

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

Valparaíso – Chile



“Determinación del potencial de la Dendroquímica como
herramienta analítica para la evaluación de la contaminación en
Santiago”

Alonso Andrés Sapunar Muñoz

Memoria de Titulación para optar al Título de:

Ingeniero Civil Ambiental

Profesores Guía: Dr. Henrik Hansen

Dr. Ariel Muñoz

Noviembre 2017

Agradecimientos

A mi madre Ana María, a mis abuelos Vinka y Manuel, y a mi tío Jorge por colaborar con mi educación, por su amor y apoyo incondicional.

A mi padrino José Manuel, a su esposa Mónica y a mi tía María Purísima y su familia por permitirme alojar en sus hogares y hacerme sentir en casa.

A mis compañeros de carrera, mis compañeros de capoeira y todos quienes me acompañaron en esta etapa universitaria y me brindaron su amistad.

A mis profesores guías Henrik Hansen y Ariel Muñoz por la paciencia y disposición a ayudar, además del conocimiento transmitido.

A Isabella Aguilera, Isadora Toledo, Gino Figueroa, Víctor Humanes y Fernando Duarte por recibirme en el laboratorio y colaborar conmigo para poder sacar adelante esta investigación.

A Pamela Verdugo por enseñarme sobre metodología de la investigación y ayudarme a estructurar el trabajo escrito en función de ello.

Al proyecto FONDECYT 1151427, al Laboratorio de Dendrocronología y Estudios Ambientales del Instituto de Geografía de la PUCV, al Arizona Laboratory for Emerging Contaminants (ALEC) de la Universidad de Arizona y al profesor Francisco Barraza.

Resumen Ejecutivo

Las características geográficas y meteorológicas de Santiago, sumado al hecho de que concentra a más de un tercio de la población total de Chile y aproximadamente el 70% de las industrias, inciden en los altos niveles de contaminación atmosférica de la ciudad, que provocan la muerte de más 1600 personas al año.

Para determinar la responsabilidad de las fuentes de emisión en la calidad del aire y así evaluar la efectividad de las medidas adoptadas por las autoridades en materia de descontaminación, se han llevado a cabo una serie de estudios tendientes a establecer la contribución relativa de cada fuente (o grupo de fuentes) a partir de la composición elemental de las partículas. No obstante, el periodo de análisis está limitado por la disponibilidad de muestras de material particulado, lo cual ha dado como resultado que no hayan estudios que abarquen más de 17 años continuos.

En este contexto, la Dendroquímica, disciplina que estudia los elementos químicos que se acumulan en los anillos de crecimiento de árboles expuestos a eventos de contaminación, surge como una alternativa de gran utilidad para abarcar periodos más largos de tiempo. Un anillo de crecimiento representa el crecimiento alcanzado por el árbol en un año calendario, por lo que medir la concentración de estos elementos en los anillos, eventualmente permite extender el periodo de análisis al equivalente de la edad de un árbol. Sin embargo, para que esto tenga validez, debe cumplirse el supuesto de que la composición química del anillo refleja al menos parcialmente la química del ambiente del año de formación.

El objetivo de esta investigación fue determinar la validez de la Dendroquímica como herramienta analítica para la evaluación de la contaminación atmosférica en Santiago, en función de la correlación entre las concentraciones de elementos traza acumulados en los anillos de crecimiento y los datos de una estación de monitoreo de referencia. Para ello se colectaron muestras de árboles de la especie *Cedrus libani* del Parque Quinta Normal, las cuales fueron datadas mediante cofechado. Las 10 muestras que mejor cofecharon fueron cortadas anillo por anillo y divididas en dos grupos. Para determinar la concentración de los elementos traza en los anillos se utilizó la técnica de ICP-MS. En total fueron 21 los elementos estudiados: Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Ba y Pb. Una vez conocida la concentración de los elementos acumulados en los anillos de crecimiento, se procedió a determinar el grado de asociación que estas presentaban con las mediciones de material particulado obtenidas de la estación de monitoreo Parque O'Higgins. Para la determinación del grado de asociación entre las variables se utilizó como criterio el coeficiente de correlación de Pearson.

Tras el análisis de los datos, se concluye que un 85,1% de las muestras de los árboles presenta buenas correlaciones con los datos de $MP_{2,5}$, un 37,8% presenta buenas correlaciones con los datos de los mismos elementos acumulados en el $MP_{2,5}$, y un 42,6% presenta buenas correlaciones con los datos de MP_{10} . Es decir, existe una relación significativa entre las variables y, por lo tanto, la Dendroquímica efectivamente es una herramienta analítica válida para evaluar la contaminación de Santiago.

Pese a las buenas correlaciones, no todos los datos obtenidos por medio del análisis químico de los anillos ofrecen la oportunidad de identificar adecuadamente los eventos de contaminación. Posiblemente sean aquellos datos que correlacionaron con los elementos del $MP_{2.5}$ en torno a los meses de máxima concentración los que tengan mayor probabilidad de éxito. En este sentido, pareciera que Fe, Zn, Ni y Mo son los trazadores idóneos para extender los registros históricos de contaminación, ya que justamente cumplen con esta característica, además de que permitieron identificar eventos de contaminación relativamente recientes asociados a aumentos en la tasa de crecimiento del parque vehicular y cambios de combustible en la industria.

Por otra parte, es importante recalcar que las altas correlaciones con el material particulado no deben ser entendidas exclusivamente en función de la contribución que tienen los elementos en la concentración de éste. Los resultados sugieren que las relaciones que se establecieron entre el $MP_{2.5}$ y las concentraciones de Ca y Al acumulados en los anillos, responden a los efectos que tiene el material particulado en la acidez del suelo. Sin embargo, para poder confirmar lo anterior, se requiere realizar nuevas investigaciones orientadas al estudio del suelo y de los parámetros meteorológicos que pudieran alterar la absorción de los elementos.

Abstract

The geographical and meteorological characteristics of Santiago, combined with the fact that it concentrates more than a third of the total population of Chile and approximately 70% of the industries, impact on the high levels of air pollution in the city, which cause death of more than 1600 people per year.

In order to determine the responsibility of emission sources in air quality and assess the effectiveness of the measures taken by the authorities on decontamination, a series of studies have been carried out to establish the relative contribution of each source in function of the elemental composition of the particles. However, the period of analysis is limited by the availability of samples of particulate matter, which has resulted in no studies covering more than 17 continuous years.

In this context, Dendrochemistry, a discipline that studies the chemical elements that accumulate in the growth rings of trees exposed to pollution events, emerges as a very useful alternative to cover longer periods of time. A growth ring represents the growth reached by the tree in a calendar year, so measure the concentration of these elements in the rings eventually allows extend the period of analysis to the equivalent of the age of a tree. Nevertheless, for this to be valid, the chemical composition of the ring at least must partially reflects the chemistry of the environment of the year of formation.

The objective of this research was to determine the validity of Dendrochemistry as an analytical tool for the evaluation of atmospheric pollution in Santiago, based on the correlation between the concentrations of trace elements accumulated in the growth rings and the data from a monitoring station reference. To do this, samples of *Cedrus libani* trees from the Quinta Normal Park were collected, which were dated by the crossdating method. The 10 best samples were cut ring by ring and divided into two groups. To determine the concentration of the trace elements in the rings, the ICP-MS technique was used. In total there were 21 elements studied: Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Ba and Pb. Once the concentration of the elements accumulated in the growth rings was known, the degree of association they had with the measurements of particulate matter, obtained from the Parque O'Higgins monitoring station, was determined. To determine the degree of association between the variables, the Pearson correlation coefficient was used as a criterion.

After analyzing the data, it is concluded that 85,1% of the samples of the trees presents good correlations with the data of $PM_{2,5}$, 37,8% presents good correlations with the data of the same accumulated elements in $PM_{2,5}$, and 42.6% presented good correlations with PM_{10} data. That is, there is a significant relationship between the variables and, therefore, Dendrochemistry is effectively a valid analytical tool to evaluate Santiago's pollution.

Despite the good correlations, not all the data obtained through the chemical analysis of the rings offer the opportunity to properly identify the pollution events. It is probably that the data that correlated with the elements of $PM_{2,5}$ around the months of maximum concentration will be the data that have a greater probability of success. In this sense, it would seem that Fe, Zn, Ni and Mo are the ideal tracers to extend the historical records of pollution, since they comply with this characteristic, in addition to they were able to identify relatively recent contamination events associated with increases in the rate of vehicle park growth and fuel changes in the industry.

On the other hand, it is important to emphasize that the high correlations with the particulate material should not be understood exclusively in function of the contribution that the elements have in the concentration of the particles. The results suggest that the relationships established between $PM_{2.5}$ and the concentrations of Ca and Al accumulated in the rings respond to the effects of the particulate matter on soil acidity. However, to be able to confirm this, it is necessary to carry out new investigations oriented to the study of the soil and of the meteorological parameters that could alter the absorption of the elements.

Glosario

- [1] **Albura:** parte activa del xilema, cuenta con células vivas y material de reserva; es reconocida por ubicarse junto al cambium vascular y tener una coloración más bien clara.
- [2] **Angiospermas:** plantas espermatófitas (con semillas) provistas de tejidos y órganos perfectamente diferenciados; se caracterizan por poseer flores que producen semillas encerradas y protegidas por la pared del ovario que, posteriormente, se convierte en fruto.
- [3] **Cambium vascular:** meristema secundario, responsable del crecimiento en grosor del tallo.
- [4] **Coníferas:** representan el grupo más importante de las gimnospermas y se caracterizan por producir semillas en conos (piñas o gálbulos).
- [5] **Contaminantes primarios:** aquellos cuya procedencia está claramente determinada y se originan en el seno de la propia fuente de emisión.
- [6] **Contaminantes secundarios:** aquellos que no son emitidos directamente de una fuente de emisión, sino que son originados a partir de gases precursores (contaminantes primarios).
- [7] **Diámetro aerodinámico:** diámetro de una esfera de densidad $1[\text{g}/\text{cm}^3]$ que tiene la misma velocidad de sedimentación que una partícula.
- [8] **Duramen:** parte biológicamente inactiva del xilema, sin células vivas y cuyo material de reserva ha sido removido; se sitúa entre la médula y la albura, y se caracteriza por tener una coloración más oscura que esta última.
- [9] **Duraminización:** transformación de albura a duramen.
- [10] **Floema:** tejido conductor que transporta principalmente azúcares, producidos durante la fotosíntesis, desde las hojas (o desde algún lugar de almacenamiento) hacia el resto de la planta.
- [11] **Gimnospermas:** plantas espermatófitas, cuyas semillas están expuestas (no forman frutos).
- [12] **Inversión Térmica:** fenómeno meteorológico caracterizado por el aumento de la temperatura a mayores alturas.
- [13] **Meristema:** conjunto de células vegetales morfológicamente indiferenciadas, pero especializadas en la función de dividirse ordenadamente.
- [14] **Modelo receptor:** herramienta matemática que permite identificar y cuantificar las fuentes de emisión y sus efectos en un sitio receptor sobre la base de mediciones de concentración, sin utilizar ni datos de inventarios de emisiones ni datos meteorológicos.

- [15] **Norma primaria de calidad ambiental:** aquélla que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población.
- [16] **Savia bruta:** fluido constituido por agua y minerales disueltos absorbidos desde las raíces.
- [17] **Traqueidas:** principales elementos xilemáticos conductores de savia bruta en las Gimnospermas.
- [18] **Vasos:** principales elementos xilemáticos conductores de savia bruta en las Angiospermas.
- [19] **Xilema:** tejido conductor que transporta la savia bruta desde las raíces al resto de la planta en dirección ascendente (hacia las hojas); también es considerado el principal elemento de soporte mecánico de los árboles.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	2
Resumen Ejecutivo	3
Abstract	5
Glosario	7
1. Introducción	21
1.1. Objetivos	22
1.1.1. Objetivo general	22
1.1.2. Objetivos específicos.....	22
2. Marco Teórico	23
2.1. Contaminación Atmosférica.....	23
2.1.1. Contexto mundial	24
2.1.2. Contexto nacional	25
2.2. Características geográficas y meteorológicas de la R.M.	27
2.3. Monitoreo de la calidad del aire en la R.M.	30
2.3.1. Evolución de la red de monitoreo	30
2.3.2. Equipos de medición de MP	32
2.4. Caracterización del MP.....	36
2.4.1. Formación y distribución.....	36
2.4.2. Componentes del MP y fuentes emisoras	38
2.5. Dendroquímica.....	42
2.5.1. Análisis de los anillos de crecimiento.....	42
2.5.2. Transporte y acumulación de especies químicas en la madera.....	45
3. Método	50
3.1. Selección de la muestra	51
3.1.1. Variable independiente: Mediciones atmosféricas.....	51
3.1.2. Variable dependiente: Muestras de árboles.....	52
3.2. Diseño experimental	53
3.2.1. Recolección de la muestra	53
3.2.2. Análisis de datos.....	57
4. Resultados	60
4.1. Relación entre la concentración de MP _{2,5} en el aire y la acumulación de elementos químicos en los anillos de crecimiento	62
4.1.1. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Na en los anillos de crecimiento	62

4.1.2.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mg en los anillos de crecimiento	64
4.1.3.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Al en los anillos de crecimiento	65
4.1.4.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de K en los anillos de crecimiento	66
4.1.5.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ca en los anillos de crecimiento	68
4.1.6.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de V en los anillos de crecimiento	70
4.1.7.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Cr en los anillos de crecimiento	71
4.1.8.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mn en los anillos de crecimiento	72
4.1.9.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Fe en los anillos de crecimiento	73
4.1.10.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Co en los anillos de crecimiento	74
4.1.11.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ni en los anillos de crecimiento	75
4.1.12.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Cu en los anillos de crecimiento	76
4.1.13.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Zn en los anillos de crecimiento	77
4.1.14.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de As en los anillos de crecimiento	78
4.1.15.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Se en los anillos de crecimiento	79
4.1.16.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mo en los anillos de crecimiento	80
4.1.17.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ag en los anillos de crecimiento	80
4.1.18.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Cd en los anillos de crecimiento	81
4.1.19.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Sn en los anillos de crecimiento	82
4.1.20.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ba en los anillos de crecimiento	83
4.1.21.	Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Pb en los anillos de crecimiento	84

4.2.	Relación entre la concentración de elementos químicos en el MP _{2,5} y la acumulación de los mismos elementos en los anillos de crecimiento	85
4.2.1.	Relación entre la concentración de Mg en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	85
4.2.2.	Relación entre la concentración de K en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	86
4.2.3.	Relación entre la concentración de Ca en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	88
4.2.4.	Relación entre la concentración de Cr en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	89
4.2.5.	Relación entre la concentración de Mn en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal	90
4.2.6.	Relación entre la concentración de Fe en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	91
4.2.7.	Relación entre la concentración de Ni en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	92
4.2.8.	Relación entre la concentración de Cu en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	93
4.2.9.	Relación entre la concentración de Zn en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	95
4.2.10.	Relación entre la concentración de As en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	96
4.2.11.	Relación entre la concentración de Se en MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal.....	97
4.2.12.	Relación entre la concentración de Mo en el MP _{2,5} y en los anillos de crecimiento de <i>Cedrus libani</i> en Parque Quinta Normal	99
4.3.	Relación entre la concentración de MP ₁₀ en el aire y la acumulación de elementos químicos en los anillos de crecimiento	101
4.3.1.	Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Na en los anillos de crecimiento	101
4.3.2.	Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Mg en los anillos de crecimiento	102
4.3.3.	Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de K en los anillos de crecimiento	103
4.3.4.	Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Ca en los anillos de crecimiento	104
4.3.5.	Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Cr en los anillos de crecimiento	105
4.3.6.	Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Mn en los anillos de crecimiento	106

4.3.7.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Fe en los anillos de crecimiento	106
4.3.8.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Co en los anillos de crecimiento	107
4.3.9.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Ni en los anillos de crecimiento	108
4.3.10.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Cu en los anillos de crecimiento	108
4.3.11.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Zn en los anillos de crecimiento	109
4.3.12.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de As en los anillos de crecimiento	109
4.3.13.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Mo en los anillos de crecimiento	110
4.3.14.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Ag en los anillos de crecimiento	110
4.3.15.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Cd en los anillos de crecimiento	111
4.3.16.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Sn en los anillos de crecimiento	112
4.3.17.	Relación entre la concentración en MP ₁₀ y la acumulación de Pb en los anillos de crecimiento	113
5.	Discusión	114
5.1.	Conclusiones generales.....	114
5.2.	Deducciones derivadas de la investigación.....	116
5.2.1.	Efecto estacional en la acumulación de cationes.....	116
5.2.2.	Aplicabilidad de los resultados en la determinación de eventos de contaminación.....	117
5.2.3.	Alteración del ciclo de nutrientes producto de la deposición de material particulado en el suelo	121
5.3.	Respuesta a la pregunta de investigación.....	123
5.4.	Recomendaciones	123
	Referencias	124
	Anexos.....	130
	Anexo A: Cálculo de la concentración de MP _{2,5}	130
	Anexo B: Coordenadas árboles muestreados	130
	Anexo C: Otros resultados.....	131
	Anexo D: Crecimiento del Parque Automotriz.....	147

Índice de tablas

Tabla 1. Normas primarias de calidad del aire.....	26
Tabla 2. Niveles que determinan situaciones de emergencia ambiental	27
Tabla 3. Configuraciones meteorológicas asociadas a episodios críticos.....	30
Tabla 4. Estaciones de monitoreo de calidad del aire de la red MACAM.....	32
Tabla 5. Comparación entre partículas finas y gruesas	39
Tabla 6. Composición porcentual histórica del MP _{2,5} en la Región Metropolitana, durante época de otoño-invierno	39
Tabla 7. Valores medios de las concentraciones de elementos de MP _{2,5} y MP _{2,5-10} en Parque O'Higgins	41
Tabla 8. Solución de seis factores PMF 5.0	41
Tabla 9. Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson.....	50
Tabla 10. Solución Routine RespoAverage considerando periodos de 3 meses con un desfase de 2 años	58
Tabla 11. Periodo de análisis según disponibilidad de datos	59
Tabla 12. Correlación entre ambas series de árboles	60
Tabla 13. Resumen de resultados ordenados en base al grado de correlación	115
Tabla 14. Resumen de resultados ordenados en base a su estacionalidad.....	116
Tabla 15. Coordenadas árboles muestreados	130

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación del material particulado	23
Figura 2. Efectos del MP en las vías respiratorias según diámetro de partícula	24
Figura 3. Mapa de exposición media anual al MP _{2,5}	25
Figura 4. Tercera Encuesta Nacional de Medio Ambiente.....	26
Figura 5. Cuenca de río Maipo	28
Figura 6. Esquema del perfil vertical de temperatura típico de la zona central de Chile	29
Figura 7. Desplazamiento de contaminantes hacia el sector poniente de Santiago	29
Figura 8. Configuración red MACAM III	31
Figura 9. Esquema estación de monitoreo	33
Figura 10. Equipo TEOM 1400ab.....	34
Figura 11. Equipo BAM-1020	35
Figura 12. Equipo Sierra-Andersen 241	35
Figura 13. Equipo Partisol 2025	36
Figura 14. Distribución teórica del material particulado según número y volumen	37
Figura 15. Distribución teórica del material particulado según área superficial	38
Figura 16. Contribución relativa por grupo de fuentes	42
Figura 17. Crecimiento secundario	42
Figura 18. Sector de transcorte de tallo secundario de conífera.....	43
Figura 19. Identificación de anillos falsos	43
Figura 20. Rutas de ingreso de elementos químicos en el xilema de los árboles.....	45
Figura 21. Recorrido de especies químicas hacia el xilema	46

Figura 22. Macroestructura de la madera	48
Figura 23. Ubicación Estación Parque O'Higgins.....	51
Figura 24. Ubicación Parque Quinta Normal	52
Figura 25. Cedro del Líbano	53
Figura 26. Extracción de tarugo con taladro de incremento	54
Figura 27. Mapa del muestreo de Cedros del Líbano	55
Figura 28. Tarugos escaneados.....	55
Figura 29. Medición y fechado de las muestras de Cedrus libani de Quinta Normal con el programa WinDENDRO™	56
Figura 30. Relación en la concentración de Ni entre ambas series de árboles	61
Figura 31. Relación en la concentración de Cu entre ambas series de árboles.....	61
Figura 32. Variación estacional de la concentración de MP _{2,5} en el periodo 1998-2012	62
Figura 33. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Na en los anillos de la Serie A	63
Figura 34. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Na en los anillos de la Serie A (Corrección).....	63
Figura 35. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Na en los anillos de la Serie B.....	64
Figura 36. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Mg en los anillos de la Serie A	64
Figura 37. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Mg en los anillos de la Serie B.....	65
Figura 38. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Al en los anillos de la Serie A	65
Figura 39. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Al en los anillos de la Serie B.....	66
Figura 40. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de K en los anillos de la Serie A	66
Figura 41. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de K en los anillos de la Serie A (Corrección).....	67
Figura 42. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de K en los anillos de la Serie B.....	67
Figura 43. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de K en los anillos de la Serie B (Corrección).....	68
Figura 44. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie A	68
Figura 45. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie A (Corrección).....	69
Figura 46. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie B.....	69
Figura 47. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie B (Corrección).....	70
Figura 48. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de V en los anillos de la Serie A	70
Figura 49. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de V en los anillos de la Serie B.....	71
Figura 50. Relación entre la concentración de MP _{2,5} y la acumulación de Cr en los anillos de la Serie A	71

Figura 51. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Cr en los anillos de la Serie B.....	72
Figura 52. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mn en los anillos de la Serie A	72
Figura 53. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mn en los anillos de la Serie B.....	73
Figura 54. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Fe en los anillos de la Serie A	73
Figura 55. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Fe en los anillos de la Serie B.....	74
Figura 56. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Co en los anillos de la Serie A	74
Figura 57. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Co en los anillos de la Serie B.....	75
Figura 58. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ni en los anillos de la Serie A	75
Figura 59. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ni en los anillos de la Serie B.....	76
Figura 60. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Cu en los anillos de la Serie A	76
Figura 61. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Cu en los anillos de la Serie B.....	77
Figura 62. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Zn en los anillos de la Serie A	77
Figura 63. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Zn en los anillos de la Serie B.....	78
Figura 64. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de As en los anillos de la Serie A	78
Figura 65. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de As en los anillos de la Serie B.....	79
Figura 66. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Se en los anillos de la Serie B.....	79
Figura 67. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mo en los anillos de la Serie B.....	80
Figura 68. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ag en los anillos de la Serie A	81
Figura 69. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ag en los anillos de la Serie B.....	81
Figura 70. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Cd en los anillos de la Serie A	82
Figura 71. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Cd en los anillos de la Serie B.....	82
Figura 72. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Sn en los anillos de la Serie B.....	83
Figura 73. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ba en los anillos de la Serie A	83
Figura 74. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ba en los anillos de la Serie B.....	84

Figura 75. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Pb en los anillos de la Serie B.....	84
Figura 76. Variación estacional de la concentración de Mg (Filtro) en el periodo 1998-2012...	85
Figura 77. Relación entre la concentración de Mg en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	86
Figura 78. Variación estacional de la concentración de K (Filtro) en el periodo 1998-2012	86
Figura 79. Relación entre la concentración de K en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A (Corrección).....	87
Figura 80. Relación entre la concentración de K en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	87
Figura 81. Relación entre la concentración de K en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B (Corrección).....	88
Figura 82. Variación estacional de la concentración de Ca (Filtro) en el periodo 1998-2012	88
Figura 83. Relación entre la concentración de Ca en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	89
Figura 84. Relación entre la concentración de Ca en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B (Corrección)	89
Figura 85. Variación estacional de la concentración de Cr (Filtro) en el periodo 1998-2012	90
Figura 86. Relación entre la concentración de Cr en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	90
Figura 87. Variación estacional de la concentración de Mn (Filtro) en el periodo 1998-2012...	91
Figura 88. Relación entre la concentración de Mn en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	91
Figura 89. Variación estacional de la concentración de Fe (Filtro) en el periodo 1998-2012	92
Figura 90. Relación entre la concentración de Fe en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	92
Figura 91. Variación estacional de la concentración de Ni (Filtro) en el periodo 1998-2012	93
Figura 92. Relación entre la concentración de Ni en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	93
Figura 93. Variación estacional de la concentración de Cu (Filtro) en el periodo 1998-2012....	94
Figura 94. Relación entre la concentración de Cu en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	94
Figura 95. Relación entre la concentración de Cu en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	95
Figura 96. Variación estacional de la concentración de Zn (Filtro) en el periodo 1998-2012	95
Figura 97. Relación entre la concentración de Zn en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	96
Figura 98. Relación entre la concentración de Zn en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	96
Figura 99. Variación estacional de la concentración de As (Filtro) en el periodo 1998-2012	97
Figura 100. Relación entre la concentración de As en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	97
Figura 101. Variación estacional de la concentración de Se (Filtro) en el periodo 1998-2012 ..	98
Figura 102. Relación entre la concentración de Se en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	98
Figura 103. Relación entre la concentración de Se en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	99
Figura 104. Variación estacional de la concentración de Mo (Filtro) en el periodo 1998-2012.	99

Figura 105. Relación entre la concentración de Mo en el MP _{2,5} y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	100
Figura 106. Relación entre la concentración de Mo en el MP _{2,5} y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	100
Figura 107. Variación estacional de la concentración de MP ₁₀ en el periodo 1998-2014	101
Figura 108. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Na en los anillos de la Serie A	101
Figura 109. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Na en los anillos de la Serie A (Corrección).....	102
Figura 110. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Na en los anillos de la Serie B.....	102
Figura 111. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Mg en los anillos de la Serie A	103
Figura 112. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de K en los anillos de la Serie B (Corrección).....	103
Figura 113. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie A	104
Figura 114. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie A (Corrección).....	104
Figura 115. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie B (Corrección).....	105
Figura 116. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Cr en los anillos de la Serie A	105
Figura 117. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Mn en los anillos de la Serie A	106
Figura 118. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Fe en los anillos de la Serie A	106
Figura 119. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Fe en los anillos de la Serie B.....	107
Figura 120. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Co en los anillos de la Serie A	107
Figura 121. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Ni en los anillos de la Serie A	108
Figura 122. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Cu en los anillos de la Serie A	108
Figura 123. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Zn en los anillos de la Serie A	109
Figura 124. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de As en los anillos de la Serie B.....	109
Figura 125. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Mo en los anillos de la Serie A	110
Figura 126. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Ag en los anillos de la Serie A	111
Figura 127. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Ag en los anillos de la Serie B.....	111
Figura 128. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Cd en los anillos de la Serie A	112

Figura 129. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Sn en los anillos de la Serie A	112
Figura 130. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Pb en los anillos de la Serie A	113
Figura 131. Variación de Fe periodo 1983-2012.....	118
Figura 132. Variación de Zn periodo 1983-2012.....	119
Figura 133. Variación de Cr periodo 1983-2006	119
Figura 134. Evolución del material particulado respirable	120
Figura 135. Variación de Ni periodo 1983-2012	120
Figura 136. Variación de Mo periodo 1983-2012	121
Figura 137. Relación entre la acidez del suelo y la concentración de $MP_{2,5}$	122
Figura 138. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Se en los anillos de la Serie A	131
Figura 139. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mo en los anillos de la Serie A.....	131
Figura 140. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Sn en los anillos de la Serie A	132
Figura 141. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Pb en los anillos de la Serie A	132
Figura 142. Relación entre la concentración de Na en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	132
Figura 143. Relación entre la concentración de Na en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	133
Figura 144. Relación entre la concentración de Mg en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	133
Figura 145. Relación entre la concentración de Al en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	133
Figura 146. Relación entre la concentración de Al en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	134
Figura 147. Relación entre la concentración de K en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	134
Figura 148. Relación entre la concentración de Ca en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	134
Figura 149. Relación entre la concentración de Ca en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A (Corrección).....	135
Figura 150. Relación entre la concentración de V en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	135
Figura 151. Relación entre la concentración de V en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	135
Figura 152. Relación entre la concentración de Cr en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	136
Figura 153. Relación entre la concentración de Mn en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	136
Figura 154. Relación entre la concentración de Fe en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	136
Figura 155. Relación entre la concentración de Ni en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	137

Figura 156. Relación entre la concentración de As en el MP _{2,5} y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	137
Figura 157. Relación entre la concentración de Sn en el MP _{2,5} y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	137
Figura 158. Relación entre la concentración de Pb en el MP _{2,5} y su acumulación en los anillos de la Serie A.....	138
Figura 159. Relación entre la concentración de Pb en el MP _{2,5} y su acumulación en los anillos de la Serie B.....	138
Figura 160. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Mg en los anillos de la Serie B.....	138
Figura 161. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Al en los anillos de la Serie A	139
Figura 162. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Al en los anillos de la Serie B.....	139
Figura 163. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de K en los anillos de la Serie A	139
Figura 164. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de K en los anillos de la Serie A (Corrección).....	140
Figura 165. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de K en los anillos de la Serie B.....	140
Figura 166. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie B.....	140
Figura 167. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de V en los anillos de la Serie A	141
Figura 168. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de V en los anillos de la Serie B.....	141
Figura 169. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Cr en los anillos de la Serie B.....	141
Figura 170. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Mn en los anillos de la Serie B.....	142
Figura 171. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Co en los anillos de la Serie B.....	142
Figura 172. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Ni en los anillos de la Serie B.....	142
Figura 173. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Cu en los anillos de la Serie B.....	143
Figura 174. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Zn en los anillos de la Serie B.....	143
Figura 175. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de As en los anillos de la Serie A	143
Figura 176. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Se en los anillos de la Serie A	144
Figura 177. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Se en los anillos de la Serie B.....	144
Figura 178. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Mo en los anillos de la Serie B.....	144
Figura 179. Relación entre la concentración de MP ₁₀ y la acumulación de Cd en los anillos de la Serie B.....	145

Figura 180. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Sn en los anillos de la Serie B.....	145
Figura 181. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Ba en los anillos de la Serie A	145
Figura 182. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Ba en los anillos de la Serie B.....	146
Figura 183. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Pb en los anillos de la Serie B.....	146
Figura 184. Crecimiento del Parque Automotriz	147

1. Introducción

Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), más del 90% de la población mundial vive en lugares donde los niveles de calidad del aire exceden los límites de $MP_{2,5}$ considerados permisibles por el organismo. En Chile, la Región Metropolitana es la región con mayor exposición media anual a este contaminante, lo que incide en que cada año, en Santiago, mueran más de 1600 personas a causa de la contaminación atmosférica (CEPAL/OCDE, 2016).

Santiago está emplazado en la cuenca del río Maipo, encerrado por cordones montañosos de gran altura que impiden que los contaminantes puedan ser removidos fácilmente. Lo anterior sumado al fenómeno de inversión térmica que persiste gran parte del año, aumenta las probabilidades de que ocurran situaciones de emergencia ambiental.

Las primeras mediciones de material particulado respirable, en la Región Metropolitana, datan de 1988, cuando se implementó la red de Monitoreo Automático de Contaminantes Atmosféricos y Meteorología (MACAM). Actualmente esta red está integrada por 11 estaciones de monitoreo, las cuales cuentan tanto con equipos de monitoreo continuo, como discreto.

Es sabido que ciertos elementos químicos dentro de las partículas pueden ser atribuidos a un grupo de fuentes emisoras en particular, por lo que estudiar la composición elemental del material particulado permite conocer la contribución relativa de cada fuente. Esta información es de gran utilidad al momento de evaluar la efectividad de las medidas adoptadas por las autoridades en materia de descontaminación. No obstante, el periodo de análisis está limitado por la disponibilidad de muestras y el costo económico de dicho análisis. De momento no hay estudios que abarquen más de 17 años continuos.

En este contexto, la Dendroquímica, disciplina que estudia los elementos químicos que se acumulan en los anillos de crecimiento de árboles expuestos a eventos de contaminación, podría ser de gran utilidad para abarcar periodos más largos de tiempo. Un anillo de crecimiento representa el crecimiento alcanzado por el árbol en un año calendario, por lo que medir la concentración de estos elementos en los anillos permitiría extender el periodo de análisis al equivalente de la edad de un árbol. Considerando la edad de los árboles de varios parques y otras áreas verdes de Santiago, se podrían cubrir en promedio más de 50 años.

Sin embargo, para que esto tenga validez, debe cumplirse el supuesto de que la composición química del anillo refleja al menos parcialmente la química del ambiente del año de formación, lo cual dependerá del caso de estudio. La absorción e inmovilización es única para cada árbol y está influenciada tanto por factores bióticos como abióticos, lo que significa que las concentraciones de contaminantes en los anillos de crecimiento pueden variar según la edad y la especie del árbol, así como de su hábitat.

A partir de lo anterior surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Existe relación entre los datos de material particulado de Santiago y los elementos traza acumulados en los anillos de crecimiento de árboles en la ciudad?

Para dar respuesta a esta pregunta, se seleccionaron registros de calidad del aire de la estación de monitoreo Parque O'Higgins, y se colectaron muestras dendrocronológicas de árboles ubicados en el Parque Quinta Normal, emplazado a tan sólo 5 km de dicha estación.

En este sentido, la hipótesis que se quiere corroborar es que existe una correlación significativa entre las mediciones atmosféricas obtenidas de la estación Parque O'Higgins y las mediciones de elementos traza acumulados en los anillos de crecimiento de árboles del Parque Quinta Normal, pues los árboles incorporarían los elementos contenidos en el material particulado depositado cada año.

El presente estudio corresponde a una investigación cuantitativa del tipo correlacional, que tiene la finalidad de determinar si la Dendroquímica permite generar inferencias válidas para evaluar la contaminación atmosférica en Santiago, sobre la base del cumplimiento o no de la hipótesis recién planteada. Para ello se diseñó un método de comparación correlacional de la composición química de los anillos de crecimiento de árboles de la especie Cedro del Líbano (*Cedrus libani*), pertenecientes al Parque Quinta Normal, con los datos de material particulado de la estación de monitoreo Parque O'Higgins, dentro de un período de 15 años en promedio, limitado por la extensión de los registros de material particulado de esta estación.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Determinar la correlación entre las mediciones atmosféricas de material particulado obtenidas en la estación Parque O'Higgins (Santiago de Chile), durante un periodo de 15 años promedio, y las mediciones de elementos químicos acumulados en los anillos de crecimiento de árboles de la especie *Cedrus libani*, pertenecientes al Parque Quinta Normal (a 5 km de distancia), que representan el mismo periodo.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar la correlación entre la medición de $MP_{2,5}$ acumulado en los filtros de $MP_{2,5}$ de la estación Parque O'Higgins, correspondientes al periodo entre 1998 y 2012, y la medición de elementos químicos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles del Parque Quinta Normal en dicho periodo.
- Determinar la correlación entre los elementos químicos analizados en los filtros de $MP_{2,5}$ de la estación Parque O'Higgins, correspondientes al periodo entre 1998 y 2012, y la medición de los mismo elementos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles del Parque Quinta Normal en dicho periodo.
- Determinar la correlación entre los datos de MP_{10} de la estación Parque O'Higgins almacenados en la base de datos del SINCA, correspondientes al periodo entre 1998 y 2014, y la medición de elementos químicos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles del Parque Quinta Normal en dicho periodo.

2. Marco Teórico

2.1. Contaminación Atmosférica

La Ley chilena sobre las Bases Generales del Medio Ambiente define como contaminante a “*todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o periodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental*”. En materia de contaminación atmosférica, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) reconoce a seis contaminantes como los más comunes (contaminantes criterio):

- Material particulado (MP)
- Ozono (O_3)
- Dióxido de nitrógeno (NO_2)
- Dióxido de azufre (SO_2)
- Monóxido de carbono (CO)
- Plomo (Pb)

Del listado anterior, el material particulado es el utilizado con mayor frecuencia como indicador del estado de la calidad del aire. Este comprende toda partícula sólida o líquida en suspensión en un gas, y es clasificado según su diámetro aerodinámico^[7] como se ve en la Figura 1.

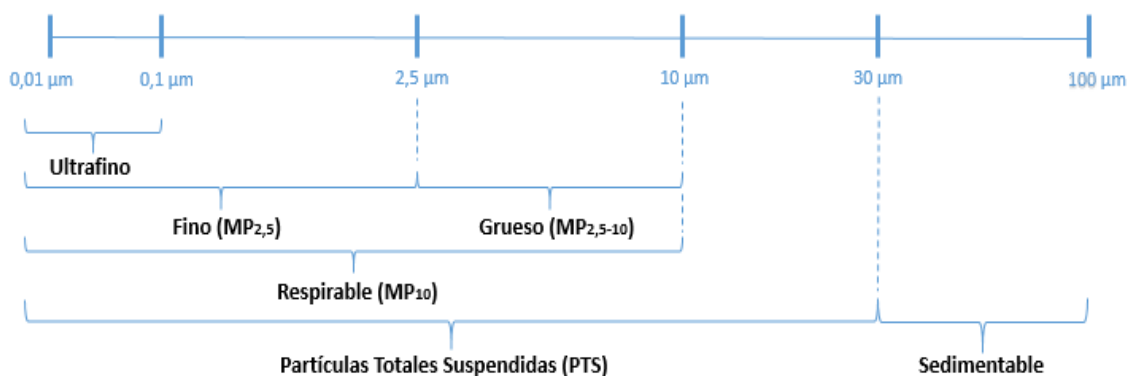


Figura 1. Clasificación del material particulado

Fuente: Elaborado por el autor a partir de Cereceda (2015)

Desde el punto de vista de la salud, toda partícula cuyo diámetro es menor a 10 micrones es capaz de ingresar al sistema respiratorio y, por lo tanto, representa algún grado de peligrosidad. Mientras más pequeñas son las partículas, mayor es su penetrabilidad y, consecuentemente, mayor es el daño que causan (ver Figura 2). Las partículas menores a un micrón, por ejemplo, alcanzan fácilmente los alveolos pulmonares, desde donde pueden ser transportadas hacia otros órganos por el torrente sanguíneo. De esta manera, si bien tanto el material particulado fino como el grueso están asociados a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, el $MP_{2,5}$ tiene mayor influencia sobre estas últimas. A nivel epidemiológico, la morbilidad y la mortalidad aumentan como consecuencia del aumento en las concentraciones de $MP_{2,5}$ (CMMCh, 2015).

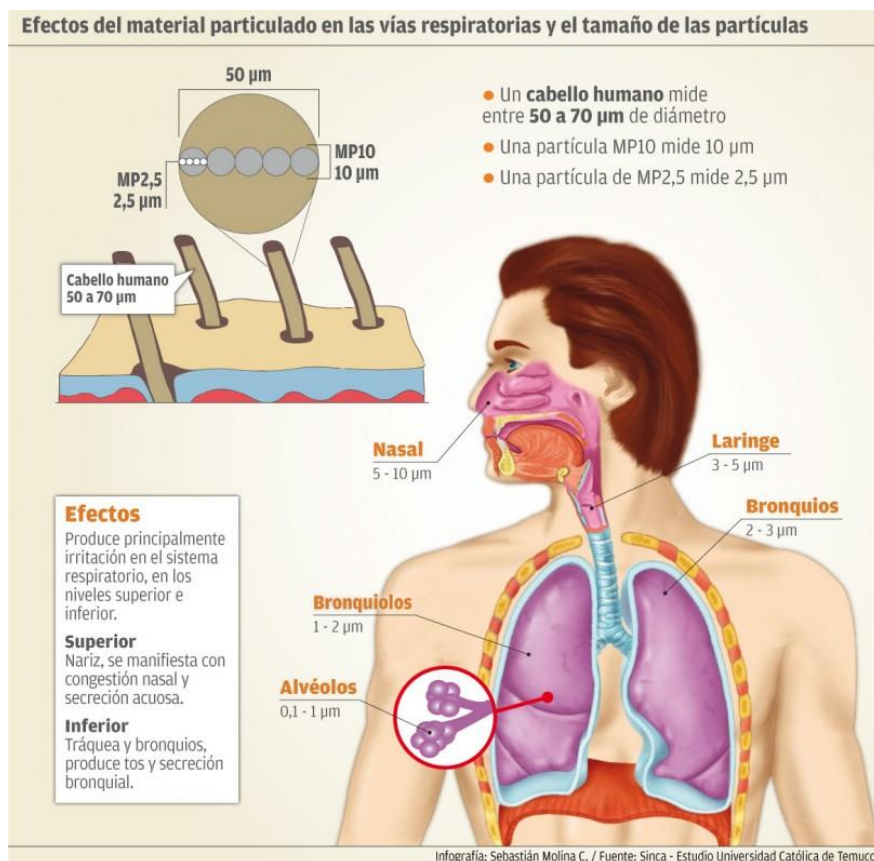


Figura 2. Efectos del MP en las vías respiratorias según diámetro de partícula

Fuente: Mogollon (2016)

2.1.1. Contexto mundial

El nuevo modelo de calidad del aire elaborado por la OMS ha confirmado que el 92% de la población está expuesta a concentraciones medias anuales de $MP_{2,5}$ superiores a los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sugeridos en las guías de calidad del aire de la OMS (ver Figura 3). A excepción de la región de las Américas, todas las regiones¹, independiente de su nivel de ingresos, tienen a menos del 20% de la población viviendo en lugares que cumplen con los estándares de dicho organismo. La exposición es particularmente alta en las regiones del Mediterráneo Oriental, Asia Sudoriental y el Pacífico Occidental. No obstante, es necesario aclarar que la contaminación atmosférica no tiene su origen exclusivamente en la actividad humana, también puede ser influenciada por tormentas de polvo como las que se producen en zonas cercanas a desiertos (WHO, 2016).

¹ Los Estados miembros de la OMS están agrupados en 6 regiones: África, las Américas, Asia Sudoriental, Europa, el Mediterráneo Oriental y el Pacífico Occidental. Para mayor información visitar <http://www.who.int/about/regions/es/>.

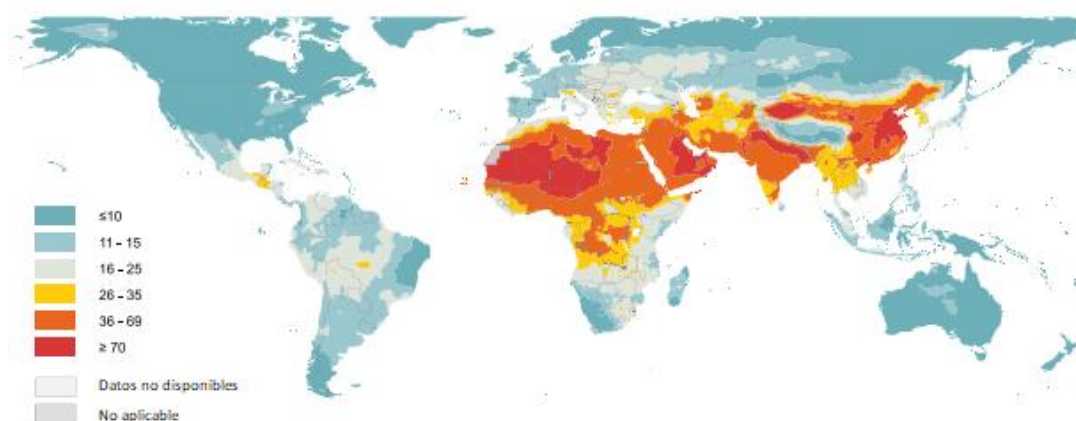


Figura 3. Mapa de exposición media anual al $MP_{2,5}$ (en $\mu g/m^3$)

Fuente: WHO (2016)

Tras la recopilación de los datos registrados por las estaciones de monitoreo en el periodo 2013-2014, se concluyó que Coyhaique (Chile) es la ciudad más contaminada de América Latina, con una concentración media anual de $64 \mu g/m^3$ de $MP_{2,5}$ el 2014, seguida por Lima (Perú), con $48 \mu g/m^3$ y La Paz (Bolivia), con $44 \mu g/m^3$ (WHO, 2016).

2.1.2. Contexto nacional

Aun cuando Coyhaique es considerada la ciudad más contaminada por $MP_{2,5}$, la XI región no es la región que presenta los niveles más altos de exposición a este contaminante en Chile. La estimación de la exposición al $MP_{2,5}$, además de los registros de estaciones de monitoreo, toma en cuenta datos demográficos como la densidad poblacional. De esta manera, la Región Metropolitana, que concentra a más de un tercio de la población total de Chile y aproximadamente el 70% de las industrias, resulta ser la región con mayor exposición al $MP_{2,5}$ de todo el país, alcanzando los $31 \mu g/m^3$ como media anual en 2013 (CEPAL/OCDE, 2016).

El Ministerio del Medio Ambiente sostiene que en 2015 hubo un total de 3723 muertes relacionadas con la contaminación atmosférica en el país (Miranda, 2017). Particularmente en Santiago se estima que alrededor de 27000 personas padecen todos los años problemas producto del smog, causando más de 1600 muertes anuales (CEPAL/OCDE, 2016).

En este contexto, según la Tercera Encuesta Nacional de Medio Ambiente, de una muestra de 2170 personas de diferentes regiones del país, el 38,3% afirma que la contaminación del aire es su mayor preocupación en materia medio ambiental (ver Figura 4).

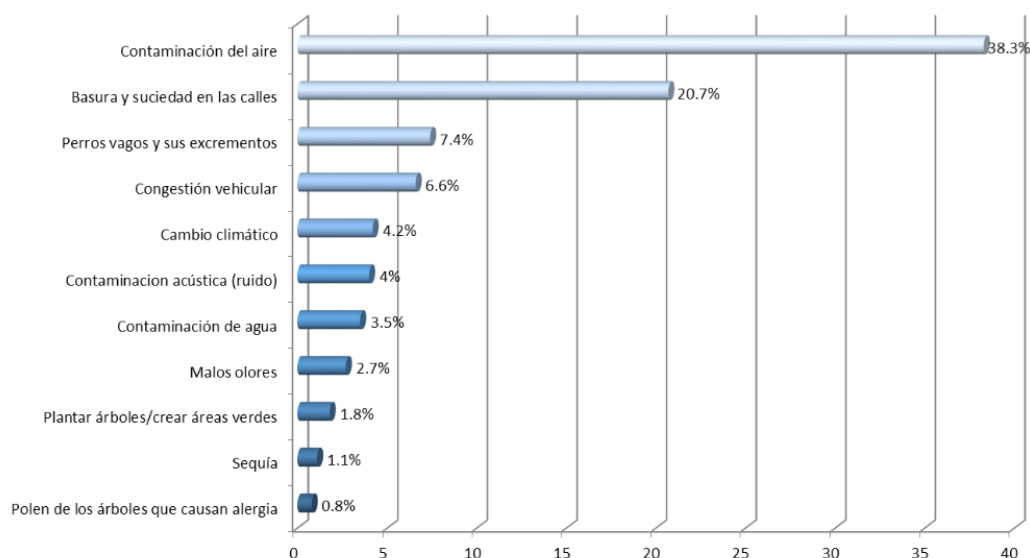


Figura 4. Tercera Encuesta Nacional de Medio Ambiente

Fuente: MMA (2017)

2.1.2.1. Estándares nacionales de calidad del aire

En la Tabla 1 se indican los límites establecidos en las normas primarias de calidad^[15] del aire para los diferentes contaminantes criterio, según el tiempo de exposición.

Tabla 1. Normas primarias de calidad del aire

Contaminante	Periodo de evaluación	Valor límite	Norma
MP _{2,5}	24 hrs	50 [µg/m ³]	D.S. N° 12/2011
	Anual	20 [µg/m ³]	
MP ₁₀	24 hrs	150 [µg/m ³ N]	D.S. N° 59/1998, modificado por D.S. N° 45/2001
	Anual	50 [µg/m ³ N]	
O ₃	8 hrs	61 [ppbv]	D.S. N° 112/2002
SO ₂	24 hrs	96 [ppbv]	D.S. N° 113/2002
	Anual	31 [ppbv]	
NO ₂	1 hr	213 [ppbv]	D.S. N° 114/2002
	Anual	53 [ppbv]	
CO	1 hr	26 [ppmv]	D.S. N° 115/2002
	8hr	9 [ppmv]	
Pb	Anual	0,5[µg/m ³ N]	D.S. N° 136/2000

Fuente: Elaborado por el autor a partir de Muñoz V. (2017)

Cuando la medición de algunos de los contaminantes da cuenta de concentraciones que se sitúan entre el 80 y el 100% del valor límite, la zona afectada es declarada como Zona Latente por ese contaminante, lo que implica que se tiene que formular un Plan de Prevención que evite que se supere tal límite. Por su parte, si la concentración es superior al valor límite, la zona afectada es declarada Zona Saturada, en cuyo caso se tiene que elaborar un Plan de Descontaminación que permita reducir la concentración por debajo de dicho valor.

En 1996 la Región Metropolitana fue declarada como Zona Saturada por MP_{10} , O_3 y CO , y Zona Latente por NO_2 . Por consiguiente, en 1998 se comenzó a ejecutar el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA), el cual ha sido actualizado en dos oportunidades, primero en 2003 y luego en 2009, y está próximo a actualizarse por tercera vez, debido a que en 2014 la región fue declarada Zona Saturada por $MP_{2,5}$.

Dentro de las estrategias de control que contempla el PPDA vigente (D.S. N°66/2009) se encuentra “El Plan Operacional para enfrentar Episodios Críticos de Contaminación”. Este plan opera desde el 1 de abril al 31 de agosto de cada año, y tiene como objetivo gestionar los episodios críticos de contaminación por MP_{10} a través de medidas preventivas como la restricción vehicular y la prohibición del uso de leña.

El año 2015 el Ministerio de Salud decretó Alerta Sanitaria por $MP_{2,5}$, permitiendo gestionar episodios críticos para $MP_{2,5}$ con medidas complementarias a las establecidas para MP_{10} , aun cuando el PPDA no ha sido actualizado para este contaminante (SEREMI del Medio Ambiente R.M., 2017).

Los niveles de contaminación que determinan episodios críticos para MP_{10} y $MP_{2,5}$ son los siguientes:

Tabla 2. Niveles que determinan situaciones de emergencia ambiental

Niveles	MP_{10} [$\mu g/m^3$] en 24hrs	$MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$] en 24hrs
Alerta	195-239	80-109
Preemergencia	240-329	110-169
Emergencia	330 o superior	170 o superior

Fuente: Elaborado por el autor a partir del D.S. N° 59/1998 y del D.S. N° 12/2011

2.2. Características geográficas y meteorológicas de la R.M.

La Región Metropolitana se ubica en el valle interior de la Zona Central de Chile ($33,5^\circ S$, $70,7^\circ O$) y comprende una superficie de $15554,5 \text{ km}^2$, donde el 85,7% corresponde a terrenos montañosos, 11% a superficie destinada a la agricultura y 3,3% a espacios urbanizados (MMA, 2014). Sus límites son prácticamente coincidentes con la cuenca del río Maipo², dentro de la cual se emplaza Santiago, la capital regional, con elevaciones crecientes en el eje oeste-este de 460 a 700 m.s.n.m. aproximadamente.

La cuenca del río Maipo está limitada al este por los faldeos de la Cordillera de los Andes, con cerros que superan los 3200 m.s.n.m. (Cerro de Ramón), y al oeste por la Cordillera de la Costa, la cual alcanza alturas sobre los 2000 m.s.n.m. (Cerro Roble Alto), siendo interrumpida en unos 50 km por el Valle del Maipo, en donde drena el río. Hacia el norte, el cordón montañoso de Chacabuco separa la cuenca de la V Región, y por el sur, los cerros de Angostura y Chada (en Paine) constituyen el límite con la VI Región. Dado este escenario, el cual se ilustra en la Figura 5, existen fuertes restricciones a la circulación de vientos y, por ende, a la renovación del aire al interior de la cuenca (Badenier, 2004).

² También denominada cuenca de Santiago.

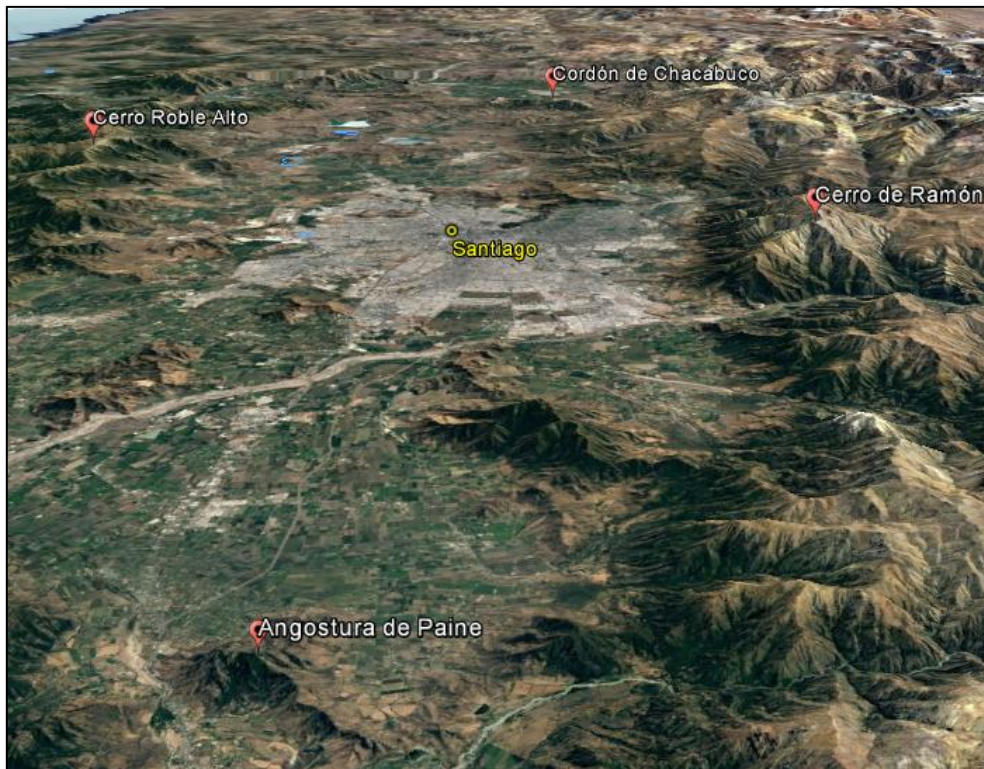


Figura 5. Cuenca de río Maipo

Por otra parte, desde el punto de vista meteorológico, la región se caracteriza por estar localizada en un sector de transición geográfica de dos regímenes de circulación atmosférica. Al norte se encuentra con la zona de influencia del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental, y al sur con el área dominada por el cinturón de los vientos del oeste, donde se alternan sistemas de altas y bajas presiones migratorias asociadas a perturbaciones frontales. Lo anterior, en conjunto con la variación latitudinal de la radiación solar durante el año, explica la marcada estacionalidad climática de la región. La influencia de las altas presiones durante el periodo estival genera veranos cálidos y secos, mientras que en el periodo invernal el desplazamiento hacia el Ecuador del anticiclón subtropical y del cinturón de los Oestes, posibilita el ingreso de perturbaciones frontales, lo que se traduce en precipitaciones (MMA, 2014).

El calentamiento por compresión que sufre la masa de aire subsidente³, asociado al anticiclón subtropical, y el afloramiento de aguas superficiales frías, producto de la predominancia de los vientos del oeste en las costas del norte y centro del país, generan lo que se conoce como inversión térmica^[12] de subsidencia. Este fenómeno conlleva a condiciones atmosféricas particularmente estables, actuando como una capa que limita la mezcla vertical en la cuenca. La altitud del tope de dicha capa de inversión térmica promedia los 1200 m.s.n.m., sin embargo, la altitud de la base varía en función del ciclo diario de calentamiento-enfriamiento de la superficie terrestre (Garreaud & Rutllant, 2006). La altura de mezcla dependerá, por lo tanto, de la posición que tome la base de la capa de inversión térmica durante el día (ver Figura 6).

³ Masa de aire transportado desde la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia los polos, que producto de la disminución de la temperatura se vuelve más densa y termina descendiendo por gravedad en torno a los 30° de latitud en ambos hemisferios (Nilo, 2012).

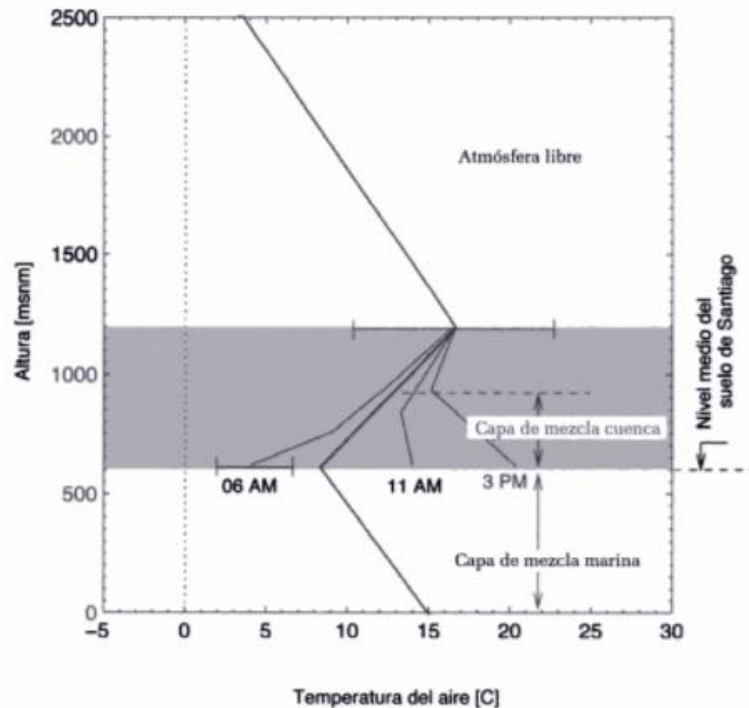


Figura 6. Esquema del perfil vertical de temperatura típico de la zona central de Chile

Fuente: Garreaud & Rutllant (2006)

En la noche la inversión térmica de subsidencia se ve potenciada por la inversión térmica radiativa, ocasionada por el enfriamiento de la superficie. En consecuencia, la dispersión vertical de contaminantes durante la noche y la madrugada es mínima, quedando concentrados cerca del nivel de emisión (Garreaud & Rutllant, 2006). Situación que representa una especial preocupación para el sector poniente de Santiago que, producto de la brisa originada por el enfriamiento de las laderas cordilleranas, recibe la contaminación del sector oriente (ver Figura 7).



Figura 7. Desplazamiento de contaminantes hacia el sector poniente de Santiago

Fuente: Adaptado de Morales (2015)

En cuanto sale el sol, la radiación solar comienza a calentar la superficie y ésta a la masa de aire inmediatamente por encima. La turbulencia térmica que resulta del calentamiento superficial permite que la altura de mezcla aumente. La tasa de crecimiento de la altura de mezcla depende de la insolación recibida en superficie y de la estabilidad de la capa de inversión que la limita (Garreaud & Rutllant, 2006). Justamente, dado la menor radiación solar que recibe la superficie en los meses de otoño-invierno, es en esta época donde se concentran los episodios críticos de contaminación. Cuando la altura de mezcla supera los 600 m y los vientos superan los 20 kilómetros por hora, se dice que el nivel de ventilación es de regular a bueno (Morales, 2015).

Rutllant (1994) ha determinado dos configuraciones meteorológicas típicas que desencadenan episodios críticos por material particulado en los meses de otoño-invierno:

Tabla 3. Configuraciones meteorológicas asociadas a episodios críticos

Configuración Tipo A	Configuración Tipo BPF
El paso simultáneo de un flujo de aire descendente (dorsal) en altura sobre la zona central, un sistema de bajas presiones en superficie desplazándose sobre la cuenca de Santiago desde el norte y la influencia de un sistema de altas presiones frío ubicado en la zona centro norte de Argentina. Esta configuración genera mala ventilación y baja remoción de contaminantes desde la superficie.	La estabilidad del aire sobre la cuenca de Santiago también se observa con la aparición de flujos ascendentes (vaguada en altura) que acompañan el paso de un sistema frontal débil. Este ascenso de aire genera la formación de nubosidad sobre la ciudad antes del ingreso del sistema frontal, de ahí su nombre, Baja Pre Frontal (BPF)
Se caracteriza por una disminución de la humedad y el aumento de la temperatura, fortaleciendo el fenómeno de inversión térmica, que inhibe el movimiento de aire y por consiguiente la remoción de los contaminantes emitidos por la ciudad. Los episodios de contaminación asociados a esta configuración generan su mayor impacto en la zona Poniente, situación que se ha observado en la estación Pudahuel.	Los episodios de contaminación asociados a esta configuración meteorológica a diferencia de lo observado con la configuración tipo A, generan impacto en las estaciones ubicadas en la zona Sur y Centro de la ciudad, estaciones de Calidad del aire Parque O'Higgins, El Bosque y Cerillos.

Fuente: MMA (2014)

2.3. Monitoreo de la calidad del aire en la R.M.

2.3.1. Evolución de la red de monitoreo

La contaminación atmosférica empezó a ser estudiada en Santiago, en forma sistemática, a partir de 1964, cuando se instalaron las primeras estaciones de monitoreo de calidad del aire, con equipos manuales de bajo costo que permitían medir índice de acidez, índice de suciedad, índice de corrosión y polvo sedimentable (Alvarado, 2006). Entre 1967 y 1980 estas estaciones integraron la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire (REDPANAIRE), como parte de un programa auspiciado por la Oficina Sanitaria Panamericana (OSP) para evaluar la contaminación del aire en América Latina (CEPIS, 1982; Muñoz M. , 1992).

En 1976 se conformó la red de Vigilancia de Calidad del Aire, la cual se enmarcaba en el “Programa de Contaminación Atmosférica en la Región Metropolitana”, financiado por la Corporación de Fomento. Su objetivo era recolectar información acerca de los tipos y niveles de contaminantes atmosféricos en Santiago, así como de sus fuentes emisoras respectivas, para poder tomar medidas de control al respecto. La red estaba constituida por una estación de monitoreo continuo, localizada en el centro de la capital, y por estaciones semiautomáticas, situadas en anillos concéntricos al centro. La estación del centro midió en forma continua CO, SO₂ e Hidrocarburos Totales (HCT), mientras que las estaciones semiautomáticas realizaban mediciones discontinuas de SO₂, CO, Óxido Nítrico (NO), NO₂, Hidrocarburos (HC), O₃, PTS y polvo sedimentable (Alvarado, 2006).

En 1988 inicia sus operaciones la red MACAM, financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), desplazando a un segundo plano a la red de Vigilancia. La red MACAM estuvo compuesta, en una primera etapa (MACAM I), por 4 estaciones fijas ubicadas en el centro de Santiago: Gotuzzo, Providencia, Independencia⁴ y Parque O'Higgins⁵; y una quinta estación móvil⁶ emplazada en la comuna de Las Condes (Badenier, 2004). Recién entonces se comenzó a medir el material particulado respirable, aunque de forma discontinua, por medio de equipos dicotómicos capaces de diferenciar la fracción fina de la fracción gruesa (Alvarado, 2006).

Con el fin de recoger de mejor modo el impacto de la contaminación a nivel poblacional y tener una mejor representatividad espacial, en 1997 se prescinde de la estación Gotuzzo y se incorporan las estaciones La Florida, Pudahuel, Cerrillos y El Bosque. De esta manera, en su segunda etapa (MACAM II), financiada en un 80% por la cooperación del gobierno de Japón y un 20% por el Ministerio de Salud, la red llegó a contar con 8 estaciones. Sin embargo, luego de que en 2002 la estación Providencia dejara de operar, este número se redujo a 7 (Badenier, 2004). Todas las estaciones fueron implementadas con monitores continuos para medición de CO, SO₂, NO₂, O₃ y HCT (Alvarado, 2006). Si bien se continuaron utilizando los equipos dicotómicos de las estaciones que pertenecían a la red MACAM I, esta nueva etapa marca el inicio de la medición continua de MP₁₀ y MP_{2,5}⁷.

El año 2009, con la instalación de las estaciones Cerro Navia, Puente Alto, Talagante y Quilicura, la red entró en una tercera etapa (MACAM III), cuya configuración se mantiene hoy en día (ver Figura 8). En la Tabla 4 se resumen las diferentes estaciones que conforman, o han conformado, la red MACAM a lo largo de su historia, con sus respectivas coordenadas y mediciones con representatividad poblacional.

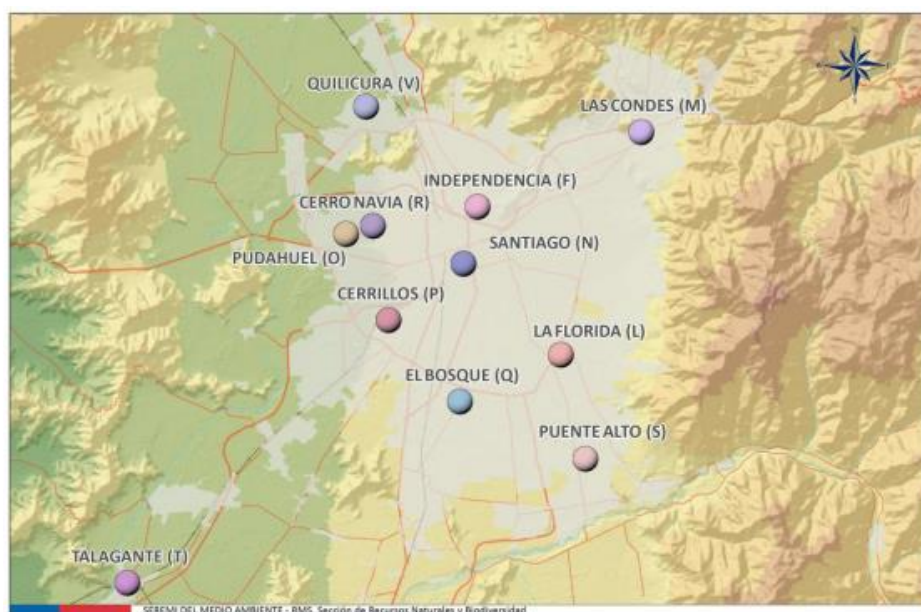


Figura 8. Configuración red MACAM III

Fuente: SEREMI del Medio Ambiente R.M. (2017)

⁴ También denominada estación La Paz.

⁵ También denominada estación Santiago.

⁶ A pesar de ser reconocida como una estación móvil, la estación Las Condes siempre ha operado fija dentro del Estadio Corfo (Katz, 2006).

⁷ El MP₁₀ se comienza a medir de forma continua a partir de 1997, mientras que el MP_{2,5} desde el 2000.

Tabla 4. Estaciones de monitoreo de calidad del aire de la red MACAM

Código	Nombre	Coordenadas UTM	Elevación [m.s.n.m.]	Representatividad	Periodo de operación
A	Gotuzzo	346113 E 6298481 N	576	-	1988-1997
B	Providencia	348363 E 6299186 N	592	-	1988-2002
F	Independencia	346488 E 6300681 N	565	MP ₁₀ , MP _{2,5} , SO ₂ , O ₃ y CO	1988-presente
L	La Florida	352504 E 6290304 N	594	MP ₁₀ , MP _{2,5} , SO ₂ , O ₃ y CO	1997-presente
M	Las Condes	358305 E 6305906 N	775	MP ₁₀ , MP _{2,5} , SO ₂ , O ₃ , CO y NO ₂	1988-presente
N	Parque O'Higgins	345673 E 6296019 N	545	MP ₁₀ , SO ₂ , O ₃ y CO	1988-presente
O	Pudahuel	337311 E 6298809 N	494	MP ₁₀ , MP _{2,5} , SO ₂ , O ₃ , CO y NO ₂	1997-presente
P	Cerrillos	341687 E 6292449 N	492 ⁸	-	1997-presente
Q	El Bosque	345313 E 6286825 N	582	MP ₁₀ , MP _{2,5} , SO ₂ , O ₃ y CO	1997-presente
R	Cerro Navia	338984 E 6299360 N	498	MP ₁₀ y MP _{2,5}	2008-presente
S	Puente Alto	352049 E 6282013 N	680	MP ₁₀ y MP _{2,5}	2009-presente
T	Talagante	318945 E 6272298 N	401	MP ₁₀	2009-presente
V	Quilicura	339594 E 6308625 N	473 ⁹	-	2009-presente

Fuente: Elaborado por el autor a partir de datos del SINCA, Osses et al. (2013) y Muñoz V. (2017)

La SEREMI de Salud de la Región Metropolitana estuvo a cargo de la red MACAM desde sus inicios hasta el 2011, cuando dicha responsabilidad fue derivada al, en ese entonces, recién constituido Ministerio del Medio Ambiente. El estado de la calidad del aire de la Región Metropolitana es actualizado periódicamente en el portal del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), donde se almacenan también los registros históricos del monitoreo continuo efectuado por la red MACAM.

2.3.2. Equipos de medición de MP

Las normas chilenas de calidad primaria, tanto para MP₁₀ como para MP_{2,5}, establecen que “se deberán emplear instrumentos de medición de concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos incluidos en la lista de Métodos Denominados de Referencia y Equivalentes publicada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), o que cuenten con certificación de alguna de las agencias de los países miembros de la Comunidad Europea, que implementan las directrices del Comité Europeo para Estandarizaciones o que cuenten con la certificación que dé cumplimiento a los estándares de calidad exigidos en el país de origen, entregada por algún ente acreditado por el gobierno de ese país”.

Actualmente el MP₁₀ es medido de forma continua a través monitores TEOM 1400ab, mientras que para medir el MP_{2,5} se utilizan monitores BAM 1020 (SINCA, s.f.). Ambos instrumentos están certificados como metodología Equivalente USEPA para cada caso (USEPA, 2017). Un esquema general de cómo opera el monitoreo continuo de material particulado se muestra en la Figura 9.

⁸ La estación Cerrillos fue reubicada en mayo de 2017, el dato de elevación fue obtenido a través de Google Earth.

⁹ La estación Quilicura fue reubicada en febrero de 2016, el dato de elevación fue obtenido a través de Google Earth.

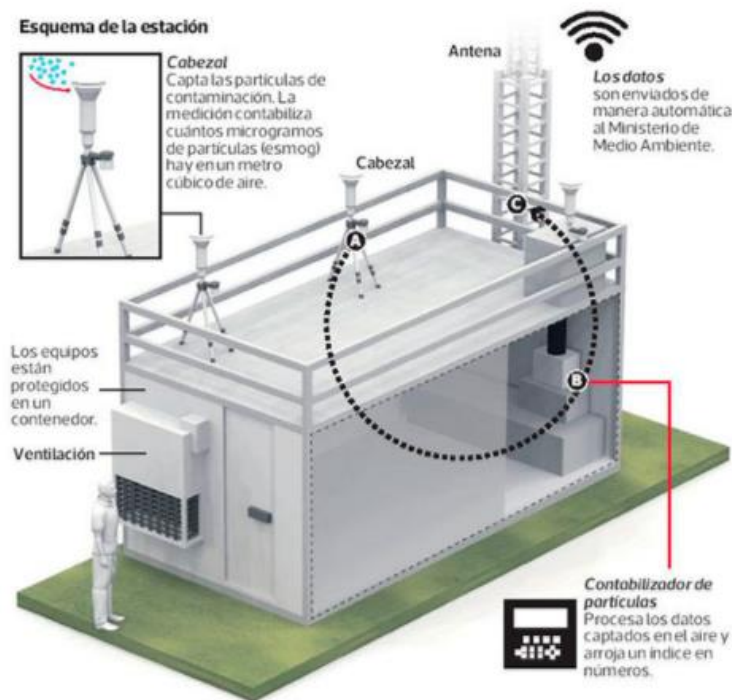


Figura 9. Esquema estación de monitoreo

Fuente: Cortés (2014)

Adicionalmente, en las estaciones Independencia, Parque O'Higgins y Las Condes, se realizan mediciones gravimétricas por medio de muestreadores dicotómicos. Hasta julio del 2014 se emplearon equipos Sierra-Andersen 241, certificados solamente para MP_{10} , los cuales fueron reemplazados por equipos Partisol 2025, certificados para MP_{10} y $MP_{2,5}$ (CMMCh, 2015).

2.3.2.1. Equipos de monitoreo continuo

TEOM 1400ab

Los monitores conocidos como TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) se basan en el uso de una microbalanza oscilante de elementos cónicos (ver Figura 10). La muestra de aire pasa a través de un filtro, colocado en el extremo de un elemento de vidrio hueco, el cual oscila a una resonancia característica. A medida que las partículas se van acumulando en el filtro, disminuye la frecuencia de oscilación en forma proporcional a ese incremento de masa. La concentración de la masa de las partículas se calcula a partir de una calibración que relaciona la frecuencia de vibración y la cantidad de material particulado, teniendo en cuenta el volumen de la muestra de aire (Gallego et al., 2012).

El equipo pesa el filtro constantemente y calcula las concentraciones de masa en un rango cercano al tiempo real (10 minutos). Además, computa la masa total acumulada en el filtro, así como los promedios de 30 minutos, 1 hora, 8 horas y 24 horas, de la concentración de la masa (Thermo Fisher Scientific Inc, 2007).

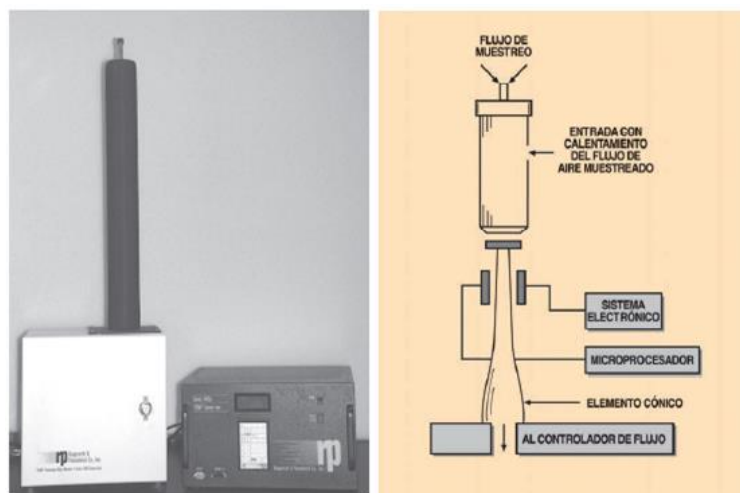


Figura 10. Equipo TEOM 1400ab

Fuente: Adaptado a partir de Thermo Fisher Scientific Inc (2007) y Gallego et al. (2012)

Este instrumento está certificado como metodología Equivalente USEPA para MP_{10} , pero no para $MP_{2.5}$, debido a que presenta una subestimación significativa de los componentes semivolátiles del $MP_{2.5}$ ¹⁰. No obstante, la red MACAM lo utilizó indistintamente para MP_{10} y $MP_{2.5}$ hasta el 2013, cuando se comenzó a implementar la metodología de atenuación beta en todas las estaciones (CMMCh, 2017).

BAM 1020

Los monitores BAM (Beta Attenuation Monitor) cuentan con una cinta elaborada con fibras de vidrio que actúa como un filtro de material particulado. Cada hora una pequeña fuente de ^{14}C (Carbono 14) emite una corriente constante de electrones de alta energía, rayos β , hacia un punto limpio de esta cinta. Los rayos β son detectados y contabilizados por un detector de centelleo, lo que permite tener una lectura inicial, sin material particulado. El instrumento hace avanzar de forma automática la cinta, de manera que el punto antes mencionado se posiciona bajo la boquilla, por donde ingresa el flujo de aire (impulsado por una bomba de vacío). De esta manera, el material particulado presente en el aire es retenido en la cinta. Al final de cada hora, la cinta regresa a su posición inicial, lo que permite que las partículas se ubiquen entre la fuente y el detector (ver Figura 11). Una vez que se vuelven a emitir los rayos β , parte de la energía es absorbida producto de la presencia de estas partículas, fenómeno que se conoce como atenuación beta. Esta disminución en la energía permite determinar la masa de material particulado retenido en la cinta¹¹ y, posteriormente, la concentración volumétrica de partículas en el aire (Met One Instruments, Inc., 2008).

¹⁰ Los monitores TEOM 1400ab calientan el filtro a 50°C para eliminar la humedad de las partículas, lo que conlleva a pérdidas de material por volatilización.

¹¹ Los rayos β son atenuados de acuerdo a una función exponencial aproximada de la masa del material particulado. Para mayor información revisar el Capítulo 11 del manual de operación del equipo: http://www.metone.com/?wpfb_dl=613.



Figura 11. Equipo BAM-1020

Fuente: Adaptado a partir de Met One Instruments, Inc. (2008) y Landreneau & Ray (2009)

2.3.2.2. Equipos de monitoreo discreto

Los equipos Sierra-Andersen 241 y Partisol 2025 tienen un funcionamiento bastante similar. Ambos poseen un cabezal de MP_{10} que permite la entrada exclusivamente de aquellas partículas menores a $10\ \mu m$ de diámetro aerodinámico, a una velocidad constante de $16,7\ [l/min]$ (ver Figura 12 y Figura 13). Este flujo de aire es separado en dos corrientes, una de 15 y otra de $1,67\ [l/min]$, por medio de un impactador virtual. Las partículas finas, cuya inercia es menor, siguen la corriente de mayor velocidad, mientras que las partículas gruesas, la de menor. De esta manera, el material particulado es separado en $MP_{2,5}$ y $MP_{2,5-10}$, y recolectado en filtros (CMMCh, 2011). Después de 24 horas de exposición (medianoche-medianoche), estos filtros son almacenados en condiciones de temperatura y humedad controladas, de tal forma que las partículas luego puedan ser cuantificadas gravimétricamente en algún laboratorio.

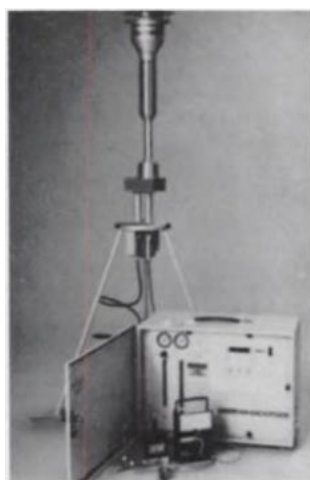


Figura 12. Equipo Sierra-Andersen 241

Fuente: Nagda et al. (1986)



Figura 13. Equipo Partisol 2025

Fuente: Hanne (2013)

2.3.2.3. Metodología de referencia

No existe en la actualidad una tecnología que permita determinar la concentración real de partículas atmosféricas, ya que el equilibrio que existe cuando ellas están suspendidas se altera cuando pasan en el filtro o en otro sustrato al momento de la cuantificación. A la ya mencionada subestimación de la concentración de $MP_{2.5}$ por parte de los equipos TEOM, se suma la sobrestimación que algunos investigadores asocian a los equipos de atenuación beta cuando en el ambiente hay altos niveles de humedad relativa. Ante esto, tanto la USEPA como la Unión Europea (UE) han optado por considerar a la gravimetría como la metodología de referencia¹². La UE, en particular, antes de estudiar tendencias de concentración o evaluar el cumplimiento de estándares de calidad del aire, primero corrige todos los registros de monitoreo en base a la gravimetría. Con esto evita que los resultados y el análisis estén sesgados por algún cambio tecnológico (CMMCh, 2017).

2.4. Caracterización del MP

2.4.1. Formación y distribución

A menudo, las partículas se distribuyen, según su tamaño, en cuatro modos: de nucleación, de Aitken, de acumulación y grueso (ver Figura 14). Los tres primeros, en su conjunto, representan la fracción fina del material particulado, mientras que el modo grueso representa a las partículas de mayor tamaño, incluyendo la fracción gruesa.

¹² A pesar de que la gravimetría también presenta pérdidas por volatilización durante el almacenamiento y transporte de los filtros, la subestimación de los equipos TEOM es notoriamente mayor.

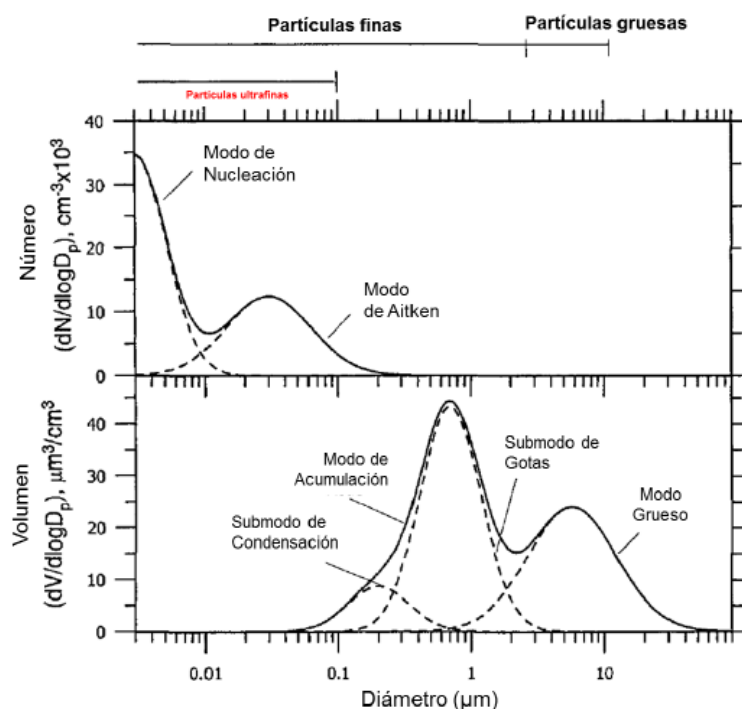


Figura 14. Distribución teórica del material particulado según número y volumen

Fuente: CMMCh (2015)

El modo de nucleación comprende todas las partículas menores a 10 nm de diámetro, formadas in situ a partir de la nucleación de especies gaseosas. El modo de Aitken, por su parte, abarca el intervalo de 10 a 100 nm (0,1 μm), constituido por partículas primarias^[5] provenientes de procesos de combustión que, a su vez, contienen componentes secundarios^[6] condensados sobre ellas. Ambos modos son importantes en número de partículas, pero despreciables en masa. Se pierden principalmente por coagulación con partículas más grandes (Seinfeld & Pandis, 2006).

El modo de acumulación, que se extiende desde 0,1 hasta aproximadamente 2,5 μm de diámetro, suele representar la mayor parte del área superficial del material particulado y una parte importante de la masa. Las partículas del modo de acumulación tienen su origen en la coagulación de las partículas más pequeñas y en la condensación de vapores sobre las partículas existentes. En este rango los mecanismos de eliminación¹³ son menos eficientes y, por ende, las partículas se acumulan, aumentando su tiempo de residencia en la atmósfera (Seinfeld & Pandis, 2006).

Por último, el modo grueso se caracteriza por contar con partículas de diámetro mayor a 2,5 μm, provenientes de procesos mecánicos. Las partículas gruesas tienen velocidades de sedimentación lo suficientemente altas como para que se asienten fuera de la atmósfera en un tiempo razonablemente corto (Seinfeld & Pandis, 2006).

En la Figura 15 se muestra un esquema con los procesos implicados en la formación y transformación de las partículas en función de su tamaño.

¹³ Las partículas son removidas de la atmósfera por dos mecanismos: deposición en la superficie de la Tierra (deposición seca) o incorporación en pequeñas gotas de nube durante la formación de precipitaciones (deposición húmeda).

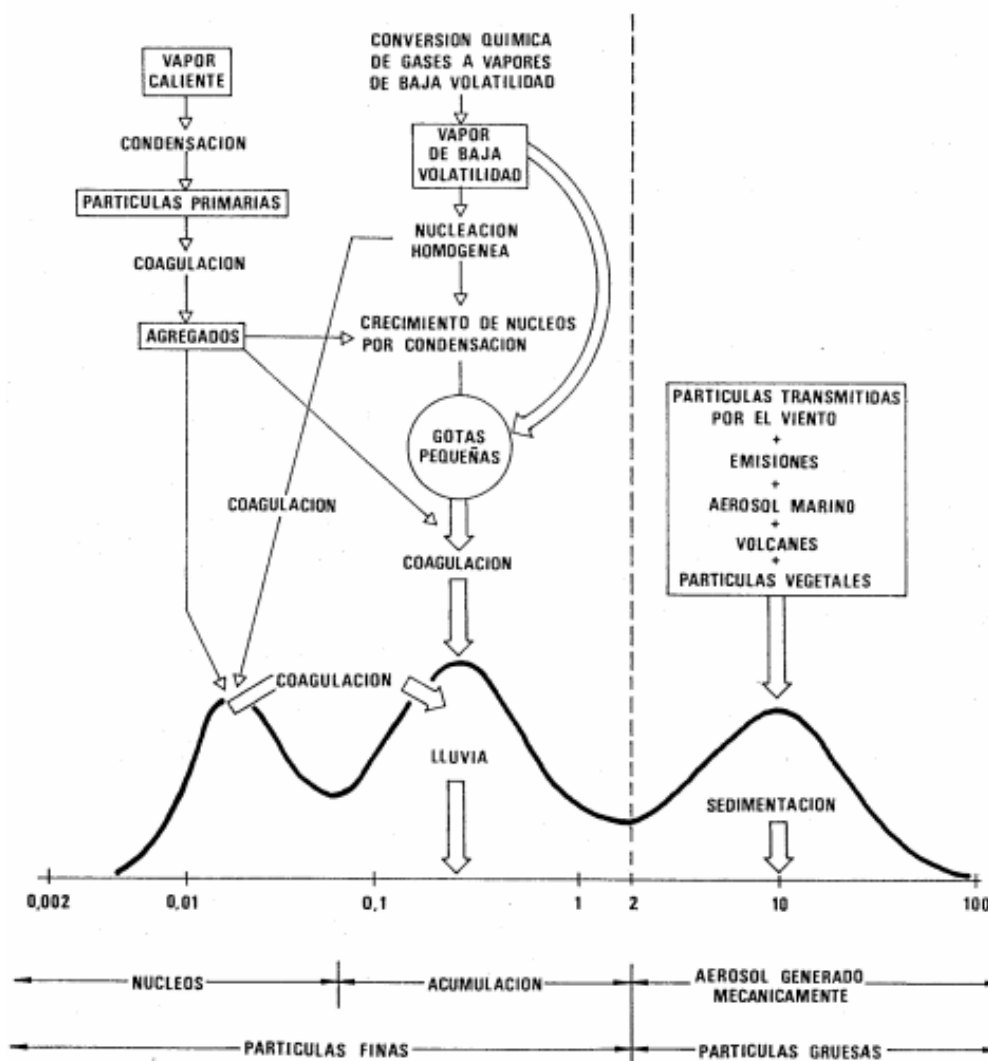


Figura 15. Distribución teórica del material particulado según área superficial

Fuente: Alvarado (2006)

2.4.2. Componentes del MP y fuentes emisoras

Las diferencias en los procesos de formación y transformación que existen entre partículas finas y gruesas inciden en que tengan propiedades físico-químicas totalmente distintas (ver Tabla 5). Dependiendo de las fuentes de emisión y de las condiciones de ventilación, una fracción puede predominar sobre la otra. En Santiago las concentraciones de $MP_{2,5}$ varían entre invierno y verano, en tanto que en el caso del $MP_{2,5-10}$ se mantienen relativamente estables durante todo el año. El porcentaje en masa que ocupa la fracción fina dentro del MP_{10} oscila entre el 45% en los meses cálidos y el 75% en los meses fríos (Moreno et al., 2010).

Tabla 5. Comparación entre partículas finas y gruesas

	Partículas finas	Partículas gruesas
Composición	Sulfato (SO ₄)	Polvo resuspendido
	Nitrato (NO ₃)	Cenizas de carbón y petróleo pesado
	Amonio (NH ₄)	Óxidos minerales (Si, Al, Ti, Fe)
	Ion hidrógeno	Carbonato de calcio (CaCO ₃), cloruro de sodio (NaCl)
	Carbono elemental (EC)	Polen, moho, esporas
	Aerosoles orgánicos	Residuos de plantas y animales
	Agua	Residuos de neumáticos
	Metales traza (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc.)	
Fuentes	Combustión (carbón, petróleo, gasolina, diesel, madera)	Resuspensión de polvo industrial
	Conversión de gas a partículas (NO _x , SO ₃ y COVs)	Resuspensión de polvo del suelo (agricultura, minería, caminos sin pavimentar)
	Fundiciones, refineras, etc.	Fuentes biogénicas
		Construcción/demolición
Solubilidad	Gran solubilidad, higroscópico	Insoluble e hidrofóbico
Tiempo de residencia	Días a semanas	Minutos a días
Distancia de transporte	100 a 1000 km	< a 10 km

Fuente: Seinfeld & Pandis (2006)

Además del tamaño de las partículas, la composición química es un factor importante a considerar al evaluar los efectos del material particulado en la salud, ya que existe evidencia de que hay componentes más tóxicos que otros. Valdés et al. (2012) sugieren que el MP_{2,5} con alto contenido en zinc, cromo, cobre, sodio y azufre, está más fuertemente asociado a la mortalidad de los santiaguinos que la masa del MP_{2,5} por sí sola. Particularmente, se ha demostrado que el zinc está relacionado con las muertes por enfermedades cardiovasculares y cerebrovasculares, mientras que el cromo, con las muertes por enfermedades respiratorias. En este contexto, hay autores que señalan que determinar la composición y las potenciales fuentes de emisión en Santiago, ayuda a implementar estrategias de mitigación orientadas a la reducción de los componentes más tóxicos del material particulado.

En la Región Metropolitana, los aerosoles secundarios (SOA, NO₃, SO₄ y NH₄) aportan, en promedio, la mitad del MP_{2,5} en el periodo otoño-invierno (ver Tabla 6) y sobre el 80% en los meses de primavera-verano. Esto implica que las reacciones fotoquímicas en las que participan gases precursores como COVs, NO_x, SO₂ y NH₃, cumplen un rol importante en la formación de partículas finas (CMMCh, 2017).

Tabla 6. Composición porcentual histórica del MP_{2,5} en la Región Metropolitana, durante época de otoño-invierno

Componente	2001	2003	2005	2009	2011	2012	2013	2014
Aerosoles orgánicos ¹⁴	43%	50%	44%	43%	51%	45%	46%	41%
BC	21%	13%	11%	13%	13%	29%	31%	15%
NO ₃	17%	19%	18%	25%	14%	15%	14%	20%
SO ₄	7%	6%	8%	6%	3%	2%	1%	2%
NH ₄	11%	9%	16%	9%	10%	7%	6%	15%
Cloruros	1%	3%	3%	4%	9%	2%	2%	7%
Estación	Parque O'Higgins	Parque O'Higgins	Parque O'Higgins	Parque O'Higgins	USACH	USACH	Alameda	USACH

Fuente: CMMCh (2017)

¹⁴ Incluye componentes primarios (POA) y secundarios (SOA).

Dado el rol de la actividad fotoquímica en la formación del $MP_{2,5}$, la relación emisión-concentración de partículas en la atmósfera en ningún caso puede ser lineal. Esta es la principal dificultad al momento de identificar cuales fuentes emisoras tienen mayor responsabilidad en la mala calidad del aire. Para lograr aquello, es necesario contar con una apropiada base de información sobre los componentes químicos de las emisiones y conocer la dinámica de éstos en la atmósfera (CMMCh, 2017).

Sin perjuicio de lo anterior, se ha encontrado que cierto grupo de elementos químicos dentro de las partículas pueden ser atribuidos a una fuente emisora en particular, o bien, a un conjunto de fuentes. Por lo tanto, a través del análisis de la composición elemental del material particulado y la aplicación de modelos receptores^[14], es posible determinar la contribución relativa de cada fuente.

2.4.2.1. Análisis de composición elemental

El primer estudio, en Santiago, sobre la composición elemental de las partículas se llevó a cabo en 1976, específicamente en los meses de julio (invierno) y septiembre (primavera) de ese año, e identificó a las fuentes antropogénicas como las principales contribuyentes a la carga de partículas, demostrando enriquecimientos¹⁵ de Cl, Cu, Zn, As, Se, Br y Sb (Préndez et al., 1984). Posteriormente, en 1981, Trier (1984) implementó el muestreo dicotómico, lo que permitió analizar la fracción fina y la fracción gruesa¹⁶ en forma separada, y estableció las primeras correlaciones entre elementos. Trier & Silva (1987) le dieron continuidad a este trabajo e incluyeron el Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) como modelo receptor.

Sobre la base de estas investigaciones, varios autores han desarrollado estimaciones acerca de la contribución de las fuentes al material particulado, utilizando diversas metodologías, sin embargo, no son muchos los estudios que abarquen periodos largos de tiempo. Los pocos que sí lo hacen, han recurrido a datos de la estación Parque O'Higgins y se han ido complementando a través de los años, llegando a cubrir un máximo de 17 años continuos, correspondientes al periodo 1998-2014 (Sax et al., 2007; Moreno et al., 2010; Jhun et al., 2013; CMMCh, 2015; Barraza et al., 2017).

Dentro de estos estudios, Moreno et al. (2010) sugieren que los elementos del $MP_{2,5}$ que tienen un origen principalmente antropogénico (Br, Cl, Cu, Mn, Pb y Zn) presentan concentraciones en los meses fríos (Abril-Septiembre) que superan más de dos veces su valor en los meses cálidos (Octubre-Marzo). Estos elementos provendrían mayoritariamente del escape de los automóviles y de petróleo residual.

¹⁵ El factor de enriquecimiento (EF, por sus siglas en inglés) se define como la razón de un elemento traza y un elemento geogénico (ej: Al) en el material particulado, dividido por la misma razón, pero correspondiente a la muestra de suelo. En este caso se asume que si EF es mayor a 6, el elemento está enriquecido y su presencia en la atmósfera no se explica por simple resuspensión natural de polvo.

¹⁶ En estricto rigor abarcaba más allá de la fracción gruesa, puesto que el equipo dicotómico cortaba en 15 μm .

Por el contrario, elementos como el Al, Mg y Si, característicos de la corteza terrestre, exhiben mayores concentraciones en los meses cálidos, cuando mejoran las condiciones de ventilación y, en consecuencia, aumenta la resuspensión de polvo. Lo mismo ocurre con el Na asociado a aerosoles marinos. No obstante, estos elementos tienen mayor participación en la fracción gruesa que en fracción la fina (ver Tabla 7).

Tabla 7. Valores medios de las concentraciones de elementos de $MP_{2,5}$ y $MP_{2,5-10}$ en Parque O'Higgins

Elemento	$MP_{2,5}$ [ng/m ³]		$MP_{2,5-10}$ [ng/m ³]	
	Invierno	Verano	Invierno	Verano
Al	91.8 ± 62.7	126.6 ± 86.7	1707.1 ± 801.2	1741.8 ± 516.7
As	20.6 ± 27.6	5.5 ± 7.7	3.2 ± 2.9	0.8 ± 1.1
Ba	23.0 ± 22.4	7.4 ± 8.3	70.4 ± 46.8	19.7 ± 11.6
Br	42.4 ± 70.1	7.6 ± 8.6	3.5 ± 2.4	1.9 ± 0.9
Ca	128.7 ± 83.5	110.7 ± 94.6	1691.5 ± 816.4	1213.3 ± 387.2
Cl	200.7 ± 269.6	60.9 ± 134.0	278.7 ± 234.5	476.1 ± 315.0
Cu	38.5 ± 26.0	17.2 ± 12.6	59.0 ± 31.8	28.9 ± 18.9
Cr	5.5 ± 5.8	2.0 ± 1.8	9.8 ± 6.3	3.5 ± 1.7
Fe	367.6 ± 244.8	208.7 ± 149.7	2490.8 ± 1236.9	1795.8 ± 548.2
K	314.4 ± 186.8	259.0 ± 233.2	500.7 ± 234.7	495.3 ± 152.3
Mg	27.4 ± 23.8	46.2 ± 29.4	429.6 ± 197.7	445.8 ± 126.7
Mn	22.5 ± 18.5	9.4 ± 6.4	55.9 ± 27.3	45.4 ± 14.1
Mo	4.8 ± 6.1	4.0 ± 9.1	17.4 ± 16.4	14.4 ± 14.0
Na	140.4 ± 117.3	262.8 ± 147.9	397.0 ± 178.3	551.6 ± 187.7
P	22.7 ± 29.2	18.9 ± 23.2	28.8 ± 14.9	15.6 ± 8.1
Pb	143.7 ± 235.9	39.6 ± 46.2	24.6 ± 13.7	10.0 ± 4.2
S	1298.5 ± 916.1	941.9 ± 498.4	469.8 ± 233.8	301.4 ± 98.4
Se	2.9 ± 3.6	2.6 ± 2.2	0.4 ± 0.7	0.4 ± 0.6
Si	243.4 ± 163.7	315.1 ± 214.9	3811.0 ± 1790.7	3699.7 ± 1085.9
Sr	1.6 ± 1.3	1.8 ± 1.6	14.2 ± 6.0	11.5 ± 3.3
Ti	12.7 ± 9.6	12.8 ± 12.9	174.6 ± 82.7	150.5 ± 45.1
V	1.9 ± 3.0	1.2 ± 1.3	3.8 ± 2.6	3.6 ± 1.6
Zn	108.1 ± 87.4	43.6 ± 33.8	93.5 ± 51.9	52.5 ± 39.0

Notas: $MP_{2,5}$ desde Abril de 1998 a Agosto de 2007 y $MP_{2,5-10}$ desde Octubre de 2003 a Agosto de 2006. Semestre de invierno = Abril a Septiembre, semestre de verano = Octubre a Marzo.

Fuente: Moreno et al. (2010)

CMMCh (2015), por su parte, agrupó los elementos según su comportamiento estacional en tres grupos: aquellos que tienen un impacto significativo en la concentración del $MP_{2,5}$ durante los meses invernales (As, Br, Cl, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn), aquellos que tienen un impacto leve (Ca, K, Mo, Ni, S, Ti y V) y aquellos que no tienen impacto en dichos meses (Al, Mg, Na, Se, Si, Sn y Sr).

Más recientemente, Barraza et al. (2017) aplicaron el modelo receptor conocido como Factorización de la Matriz Positiva versión 5.0 (PMF 5.0, por sus siglas en inglés), a la serie de datos de composición elemental correspondientes a los filtros de $MP_{2,5}$ del periodo 1998-2012, el cual arrojó una solución de 6 factores (grupos de fuentes) que explican el 74% de la variación de este contaminante:

Tabla 8. Solución de seis factores PMF 5.0

Factor	Elementos trazadores
Vehículos motorizados	Cr (>50%), Cu (>50%), Zn (>50%)
Fuentes industriales	S (65,47%), Ni (19,5%), Kns ¹⁷ (12,8%)
Fundiciones de cobre	As (79%), Cu (21,4%), S (18,9%)
Leña	Kns (>70%)
Fuentes costeras	Cl (90%), Ni (8,6%), Zn (9,9%), As (4,7%)
Polvo urbano	Al, Si, Ti

Fuente: Elaborado por el autor a partir de Barraza et al. (2007)

¹⁷ Non-soil potassium (potasio no perteneciente al suelo).

Entre 1998 y 2012 la concentración de $MP_{2,5}$ en la atmósfera se ha reducido, aunque todavía presenta promedios anuales por sobre los $20 \text{ } [\mu\text{g}/\text{m}^3]$. Asimismo, la contribución relativa de cada fuente se ha visto modificada. El impacto de los vehículos motorizados ha aumentado significativamente, lo que lo ha llevado a convertirse en la fuente con mayor contribución desde el periodo 2003-2005 (ver Figura 16) (Barraza et al., 2017).

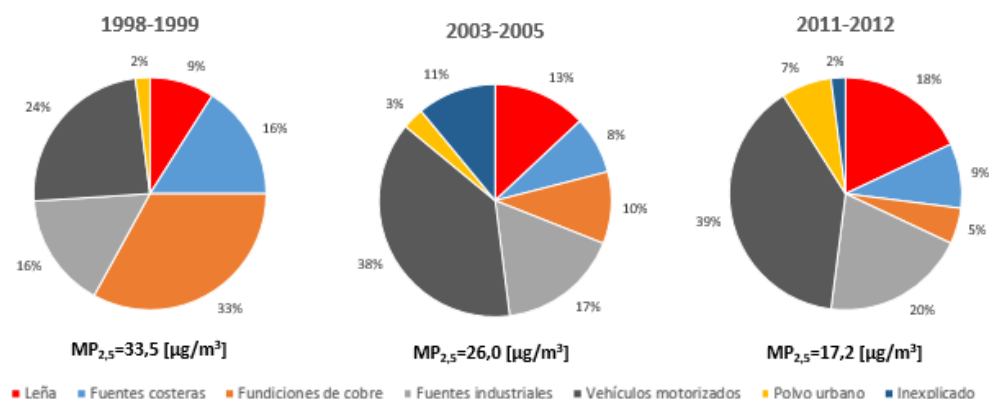


Figura 16. Contribución relativa por grupo de fuentes (en negrita la mediana de la concentración de $MP_{2,5}$)

Fuente: Barraza et al. (2017)

2.5. Dendroquímica

2.5.1. Análisis de los anillos de crecimiento

En climas templados con veranos e inviernos claramente diferenciados, la mayoría de los árboles producen un anillo anual de crecimiento, el cual pasa a formar parte de la capa más externa del cilindro de madera. El crecimiento en el grosor del tronco (crecimiento secundario) se inicia en la primavera cuando el cambium vascular^[3] se divide y forma nuevas células a cada lado. Las que se producen en el interior se integran al xilema^[19] (o madera), mientras que las otras, al floema^[10] (ver Figura 17). Las células del xilema empujan al cambium, al floema y a los tejidos de la corteza cada vez más lejos de la médula, provocando que el tronco aumente de diámetro (Martin & Coughtrey, 1982). En otoño e invierno el cambium permanece inactivo, por lo que se detiene el crecimiento.

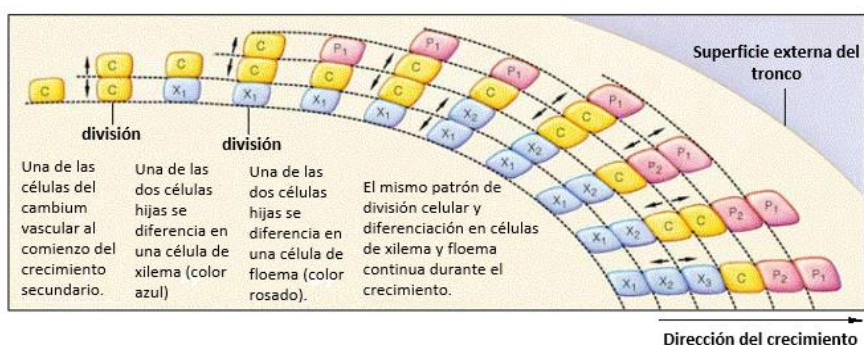


Figura 17. Crecimiento secundario

Fuente: Traducido de UC Davis (2008)

El tejido del xilema que se forma cada año puede subdividirse en leño temprano (o leño de primavera) y leño tardío (o leño de verano), tal cual se indica en la Figura 18. En las Gimnospermas^[11], el leño temprano y tardío de los anillos de crecimiento puede distinguirse por cambios en el tamaño y la forma de las células que conducen el agua (traqueidas). El leño temprano está compuesto de células relativamente grandes y de paredes delgadas, pero a medida que avanza la estación, las células se vuelven más pequeñas, de paredes más gruesas y, generalmente, de color más oscuro. Esta alternancia entre células pequeñas y oscuras del leño tardío, y las células más grandes de la primavera siguiente, permite diferenciar un anillo anual de otro. Al hacer referencia a las Angiospermas^[12], sin embargo, se habla de porosidad difusa, porosidad anular y porosidad semianular. Cuando la porosidad es anular, los vasos^[18] en el leño temprano son más prominentes que en el leño tardío, mientras que cuando la porosidad es difusa, los vasos tienen aproximadamente el mismo tamaño en todo el anillo, por lo que solamente es posible distinguir el margen del anillo como una línea tenue (usualmente de color claro) (Martin & Coughtrey, 1982). La porosidad semianular es un caso intermedio.

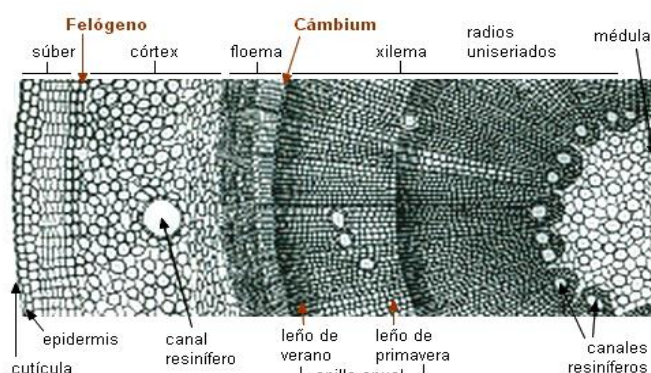


Figura 18. Sector de transcurso de tallo secundario de conífera

Fuente: UNNE (2013)

Al contar el número de anillos es posible, en la mayoría de las especies, determinar la edad del árbol. No obstante, se debe tener precaución ante la presencia ocasional de los denominados anillos falsos (o bandas de crecimiento intra-anual). En la Figura 19 se muestran los diferentes tipos de anillos falsos. La formación de estos anillos falsos puede atribuirse a causas externas que alteran el funcionamiento normal del cambium, como, por ejemplo: heladas tardías, caída temporaria de hojas, defoliación y fluctuaciones climáticas en general (Giménez et al., 2005).

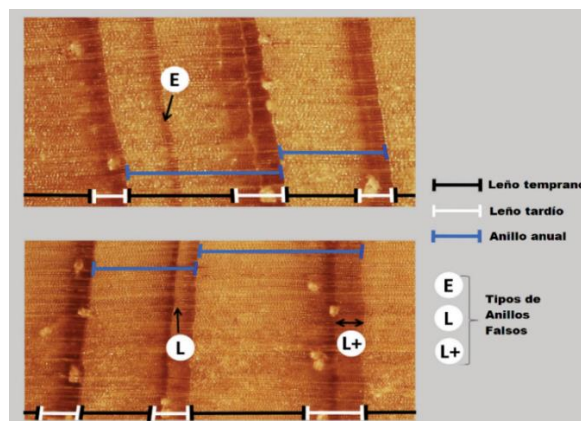


Figura 19. Identificación de anillos falsos

Fuente: Traducido de Kurz-Besson et al. (2016)

La disciplina que utiliza los anillos de crecimiento para datar eventos del pasado es conocida como Dendrocronología, y su aplicación en estudios sobre variaciones climáticas (Dendroclimatología) ha suscitado gran atención. El éxito de la dendrocronología ha despertado el interés de algunos investigadores por estudiar la posibilidad de que los anillos muestren variaciones en la concentración de ciertos elementos químicos, que den cuenta de los niveles de contaminación de los años de formación correspondientes. Claramente si los elementos que ingresan a un anillo de crecimiento persisten en ese anillo, entonces el análisis químico que se realice sobre él debería entregar información con respecto al año en que se formó, permitiendo, de esta manera, monitorear condiciones ambientales del pasado (Martin & Coughtrey, 1982). Según cuales sean las características del hábitat en que crecen los árboles y dependiendo del enfoque del investigador, esta información puede ser empleada tanto para estudiar la contaminación atmosférica, como la contaminación de las aguas y el suelo (incluyendo sus efectos en el crecimiento de los árboles). La subdisciplina de la Dendrocronología que lleva a cabo este tipo de estudios es denominada Dendroquímica, y tuvo su origen en la década de 1960 (Hristovski & Melovski, 2010). Dada la longevidad de los árboles, la Dendroquímica ofrece la oportunidad de estudiar la contaminación de épocas de las cuales no se tienen registros de contaminantes, o bien, en zonas en las que no es posible instalar equipos modernos de monitoreo.

De acuerdo a los antecedentes que se manejan, se han realizado cuatro estudios dendroquímicos en Chile. El primer estudio se desarrolló a principios de los noventa en las localidades de Ventanas y Quintay, y tenía el objetivo de determinar el efecto de la adición antropogénica de Cu en los componentes del bosque esclerófilo, por medio de la cuantificación de la concentración de Cu en los anillos de Peumo (*Cryptocarya alba*) (Delgado, 1996). Posteriormente, en un segundo estudio, Romo-Kroeger et al. (1996) determinaron la presencia de K, Ca, S, Cu, Zn, As, Br y Pb en diferentes especies de árboles de Santiago, con el fin de evaluar el impacto ambiental de la industria y del parque automotriz. El tercer y cuarto estudio corresponden a los trabajos de Cantin (2003) y Arredondo (2014), respectivamente. En ambos casos se investigó la responsabilidad del Complejo Industrial Ventanas en la contaminación de la zona, a través de la medición de diferentes elementos trazadores en árboles de la especie Ciprés de Monterrey (*Capressus Macrocarpa*), cercanos a las fuentes de emisión. Cabe mencionar, que, de todos los estudios, solamente el trabajo de Arredondo (2014) emplea el método de cofchado para asignar correctamente un año a cada anillo, además de ser el primero en utilizar tecnología de alta detección para medir iones y metales.

El análisis de los anillos de crecimiento no entrega un registro pasivo de la contaminación, por lo que si se logran buenos resultados o no, dependerá de la especie de árbol seleccionado y de los factores bióticos y abióticos que pudieran afectar la absorción e inmovilización de estos elementos en el suelo y en el tronco del árbol. Conocer los aspectos biológicos implicados en la absorción, transporte y acumulación de contaminantes en los árboles es vital para lograr una correcta interpretación de los datos.

2.5.2. Transporte y acumulación de especies químicas en la madera

Existen tres vías por la que las especies químicas pueden ingresar en los árboles para luego acumularse en los anillos, estas son: (1) absorción desde el suelo a través de las raíces, con el posterior transporte en el xilema por medio de la corriente de transpiración; (2) absorción foliar, con la subsecuente translocación en el floema y traspaso hacia el xilema; y (3) deposición directa sobre la superficie del tallo, seguido de un movimiento lateral a través de la corteza y dentro de la madera (ver Figura 20) (Lepp, 1975).

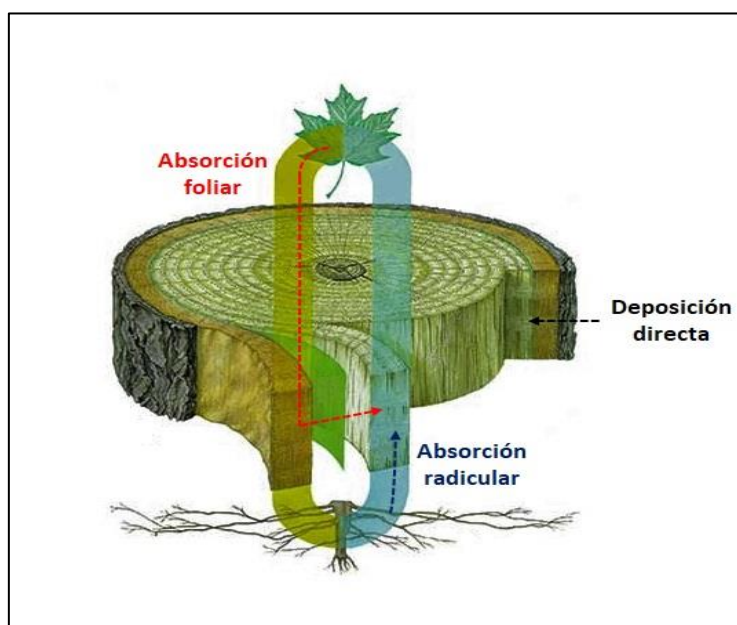


Figura 20. Rutas de ingreso de elementos químicos en el xilema de los árboles

Algunos autores afirman que la absorción a través de las raíces es la principal vía de ingreso para aquellos árboles que crecen en suelos ácidos, con mayor disponibilidad de elementos traza. No obstante, en suelos menos ácidos, donde los elementos tienden a inmovilizarse, las absorciones a través de la corteza y las hojas adquieren mayor importancia (Prasad, 2001). Particularmente, en plantas herbáceas, se ha demostrado que la absorción foliar de Fe, Mn, Zn y Cu es posible (Kabata-Pendias, 2011). Sin embargo, a diferencia del caso de la absorción radicular, no se han encontrado estudios que expliquen en mayor detalle los mecanismos involucrados en la acumulación de elementos en el tronco que han ingresado vía corteza u hojas.

En vista de lo anterior, la información entregada a continuación se centra en aquellos componentes del material particulado que son depositados en el suelo y posteriormente captados por las raíces de los árboles.

2.5.2.1. Absorción a través de las raíces

Lo primero que se debe tener en cuenta es que los árboles no responden de igual forma con todos los elementos traza del material particulado, de hecho varios de estos elementos son consideradas nutrientes esenciales¹⁸ para las plantas, por lo que su absorción está fuertemente regulada. Esta regulación es posible gracias a la existencia de proteínas transportadoras específicas para cada nutriente, las cuales permiten el transporte a través de las membranas plasmáticas de las células capilares de la raíz (Mitra, 2017). Según exista deficiencia o exceso de nutrientes en el árbol, la absorción puede verse favorecida o impedida. La especie Haya común (*Fagus sylvatica*), por ejemplo, discrimina contra la captación y translocación de Al y Na, en tanto que favorece la absorción de Mn, Ca, K y P (posiblemente con el objetivo de regular el pH) (Smith & Shortle, 1996).

Las especies químicas absorbidas pueden ser trasladadas hacia el xilema traspasando las paredes y membranas celulares mediante transporte activo (vía simplástica), o circulando entre medio de las paredes celulares por difusión simple hasta la Banda de Caspary, donde se ven obligadas a atravesar las membranas plasmáticas de las células endodérmicas para continuar su recorrido (vía apoplástica), tal cual se ilustra en la Figura 21. Smith & Shortle (1996) indican que tanto Ca como Ba y Sr siguen la vía apoplástica, a diferencia de S, Fe, Cs y K que siguen la vía simplástica. El transporte de Mg, por su parte, puede efectuarse tanto por transporte activo como por difusión simple. En condiciones de escasez de nutrientes, se espera que el transporte simplástico de aquellos elementos esenciales se vea favorecido.

Una vez dentro del xilema, los elementos ascienden por el tronco impulsados por el potencial hídrico que resulta de la pérdida de agua en las hojas por transpiración.

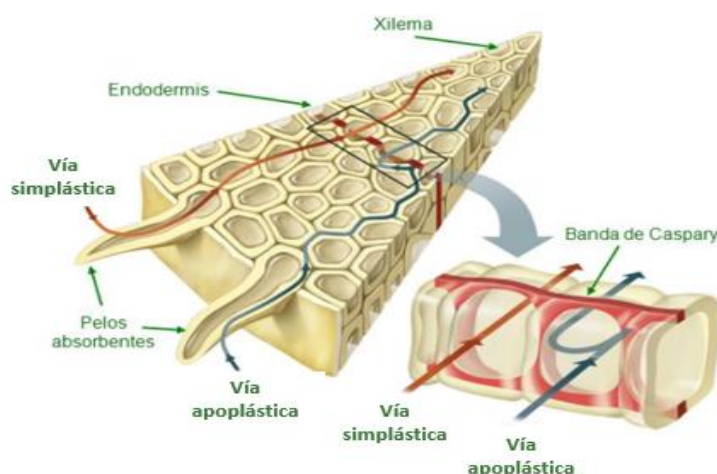


Figura 21. Recorrido de especies químicas hacia el xilema

Fuente: Gómez (2016)

¹⁸ N, P, K, S, Ca y Mg son calificados como macronutrientes; mientras que Zn, Fe, Mn, Cu, B, Mo, Cl⁻, Co y Ni, como micronutrientes. En algunas especies, Na, Si, Se y V también son considerados nutrientes esenciales (Mitra, 2017).

2.5.2.2. Capacidad de fijación de cationes

El xilema funciona como una columna de intercambio iónico en la que interactúan los elementos que ingresan al árbol en su forma catiónica, con los aniones no difusibles de la pared celular del xilema, lo cual provoca la separación de los cationes de la corriente de transpiración. La cantidad y la proporción de iones retenidos en el xilema depende de la densidad de carga iónica, la actividad de los cationes competidores, la densidad de carga de los aniones no difusibles y el pH de la savia bruta^[16] (el cual puede variar entre 5 y 7) (Prasad, 2001). Lepp (1975) sugiere que la mayoría de los metales se transportan formando complejos con moléculas orgánicas, lo que altera el estado de carga de los cationes y reduce su afinidad con las cargas negativas de la pared celular, aumentando, de esta forma, la velocidad de transporte. En este contexto, Flis et al. (2016) han identificado más de 50 complejos metálicos diferentes, donde están implicados numerosos ligandos tales como: ácido aspártico, asparagina, ácido cítrico, glutamina, histidina, ácido málico, nicotianamina, fenilalanina, triptófano, ácido pipecólico y ácido aminoadípico.

Los cambios en el pH y en la concentración de cationes en la savia, son detectados como cambios en la composición y el grado de saturación de bases de la pared celular del xilema. Por lo tanto, el registro que queda en una posición en particular del tronco es, en estricto rigor, un resumen de los cambios en la química de la savia que estuvo en contacto con la madera en esa posición (Bondietti et al., 1990). Dado que el xilema es capaz de impedir el movimiento de los elementos hacia arriba durante meses o incluso años, los resultados del análisis químico efectuado a una muestra de madera dada, extraída a la altura del pecho, pueden corresponder a modificaciones en la química del suelo de varios años atrás (Watmough, 1999). Momoshima & Bondietti (1990) sostienen que durante el ascenso de los cationes por el tronco se produce una especie de fraccionamiento cromatográfico basado en sus densidades de carga y concentraciones. De esta manera, los elementos alcalinotérreos se ordenan de mayor a menor movilidad de la siguiente forma: $Mg^{+2} > Ca^{+2}$, $Sr^{+2} > Ba^{+2}$. Por su parte, Ag^{+} y probablemente Cu^{+2} son retenidos en la parte inferior del tronco.

Algunos árboles con la edad pierden su capacidad de fijar cationes, por ejemplo, la especie Picea roja (*Picea Rubens*). Esto se debe a que al aumentar el radio del tallo, las traqueidas^[17] se alargan, provocando que la cantidad de pectinas¹⁹ disminuya y, en consecuencia, se reduzca el número de los potenciales sitios de intercambio iónico (Prasad, 2001). Smith & Shortle (1996) sugieren que, en situaciones como ésta, expresar la concentración del catión como un porcentaje de la posible concentración total, puede ser más útil que la expresión de la concentración absoluta. Esto sería análogo a la determinación del porcentaje de saturación de bases, el cual es comúnmente utilizado en los análisis de suelos.

¹⁹ Las pectinas son ricas en ácido D-galacturónico, cuyo grupo carboxilo es responsable de la carga negativa de la pared celular.

2.5.2.3. Translocación radial

Existe evidencia de que la distribución radial de ciertos elementos traza en los árboles, está influenciada por la ubicación del límite entre la albura^[1] y el duramen^[8] (ver Figura 22). En ocasiones, elementos tóxicos como Cd y Pb muestran bajas concentraciones cerca del cambium, pero aumentan hacia el centro del tronco. Algunos autores sugieren que estos elementos tóxicos son transportados a través de los rayos medulares para desintoxicar la parte activa de la madera (albura) y ser dispuestos en la parte inactiva (duramen) (Prasad, 2001).

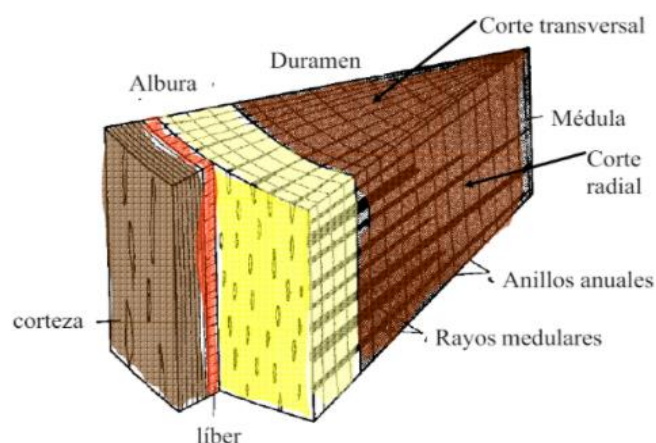


Figura 22. Macroestructura de la madera

Fuente: Vazquez & Esquivel (2014)

En cuanto a aquellos elementos esenciales, se observa que, dentro del duramen, generalmente sus concentraciones disminuyen al aumentar la distancia con respecto a la médula. Este patrón es interrumpido en el límite con la albura, donde las concentraciones aumentan considerablemente. Esta discontinuidad en la frontera de la albura con el duramen indica que los nutrientes son redistribuidos desde el duramen recién formado hacia la albura. Esto ha sido observado en los perfiles de concentración de P, K, Mn, Mg y Ca. En la especie Falso ciprés blanco (*Chyocyparis thyoides*), se estima que el 80% del Ca y el 78% del Mg requerido para el crecimiento secundario reciente, se recuperaron de las células de la albura que estaban en pleno proceso de duraminización^[9]. Se ha demostrado que esta retranslocación de nutrientes está relacionada inversamente con la disponibilidad de nutrientes del suelo (Prasad, 2001).

En vista de lo anterior, y teniendo en cuenta lo regulada que es su absorción, los elementos esenciales no entregan garantías de ser buenos trazadores de la contaminación a la que está expuesta el árbol. Sin perjuicio de lo anterior, Odabasi et al. (2016) sugieren que, aunque efectivamente K, P y Na no parecen ser apropiados trazadores, los micronutrientes Fe, Mo, Ni, V y Cu, sí pueden serlo.

Para que la distribución de los cationes en la madera entregue información fidedigna de la contaminación atmosférica, estos cationes no deben tener demasiada movilidad en el tronco. En este contexto, se sabe que en la especie Tulipífero de Virginia (*Liriodendron tulipifera*) el movimiento lateral de elementos como Mn, K, P, Ca, Sr y Zn, es significativo. Por el contrario, Al, Si, Fe y Cu, no presentan gran movilidad (Prasad, 2001).

Es importante no confundir la translocación radial, con el hecho de que en algunos árboles la savia es conducida por medio de varios anillos. Por ejemplo, en gimnospermas y angiospermas de porosidad difusa, la corriente de transpiración puede llegar a cubrir hasta los últimos cuatro anillos. Por el contrario, en angiospermas de porosidad anular, la savia es conducida exclusivamente a través del leño temprano del anillo en formación (Chaney, 2000). Este aspecto es importante tenerlo presente si es que lo que se busca es tener una resolución anual de los eventos de contaminación.

3. Método

El presente estudio corresponde a una investigación cuantitativa, de tipo correlacional, que tuvo como finalidad conocer la relación o grado de asociación existente entre los elementos químicos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles (variable dependiente) y las mediciones atmosféricas obtenidas en estaciones de monitoreo (variable independiente). Cabe destacar que se presumió el grado de asociación entre estas mediciones sobre la base de que cumplen un objetivo común: evaluar la contaminación atmosférica, aunque en el momento de la presente investigación no se registraron estudios previos en Chile o en el resto del mundo que los asocien.

En este contexto, se debe entender por mediciones atmosféricas a las mediciones de las concentraciones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ en el aire, así como de las concentraciones de elementos traza en el mismo $MP_{2,5}$. Para evaluar la relación entre este tipo de mediciones y las mediciones de elementos acumulados en los anillos de crecimiento, se utilizó como criterio el coeficiente de correlación de Pearson (ver Tabla 9).

Tabla 9. Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson

Coeficiente de correlación	Interpretación
$r = -1$	Correlación negativa perfecta
$-1 < r < -0,80$	Correlación negativa muy alta
$-0,80 < r < -0,60$	Correlación negativa alta
$-0,60 < r < -0,40$	Correlación negativa moderada
$-0,40 < r < -0,20$	Correlación negativa baja
$-0,20 < r < 0$	Correlación negativa muy baja
$r = 0$	Correlación nula
$0 < r < 0,20$	Correlación positiva muy baja
$0,20 < r < 0,40$	Correlación positiva baja
$0,40 < r < 0,60$	Correlación positiva moderada
$0,60 < r < 0,80$	Correlación positiva alta
$0,80 < r < 1$	Correlación positiva muy alta
$r = 1$	Correlación positiva perfecta

De esta manera, las correlaciones entre las variables fueron consideradas significativas toda vez que implicaron un alto grado de asociación entre ellas ($|r| > 0,6$). En consecuencia, la corroboración de la hipótesis de investigación, en función de los objetivos específicos trazados inicialmente, estuvo sujeta al cumplimiento de las siguientes afirmaciones:

- Existe una correlación de Pearson superior a $\pm 0,6$ entre la medición de $MP_{2,5}$ acumulado en los filtros de $MP_{2,5}$ de la estación Parque O'Higgins, correspondientes al periodo entre 1998 y 2012, y la medición de elementos químicos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles del Parque Quinta Normal en dicho periodo.
- Existe una correlación de Pearson superior a $+0,6$ entre los elementos químicos analizados en los filtros de $MP_{2,5}$ de la estación Parque O'Higgins, correspondientes al periodo entre 1998 y 2012, y la medición de los mismo elementos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles del Parque Quinta Normal en dicho periodo.

- Existe una correlación de Pearson superior a $\pm 0,6$ entre los datos de MP_{10} de la estación Parque O'Higgins almacenados en la base de datos del SINCA, correspondientes al periodo entre 1998 y 2014, y la medición de los elementos químicos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles del Parque Quinta Normal en dicho periodo.

3.1. Selección de la muestra

3.1.1. Variable independiente: Mediciones atmosféricas

3.1.1.1. Estación de monitoreo de referencia para las mediciones atmosféricas

La estación Parque O'Higgins, junto con sus mediciones de material particulado respectivas, fue elegida para representar el monitoreo tradicional de la calidad del aire. Esta estación está ubicada al interior del parque del mismo nombre, a unos 2 km al sur del centro de la ciudad de Santiago de Chile, a unos 0,5 km al oeste de la Autopista Central (Ruta 5), donde circulan alrededor de 60000 vehículos por día, y cercana a fuentes de contaminación menores como talleres mecánicos y otros negocios pequeños (ver Figura 23) (Sax et al., 2007; Gramsch et al., 2016). Según Osses et al. (2013) es considerada una de las estaciones más representativas de la contaminación en la cuenca del río Maipo, y gran parte de los estudios sobre material particulado se han desarrollado allí, lo cual justifica su elección.

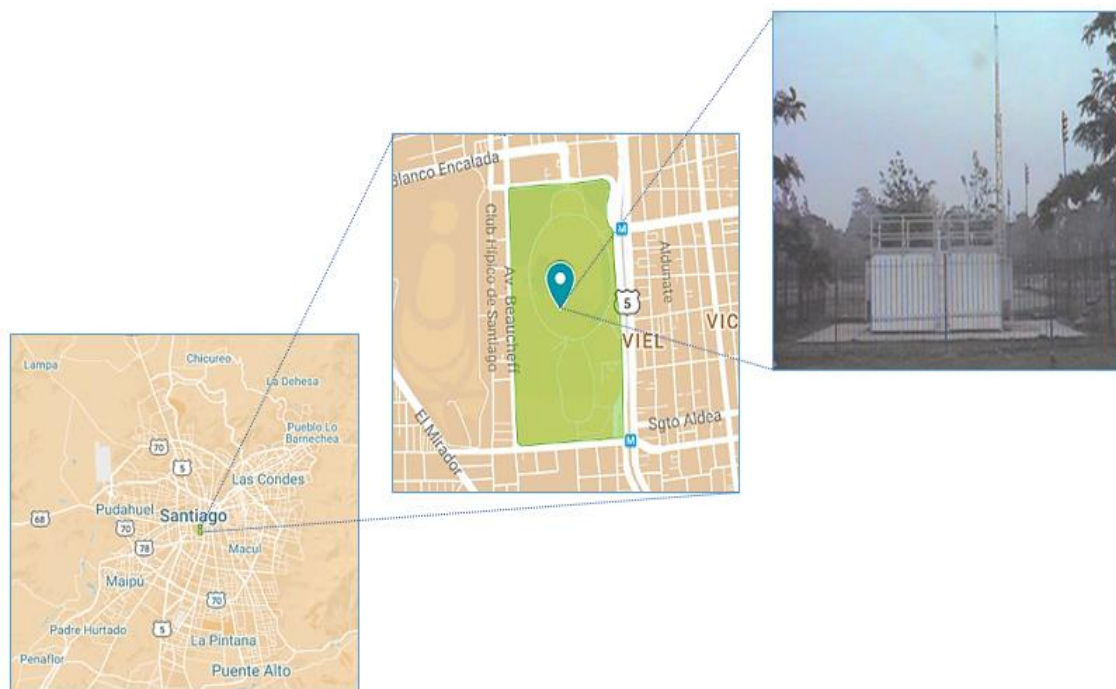


Figura 23. Ubicación Estación Parque O'Higgins

3.1.2. Variable dependiente: Muestras de árboles

3.1.2.1. Área de estudio

Para efectos de la recolección de muestras de árboles, se escogió como área de estudio el Parque Quinta Normal, en la comuna de Santiago. Este parque, inaugurado en 1842, fue el primer parque público del país y actualmente cuenta con alrededor de 40 hectáreas de extensión. Desde 1976 ostenta la categoría de Santuario de la Naturaleza, debido a la diversidad de especies vegetales presentes en él (Municipalidad de Santiago, s.f.). Dada su antigüedad, es propicio para encontrar ejemplares de árboles con más de 50 años de edad. Además, al estar localizado a tan sólo 5 km del Parque O'Higgins (ver Figura 24), se presume que la calidad del aire en ambos sitios es lo suficientemente similar como para poder comparar los métodos de monitoreo.



Figura 24. Ubicación Parque Quinta Normal

Fuente: Elaborado por el autor a partir de Aguirre (2015)

3.1.2.2. Especie arbórea

Los árboles seleccionados corresponden a la especie Cedro del Líbano (*Cedrus libani*), de gran presencia en plazas y parques del país. Esta especie exótica es originaria de Asia Menor y Siria (montes Líbano), y pertenece al grupo de las coníferas^[4], específicamente a la familia de las pináceas. Se caracterizan por ser árboles de tronco robusto y de gran tamaño, llegando a medir 40 m de altura. Es posible reconocerlos por sus hojas de 2 a 3 cm de largo, agrupadas en braquiblastos (o ramas cortas), y por producir conos de 9 a 14 cm de longitud, con numerosas escamas aladas, irregularmente triangulares y membranosas (ver Figura 25) (Hoffmann, 2010). Crecen preferentemente en climas templados, no obstante, resisten bien las heladas. Su crecimiento es lento y alcanzan edades muy avanzadas (existen individuos de cerca de 1000 años) (Museo Nacional de Historia Natural, 2014).



Figura 25. Cedro del Líbano

Fuente: Museo Nacional de Historia Natural (2014)

Justamente, dada su longevidad, sumado a que existía un número importante de estos individuos en el Parque Quinta Normal y que ya había habido estudios previos que analizaran sus anillos de crecimiento, esta especie cumplía con los 3 requisitos principales para que se pudiera efectuar una cronología de ancho de anillos:

- ✓ Presentar anillos de crecimiento visibles.
- ✓ Tener potencial para datación cruzada.
- ✓ Presencia de individuos de la especie de más de 50 años de edad.

3.2. Diseño experimental

3.2.1. Recolección de la muestra

3.2.1.1. Determinación de las concentraciones de $MP_{2,5}$

La campaña de recolección de $MP_{2,5}$ fue llevada a cabo por operarios de la red MACAM entre Abril de 1998 y Agosto de 2012, en la estación Parque O'Higgins. Las partículas finas fueron capturadas en filtros de teflón de 37 mm con la ayuda del equipo dicotómico Sierra-Andersen 241, el cual, como ya se mencionó anteriormente, separa las partículas finas de las gruesas en función de su inercia. Por cada día de toma de muestras, un filtro fue expuesto a un flujo de aire²⁰ constante de 15 [l/min] durante 24 horas (medianoche-medianoche). En el periodo invernal (Abril a Septiembre) se tomaron muestras todos los días, mientras que en el periodo estival (Octubre a Marzo), día por medio²¹. Finalmente, las concentraciones fueron determinadas por gravimetría, empleando una microbalanza con resolución de 0,01 [mg] para el pesaje de la muestras (CMMCh, 2015). Para mayor información con respecto al cálculo de la concentración ver Anexo A.

²⁰ La entrada de aire del instrumento se ubicó a 3 m del suelo.

²¹ Esto equivalía a un universo total de 14-15 filtros disponibles en los meses de verano y de 28-30 filtros en los meses de invierno. Sin embargo, en 2007 la frecuencia de sustitución se redujo de tal manera que a partir de ese año en adelante solamente hubieron disponibles 11-15 filtros en los meses de invierno y 6-9 en los meses de verano.

Determinación de la composición elemental del MP_{2,5}

Del total de filtros recolectados se seleccionaron 1243 de ellos para análisis de composición elemental, considerando un filtro diario cada cuatro días. La concentración de elementos químicos en los filtros fue determinada a partir de fluorescencia de rayos X (XRF) en el Instituto de Investigación del Desierto, Reno, Nevada, E.E.U.U. La base de datos con el resultado de este análisis químico fue provista por el Ministerio de Medio Ambiente y cuenta con la información de 49 elementos. Cabe mencionar que es la misma base de datos con la que trabajaron CMMCh (2015) y Barraza et al. (2017).

En el caso particular de este estudio, de los 49 elementos identificados, se optó por trabajar con los siguientes: Sodio (Na), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Potasio (K), Calcio (Ca), Vanadio (V), Cromo (Cr), Manganeseo (Mn), Hierro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Arsénico (As), Selenio (Se), Molibdeno (Mo), Plata (Ag), Cadmio (Cd), Estaño (Sn), Bario (Ba) y Plomo (Pb). Esto basado en su presencia en los anillos de crecimiento de los árboles y su utilidad como trazadores de fuentes emisoras.

3.2.1.2. Determinación de las concentraciones de MP₁₀

Las concentraciones de MP₁₀ correspondientes al periodo entre Enero de 1998 y Diciembre de 2014, fueron obtenidas a partir del registro histórico de la estación Parque O'Higgins publicado en el sitio web del SINCA (sinca.mma.gob.cl). Por lo tanto, representan las mediciones continuas efectuadas por el equipo TEOM 1400ab y luego validadas por el Departamento de Redes de Monitoreo de Calidad del Aire del MMA.

3.2.1.3. Determinación de la concentración de elementos químicos en los anillos

Extracción de los tarugos

Para la extracción de las muestras de madera, en Enero de 2016, se utilizaron taladros de incremento (o barrenas forestales). Estos instrumentos permiten extraer las muestras en forma de tarugos, de manera de generar el menor impacto posible en el árbol (ver Figura 26). El agujero dejado por el taladro de incremento raramente infringe algún daño a árboles del grupo de las coníferas, puesto que generalmente el agujero es rellanado rápidamente con resina o cubierto por la corteza (Arredondo, 2014). Para proteger las muestras luego de su extracción, éstas fueron almacenadas en bombillas de plástico con sus códigos de identificación respectivos.



Figura 26. Extracción de tarugo con taladro de incremento

Fuente: Sibtec Scientific (2004)

De un total de 22 árboles intervenidos, se extrajeron 2 tarugos por árbol (a excepción de un caso en particular en que sólo se extrajo uno). En la Figura 27 se muestra la distribución de los árboles muestreados dentro del Parque Quinta Normal (para mayor detalle ver Anexo B).

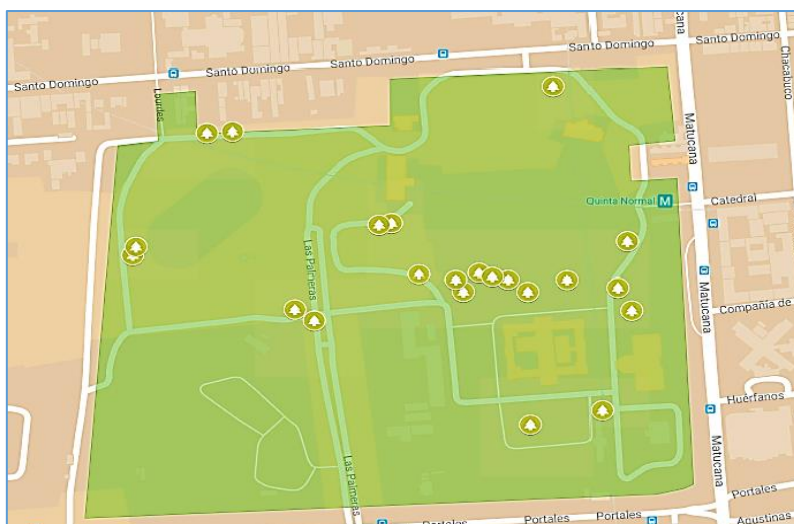


Figura 27. Mapa del muestreo de Cedros del Líbano

Preparación de las muestras para el cofechado

Una vez en el laboratorio, las muestras fueron montadas sobre molduras de madera con las traqueidas en posición vertical, de manera que luego al lijarlas fuera factible identificar los anillos de crecimiento. El lijado se realizó con lijas de granulometría ascendente (de granos gruesos a granos finos), con el objetivo de lograr la mayor visualización de los anillos posible, con la menor pérdida de masa. Para ello se utilizó una lijadora orbital, la cual permitió que las superficies lijadas quedaran totalmente planas.

Posteriormente, cuando los anillos ya estuvieron visibles, se procedió a escanear las muestras (en alta resolución) por la cara recientemente lijada (plana). Aquellas muestras que pertenecían a un mismo árbol fueron escaneadas conjuntamente (ver Figura 28).



Figura 28. Tarugos escaneados

Cofechado

Las muestras digitalizadas fueron analizadas con el programa computacional WinDENDRO™ (Regent Instruments Canada Inc., 2014), el cual está diseñado para la medición de diferentes parámetros relacionados con los anillos de crecimiento (ver Figura 29). Particularmente, para efectos del fechado de las muestras, el programa solicita ingresar el año asociado al anillo más externo (cercano a la corteza) y, en base a ello, asigna automáticamente el año correspondiente al resto de los anillos. Dado que las muestras se extrajeron en Enero de 2016, el anillo asociado al año 2015 todavía estaba en formación²², por lo que al último anillo visible en su totalidad debía asignársele el año 2014. Si bien WinDENDRO™ realizó una detección automática de los anillos, esta detección generalmente no era muy rigurosa, siendo necesario corregir manualmente. En situaciones en que la imagen digital no era lo suficientemente esclarecedora de la presencia o no de un anillo, fue preciso utilizar complementariamente la lupa binocular.

²² Teniendo en cuenta que en el Hemisferio Sur el crecimiento de los árboles ocurre entre dos años calendarios (Septiembre – Mayo), la convención de Schulman (1956) establece que se deberá asignar el año a cada anillo según el año en que comenzó su formación.

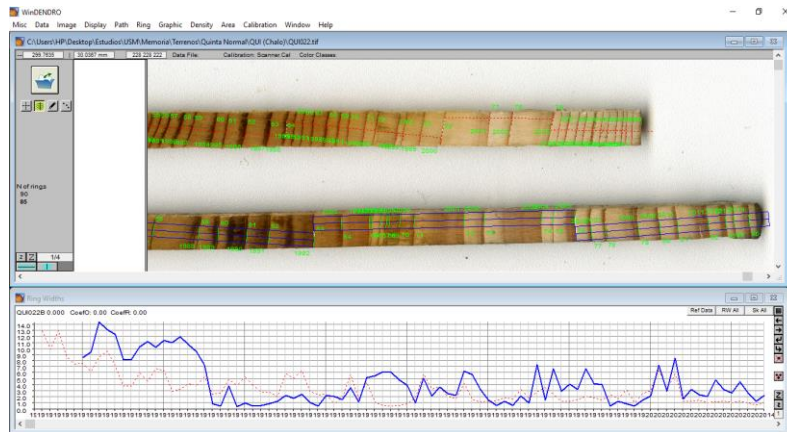


Figura 29. Medición y fechado de las muestras de *Cedrus libani* de Quinta Normal con el programa WinDENDRO™

Para asegurar la correcta datación, se comparó el fechado de las muestras en función de las variaciones en el ancho de sus anillos, proceso que se conoce como cofechado o datación cruzada. Dicho proceso se llevó a cabo con la ayuda del software Dendrochronology Program Library (DPL) y su herramienta de análisis COFECHA (Holmes, 1983). Este programa computacional determina el grado de sincronía entre las series de anillos por medio del cálculo de la correlación entre ellas, basándose en las mediciones del ancho de sus anillos y considerando segmentos de 50 años (acoplados en 25 años). Adicionalmente, desplaza cada serie 10 posiciones hacia un lado y 10 posiciones hacia el otro, con el objetivo de verificar que no exista una mejor correlación. De encontrarse una mejor correlación, el programa señala la cantidad de anillos que le faltan o que le sobran a cada serie. De esta manera, es posible corregir cualquier error que se pudiera haber cometido ante la presencia de anillos falsos o ante anillos de difícil distinción.

En el caso de la presente investigación, la información del ancho de los anillos fue suministrada por el programa WinDENDRO™, luego de efectuar la datación individual de cada muestra. Siguiendo las sugerencias de los análisis realizados con la herramienta COFECHA fue posible llegar a la correlación óptima entre las series y validar estadísticamente la datación de los anillos. De las 43 muestras de árboles, se escogieron las 10 que mejor correlacionaban con las demás para someterlas al análisis químico.

Preparación de las muestras para el análisis químico

Los anillos de las muestras seleccionadas fueron cortados cuidadosamente con cuchillos de cerámica y almacenados en tubos Eppendorf, con la identificación de la muestra y el año correspondiente. Para eliminar cualquier rastro de contaminación que pudiera haber derivado de la manipulación de las muestras en el laboratorio, los anillos fueron pulidos con una herramienta rotativa de punta de diamante.

Previo al análisis químico de las muestras y con el fin de posteriormente evaluar la coherencia de los resultados, estas muestras fueron divididas en dos grupos, distinguibles por el periodo en común que comparten sus anillos:

- Serie A: 1983-2014
- Serie B: 1930-2008²³

²³ En gran parte de las muestras que componen esta serie no fue posible distinguir los anillos recientemente formados.

Análisis químico

Finalmente, la concentración de elementos químicos en los anillos fue determinada a través de Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS, por sus siglas en inglés) en el Arizona Laboratory for Emerging Contaminants (ALEC), Tucson, Arizona, E.E.U.U. Todos los anillos correspondientes al mismo año y grupo fueron analizados como una unidad.

Dado que este tipo de tecnología requiere que las muestras se encuentren en estado líquido, fue necesario someter los anillos a un proceso de digestión previo, el cual constó de los siguientes pasos:

- i. Cada grupo de anillos fue depositado en tubos de masa conocida y posteriormente pesados, de manera de determinar la masa de los tubos con las muestras en su interior. Esto permitió calcular indirectamente la masa de los anillos restándole a la sumatoria entre las muestras y los tubos, la masa de los tubos respectivos.
- ii. A cada tubo se le agregó 3 mL de HNO_3 al 70% y se les dejó reposar durante la noche.
- iii. Luego, las muestras se digirieron a 90°C en una estufa bajo campana durante 1 hora.
- iv. Una vez transcurrido dicho tiempo se le agregó agua desionizada (H_2O_2) a los tubos, hasta completar un volumen de 15 mL en cada uno.
- v. Posteriormente, se volvieron a pesar los tubos con este nuevo contenido (digestato), con el objetivo de calcular los factores de dilución.
- vi. Por último, se tomaron 1,5 mL de digestato, se colocaron en tubos limpios y se diluyeron por un factor de 10 con agua desionizada, lo que permitió reducir el porcentaje de HNO_3 a un 2%.

Excepcionalmente, a causa de las altas concentraciones de Na, K y Ca encontradas en las muestras de la Serie A, y de K y Ca en las muestras de la Serie B, se decidió realizar una segunda digestión. Esto con el fin de evitar subestimaciones producto de la posibilidad de que dichos elementos no se hubieran disuelto apropiadamente tras la digestión inicial.

3.2.2. Análisis de datos

Para poder correlacionar la información contenida en los anillos con las mediciones atmosféricas llevadas a cabo en la estación Parque O'Higgins, fue necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1) Los elementos traza no necesariamente se acumulan en la madera con la misma frecuencia durante todo el año. En consecuencia, algunos meses pueden tener mayor influencia que otros en la concentración de éstos en los anillos.
- 2) Probablemente exista un desfase entre la deposición de los elementos y su acumulación en los anillos de crecimiento, especialmente si fueron absorbidos por medio de la raíces.

En vista de lo anterior, se recurrió a la Routine RespoAverage, desarrollada por Mariano Masiokas, la cual permitió identificar preliminarmente las relaciones entre los datos mensuales de material particulado (MP_{10} , $\text{MP}_{2,5}$ y componentes elementales del $\text{MP}_{2,5}$) y los datos de los anillos de crecimiento (Serie A y Serie B) en una ventana temporal de 41 meses, seleccionando el conjunto de datos en periodos móviles de 1 a 12 meses, comenzando en enero del segundo

año calendario anterior (t-2) y terminando en mayo del año dendrocronológico actual (t+1). Así, se logró considerar todas las combinaciones de meses posibles con un desfase de hasta 2 años. Por cada combinación de meses, la Routine RespoAverage tomó los datos mensuales de la estación Parque O'Higgins correspondiente al año y a los meses respectivos, y calculó su promedio. De esta manera, se obtuvo una serie de valores medios por año, los cuales fueron comparados con los datos de los anillos de crecimiento, en base al coeficiente de correlación de Pearson:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_{i+\varphi} - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_{i+\varphi} - \bar{y})^2}}$$

r : Coeficiente de correlación de Pearson.

x_i : Promedio de los datos de la estación Parque O'Higgins (MP₁₀, MP_{2,5} o elemento traza), según combinación de meses, correspondiente al año i .

$y_{i+\varphi}$: Concentración de elemento traza en anillo de crecimiento (Serie A o Serie B) correspondiente al año $i + \varphi$; con φ =desfase (0, 1 o 2 años).

$\bar{x}$: Promedio de todos los valores de x_i .

$\bar{y}$: Promedio de todos los valores de $y_{i+\varphi}$.

En la Tabla 10 se muestra un ejemplo de la solución que entregó la Routine RespoAverage para la relación entre la concentración de MP_{2,5} y la concentración de elementos traza en los anillos de la Serie A, tras analizar combinaciones de 3 meses y un desfase de 2 años.

Tabla 10. Solución Routine RespoAverage considerando periodos de 3 meses con un desfase de 2 años (en rojo correlaciones superiores a $\pm 0,40$)²⁴

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CORRS	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
55 Mn	-0,03	-0,13	0,11	0,28	0,13	-0,06	-0,41	-0,52	-0,46	-0,32	0,21	0,11
56 Fe	0,15	-0,04	-0,10	0,03	-0,05	-0,18	-0,51	-0,64	-0,53	-0,43	0,05	-0,03
59 Co	-0,04	-0,08	0,00	0,22	0,08	-0,04	-0,38	-0,51	-0,39	-0,30	0,16	-0,05
60 Ni	0,12	0,10	-0,11	0,09	0,02	0,01	-0,28	-0,43	-0,36	-0,14	0,22	-0,12
63 Cu	-0,07	0,30	0,30	0,28	0,17	0,17	0,39	0,56	0,73	0,37	0,05	-0,22
66 Zn	-0,07	0,15	0,38	0,43	0,12	-0,06	-0,25	-0,13	0,03	0,05	0,02	-0,32
75 As	-0,13	0,21	0,00	0,07	-0,19	-0,19	-0,07	0,12	0,34	0,05	0,10	0,17
78 Se	-0,11	-0,07	0,11	0,49	0,41	0,40	-0,04	-0,02	-0,02	0,42	0,69	0,31
95 Mo	0,24	0,20	0,22	0,23	0,15	0,02	-0,24	-0,30	-0,24	-0,23	0,08	-0,08
107 Ag	-0,75	-0,34	0,41	0,55	0,39	0,36	0,44	0,50	0,42	0,33	0,09	0,01
111 Cd	-0,27	0,14	0,13	0,32	0,00	-0,02	-0,07	0,12	0,32	0,26	0,24	0,03
118 Sn	0,02	0,15	-0,08	-0,01	0,12	0,28	0,35	0,21	0,16	0,06	0,26	0,21
121 Sb	0,47	0,37	0,04	-0,14	0,20	0,30	0,53	0,38	0,30	0,04	0,14	0,17
137 Ba	-0,52	-0,29	0,22	0,50	0,46	0,44	0,37	0,28	0,28	0,14	0,23	-0,01
208 Pb	-0,15	-0,25	0,22	0,28	0,05	-0,26	-0,52	-0,57	-0,44	-0,53	0,10	0,34

Para eliminar cualquier efecto que pudiera tener la magnitud y la unidad de las variables al momento de establecer relaciones, se escogieron aquellas combinaciones de meses que según la Routine RespoAverage daban mejores resultados, y se volvió a calcular el coeficiente de correlación de Pearson, pero esta vez en términos de sus anomalías estandarizadas:

²⁴ Cada número representa un mes (entre paréntesis se indica el desfase): 1=Enero(-2), 2=Febrero(-2), 3=Marzo(-2), 4=Abril(-2), 5=Mayo(-2), 6=Junio(-2), 7=Julio(-2), 8=Agosto(-2), 9=Septiembre(-2), 10=Octubre(-2), 11=Noviembre(-2), 12=Diciembre(-2), 13=Enero(-1), 14=Febrero(-1). La numeración continúa de la misma forma hasta el mes 41.

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_x}$$

z_i : Anomalía estandarizada del dato x_i .

x_i : Dato correspondiente al valor de la variable x para el año i .

$\bar{x}$: Promedio de todos los valores de x_i .

S_x : Desviación estándar.

El utilizar las anomalías de las variables permitió verificar su correlación no sólo numéricamente, sino que gráficamente también²⁵. En este sentido, para efectos de la presente investigación, se consideró como indicativo de la validez de la Dendroquímica como herramienta analítica de la evaluación de la contaminación en Santiago, todo resultado que dio cuenta de una correlación de Pearson entre las variables superior a $\pm 0,6$ (correlación alta o muy alta), demostrable gráficamente.

El periodo de análisis en cada caso estuvo determinado por la disponibilidad de datos, tal cual se señala en la Tabla 11. Lamentablemente, la falta de información con respecto a la concentración de determinados elementos traza en el MP_{2,5}, provocó en algunas situaciones que este periodo se viera reducido.

Tabla 11. Periodo de análisis según disponibilidad de datos

Grupo de muestras de madera	Variable a comparar	Periodo de análisis
Serie A	Concentración de elementos traza en MP _{2,5}	1998-2012
	Concentración de MP _{2,5}	1998-2012
	Concentración de MP ₁₀	1998-2014
Serie B	Concentración de elementos traza en MP _{2,5}	1998-2008
	Concentración de MP _{2,5}	1998-2008
	Concentración de MP ₁₀	1998-2008

Paralelamente, se calculó también el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas series de árboles, considerando los datos correspondientes al periodo entre 1998 y 2008, de manera de evaluar si los resultados pueden ser replicables para otras muestras de *Cedrus libani*.

²⁵ Las anomalías son adimensionales y permiten trabajar con las variables en un mismo orden de magnitud, siendo posible verificar visualmente si siguen la misma tendencia.

4. Resultados

En esta sección se dan a conocer los principales resultados de la investigación. Cabe señalar que se ha decidido profundizar exclusivamente en aquellas relaciones entre las mediciones atmosféricas y los datos de los árboles que mostraron una correlación de Pearson superior a $\pm 0,6$, o que presentaron correlaciones moderadas, pero mostrando una variabilidad similar. Todos los resultados que no cumplen con estas características se pueden ver con mayor detalle en el Anexo C.

Dado que se tienen dos conjuntos de datos para las concentraciones de K y Ca en los anillos de crecimiento (valores iniciales y valores obtenidos tras la digestión extra), se optó por analizar ambos escenarios. Lo mismo aplica para el Na en el caso particular de la Serie A.

En la Tabla 12, por su parte, se muestra el resultado de comparar los datos de la Serie A con los datos de la Serie B. Como se puede ver, el Ni es el único elemento que dio cuenta de una correlación superior a 0,6 entre las dos series de árboles, seguido por el Cu que presentó una correlación moderada. Para una mejor apreciación de las similitudes en la variabilidad de las concentraciones de estos elementos, ver Figura 30 y Figura 31.

Tabla 12. Correlación entre ambas series de árboles ([1]: valor inicial, [2]: valor corregido)

Elemento	Coef. de Correlación
Na[1]	-0,011
Na[2]	-0,110
Mg	0,294
Al	0,081
K[1]	0,222
K[2]	-0,165
Ca[1]	0,313
Ca[2]	-0,174
V	0,168
Cr	0,048
Mn	0,364
Fe	-0,160
Co	0,126
Ni	0,610
Cu	0,408
Zn	0,164
As	0,134
Se	0,085
Mo	0,222
Ag	0,177
Cd	-0,016
Sn	0,057
Ba	0,284
Pb	0,067

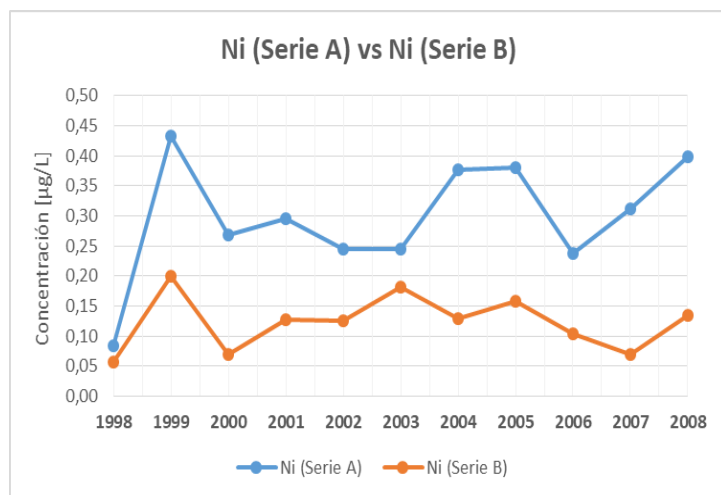


Figura 30. Relación en la concentración de Ni entre ambas series de árboles

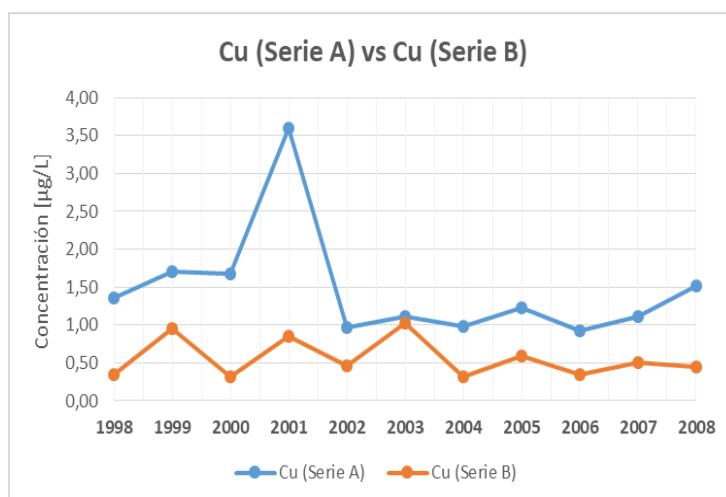


Figura 31. Relación en la concentración de Cu entre ambas series de árboles

4.1. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ en el aire y la acumulación de elementos químicos en los anillos de crecimiento

La concentración de $MP_{2,5}$ tuvo una marcada estacionalidad, registrando valores en los meses de otoño e invierno notoriamente superiores a los meses de primavera y verano (ver Figura 32).

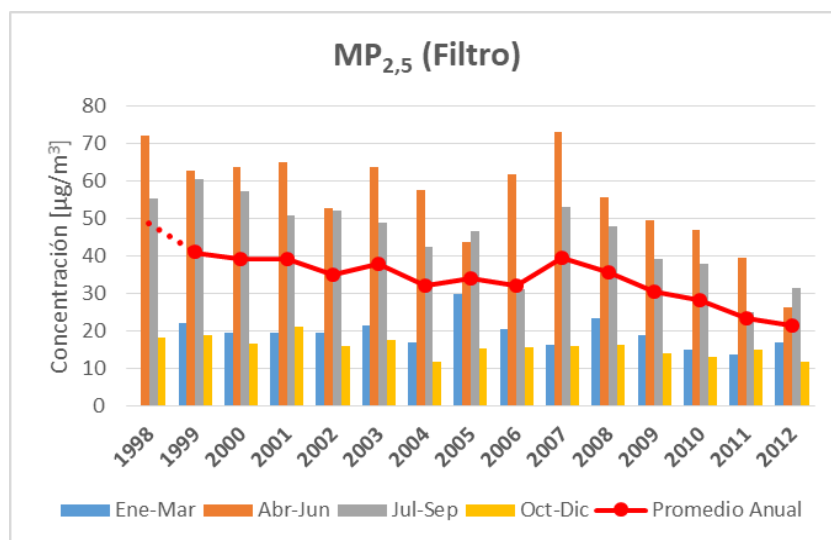


Figura 32. Variación estacional de la concentración de $MP_{2,5}$ en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Al menos en una de las dos series, todos los elementos analizados en los anillos de crecimiento, 21 en total, presentaron correlaciones superiores a $\pm 0,6$ con la concentración de $MP_{2,5}$, a excepción del estaño (Sn).

4.1.1. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Na en los anillos de crecimiento

En la Figura 33 se muestra el resultado de correlacionar la concentración de Na en los anillos de crecimiento de la Serie A (valor sin digestión extra), con la concentración de $MP_{2,5}$. Como se puede ver existió una buena correlación entre las variables cuando se consideraron solamente aquellos datos de $MP_{2,5}$ correspondientes a los meses de Abril a Junio, con un desfase de dos años ($r=0,75$). Al considerar los valores corregidos de Na, la correlación con el $MP_{2,5}$ mejoró aún más ($r=0,85$), no obstante, en este caso los meses que mejor correlacionaron fueron los meses de Septiembre a Noviembre con un desfase de un año (ver Figura 34).

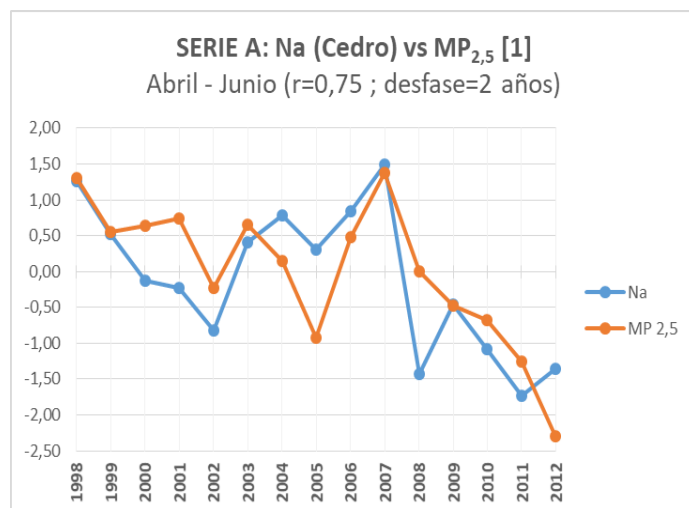


Figura 33. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Na en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

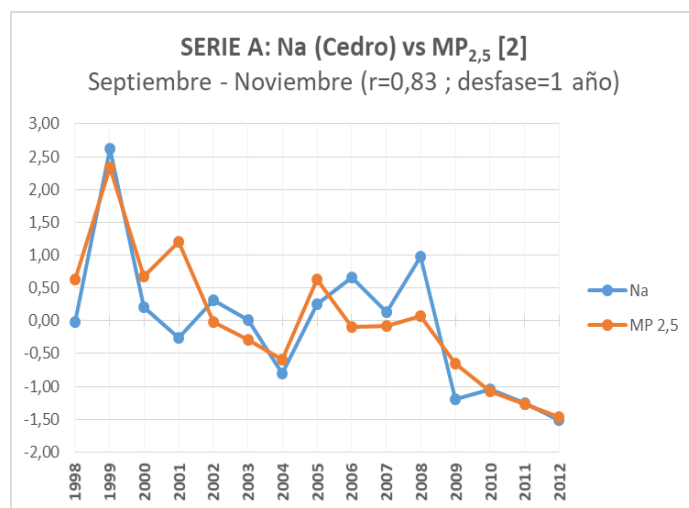


Figura 34. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Na en los anillos de la Serie A (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

Similarmenete, la concentración de Na en los anillos de la Serie B correlacionó de buena manera con los meses de Septiembre a Diciembre ($r=0,86$), pero con 2 años de desfase (ver Figura 35).

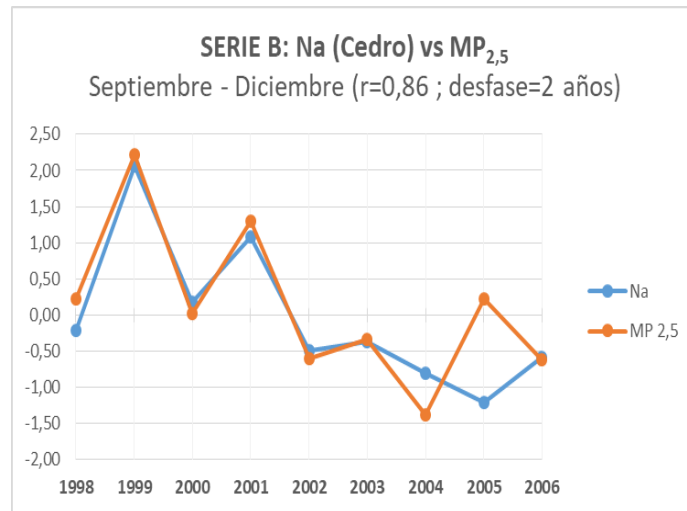


Figura 35. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Na en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.2. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Mg en los anillos de crecimiento

Al igual que con los valores no corregidos de Na, las concentraciones de MP_{2,5} asociadas a los meses Abril a Junio tuvieron una buena correlación con los datos de Mg correspondientes a los anillos de la Serie A ($r=0,67$), considerando un desfase de 2 años (ver Figura 36).

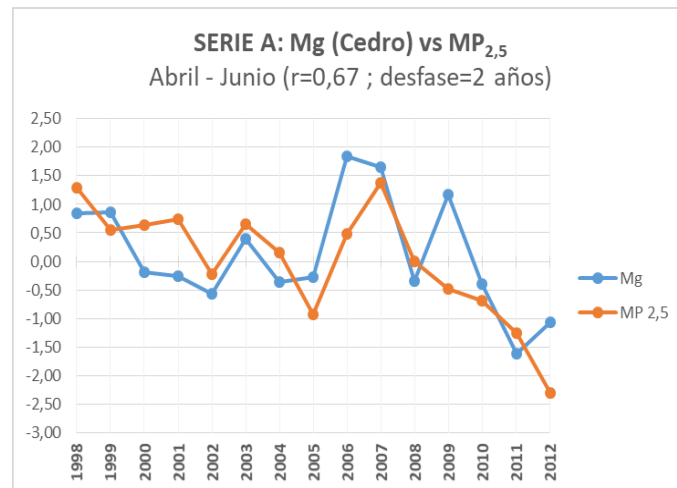


Figura 36. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Mg en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

Consistente con lo anterior, en la Serie B la concentración de Mg se relacionó con los datos de los meses de Febrero a Junio, también con un desfase de 2 años (ver Figura 37).

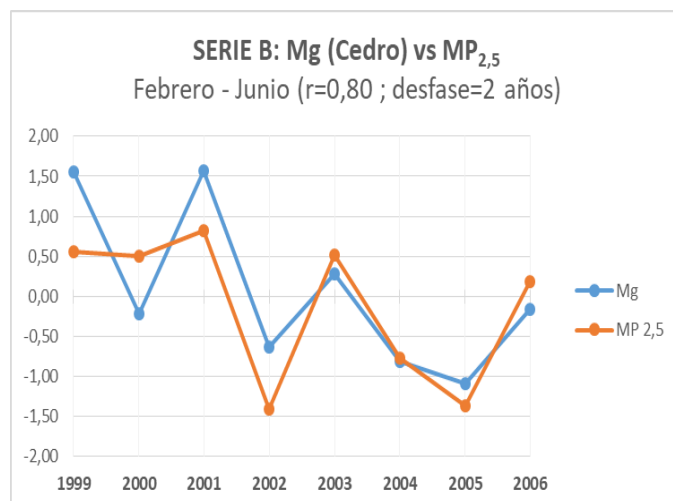


Figura 37. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mg en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.3. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Al en los anillos de crecimiento

Aunque las concentraciones de Al en los anillos de la Serie A y de la Serie B se relacionaron en torno a datos mensuales de $MP_{2,5}$ en común (con un mismo desfase), las características de dichas relaciones fueron totalmente distintas. En la Serie A el Al demostró un coeficiente de correlación positivo e igual a 0,62, mientras que para la Serie B, un coeficiente de correlación negativo de -0,88 (ver Figura 38 y Figura 39).

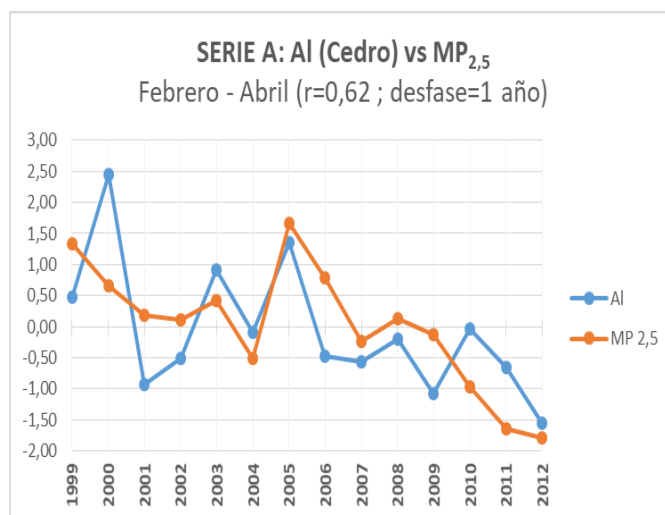


Figura 38. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Al en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

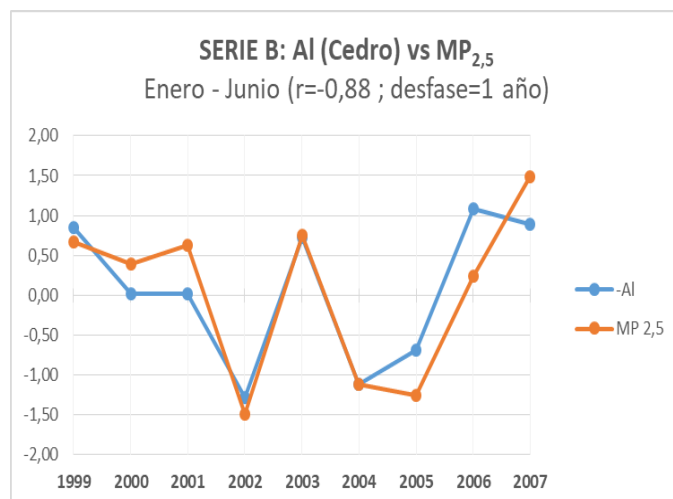


Figura 39. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de AI en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.4. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de K en los anillos de crecimiento

Al corregir las concentraciones del K acumulado en los anillos de la Serie A, no hubo grandes cambios en el resultado. En los dos escenarios los resultados indicaron que existe una relación inversa entre la concentración de MP_{2,5}, correspondiente al periodo verano-otoño, y la acumulación de K en los árboles, sin ningún año de desfase (ver Figura 40 y Figura 41).

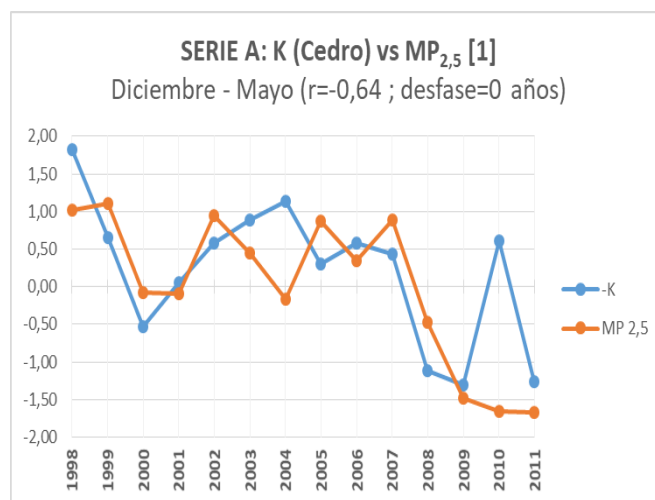


Figura 40. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de K en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

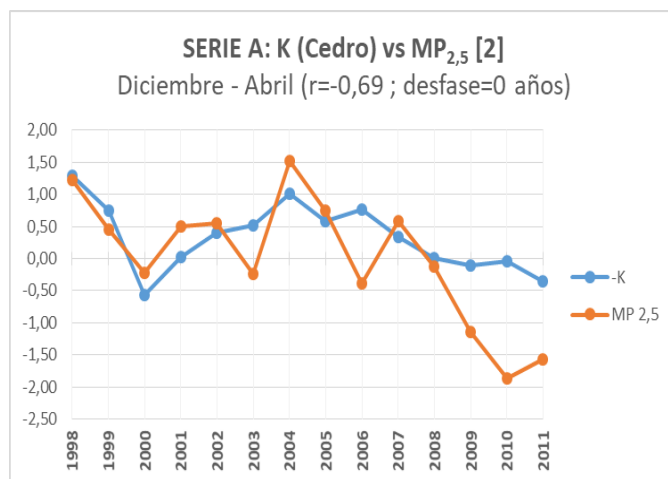


Figura 41. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de K en los anillos de la Serie A (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

Por el contrario, los resultados de la Serie B para los diferentes valores de K solamente coincidieron en el desfase (2 años), y no fueron coherentes con los resultados de la Serie A, sin embargo, presentaron mayores coeficientes de correlación. Un escenario señaló una relación positiva entre las variables y el otro una relación inversa (ver Figura 42 y Figura 43).

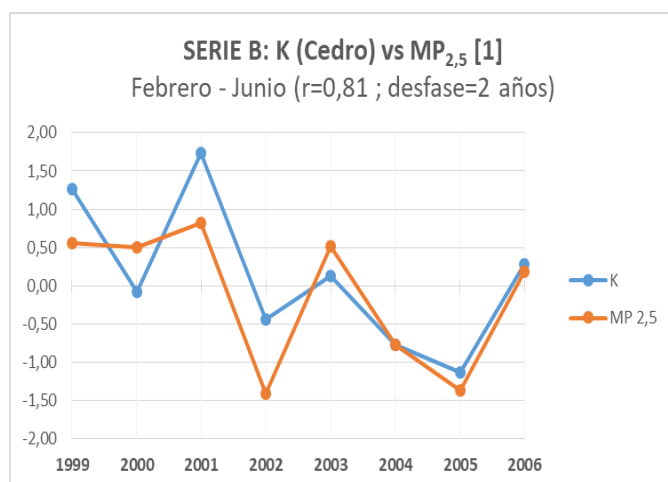


Figura 42. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de K en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

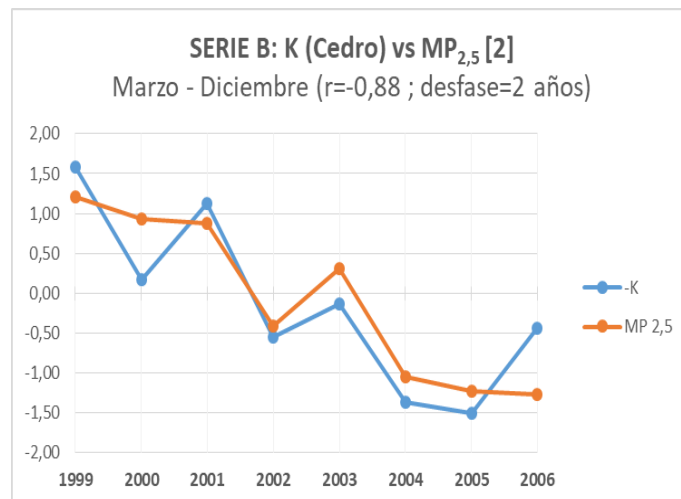


Figura 43. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de K en los anillos de la Serie B (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.5. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ca en los anillos de crecimiento

Opuesto a lo sucedido con la concentración de Na en los anillos de la Serie A, los valores corregidos de Ca, correspondientes a la misma serie, dieron cuenta de una menor correlación con el $MP_{2,5}$ que los valores no corregidos. Por otra parte, el resultado para cada escenario fue totalmente contrario uno a otro. Difirieron en el tipo de relación que se estableció con la fracción fina del material particulado, y en el desfase. Solamente coincidieron con respecto al mes de abril (ver Figura 44 y Figura 45).

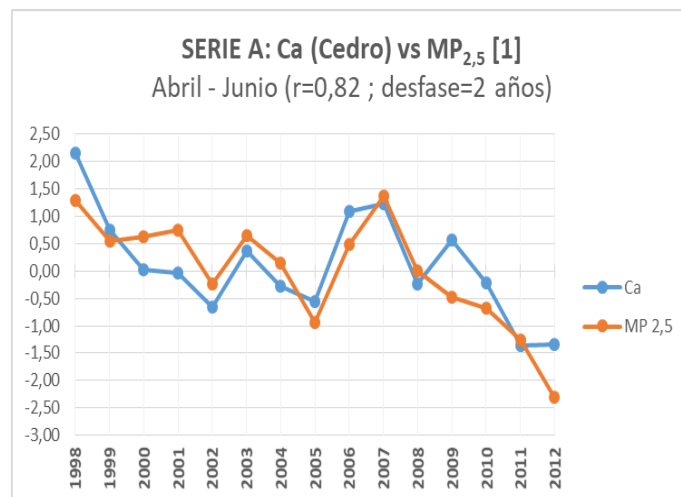


Figura 44. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

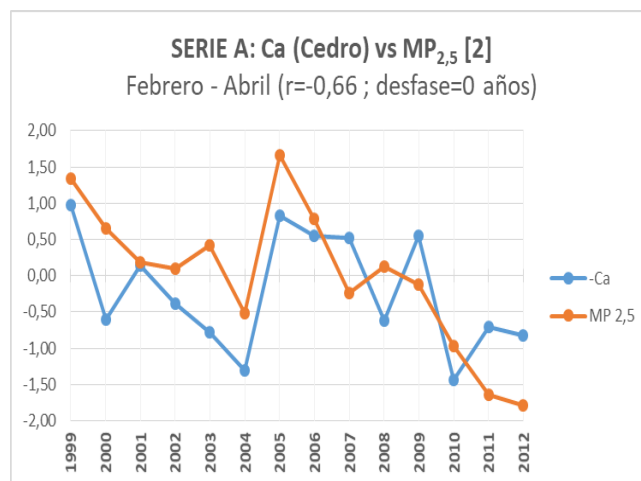


Figura 45. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie A (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

Lo mismo sucedió al comparar los diferentes conjuntos de datos de Ca asociados a la Serie B. No obstante, a pesar de las diferencias, en ambos escenarios las concentraciones de Ca acumulados en los anillos de la Serie B presentaron excelentes correlaciones con el MP_{2,5} (ver Figura 46 y Figura 47).

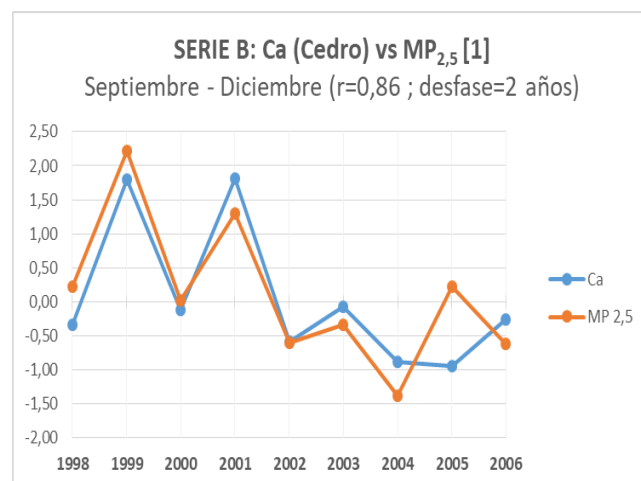


Figura 46. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

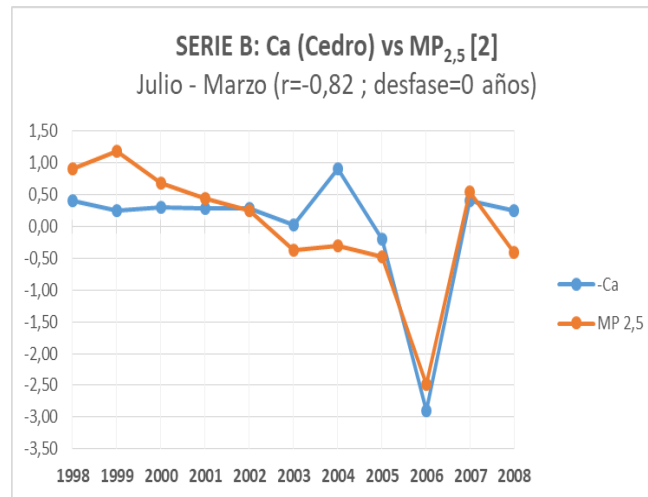


Figura 47. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie B (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1).

4.1.6. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de V en los anillos de crecimiento

La concentraciones de V en los anillos de la Serie A presentaron una correlación inferior a 0,6 con los datos de MP_{2,5} para los meses de Octubre a Diciembre ($r=0,56$), aunque la variabilidad fue similar. Lo más destacable de este resultado es que ambas variables mostraron un máximo en el año 2001 (ver Figura 48).

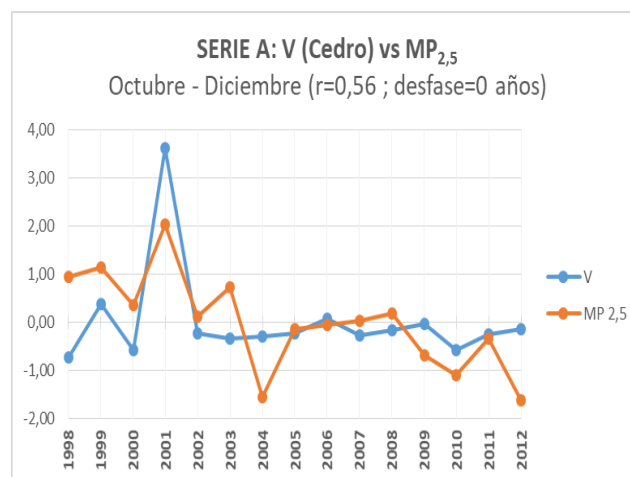


Figura 48. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de V en los anillos de la Serie A

En la serie B las variables tuvieron una correlación más fuerte, pero inversa ($r=-0,74$). En este caso la relación se estableció con los datos mensuales correspondientes a los meses de Enero a Junio, con un año de desfase (ver Figura 49).

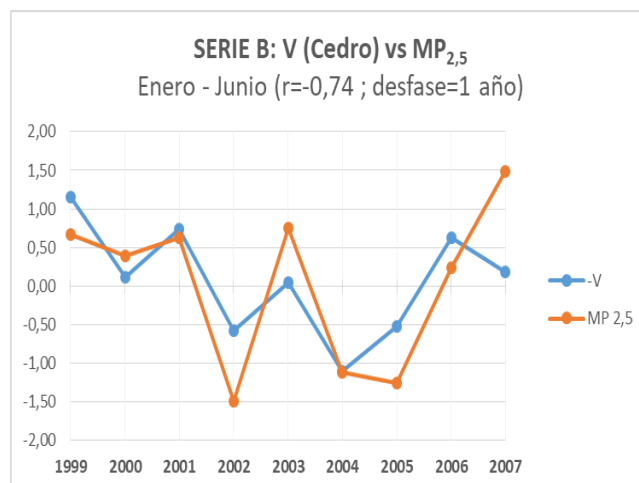


Figura 49. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de V en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.7. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Cr en los anillos de crecimiento

La concentración de Cr, tanto en la Serie A como en la Serie B, mostró su mejor correlación con el MP_{2,5} en los meses de Octubre a Diciembre. La diferencia radicó en que en la Serie A la relación fue inversa y sin desfase, mientras que en la serie B, la relación fue positiva, pero con dos años de desfase (ver Figura 50 y Figura 51).

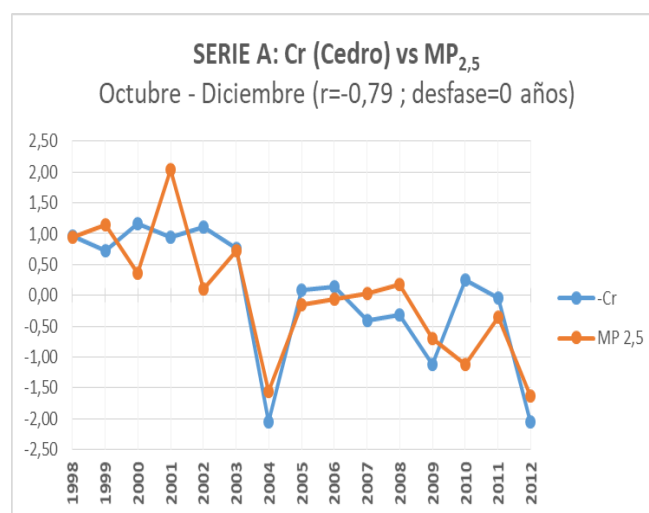


Figura 50. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Cr en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

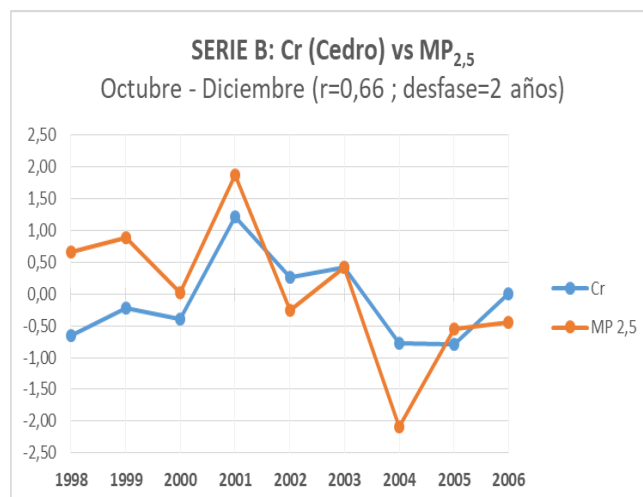


Figura 51. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Cr en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.8. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Mn en los anillos de crecimiento

Similar al caso anterior, el Mn presente en los anillos de la Serie A correlacionó negativamente con el MP_{2,5} ($r=-0,63$), sin ningún desfase, en tanto que el Mn asociado a los anillos de la Serie B correlacionó positivamente ($r=0,89$), con un desfase de 2 años (ver Figura 52 y Figura 53).

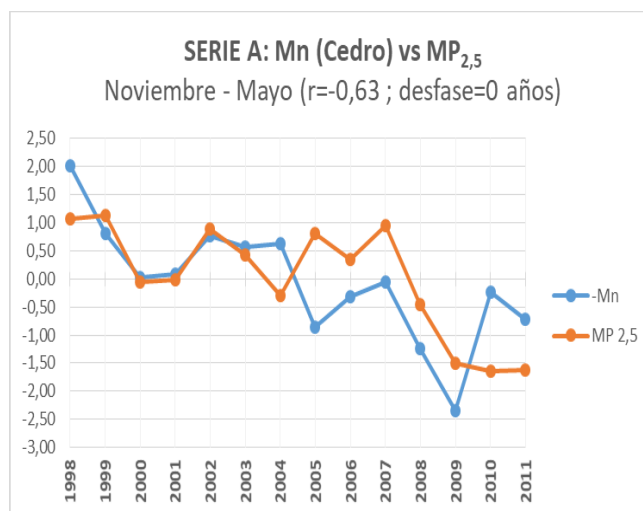


Figura 52. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Mn en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

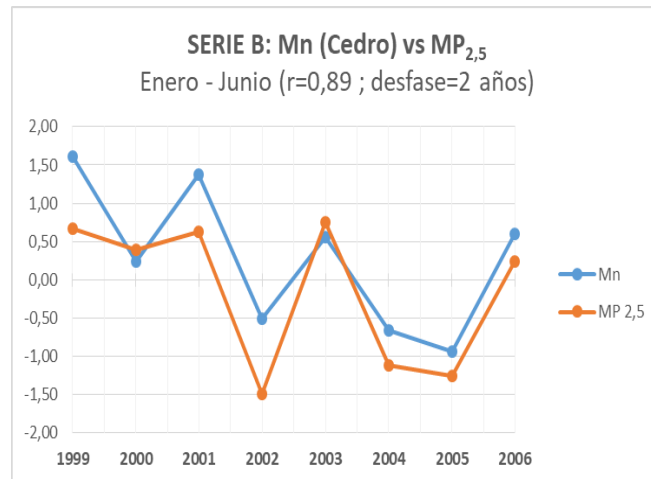


Figura 53. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Mn en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.9. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Fe en los anillos de crecimiento

La concentración de Fe en los anillos de la Serie A también presentó una correlación negativa y sin desfase con el MP_{2,5}, pero con los meses de Agosto a Mayo (ver Figura 54).

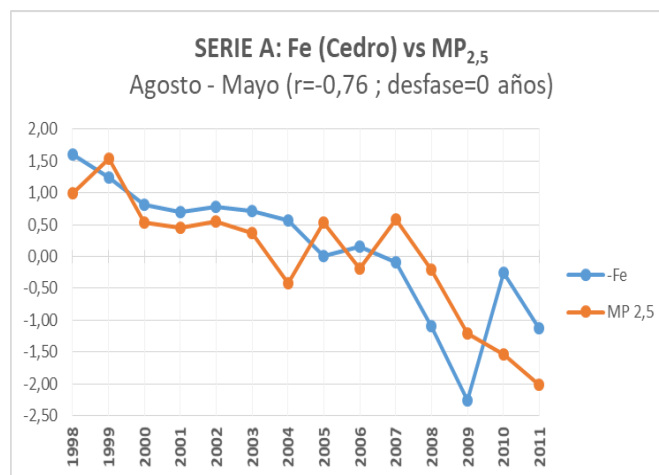


Figura 54. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Fe en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

Por su parte, el Fe acumulado en los anillos de la Serie B correlacionó mejor con los datos de los meses de Octubre a Diciembre, con dos años de desfase, al igual que el Cr (ver Figura 55).

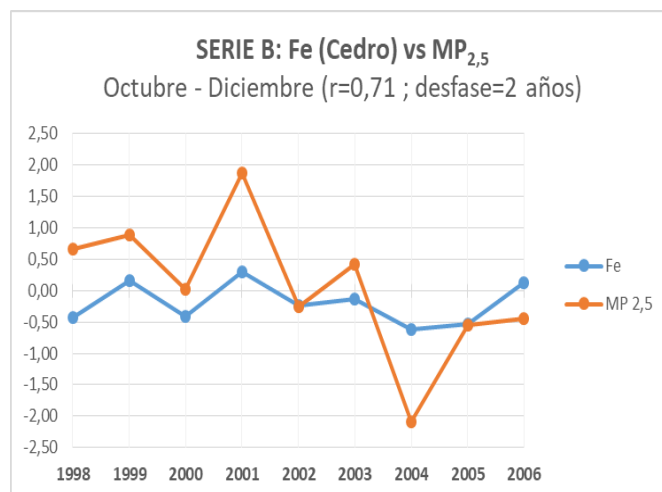


Figura 55. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Fe en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.10. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Co en los anillos de crecimiento

Tanto en la Serie A como en la Serie B, el Co estableció una relación inversa con los datos MP_{2,5} correspondientes a los meses de verano y otoño (ver Figura 56 y Figura 57). Mientras en la Serie A no se evidenció desfase, en la Serie B se registró un desfase de un año.

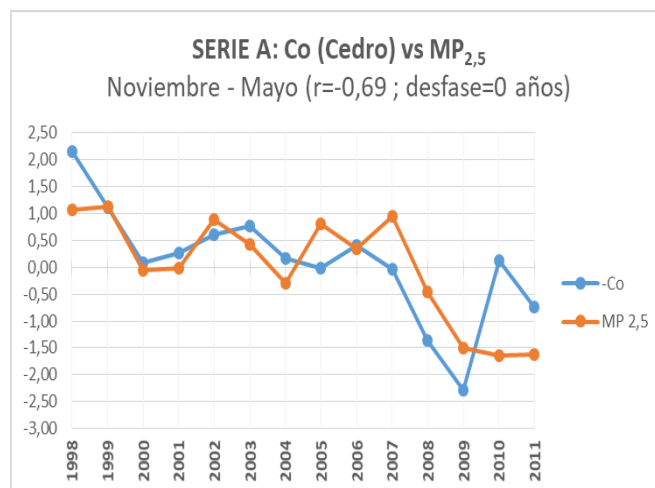


Figura 56. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Co en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

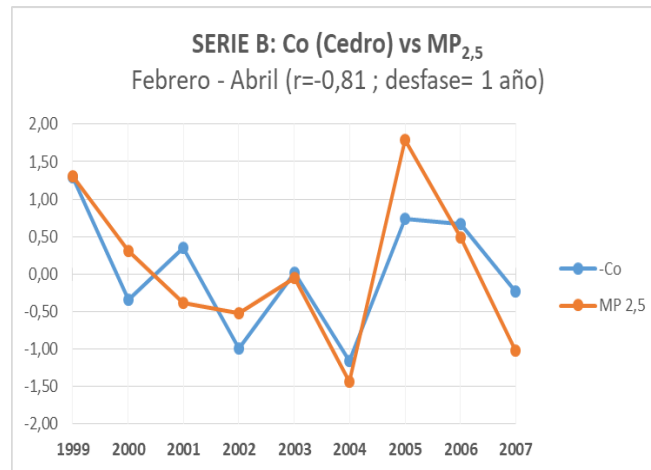


Figura 57. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Co en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.11. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Ni en los anillos de crecimiento

Si bien en la Serie A el Ni presentó una correlación menor a 0,6 con el MP_{2,5}, en el periodo de 1998-2006 el comportamiento de ambas variables fue bastante parecido (ver Figura 58).

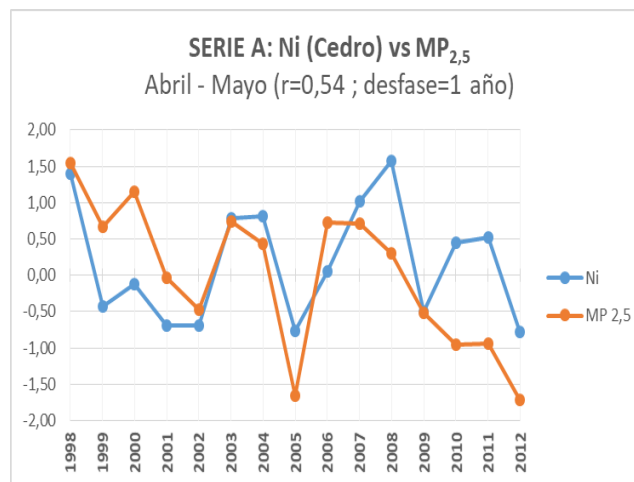


Figura 58. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Ni en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

Aunque en la Serie A y en la Serie B la mejor relación se dio con respecto a los meses otoñales (con un año de desfase), los resultados de ambas series fueron opuestos. Los resultados de la Serie A sugieren una relación positiva entre las variables, en tanto que los resultados de la Serie B sugieren una relación inversa (ver Figura 59).

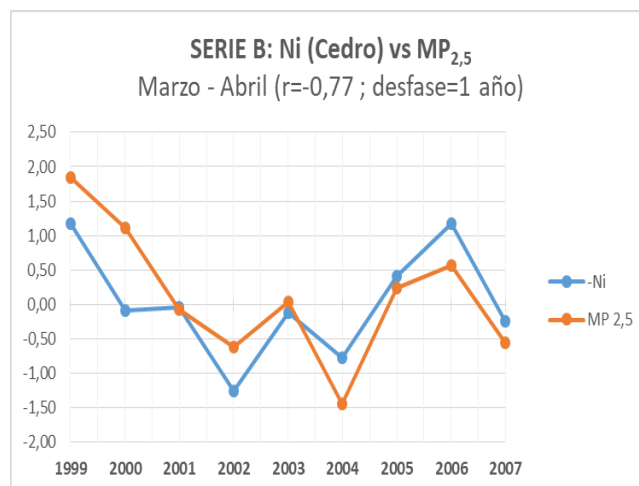


Figura 59. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Ni en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.12. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Cu en los anillos de crecimiento

En el caso del Cu, las correlaciones con el MP_{2,5} para la Serie A y la Serie B fueron similares. La concentración de Cu en los anillos se relacionó con los datos de los meses de primavera, considerando un desfase de dos años (ver Figura 60 y Figura 61).

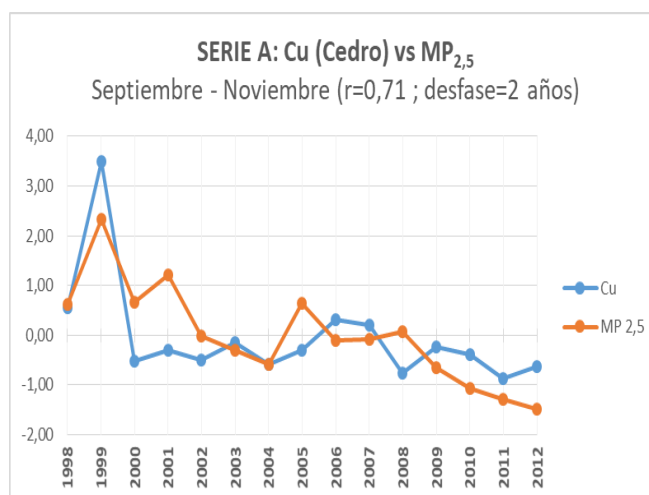


Figura 60. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Cu en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

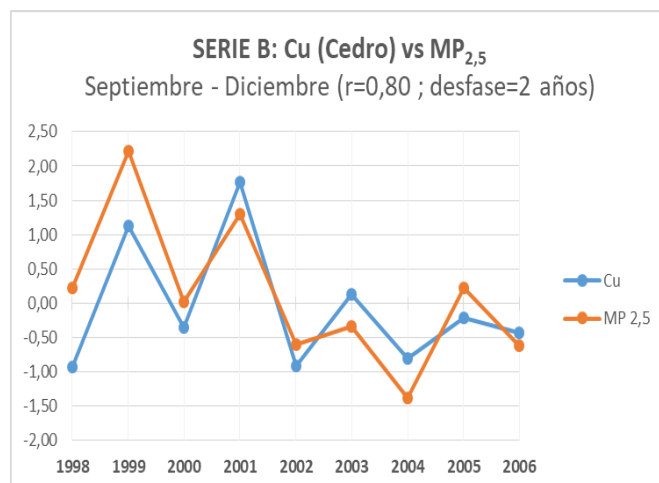


Figura 61. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Cu en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.13. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Zn en los anillos de crecimiento

La mejor correlación entre la concentración de MP_{2,5} y la concentración de Zn en los anillos de la Serie A, ocurrió entre los meses de Marzo a Julio, con un año de desfase (ver Figura 62).

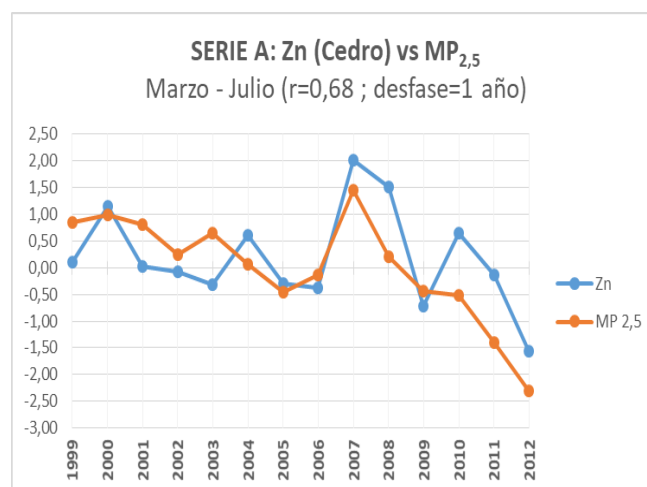


Figura 62. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Zn en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

Los resultados de la Serie B, por su parte, indicaron que los datos de MP_{2,5} que mejor correlacionan con el Zn acumulado en los árboles, son los correspondientes a los meses de Noviembre a Diciembre, sin ningún año de desfase (ver Figura 63).

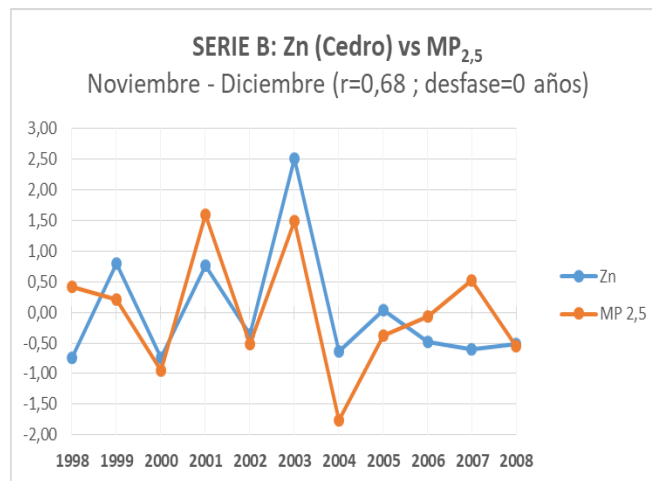


Figura 63. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Zn en los anillos de la Serie B

Pese a las diferencias, en las dos situaciones el coeficiente de correlación de Pearson fue igual a 0,68.

4.1.14. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de As en los anillos de crecimiento

Las concentraciones de As en los anillos de la Serie A y de la Serie B se relacionaron con el MP_{2,5} en los meses de verano y otoño, sin ningún desfase temporal (ver Figura 64 y Figura 65).

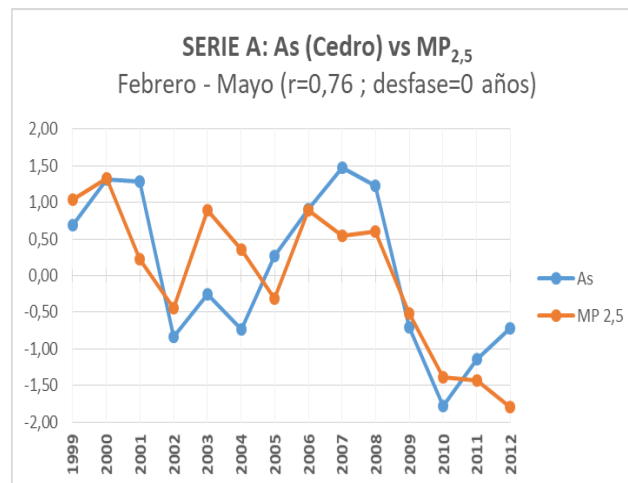


Figura 64. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de As en los anillos de la Serie A

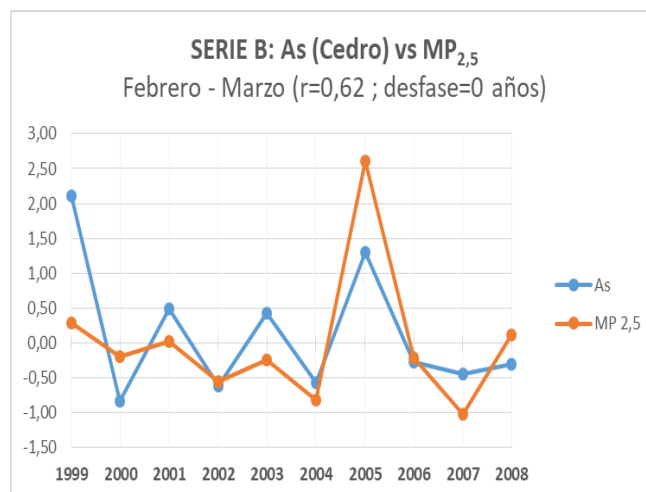


Figura 65. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de As en los anillos de la Serie B

4.1.15. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Se en los anillos de crecimiento

La concentración de Se en los anillos de la Serie A mostró una correlación baja con el MP_{2,5}, dando cuenta de coeficientes de correlación menores a 0,4. Por el contrario, los resultados de la Serie B indicaron que existe una relación inversa entre la concentración de Se y los datos de MP_{2,5} asociados a los meses de Febrero a Agosto, con un año de desfase (ver Figura 66).

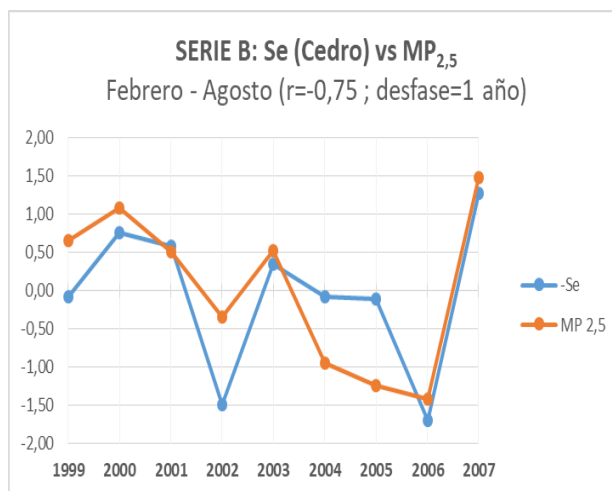


Figura 66. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Se en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.16. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mo en los anillos de crecimiento

Al igual que para el caso del Se, no fue posible encontrar relación entre la concentración de Mo en los anillos de la Serie A y los datos de $MP_{2,5}$. Sin embargo, el Mo acumulado en los anillos de la Serie B correlacionó de muy buena manera con los datos de $MP_{2,5}$ correspondientes a los meses de Julio a Enero, con un año de desfase, dando cuenta de una relación inversa entre las variables (ver Figura 67).

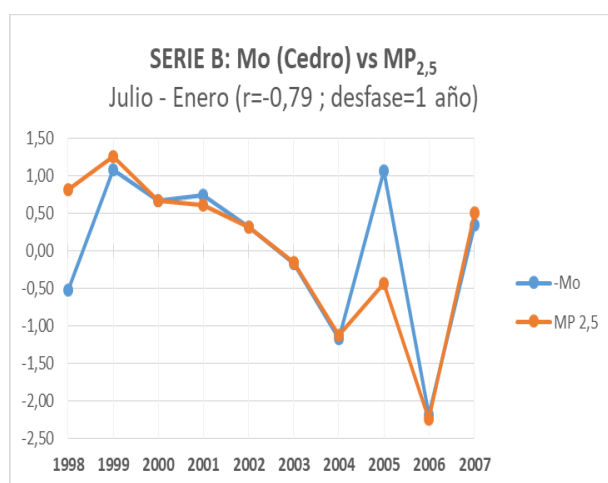


Figura 67. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mo en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.17. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ag en los anillos de crecimiento

La concentración de Ag en la Serie A tuvo una excelente correlación con los datos de $MP_{2,5}$ asociados a los meses de Septiembre y Noviembre, sin desfase alguno (ver Figura 68).

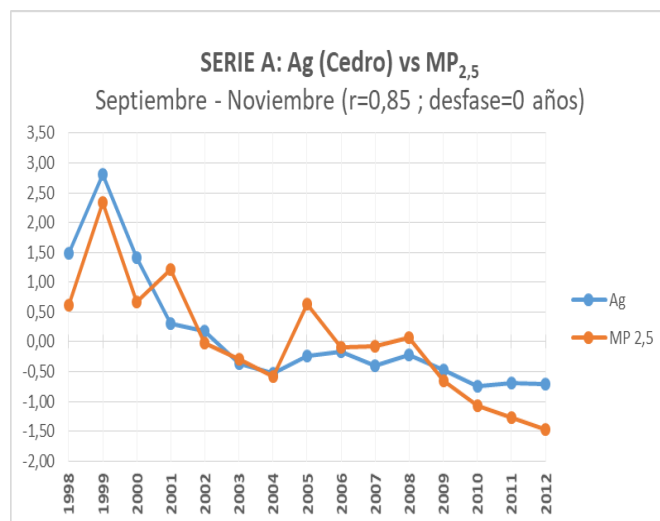


Figura 68. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ag en los anillos de la Serie A

En la Serie B, por otra parte, la mejor relación se manifestó en los meses de Septiembre a Marzo e implicó un desfase de dos años (ver Figura 69).

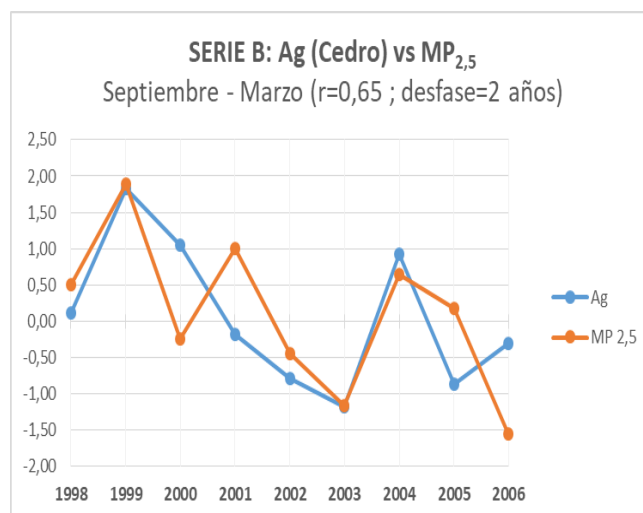


Figura 69. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ag en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.18. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Cd en los anillos de crecimiento

Tanto en la Serie A como en la Serie B, las concentraciones de Cd correlacionaron de buena forma con el $MP_{2,5}$. Mientras en la Serie A la relación se estableció con los datos correspondientes a los meses de Agosto a Noviembre, sin desfase, en la Serie B la relación se estableció con los datos de Agosto a Enero, con dos años de desfase (ver Figura 70 y Figura 71).

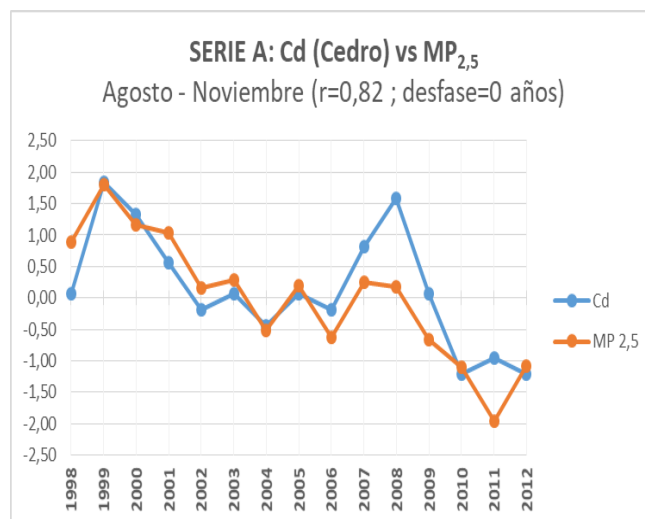


Figura 70. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Cd en los anillos de la Serie A

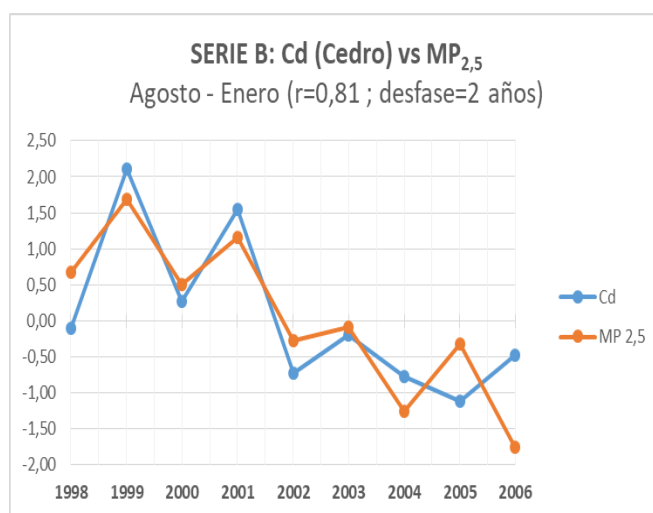


Figura 71. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Cd en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.19. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Sn en los anillos de crecimiento

No hubo éxito al relacionar la concentración de Sn en los anillos de la Serie A con los datos mensuales de MP_{2,5}, y aunque en la Serie B se encontró cierta relación con respecto a los meses de Octubre a Febrero (con un año de desfase), el coeficiente de correlación obtenido no superó los 0,6 (ver Figura 72).

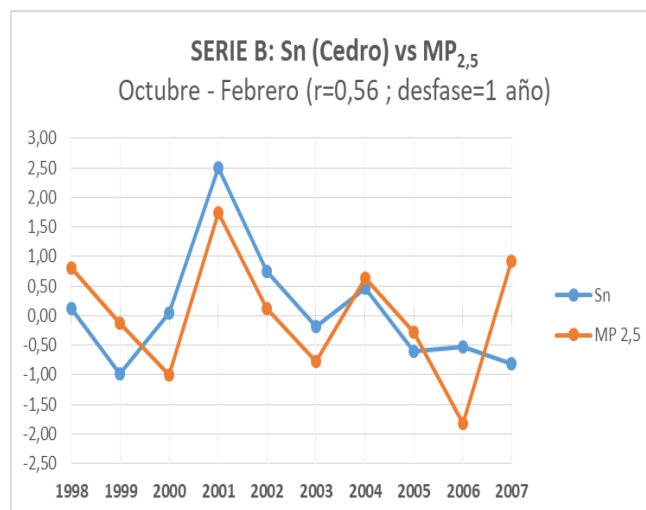


Figura 72. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Sn en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.20. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Ba en los anillos de crecimiento

En el caso de la concentración de Ba en los anillos de la Serie A, la mejor correlación se obtuvo con los datos correspondientes a los meses de Julio a Septiembre (con un año de desfase), en tanto que en los anillos de la Serie B, con los datos de los meses de Octubre a Diciembre (con dos años de desfase). En ambas series el coeficiente de correlación fue de 0,73, sin embargo, fue la Serie B la que se ajustó de mejor manera a la variación anual del MP_{2,5} (ver Figura 73 y Figura 74).

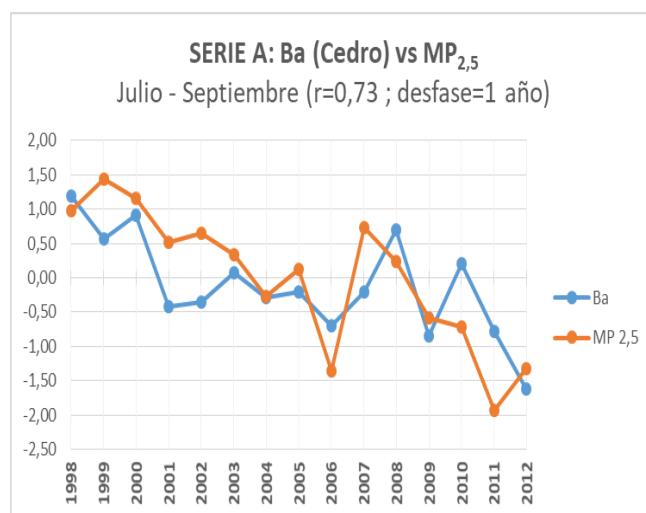


Figura 73. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Ba en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

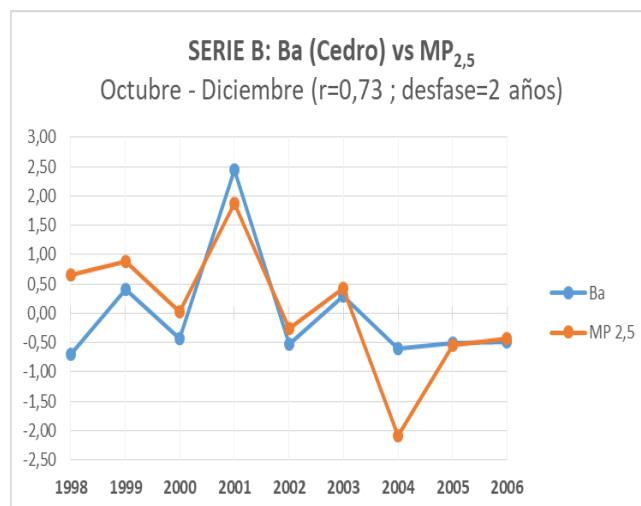


Figura 74. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Ba en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.1.21. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Pb en los anillos de crecimiento

Pese a que en la Serie A el Pb no mostró una buena correlación con los datos del MP_{2,5}, en la Serie B se observó una relación inversa con los datos asociados a los meses de Enero a Mayo, con un año de desfase (ver Figura 75).

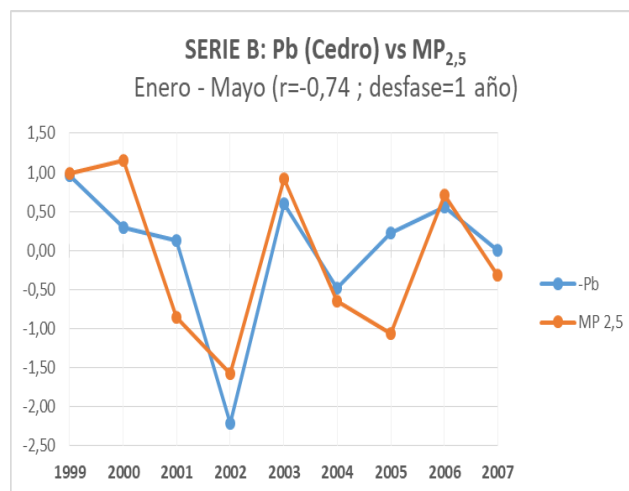


Figura 75. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Pb en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.2. Relación entre la concentración de elementos químicos en el $MP_{2,5}$ y la acumulación de los mismos elementos en los anillos de crecimiento

Se descartaron del análisis aquellos elementos que tenían más de un 20% de datos faltantes, vale decir, Co, Ag, Cd y Ba. Del resto de los elementos, Na, Mg, Al, Ca, V, Sn y Pb presentaron correlaciones inferiores a 0,6. Cabe mencionar que en este caso se excluyeron todos los resultados que sugerían una relación negativa entre las variables, ya que no eran consistentes con el supuesto de que la química del árbol es un reflejo de la química del ambiente, que es lo que finalmente se busca probar a través de esta investigación.

4.2.1. Relación entre la concentración de Mg en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

Generalmente, la concentración de magnesio en el $MP_{2,5}$ es mayor durante los meses de verano, con importantes contribuciones en primavera y otoño también, tal cual se puede observar en la Figura 76.

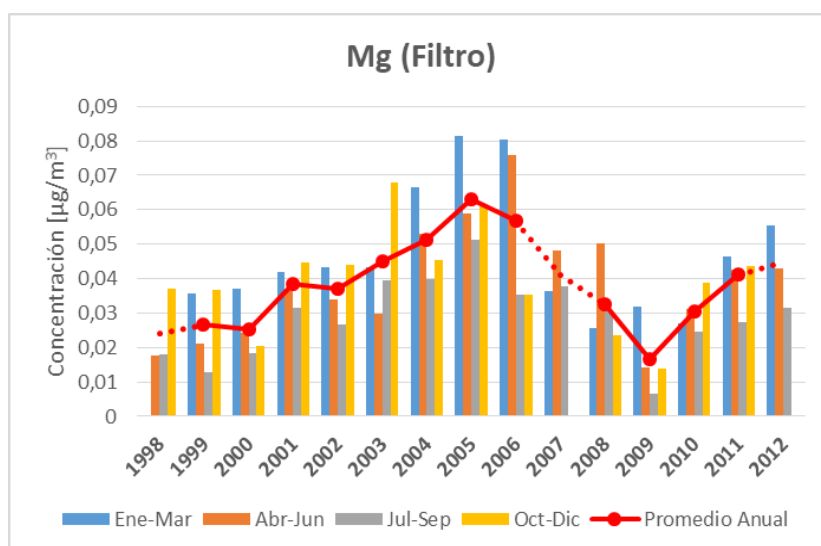


Figura 76. Variación estacional de la concentración de Mg (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

En concordancia con lo anterior, el Mg acumulado en los anillos de la Serie B mostró su mejor correlación con los datos correspondientes a los meses de Octubre a Diciembre, sin ningún desfase. A pesar de que esta correlación es inferior a 0,6, es posible ver cierta similitud en las gráficas entre los años 2000 y 2006 (ver Figura 77). La concentración de Mg en los anillos de la Serie A, por su parte, no dio cuenta de relación alguna con el Mg presente en el $MP_{2,5}$.

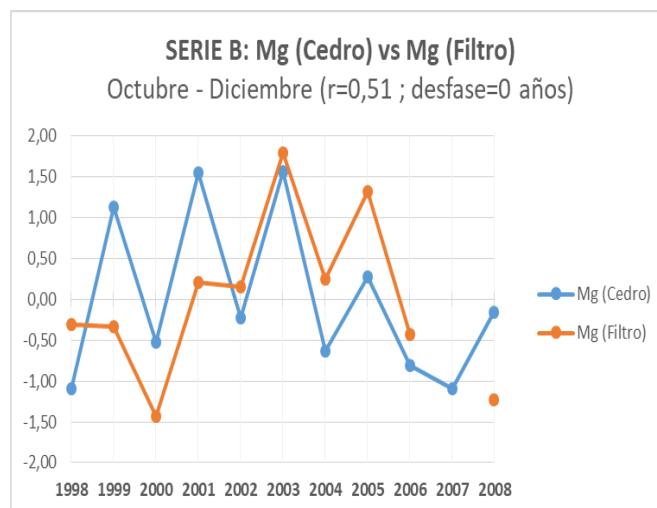


Figura 77. Relación entre la concentración de Mg en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

4.2.2. Relación entre la concentración de K en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

En el caso del potasio, éste alcanzó sus máximas concentraciones en el $MP_{2,5}$ durante los meses de otoño (ver Figura 78). Sin embargo, los valores que se registraron el resto de los meses no son despreciables.

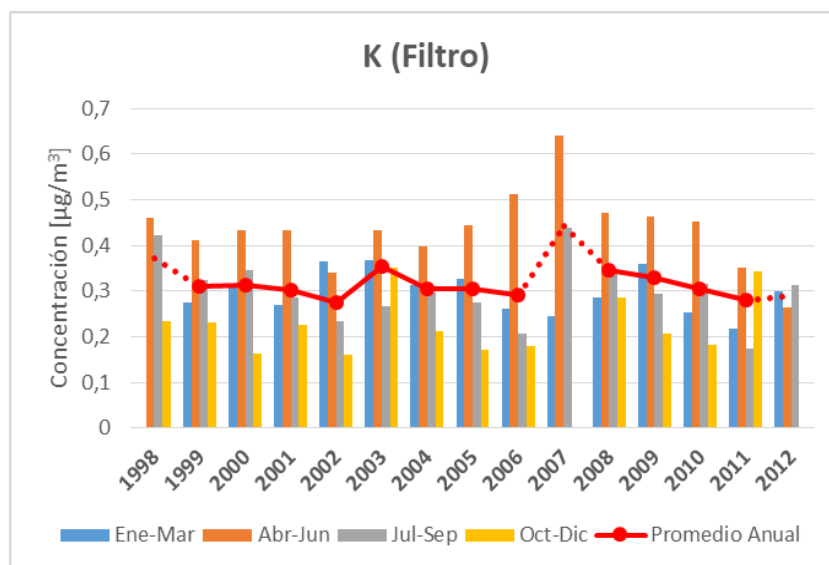


Figura 78. Variación estacional de la concentración de K (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Lamentablemente, no fue posible correlacionar la concentración de K en el $MP_{2,5}$ con los valores no corregidos de K asociados a la Serie A. No obstante, al trabajar con los valores corregidos, se encontró que éstos tenían relación con los datos de los meses de Abril a Octubre, sin desfase alguno (ver Figura 79).

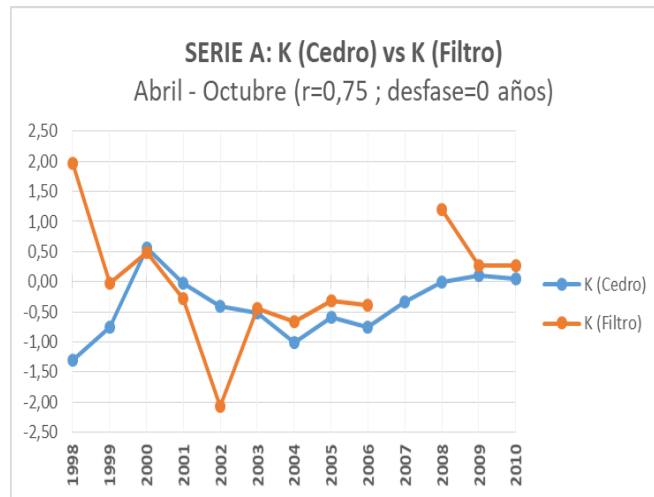


Figura 79. Relación entre la concentración de K en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A (Corrección)

En cuanto a la concentración de K acumulado en los anillos de la Serie B, se identificaron correlaciones para ambos escenarios (valores corregidos y no corregidos). Mientras los valores no corregidos se correlacionaron con los datos correspondientes a los meses de Noviembre a Marzo, sin desfase (ver Figura 80), los valores corregidos mostraron su mejor correlación con los datos de los meses de Noviembre a Junio, con un año de desfase (Figura 81).

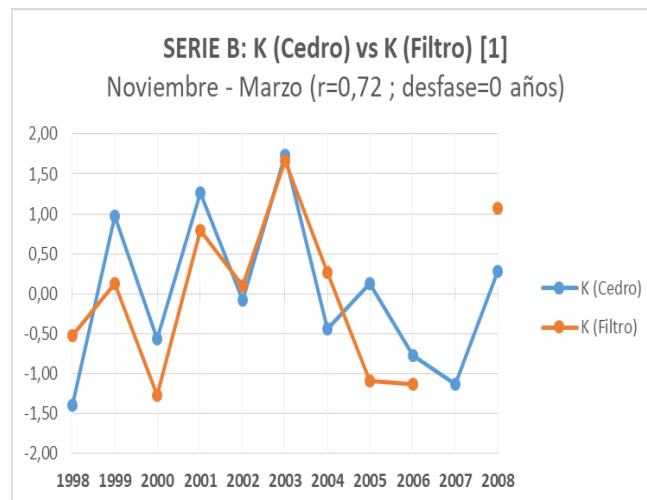


Figura 80. Relación entre la concentración de K en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

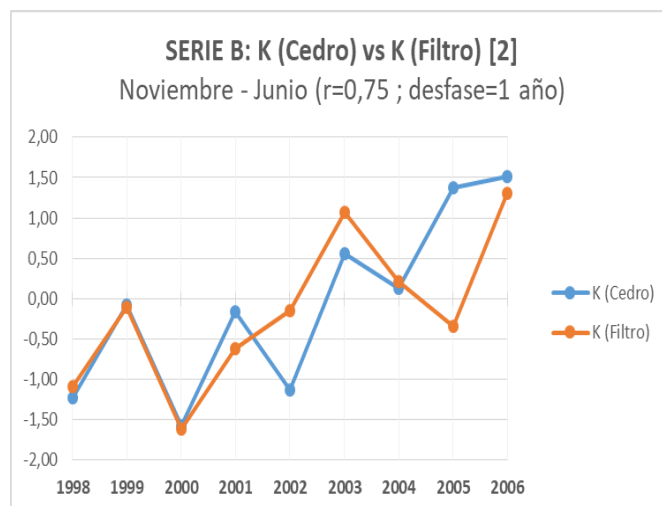


Figura 81. Relación entre la concentración de K en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.2.3. Relación entre la concentración de Ca en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

Al igual que el potasio, el calcio aumentó sus concentraciones en el $MP_{2,5}$ durante los meses de otoño, presentando valores significativos en invierno también.

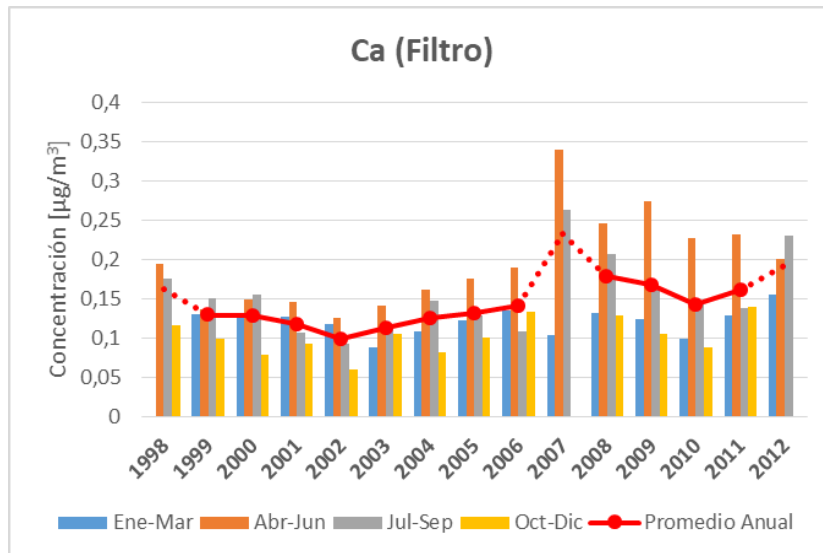


Figura 82. Variación estacional de la concentración de Ca (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Aunque en ningún escenario se registró una correlación superior a 0,6 entre el Ca presente en el $MP_{2,5}$ y el acumulado en los anillos de crecimiento, los resultados de la Serie B dieron cuenta de cierta semejanza en la forma de las gráficas de ambas variables (ver Figura 83 y Figura 84). Los valores no corregidos de Ca se relacionaron con los datos de Diciembre y Enero (2 años de desfase), en tanto que los valores corregidos, con los datos de Febrero a Abril (sin desfase).

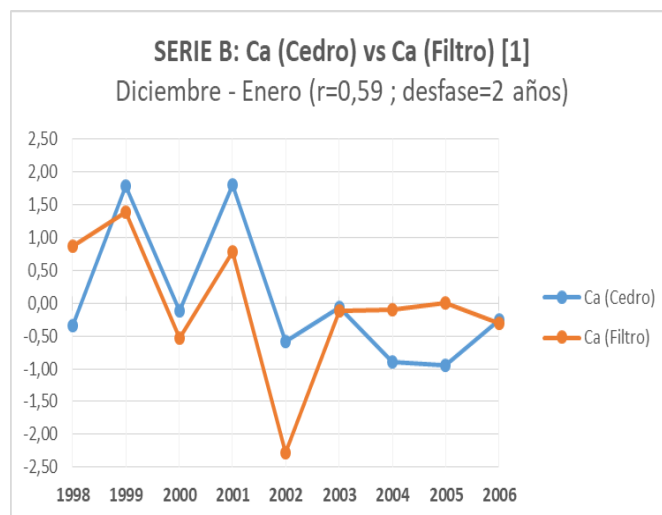


Figura 83. Relación entre la concentración de Ca en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

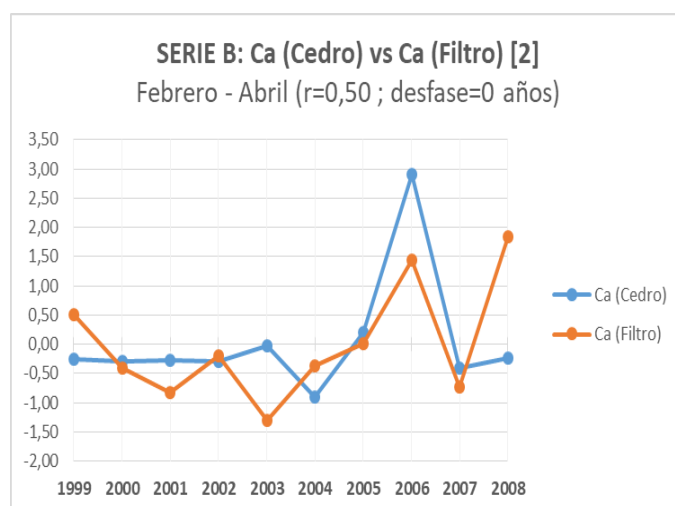


Figura 84. Relación entre la concentración de Ca en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B (Corrección)

4.2.4. Relación entre la concentración de Cr en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

Las concentraciones de cromo en el $MP_{2,5}$ asociadas a los meses fríos (Abril-Septiembre) superaron ampliamente los valores observados el resto del año (ver Figura 85).

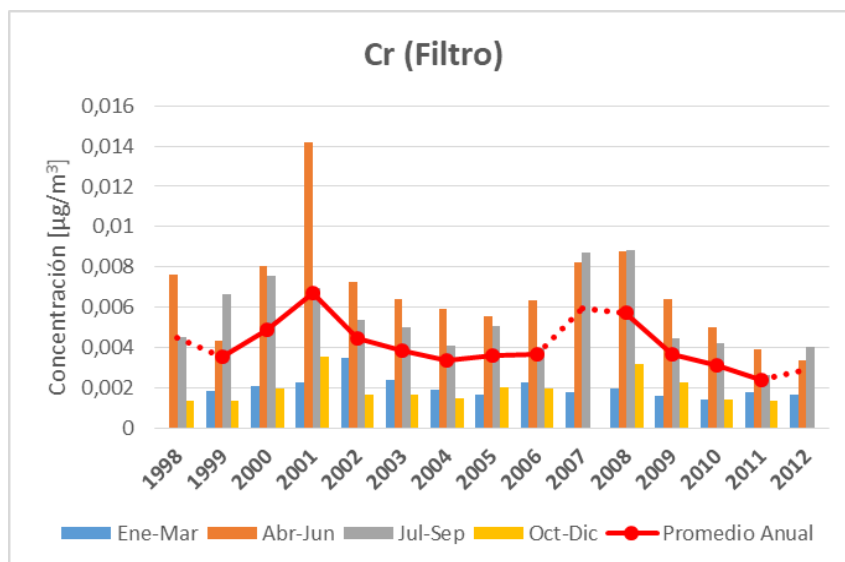


Figura 85. Variación estacional de la concentración de Cr (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

A pesar de que el Cr acumulado en los anillos de la Serie A no mostró tener una buena correlación con los datos correspondientes al Cr en el $MP_{2,5}$, los valores de Cr en los anillos de la Serie B correlacionaron muy bien con los datos de los meses de Febrero a Abril, con un desfase de dos años (ver Figura 86).

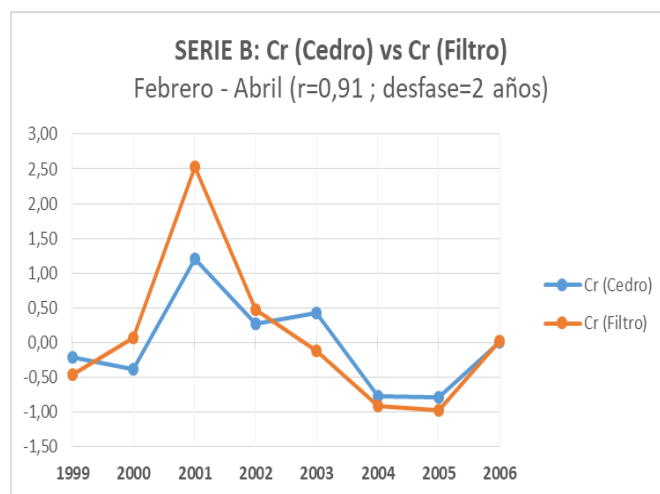


Figura 86. Relación entre la concentración de Cr en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.2.5. Relación entre la concentración de Mn en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

Similar al caso del cromo, las concentraciones de manganeso en el $MP_{2,5}$ fueron mayores durante los meses fríos. En el año 2008, particularmente, fue cuando se alcanzaron las diferencias más significativas (ver Figura 87).

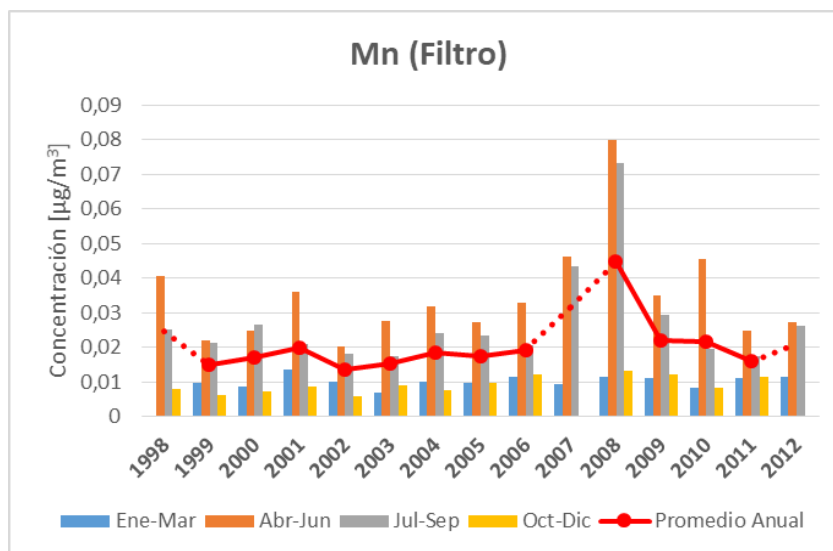


Figura 87. Variación estacional de la concentración de Mn (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Consistente con lo anterior, la concentración de Mn en los anillos de la Serie A tuvo muy buena correlación con los datos de los meses de Abril a Julio, con un año de desfase (ver Figura 88). Los valores asociados a la Serie B, por su parte, no entregaron buenos resultados.

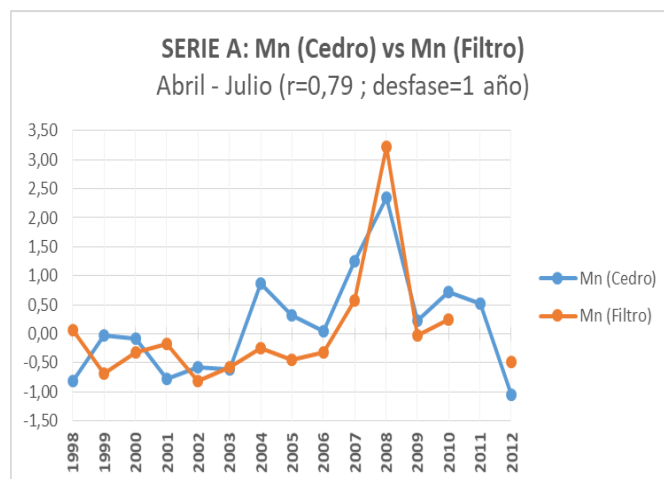


Figura 88. Relación entre la concentración de Mn en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.2.6. Relación entre la concentración de Fe en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

La concentración de hierro en el $MP_{2,5}$ también fue mayor durante los meses fríos, aunque su concentración en los meses cálidos no fue despreciable (ver Figura 89).

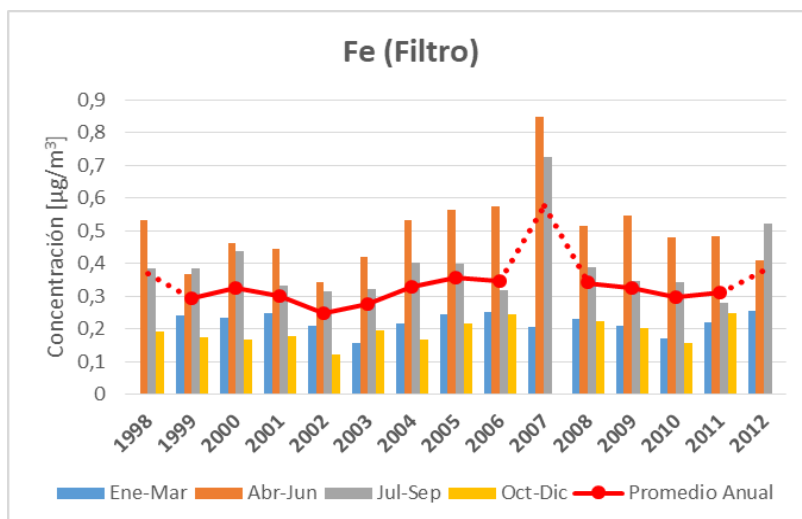


Figura 89. Variación estacional de la concentración de Fe (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Justamente fueron los datos de Abril a Junio los que mejor correlacionaron con los valores de Fe presentes en los anillos de la Serie A, considerando un desfase de dos años (ver Figura 90). Con respecto a la Serie B, nuevamente no hubo resultados favorables.

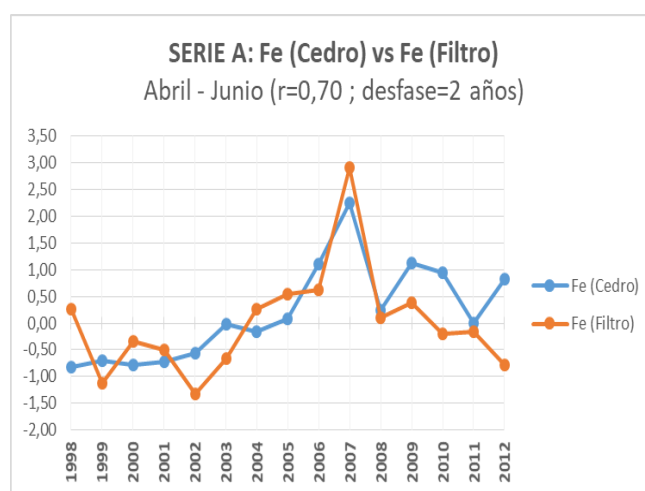


Figura 90. Relación entre la concentración de Fe en el $MP_{2.5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.2.7. Relación entre la concentración de Ni en el $MP_{2.5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

En general, las mayores concentraciones de níquel en el $MP_{2.5}$ se dieron durante los meses de otoño. En los meses cálidos, por su parte, las concentraciones se mantuvieron más o menos estables, con valores bastante inferiores (ver Figura 91).

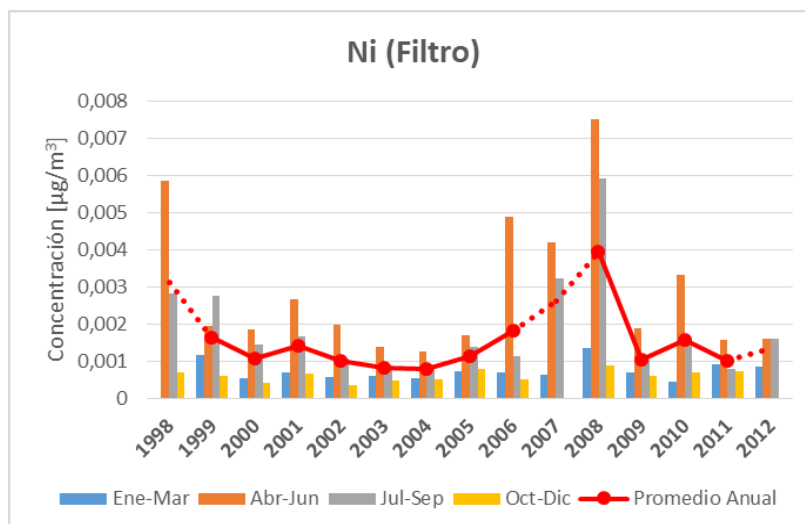


Figura 91. Variación estacional de la concentración de Ni (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Sin perjuicio de lo anterior, los datos que mostraron una mejor correlación con la concentración de Ni en los anillos de la Serie A, correspondieron a los meses de Noviembre a Abril (con un año de desfase). Cabe mencionar que, dada la falta de datos de Ni en los filtros, los años 2007 y 2009 no tuvieron puntos de comparación (ver Figura 92).

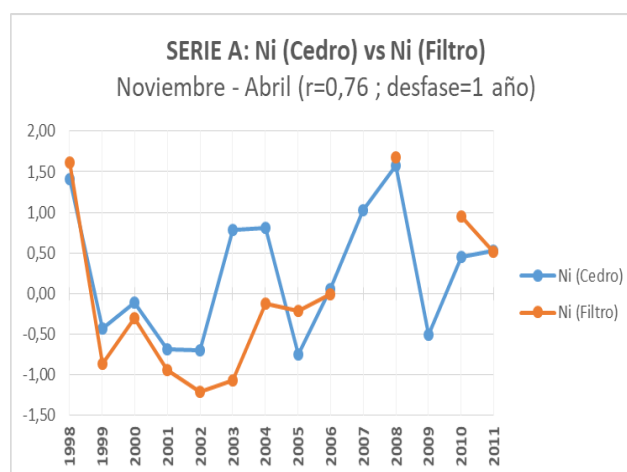


Figura 92. Relación entre la concentración de Ni en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

Al igual que lo sucedido con los elementos Mn y Fe, no fue posible encontrar buenas correlaciones entre la concentración de Ni en el $MP_{2,5}$ y la acumulación de Ni en los anillos de la Serie B.

4.2.8. Relación entre la concentración de Cu en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

Como la gran mayoría de los elementos traza, la concentración de cobre en el $MP_{2,5}$ alcanzó los valores máximos durante los meses fríos (ver Figura 93).

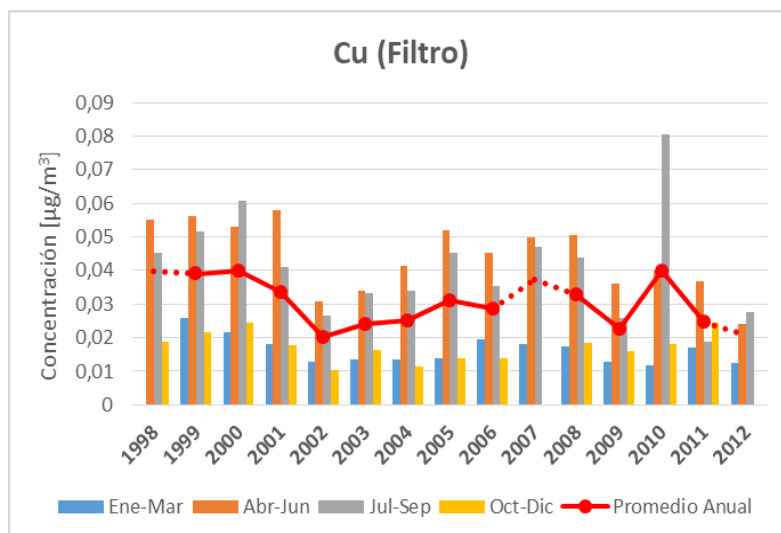


Figura 93. Variación estacional de la concentración de Cu (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

A pesar de su relevancia en el periodo otoño-invierno, los datos que mejor correlacionaron con el Cu acumulado en los anillos de crecimiento, correspondieron principalmente a los meses de verano. Mientras los datos de la Serie A se relacionaron con los datos de los meses de Enero y Febrero (ver Figura 94), los datos de la Serie B se relacionaron con los datos de los meses de Enero a Junio (Figura 95). Ambas series presentaron un desfase de 2 años con respecto a los datos de los filtros.

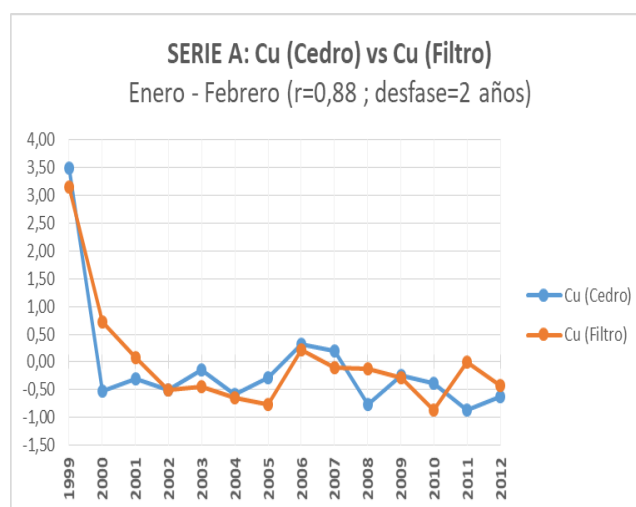


Figura 94. Relación entre la concentración de Cu en el MP_{2.5} y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

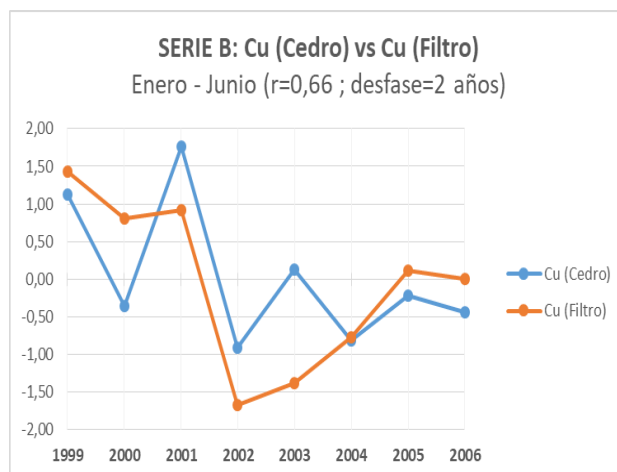


Figura 95. Relación entre la concentración de Cu en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.2.9. Relación entre la concentración de Zn en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

El zinc también registró sus mayores concentraciones en el $MP_{2,5}$ durante los meses fríos y, por lo tanto, fueron estos meses los que tuvieron mayor incidencia en su variación anual (ver Figura 96).

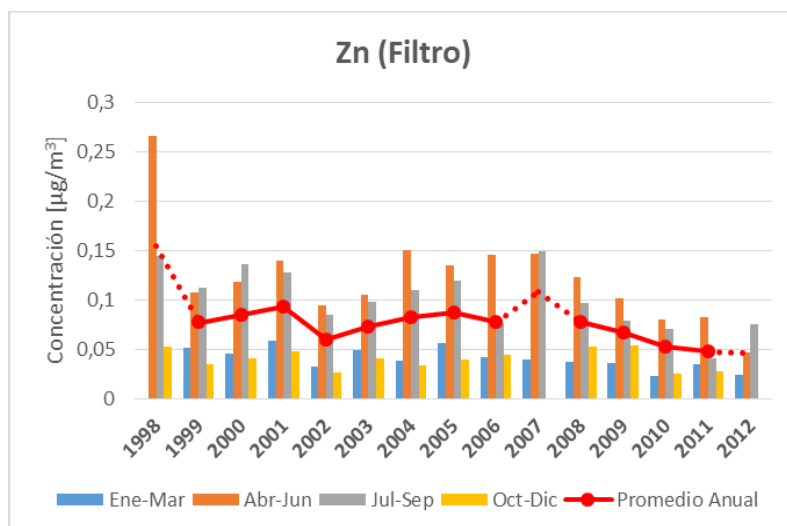


Figura 96. Variación estacional de la concentración de Zn (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Aunque la relación entre la concentración de Zn en el $MP_{2,5}$ y la acumulación de éste en los anillos de la Serie A concordó con el periodo en el que el Zn alcanzó su máxima concentración en el $MP_{2,5}$, con un año de desfase (ver Figura 97), el zinc acumulado en los anillos de la Serie B se relacionó de mejor manera con los datos correspondientes a los meses de verano, con un desfase de dos años (ver Figura 98).

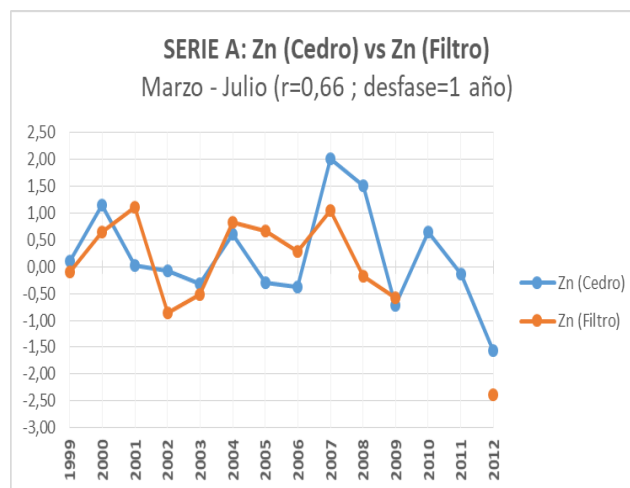


Figura 97. Relación entre la concentración de Zn en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

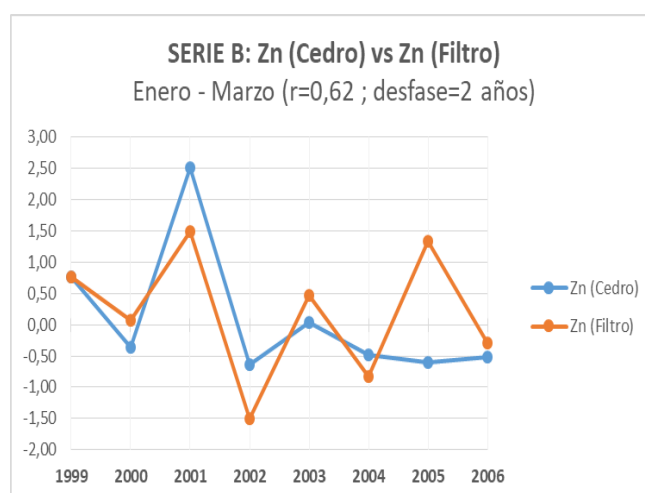


Figura 98. Relación entre la concentración de Zn en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.2.10. Relación entre la concentración de As en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

El Arsénico es otro de los elementos traza del $MP_{2,5}$ cuya concentración en los meses de otoño e invierno presentó valores por sobre la media anual (ver Figura 99).

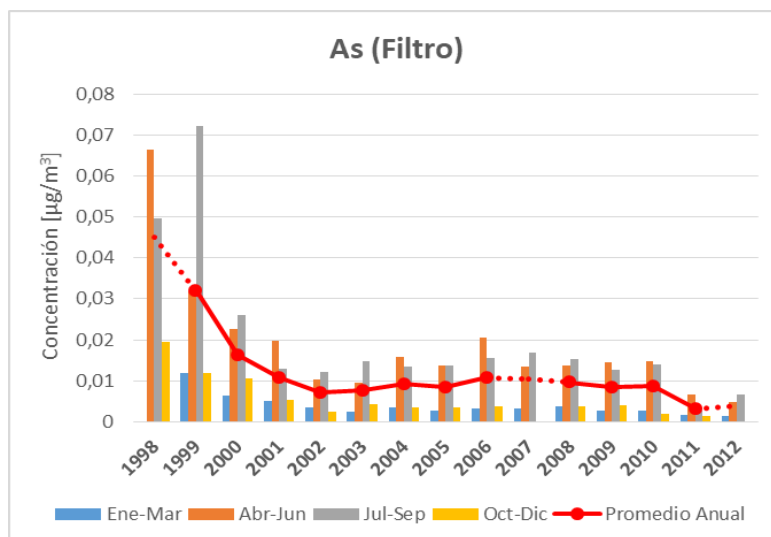


Figura 99. Variación estacional de la concentración de As (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Pese a los bajos valores de concentración que se registraron en los meses cálidos, en comparación a los meses fríos, la concentración de As en los anillos de la Serie B tuvo buena correlación con los datos asociados a los meses de Enero y Febrero (ver Figura 100). Los resultados de la Serie A, por su parte, no dieron cuenta de buenas correlaciones entre las variables.

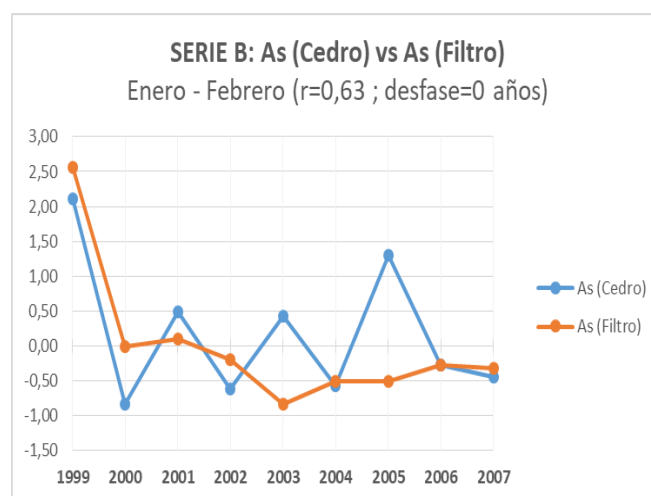


Figura 100. Relación entre la concentración de As en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

4.2.11. Relación entre la concentración de Se en $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

Contrario al resto de los elementos, las concentraciones máximas de selenio en el $MP_{2,5}$ no fueron atribuibles a meses en particular. A lo largo del periodo de estudio el Se presentó valores máximos en diferentes épocas del año (ver Figura 101).

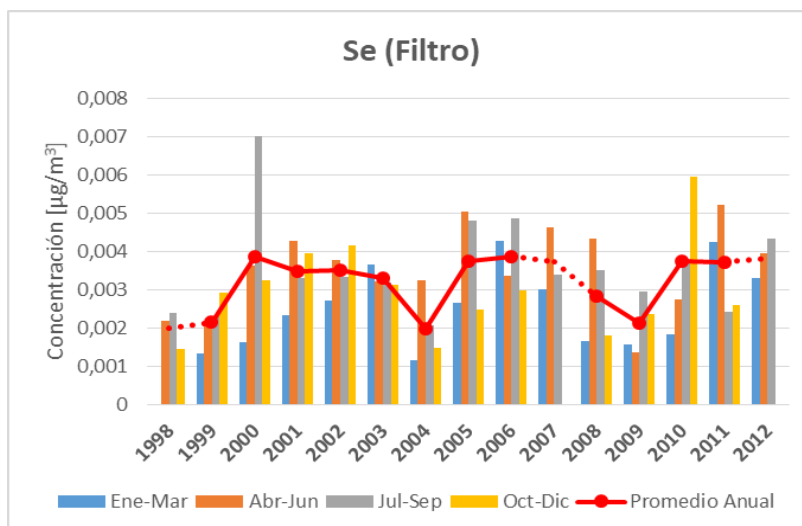


Figura 101. Variación estacional de la concentración de Se (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Al comparar la concentración de Se en los anillos de la Serie A, con los datos de los filtros correspondientes a los meses de Enero a Junio (considerando un desfase de 2 años), se observó que entre 1999 y 2008 las gráficas de las variables siguen patrones similares, aun cuando el valor del coeficiente de correlación dio menor a 0,6 (ver Figura 102). A su vez, se descubrió que existe una excelente correlación entre los datos de la Serie B y los datos correspondientes a los meses de Junio y Julio, considerando también un desfase de 2 años (ver Figura 103).

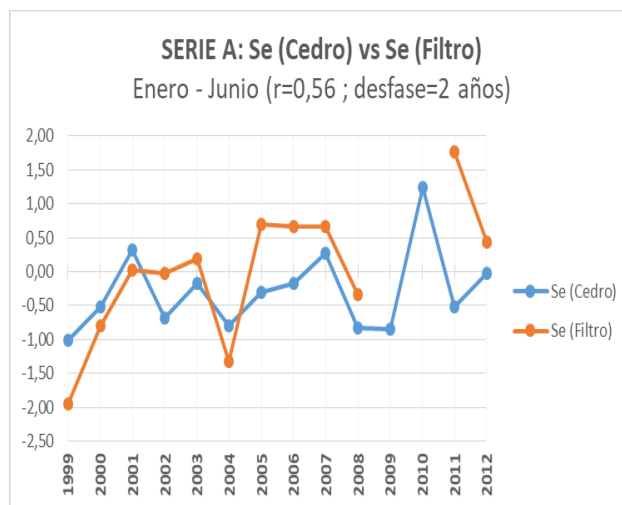


Figura 102. Relación entre la concentración de Se en el MP_{2,5} y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

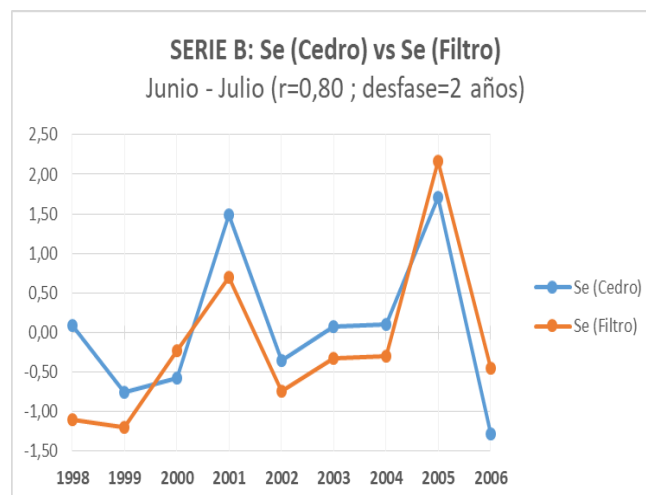


Figura 103. Relación entre la concentración de Se en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.2.12. Relación entre la concentración de Mo en el $MP_{2,5}$ y en los anillos de crecimiento de *Cedrus libani* en Parque Quinta Normal

El molibdeno fue uno de los pocos elementos traza del $MP_{2,5}$ que, sin tener una cantidad importante de datos faltantes, presenta menos del 70% de sus datos sobre el límite de detección. Vale decir que, a pesar de que existe una cantidad suficiente de datos para analizar, no hay seguridad de que estos representen realmente la concentración de Mo en el $MP_{2,5}$. Por lo mismo, Barraza et al. (2017) prescindieron de ellos. No obstante, considerarlo en esta investigación ofreció la oportunidad de determinar su confiabilidad en términos de su relación con el Mo acumulado en los anillos de crecimiento.

En este contexto, si se asume la información referente a los filtros como válida, el Mo se sumaría a la larga lista de elementos que alcanzaron sus máximas concentraciones en los meses fríos (ver Figura 104).

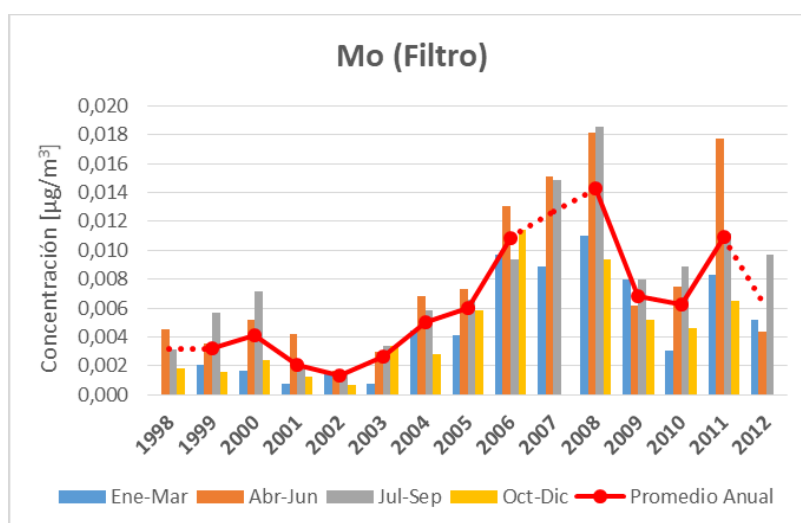


Figura 104. Variación estacional de la concentración de Mo (Filtro) en el periodo 1998-2012 (línea punteada indica falta de datos con respecto a algunos meses)

Coincidente con lo anterior, la mejor correlación entre la concentración de Mo acumulado en los anillos de la Serie A y los datos de los filtros, se dio con respecto a los meses de Marzo a Mayo, con un año de desfase (ver Figura 105).

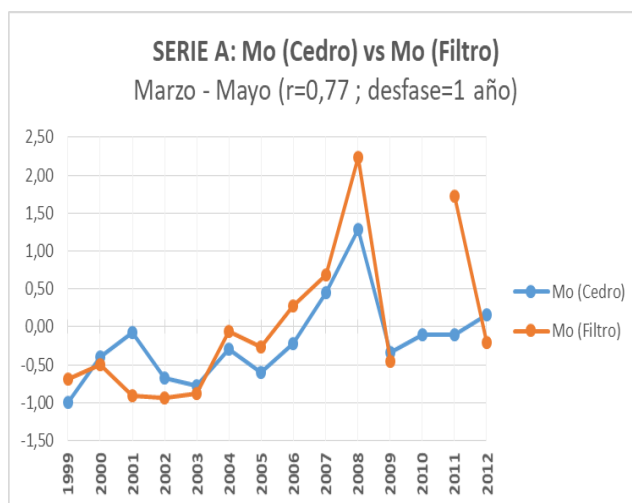


Figura 105. Relación entre la concentración de Mo en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

Por el contrario, en el caso de la Serie B, la relación se estableció con los datos de Enero a Marzo (también con un año de desfase). Aunque la correlación en sí no fue muy fuerte, las gráficas de las variables tienen cierta semejanza (ver Figura 106).

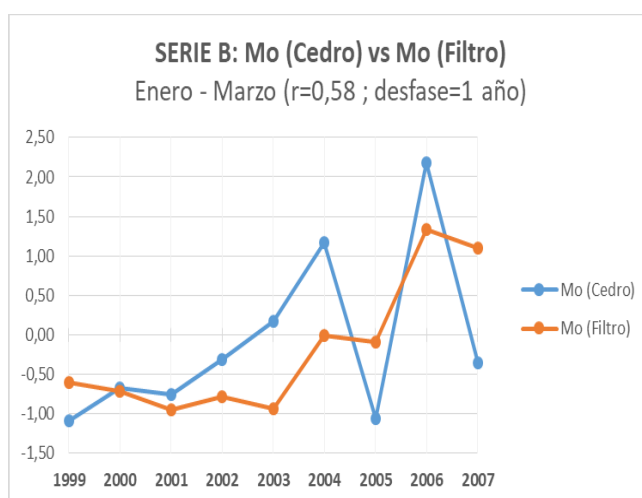


Figura 106. Relación entre la concentración de Mo en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.3. Relación entre la concentración de MP_{10} en el aire y la acumulación de elementos químicos en los anillos de crecimiento

Aunque la concentración de MP_{10} fue mayor durante otoño e invierno, la diferencia con respecto a los meses cálidos no fue tan marcada como lo fue con el $MP_{2,5}$ (ver Figura 107).

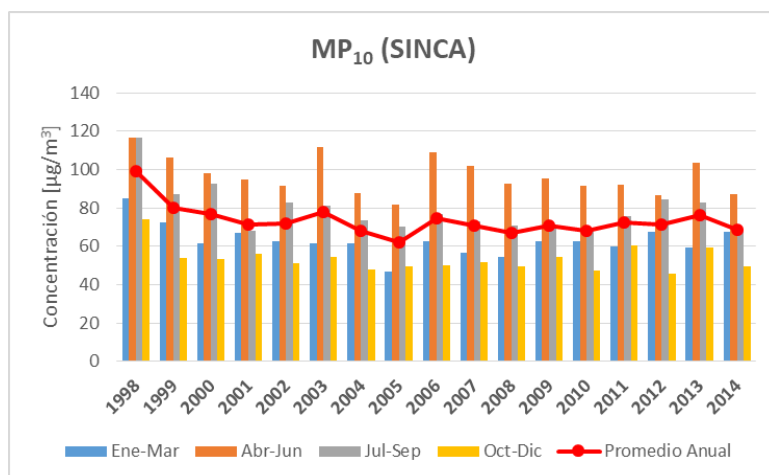


Figura 107. Variación estacional de la concentración de MP_{10} en el periodo 1998-2014

De los 21 elementos analizados, Al, V, Se, Cu, Ba y Pb fueron los únicos elementos acumulados en los anillos cuya correlación con la concentración del MP_{10} fue inferior a $\pm 0,6$ en ambas series.

4.3.1. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Na en los anillos de crecimiento

Similar a lo sucedido con la concentración de $MP_{2,5}$, los valores no corregidos de Na, correspondientes a la Serie A, se relacionaron de mejor manera con los datos de MP_{10} asociados a los meses de Abril a Junio, considerando un desfase de 2 años (ver Figura 108). No obstante, en este caso, la relación que se estableció entre las variables fue más débil ($r=0,57$).

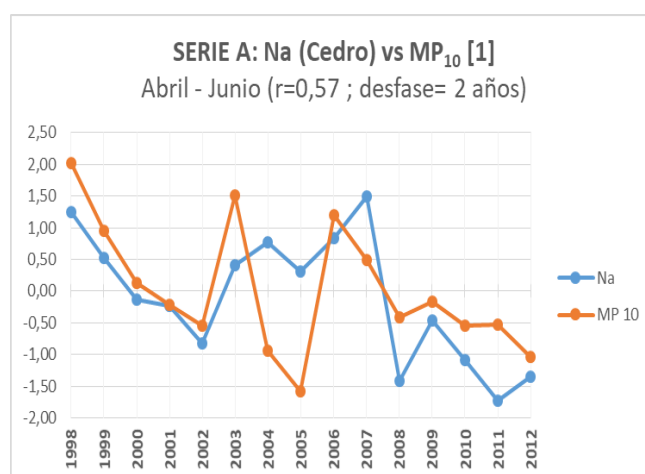


Figura 108. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Na en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

Al trabajar con los valores corregidos, manteniendo el mismo desfase, pero reduciendo el periodo de comparación a los meses de Junio y Julio, la correlación mejoró y alcanzó valores por sobre los 0,6 (ver Figura 109).

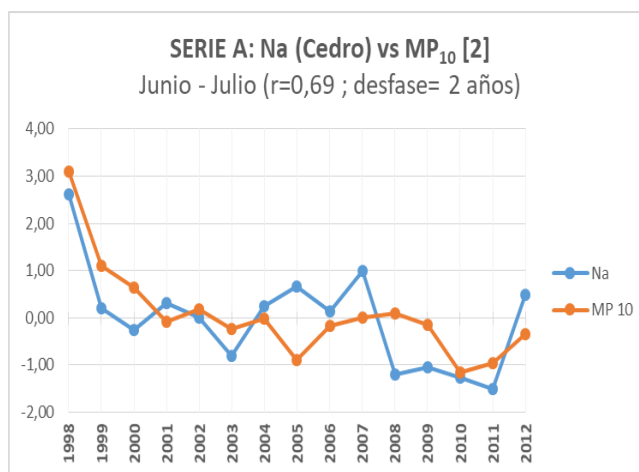


Figura 109. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Na en los anillos de la Serie A (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

La concentración de Na encontrada en los anillos de la Serie B también tuvo relación con los datos de MP₁₀ correspondientes a meses fríos, Julio y Agosto, pero con un año de desfase (ver Figura 110).

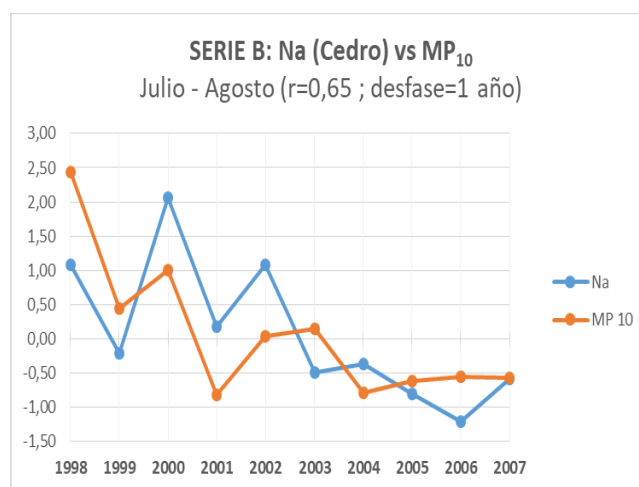


Figura 110. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Na en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.2. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Mg en los anillos de crecimiento

Coincidente con el resultado obtenido para el MP_{2,5}, la concentración de Mg en los anillos de la Serie A se relacionó con la concentración de MP₁₀ en función de los meses de Abril a Junio, con un desfase de 2 años (ver Figura 111). Lamentablemente, no se observaron buenas correlaciones para el caso de la Serie B.

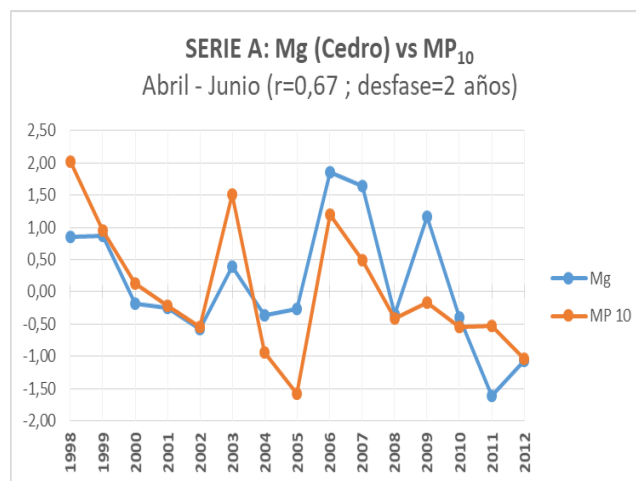


Figura 111. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Mg en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.3. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de K en los anillos de crecimiento

En ninguno de los dos escenarios (valores sin y con digestión extra) se identificaron correlaciones superiores a 0,6 entre el K acumulado en los anillos de la Serie A y las concentraciones de MP₁₀. En cuanto a la Serie B, solamente los valores corregidos de K correlacionaron adecuadamente, dando cuenta de una relación inversa entre la acumulación de K y las concentraciones de MP₁₀ correspondientes a los meses de Enero y Febrero, con un desfase de dos años (ver Figura 112).

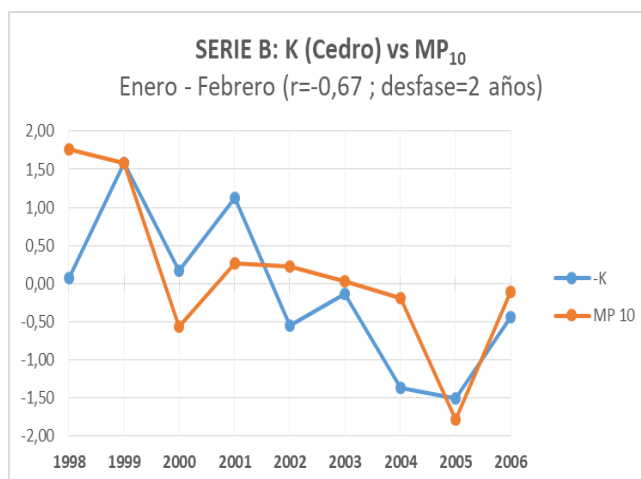


Figura 112. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de K en los anillos de la Serie B (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.4. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Ca en los anillos de crecimiento

Mientras los valores no corregidos de Ca vinculados a la Serie A mostraron una relación positiva con los datos de MP_{10} para el periodo de Febrero a Junio, con un desfase de dos años (ver Figura 113), los valores corregidos correlacionaron negativamente con los datos de Octubre a Enero, sin desfase (ver Figura 114).

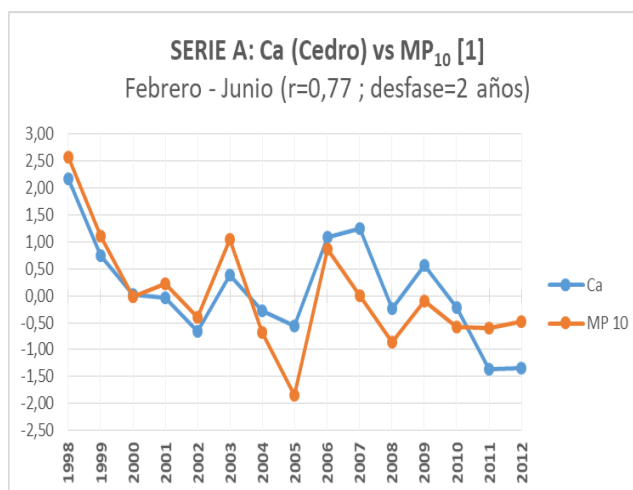


Figura 113. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

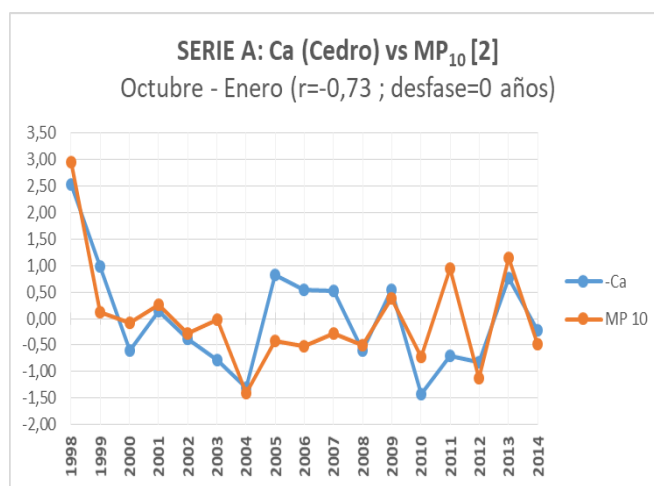


Figura 114. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie A (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

Con respecto a los valores corregidos de la Serie B, estos también presentaron una correlación negativa con los datos de MP_{10} , pero tomando en cuenta los meses de Mayo y Junio, con un año de desfase (ver Figura 115).

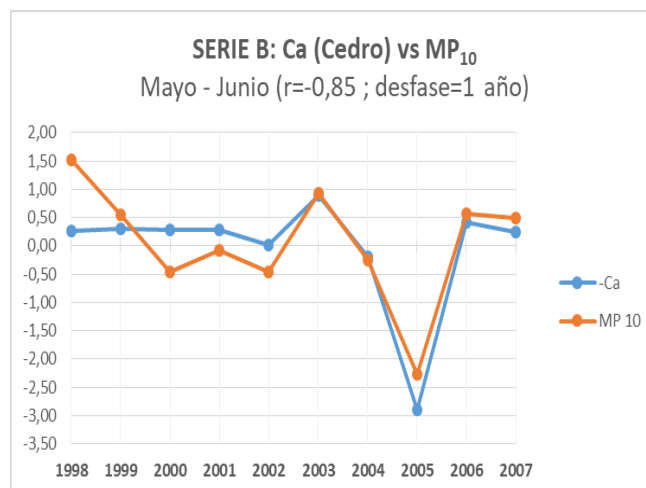


Figura 115. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie B (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.5. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Cr en los anillos de crecimiento

Al considerar únicamente los datos mensuales correspondientes a los meses de Diciembre a Febrero, se observó que existe una relación inversa entre la concentración de MP₁₀ y el Cr acumulado en los anillos de la Serie A (sin desfase), cuyo coeficiente de correlación supera muy ajustadamente los 0,6 (ver Figura 116).

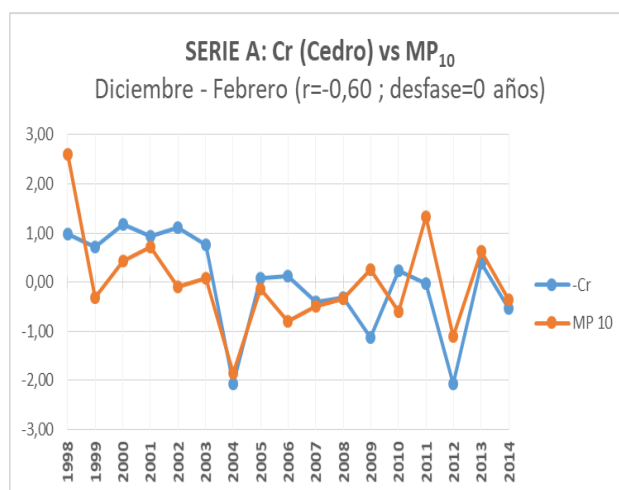


Figura 116. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Cr en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

En el caso de la Serie B no hubo resultados que sugirieran una relación aceptable entre las variables.

4.3.6. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Mn en los anillos de crecimiento

La concentración de Mn en la Serie A también correlacionó negativamente con la concentración de MP_{10} , pero asociada a los meses de Febrero a Abril, con un año de desfase (ver Figura 117).

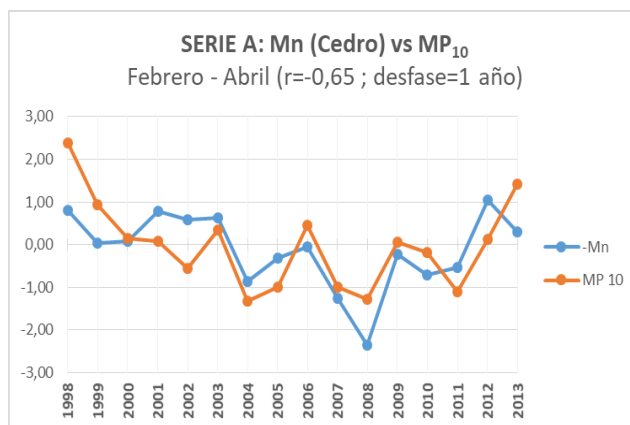


Figura 117. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Mn en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

Al igual que el Cr, no se encontró una buena correlación entre el MP_{10} y los datos de Mn de la Serie B.

4.3.7. Relación entre la concentración en MP_{10} y la acumulación de Fe en los anillos de crecimiento

El Fe acumulado en los anillos de la Serie A mantuvo una relación inversa con los datos de MP_{10} correspondientes a los meses de Febrero y Marzo, considerando un año de desfase (ver Figura 118), muy similar a lo sucedido con el Mn.

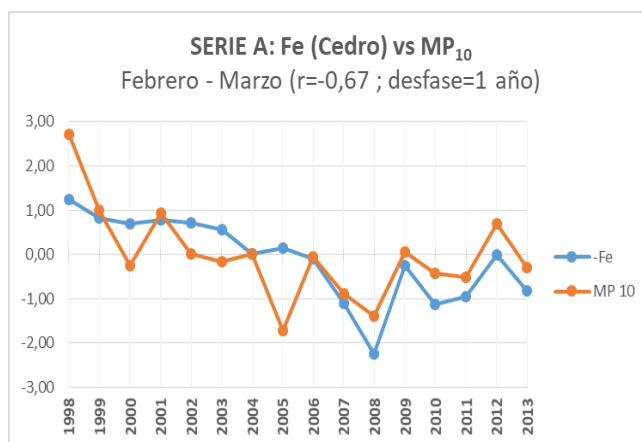


Figura 118. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Fe en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

Por el contrario, los resultados para la Serie B indicaron que hay una relación positiva entre la concentración de Fe en los anillos y los datos de MP₁₀ de los meses de Julio a Octubre, también con un año de desfase (ver Figura 119).

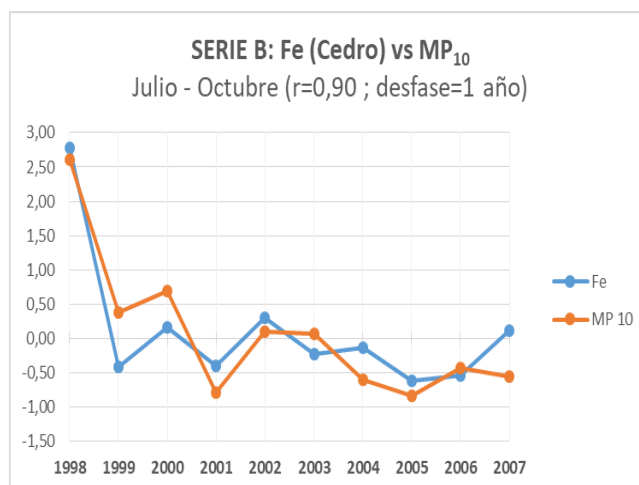


Figura 119. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Fe en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.8. Relación entre la concentración en MP₁₀ y la acumulación de Co en los anillos de crecimiento

Siguiendo la misma lógica que el Mn y el Fe, se observó que la concentración de Co en la Serie A tiene una correlación negativa con los datos de MP₁₀ para los meses de Febrero y Marzo, con un año de desfase (ver Figura 120).

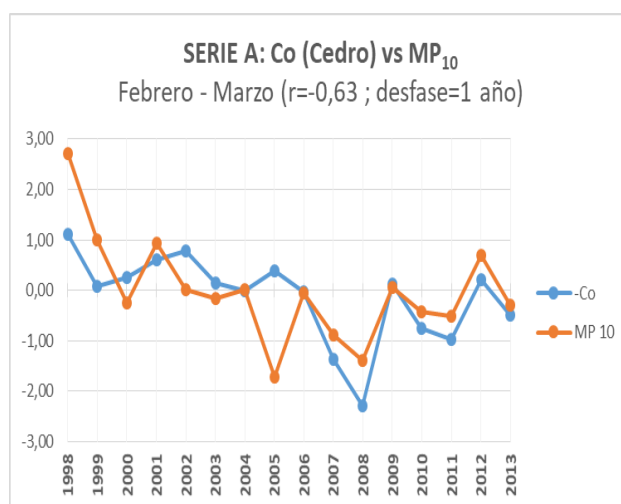


Figura 120. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Co en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

La Serie B, por su parte, no presentó buena correlación entre las variables.

4.3.9. Relación entre la concentración en MP₁₀ y la acumulación de Ni en los anillos de crecimiento

El Ni acumulado en los anillos de la Serie A correlacionó negativamente con las concentraciones de MP₁₀ correspondientes a los meses de Marzo a Mayo, sin desfase (ver Figura 121).

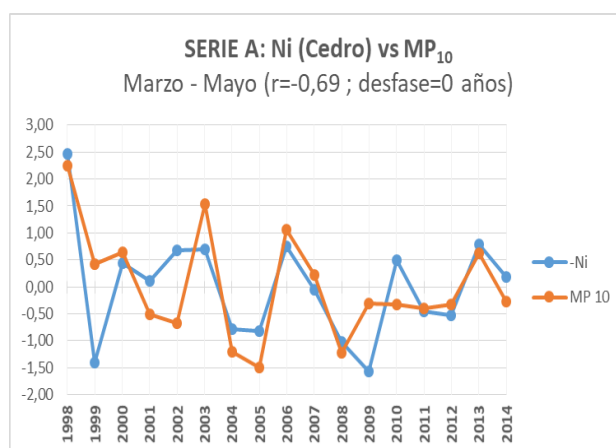


Figura 121. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Ni en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

Por otra parte, al comparar la concentración de Ni en la Serie B con los datos de MP₁₀, no hubo resultados que dieran coeficientes de correlación mayores a 0,6.

4.3.10. Relación entre la concentración en MP₁₀ y la acumulación de Cu en los anillos de crecimiento

Para el caso del Cu acumulado en los anillos de crecimiento, si bien no se presentaron correlaciones que superaran los 0,6, al graficar las concentraciones de Cu en la Serie A y los datos de MP₁₀ para los meses de Enero y Febrero, se observaron ciertas similitudes. Esto considerando un desfase de dos años (ver Figura 122).

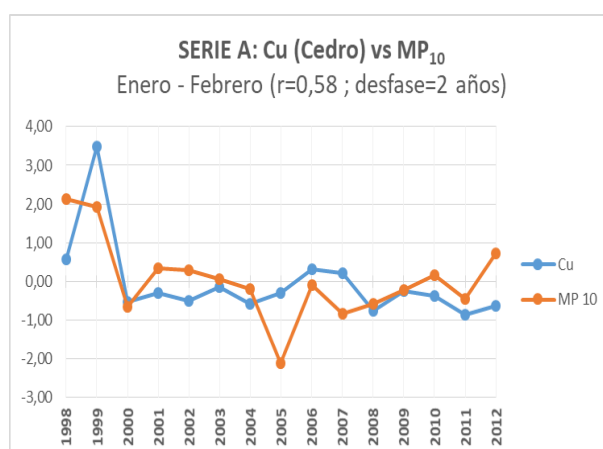


Figura 122. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Cu en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.11. Relación entre la concentración en MP_{10} y la acumulación de Zn en los anillos de crecimiento

La concentración de Zn en la Serie A se relacionó con el MP_{10} en torno a los meses de Abril a Junio, también con 2 años de desfase (ver Figura 123). Los datos de la Serie B, en cambio, no mostraron relación alguna con el MP_{10} .

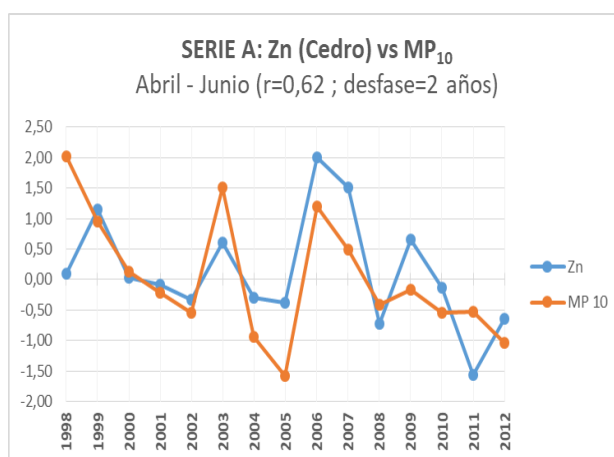


Figura 123. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Zn en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.12. Relación entre la concentración en MP_{10} y la acumulación de As en los anillos de crecimiento

Aunque no fue posible hallar relación entre la concentración de As en los anillos de la Serie A y el MP_{10} , se verificó que el As acumulado en los anillos de la Serie B tiene relación con los datos de MP_{10} asociados a los meses de Junio y Julio, considerando un año de desfase (ver Figura 124).

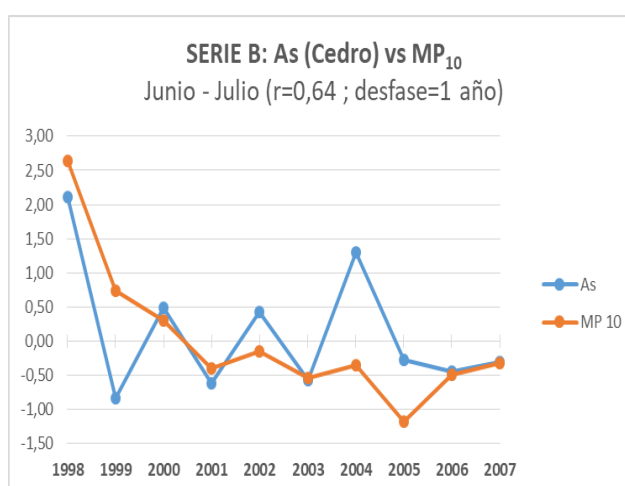


Figura 124. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de As en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.13. Relación entre la concentración en MP_{10} y la acumulación de Mo en los anillos de crecimiento

La mejor correlación entre los datos de Mo de la Serie A y los datos mensuales de MP_{10} , se dio con respecto a los meses de Agosto a Noviembre, con un año de desfase (ver Figura 125).

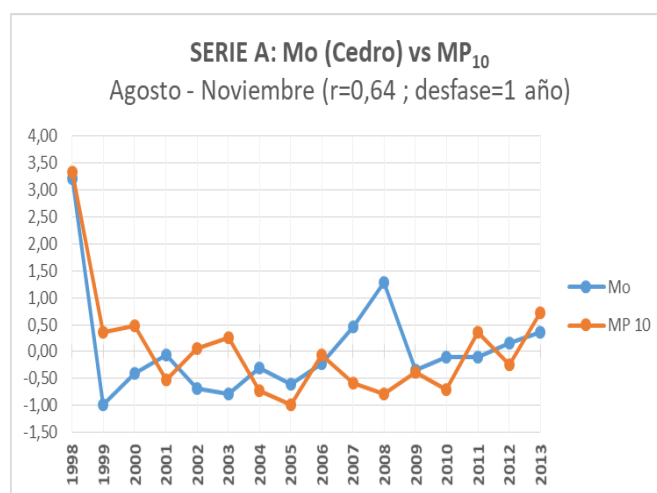


Figura 125. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Mo en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

Por su parte, los resultados para el caso de la Serie B indicaron que no hay una relación significativa entre el As acumulado en los anillos y el MP_{10} .

4.3.14. Relación entre la concentración en MP_{10} y la acumulación de Ag en los anillos de crecimiento

Mientras la concentración de Ag en la Serie A correlacionó muy bien con los datos de MP_{10} para los meses de Junio a Agosto, considerando dos años de desfase (ver Figura 126), la concentración en la Serie B lo hizo con los datos de Diciembre a Marzo, considerando un año de desfase (ver Figura 127).

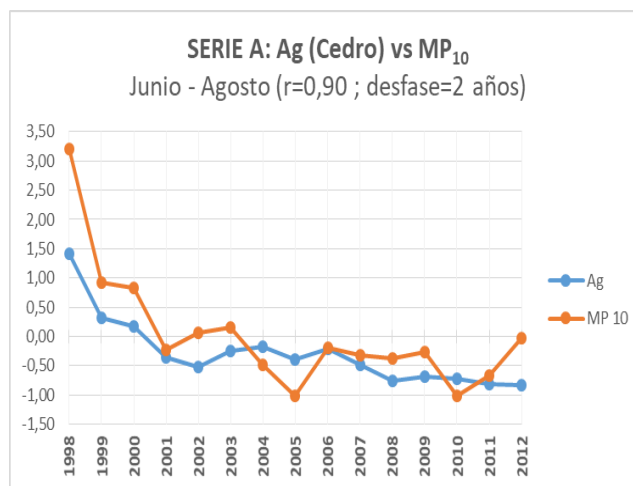


Figura 126. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Ag en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

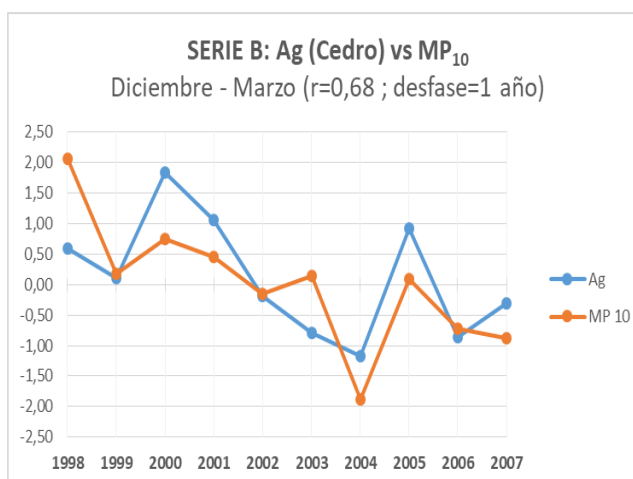


Figura 127. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Ag en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.15. Relación entre la concentración en MP₁₀ y la acumulación de Cd en los anillos de crecimiento

El Cd acumulado en los anillos de la Serie A mostró su mejor correlación con el MP₁₀ en base a los datos de los meses de Junio y Julio, con un año de desfase (ver Figura 128). En tanto que los datos de la Serie B no mostraron buenas correlaciones.

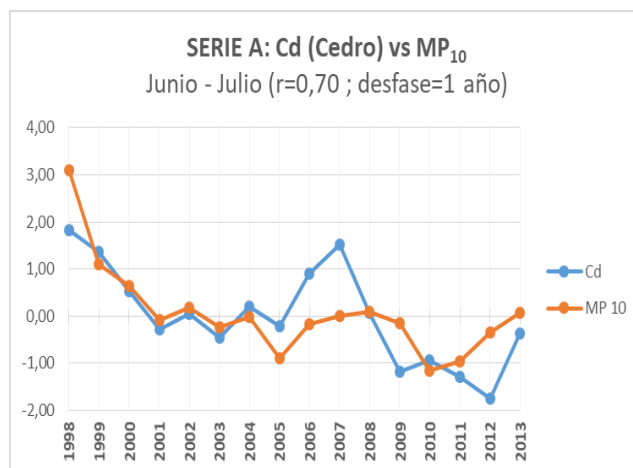


Figura 128. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Cd en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

4.3.16. Relación entre la concentración en MP₁₀ y la acumulación de Sn en los anillos de crecimiento

Los resultados de la Serie A sugirieron que existe una buena correlación entre el Sn acumulado en los anillos y los datos de MP₁₀ correspondientes a los meses de Mayo a Diciembre (ver Figura 129).

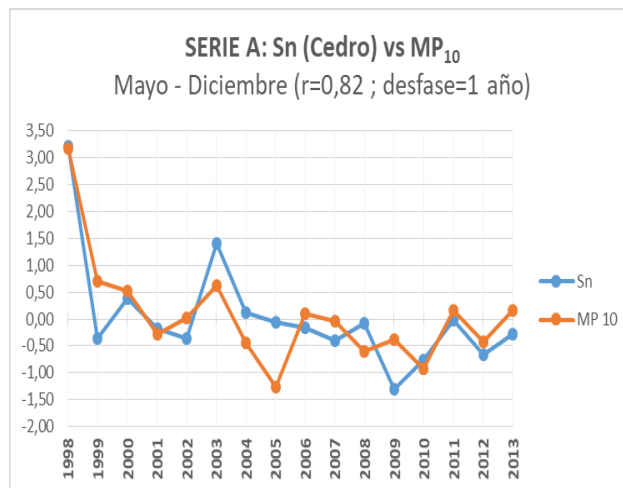


Figura 129. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Sn en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

Nuevamente no fue posible encontrar relaciones entre los datos de la Serie B y el MP₁₀ que tuvieran un coeficiente de correlación mayor a 0,6.

4.3.17. Relación entre la concentración en MP_{10} y la acumulación de Pb en los anillos de crecimiento

Aun cuando las concentraciones de Pb en los anillos de ambas series presentaron relaciones con el MP_{10} cuyos coeficientes de correlación eran inferiores a 0,6, en la Figura 130 se puede ver que, en el caso de la Serie A, al considerar solamente los meses de Enero a Marzo (con un año de desfase), las gráficas del MP_{10} y del inverso de la concentración de Pb son prácticamente coincidentes. El único año en que se establecieron diferencias significativas fue en el año 1998, lo cual lo hace responsable de la baja en la correlación.

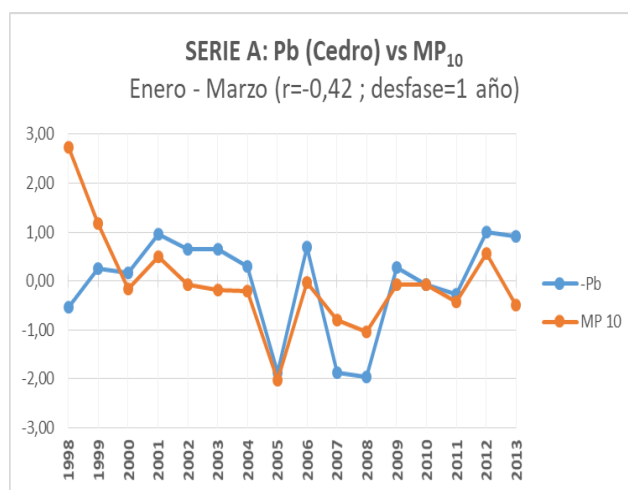


Figura 130. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Pb en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

5. Discusión

5.1. Conclusiones generales

Según la información recopilada, este estudio es el primero de su clase en comparar los datos obtenidos a partir del análisis químico de los anillos de crecimiento con ICP-MS, y las mediciones atmosféricas efectuadas por los equipos tradicionalmente utilizados para determinar la calidad del aire en las estaciones de monitoreo.

El método comparativo implicó la utilización de la Routine RespoAverage, la cual si bien originalmente fue creada para establecer relaciones entre el crecimiento de los árboles y parámetros no aditivos como la temperatura, fue adaptada para que trabajara con las variables de estudio. Es decir, en vez de ingresar el ancho de los anillos de crecimiento correspondientes a cada año, se ingresó la concentración de elementos químicos acumulados en estos anillos, y en el lugar de datos de temperatura, se emplearon los promedios mensuales de los datos de material particulado recolectados en la estación Parque O'Higgins.

De esta manera, siguiendo una metodología inspirada en la Dendroclimatología, se pudo concluir que:

- Un **85,1%** de los resultados indicaron que efectivamente existe una **correlación de Pearson superior a $\pm 0,6$** entre la medición de $MP_{2,5}$ acumulado en los filtros de $MP_{2,5}$ de la estación Parque O'Higgins, correspondientes al periodo entre 1998 y 2012, y la medición de elementos químicos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles del Parque Quinta Normal en dicho periodo.
- Un **37,8%** de los resultados indicaron que efectivamente existe una **correlación de Pearson superior a $+0,6$** entre los elementos químicos analizados en los filtros de $MP_{2,5}$ de la estación Parque O'Higgins, correspondientes al periodo entre 1998 y 2012, y la medición de los mismo elementos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles del Parque Quinta Normal en dicho periodo.
- Un **42,6%** de los resultados indicaron que efectivamente existe una **correlación de Pearson superior a $\pm 0,6$** entre los datos de MP_{10} de la estación Parque O'Higgins almacenados en la base de datos del SINCA, correspondientes al periodo entre 1998 y 2014, y la medición de los elementos químicos acumulados en los anillos de crecimiento de los árboles del Parque Quinta Normal en dicho periodo.

Aunque la mayoría de los resultados sugirieron que la correlación entre las variables era alta, comparado con aquellos que mostraron correlaciones moderadas o bajas, es con respecto a la concentración de $MP_{2,5}$ cuando se vuelve más evidente. Lamentablemente la falta de datos posiblemente perjudicó la correlación de los elementos traza del $MP_{2,5}$ con los elementos acumulados en los anillos, lo cual se vio reflejado en la menor cantidad de resultados favorables. Al analizar las soluciones en su conjunto se determinó que el 56,5% de las correlaciones son altas o muy altas, el 21,4% moderadas y el 22,1% bajas o muy bajas.

En la Tabla 13 se resumen los principales resultados que arrojó este estudio, en función del tipo y grado de correlación.

Tabla 13. Resumen de resultados ordenados en base al grado de correlación

Tipo y grado de correlación	SERIE A			SERIE B		
	MP _{2,5}	Elemento en MP _{2,5}	MP ₁₀	MP _{2,5}	Elemento en MP _{2,5}	MP ₁₀
Correlación positiva alta / muy alta	Na[1], Na[2], Mg, Al, Ca[1], Cu, Zn, As, Ag, Cd, Ba	K[2], Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo	Na[2], Mg, Ca[1], Zn, Mo, Ag, Cd, Sn	Na, Mg, K[1], Ca[1], Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Ag, Cd, Ba	K[1], K[2], Cr, Cu, Zn, As, Se	Na, Fe, As, Ag
Correlación negativa alta / muy alta	K[1], K[2], Ca[2], Cr, Mn, Fe, Co	-	Ca[2], Cr, Mn, Fe, Co, Ni	Al, K[2], Ca[2], V, Co, Ni, Se, Mo, Pb	-	K[2], Ca[2]
Correlación positiva moderada	V, Ni	Ca[1], V, Cr, As, Se	Na[1], Al, V, Cu, As, Ba	Sn	Mg, Ca[1], Ca[2], Mn, Mo	Cr, Co, Ni, Cu
Correlación negativa moderada	-	-	K[1], Pb	-	-	V, Se, Sn
Correlación positiva baja / muy baja	Se, Sn	Na[1], Mg, Al, K[1], Ca[2], Pb	K[2], Se	-	Na, Al, V, Fe, Ni, Sn, Pb	Mg, K[1], Ca[1], Mn, Zn, Cd
Correlación negativa baja / muy baja	Mo, Pb	-	-	-	-	Al, Mo, Ba, Pb

Lamentablemente, al comparar los datos de la Serie A con los datos la Serie B la mayoría de los elementos exhibieron bajas correlaciones entre sí, siendo el Cu y el Ni las únicas excepciones. Con respecto a lo anterior, se presume que la diferencia etaria de las muestras pudo haber tenido influencia en ello, dado la pérdida en la capacidad de fijar cationes que presentan algunas especies al envejecer. Tener en cuenta que la mayoría de los árboles que componían la Serie A eran varios años más jóvenes que los de la Serie B. No obstante, existen otros factores como la ubicación de los individuos que también pudo haber tenido incidencias.

Las bajas correlaciones entre las series se vio reflejado en las grandes diferencias al momento de establecer relaciones con los datos de la estación de monitoreo. Si se analizan solamente las correlaciones con el MP_{2,5}, los únicos elementos que concuerdan en los resultados de ambas series, en cuanto al desfase y meses en común, son Mg, Cu y As. Al realizar el mismo ejercicio con las correlaciones de los elementos traza del MP_{2,5}, sólo el Cu muestra resultados semejantes entre las series, aunque éstos no tienen relación con las correlaciones con el MP_{2,5}. Las correlaciones con el MP₁₀, por su parte, no presentan ninguna concordancia entre las series.

En vista de lo anterior, no hay garantías de que los resultados obtenidos en esta investigación para aquellos elementos distintos a los antes mencionados, puedan ser replicables para otras muestras de *Cedrus libani*, pues al parecer están afectos a las particularidades de cada individuo. De las dos series, los resultados de la Serie A son los más confiables, ya que implicaron un mayor periodo de comparación y mostraron mejores correlaciones que la Serie B.

Finalmente, se observa que al corregir los datos de Na y K, por medio de la digestión extra, las correlaciones mejoraron. Por el contrario, el Ca presentó resultados menos favorables cuando se utilizaron los datos corregidos. Sin embargo, independiente de que se establezcan mejores o peores correlaciones, el error de medición asociado a los valores corregidos es menor y, por lo tanto, son éstos los que deben considerarse al momento de sacar cualquier conclusión con respecto a los elementos aludidos.

5.2. Deducciones derivadas de la investigación

5.2.1. Efecto estacional en la acumulación de cationes

Las mejores correlaciones se establecieron en un 29,2% en torno a datos de material particulado correspondientes a los meses de verano, 29,9% a los meses de otoño, 18,8% a los meses de invierno, y 22,2% a los meses de primavera (ver Tabla 14). El que sean los datos de los meses de otoño y verano los que dieron mejores resultados, es consistente con lo descrito por Watmough (1999), quien señala que existe evidencia de que en árboles de la especie Aliso rojo (*Alnus rubra*) el Zn se acumula principalmente en otoño, mientras que el Pb en verano y otoño.

Tabla 14. Resumen de resultados ordenados en base a su estacionalidad (en rojo correlaciones negativas)

Estación	Desfase (años)	SERIE A			SERIE B		
		MP _{2,5}	Elementos en MP _{2,5}	MP ₁₀	MP _{2,5}	Elementos en MP _{2,5}	MP ₁₀
Verano (Ene-Mar)	+1	K[2], K[1], Mn, Fe, Co	-	Ca[2], Cr	Ca[2]	K[1]	-
	0	Ca[2], As	Ni	Ni	As, Mo	K[2], As	Ag
	-1	Al, Zn	Mo	Mn, Fe, Co	Al, V, Co, Ni, Se, Ag, Cd, Pb	-	-
	-2	-	Cu	Ca[1]	Mg, K[1], K[2], Mn	Cr, Cu, Zn	K[2]
Otoño (Abr-Jun)	+1	K[2], K[1], Mn, Fe, Co	-	-	-	-	-
	0	Ca[2], As	K[2], Ni	Ni	-	K[2]	-
	-1	Al, Zn	Mn, Zn, Mo	Mn, Cd, Sn	Al, V, Co, Ni, Se, Pb	-	Ca[2], As
	-2	Na[1], Mg, Ca[1]	Fe	Na[2], Ca[1], Zn, Ag, Mg	Mg, K[1], K[2], Mn	Cr, Cu, Se	-
Invierno (Jul-Sep)	+1	-	-	-	-	-	-
	0	Fe, Ag, Cd	K[2]	-	Ca[2],	-	-
	-1	Na[2], Zn, Ba	Mn, Zn	Mo, Cd, Sn	Se, Mo	-	Na, Fe, As
	-2	Cu	-	Na[2], Ag	K[2], Ca[1], Cu, Ag, Cd	Se	-
Primavera (Oct-Dic)	+1	-	-	-	-	-	-
	0	K[1], K[2], Cr, Mn, Fe, Co, Ag, Cd	K[2]	Ca[2], Cr	Ca[2], Zn	K[1]	-
	-1	Na[2]	Ni	Mo, Sn	Mo	K[2]	Fe, Ag
	-2	Cu	-	-	Na, K[2], Ca[1], Cr, Fe, Cu, Ag, Cd, Ba	-	-

La menor cantidad de resultados asociados a los meses de invierno concuerda con el hecho de que en dicho periodo el cambium se encuentra inactivo y el transporte de savia a través del xilema se ve reducido, lo cual probablemente disminuye la acumulación. Pese a que en otoño la absorción de nutrientes también es menor, en relación al periodo de primavera y verano, pareciera que, en este caso, las altas concentraciones de material particulado que se presentan son preponderantes. Recordar que gran parte de los elementos traza del material particulado alcanzaron sus máximas concentraciones en otoño, salvo aquellos elementos asociados a la resuspensión de polvo como el Mg.

Por otra parte, según Hagemeyer & Schäfer (1995), en primavera aumenta el contenido de ligandos y, por ende, el número de complejos, lo que disminuiría la fijación de cationes en la paredes del xilema. Esto justificaría que la cantidad de resultados referentes a dicho periodo fuera menor, aun cuando el flujo de savia es mayor que en otoño.

Sin perjuicio de lo anterior, no se tiene claridad de si las buenas correlaciones entre las variables, con respecto a algunos meses en específico, implican necesariamente que los elementos fueron absorbidos en dichos meses. Lo más probable es que haya un tiempo de retardo entre la deposición del material particulado en el suelo y la absorción de los elementos a través de las raíces. Este tiempo de retardo, sumado a la demora de algunos elementos en ascender por el xilema, producto de la interacción con las cargas negativas de la pared celular, justificaría el desfase observado entre las variables. Savard et al. (2006) ya habían dado cuenta anteriormente de este fenómeno, al percatarse de que individuos de la especie Picea negra (*Picea mariana*), cercanos a una planta de fundición en Rouyn-Noranda (Canadá), registraron los inicios de las operaciones de la planta con un desfase de 14 años entre las primeras emisiones de los metales de fundición, y su asimilación en los anillos de crecimiento. No obstante, en dicho caso, parte de la responsabilidad del desfase fue atribuida también a la translocación radial de los metales.

En este sentido, el que algunos elementos no presentaran desfase puede significar, por una parte, que tienen gran movilidad en el suelo y en el xilema²⁶, o simplemente que no ingresaron a través de la raíces, sino que por medio de otra vía de entrada (hojas o corteza). Sin embargo, debido a que la mayoría de los resultados indicaron que el desfase existe, se estaría confirmando la absorción radicular como la principal ruta de ingreso.

5.2.2. Aplicabilidad de los resultados en la determinación de eventos de contaminación

Pese a que se encontraron buenas correlaciones, no todas ellas tienen la misma utilidad al momento de evaluar la contaminación de Santiago. En términos prácticos es más relevante contar con información referente a aquellos meses en que las concentraciones de material particulado (o sus componentes) suelen ser más altas, que de aquellos en que las concentraciones son más bien bajas. Esto debido a que los meses en los que se registran las concentraciones máximas son los que finalmente evidencian los grandes eventos de

²⁶ Debe tener la suficiente movilidad en el xilema como para alcanzar rápidamente la altura de extracción de las muestras, pero no tanta como para que no interactúe con las paredes celulares, puesto que de ello depende el registro que queda en la madera.

contaminación y, a su vez, tienen mayor influencia en la variación anual. Además de que durante ellos se concentran la mayoría de las medidas adoptadas por las autoridades.

Por ejemplo, el Fe acumulado en los anillos de la Serie A se relacionó con los datos de Fe en el $MP_{2,5}$ correspondientes a los meses de Abril a Junio (otoño), que fueron justamente los meses en que se alcanzaron las mayores concentraciones de Fe en el material particulado. Por lo tanto, al graficar la concentración de Fe en los anillos, considerando el desfase respectivo (2 años), se observó que hay ciertas similitudes con la gráfica de la concentración anual de Fe en el $MP_{2,5}$, siendo posible distinguir en ambos casos un aumento importante entre los años 2003 y 2007, asociado a la aceleración en el crecimiento del parque automotriz²⁷ de un 1,2% a un 7,1% en dicho periodo (ver Figura 131) (INE, s.f.). El peak en el año 2007 ha sido atribuido principalmente a dos factores: la implementación del Transantiago que, dado los problemas que conllevó, incentivó la compra de autos privados; y las bajas temperaturas, que potenciaron el fenómeno de inversión térmica (Moreno et al., 2010, Jhun et al., 2013; Barraza et al., 2017).

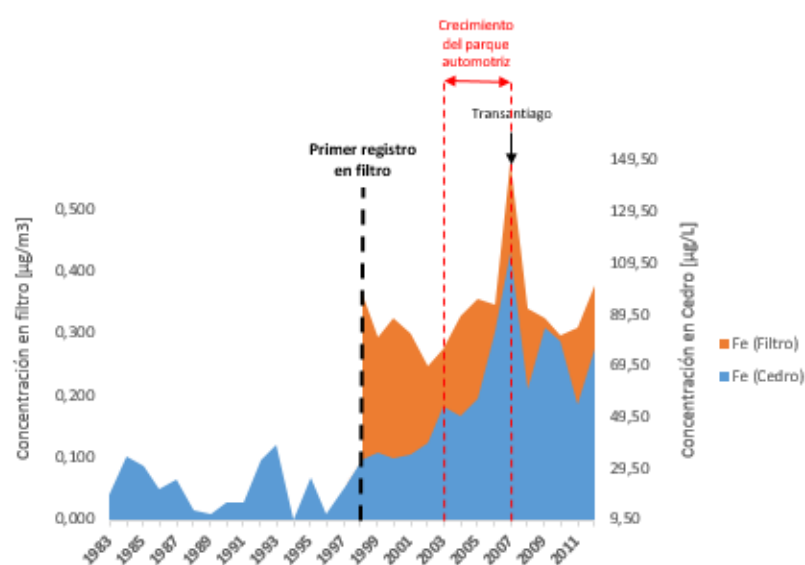


Figura 131. Variación de Fe periodo 1983-2012

Esto también queda en evidencia al realizar el mismo ejercicio con otro trazador del tráfico vehicular como lo es el Zn, en cuyo caso nuevamente se ocuparon los datos de la Serie A, puesto que fueron los que mejor correlacionaron con los datos de los filtros en torno a los meses de máxima concentración en el $MP_{2,5}$ (ver Figura 132).

²⁷ Según CMMCh (2015) el Fe es atribuible tanto a las emisiones de los vehículos como a la resuspensión de polvo. Ambas emisiones aumentan con el crecimiento del parque automotriz.

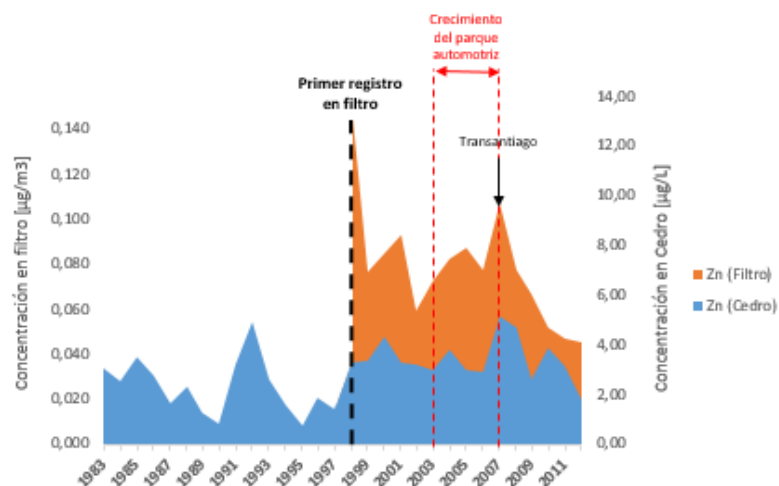


Figura 132. Variación de Zn periodo 1983-2012

El saber que existen tales similitudes entre lo que señalan los datos de los filtros y los datos de los árboles, permite confiar en que estos últimos sean igual de representativos de la calidad del aire para los años anteriores al primer registro de los filtros.

En este contexto, se puede apreciar un peak en la concentración de Zn el año 1993, menos significativo que el del año 2007, pero que coincide con lo muestran los datos de la Serie B para el Cr, también trazador del tráfico vehicular (ver Figura 133). El Fe igualmente presenta un peak, pero en el año 1992. Como se puede ver en la Figura 134, ese mismo año significó un aumento en la concentración de $MP_{2,5}$ con respecto al año 1991, posiblemente influenciado por la aceleración en el crecimiento del parque automotriz del 7,3% al 10,0% entre un año y el otro (a nivel país²⁸) (Registro Civil, s.f.). Dado que las diferencias entre los elementos trazadores son pequeñas, se sugiere que dichos peaks corresponden al mismo evento de contaminación, tan sólo que los registros vinculados al Fe son más exactos que los correspondientes al Zn y el Cr.

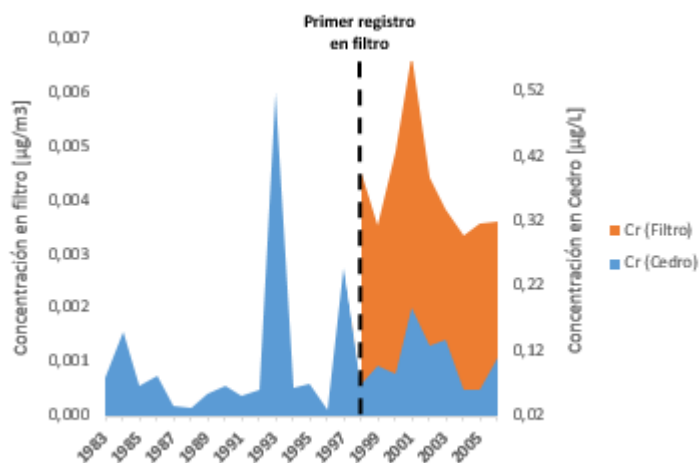


Figura 133. Variación de Cr periodo 1983-2006

²⁸ Se presume que la tasa de crecimiento a nivel país es representativa de la tasa de crecimiento de la Región Metropolitana, ya que dicha región cuenta con el 56% del total del parque automotriz y entre 2002 y 2012 presentaron el mismo comportamiento (ver Anexo D).

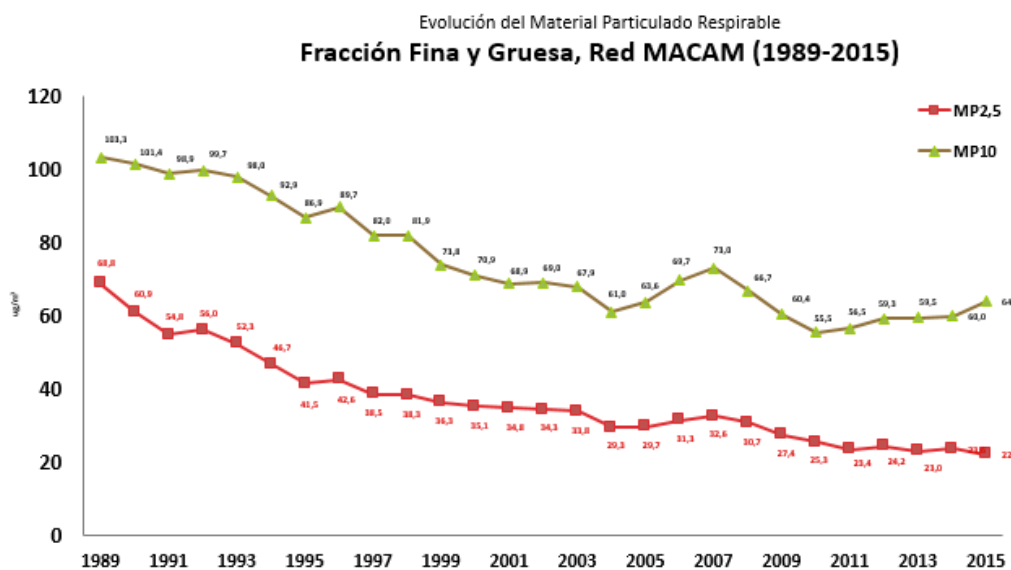


Figura 134. Evolución del material particulado respirable

Fuente: MMA (2016)

Con las concentraciones de Ni y Mo en los anillos de la Serie A sucede algo parecido que con los elementos anteriormente mencionados, en el sentido de que correlacionaron con los datos de algunos de los meses donde registran sus más altas concentraciones en el MP_{2.5} (meses de otoño). No obstante, también tuvieron fuertes influencias de los meses cálidos, especialmente el Ni, por lo que la evidencia de los eventos de contaminación es más difusa (ver Figura 135 y Figura 136). Ambas especies son trazadoras de fuentes industriales y tuvieron un aumento importante tras las restricciones en la importación de gas natural desde Argentina en 2004, lo que implicó su sustitución por combustibles más contaminantes, alcanzando sus peaks en 2008 (Moreno et al., 2010; Jhun et al., 2013; CMMCh, 2015; Barraza et al., 2017). Luego de la puesta en marcha del Terminal GNL Quintero en 2009, el cual permitió la importación de gas natural de otros países como Trinidad y Tobago, las industrias volvieron a recurrir al gas natural como combustible, reduciendo, de esta manera, las concentraciones de Ni y Mo en el aire.

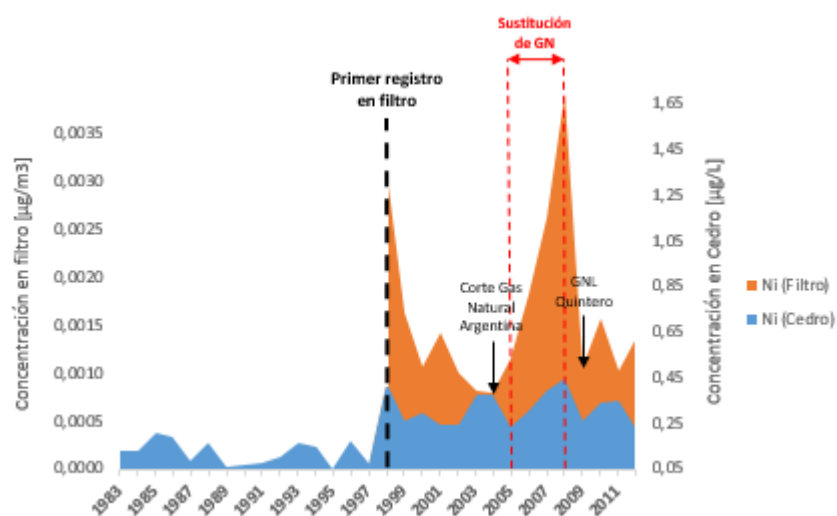


Figura 135. Variación de Ni periodo 1983-2012

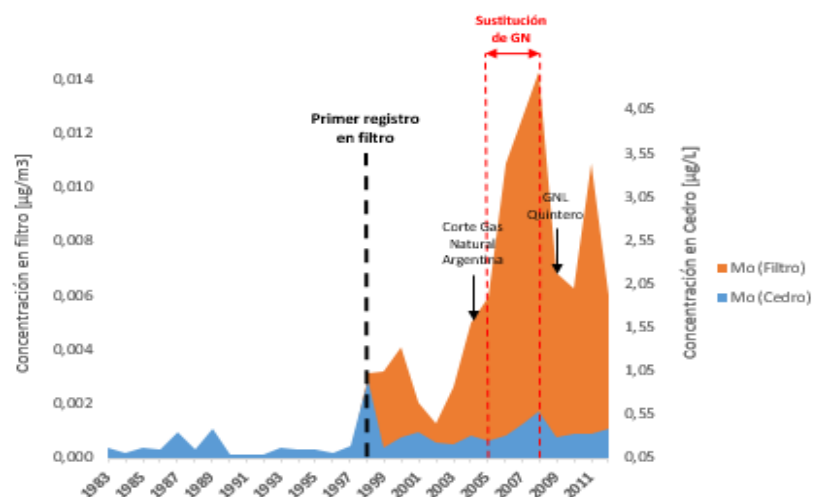


Figura 136. Variación de Mo periodo 1983-2012

Cabe mencionar que, en cuanto a los datos de los filtros, el Mo era uno de los elementos que presentaba menos del 70% de los datos sobre el límite de detección, por lo que el que se encontrara correlación con los datos de los anillos es un resultado bastante valioso desde el punto de vista de poder validar esta información a través de la Dendroquímica.

De momento no se manejan antecedentes que justifiquen las variaciones en las concentraciones de Ni y Mo previas al año 1998, por lo que sería una temática interesante de abordar en futuras investigaciones.

Curiosamente cada uno de los elementos recién mencionados dio cuenta de concentraciones en los últimos años superiores a las de años anteriores, a pesar de que las concentraciones de material particulado se han reducido de forma importante desde 1989. Esto podría ser consecuencia de la persistencia de los elementos en el ambiente. Jhun et al. (2013) sostienen que elementos como el bromo y el plomo siguen estando presentes en el ambiente a pesar de que se eliminaron de la gasolina, posiblemente incorporados al suelo.

5.2.3. Alteración del ciclo de nutrientes producto de la deposición de material particulado en el suelo

Según Grantz et al. (2003) la deposición de material particulado en el suelo puede alterar el ciclo de nutrientes e inhibir la absorción de los mismos. Particularmente, el $MP_{2,5}$ es considerado responsable de la acidificación de los suelos, debido a su contenido de N y S. En dicho escenario, y en suelos ricos en Al, el Al se acumula en el tejido de las raíces y reduce la absorción de cationes esenciales para las plantas, como el Ca.

Siguiendo esta línea, los resultados muestran que, para la Serie A, tanto el Al como el Ca (valor corregido) correlacionan con los datos de $MP_{2,5}$ correspondientes a los meses de Febrero a Abril, pero mientras el Al muestra una correlación positiva, con un año de desfase, el Ca muestra una correlación negativa, sin desfase. Vale decir, al aumentar la concentración de $MP_{2,5}$ durante los meses de verano y otoño, aumenta también la concentración de Al, lo que, al mismo tiempo, reduce la concentración de Ca (ver Figura 38 y Figura 45).

El desfase en la fijación del Al con respecto al Ca podría ser consecuencia de que el primero tiene una mayor densidad de carga iónica y, por lo tanto, tiene menor movilidad a través de las paredes celulares del xilema (Prasad, 2001). Esto sumado a su limitada absorción, producto de tratarse de un elemento tóxico para las plantas, retrasaría su aparición en los anillos de crecimiento.

Algunos autores utilizan la razón Ca/Al como indicador de los cambios en el ecosistema a lo largo del tiempo en respuesta a la deposición ácida (Grantz et al., 2003). Al calcular esta razón con los datos de la Serie A y correlacionarla con la concentración de $MP_{2,5}$ para los meses de Febrero a Abril, en términos de sus anomalías, se llegó a la conclusión de que efectivamente existe una relación significativa entre el $MP_{2,5}$ y la acidez del suelo, que afecta la absorción de Ca (ver Figura 137).

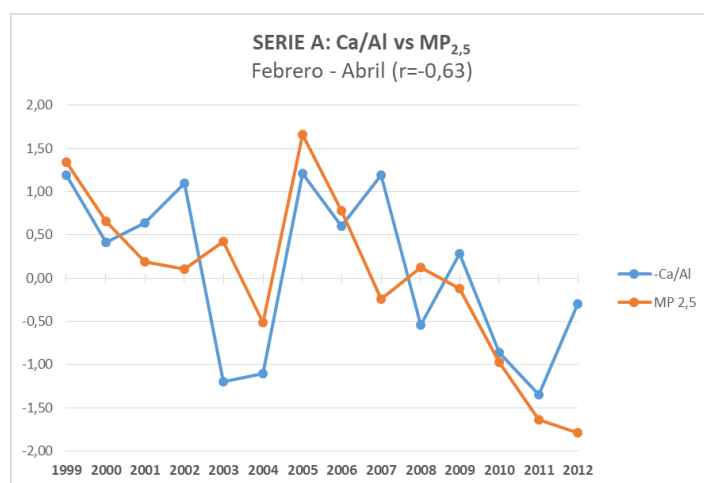


Figura 137. Relación entre la acidez del suelo y la concentración de $MP_{2,5}$

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

En vista de lo anterior, las altas correlaciones de los elementos acumulados en los árboles con el $MP_{2,5}$ y el MP_{10} no se explican exclusivamente en función de la contribución de las fuentes emisoras de dichos elementos en la formación de material particulado, como sería la interpretación que se le daría si es que se trataran de registros pasivos como los filtros. Estos resultados pueden ser también un reflejo de la respuesta de los árboles ante las alteraciones que provoca la deposición de estas partículas en su hábitat.

Por lo mismo, si lo que se quiere es determinar la responsabilidad de las fuentes en la contaminación de Santiago, no es recomendable guiarse por aquellos elementos que son considerados macronutrientes para las plantas, pues las probabilidades de que los resultados sean perturbados por situaciones de estrés para el árbol son altas (Bukata & Kyser, 2008). Por el contrario, micronutrientes como el Fe, Mo y Ni han mostrado ser de utilidad en el estudio de eventos de contaminación, lo cual coincide con lo expuesto por Odabasi et al. (2016), quienes estudiaron las variaciones espaciales y temporales de elementos traza y macronutrientes en árboles localizados en la región industrial de Aliaga (Turquía).

5.3. Respuesta a la pregunta de investigación

Sobre la base de que los resultados indicaron que las mediciones atmosféricas obtenidas de la estación Parque O'Higgins, tanto en términos de las concentraciones de MP_{10} , $MP_{2,5}$ y de elementos traza del $MP_{2,5}$, presentan correlaciones superiores a 0,6 con la mayoría de los elementos acumulados en los anillos de crecimiento de árboles de la especie *Cedrus libani* del Parque Quinta Normal, se puede afirmar que efectivamente existe una relación significativa entre las variables y, por lo tanto, se cumple la hipótesis de investigación, respondiendo favorablemente a la pregunta de investigación.

En consecuencia, se concluye que la Dendrocronología es una herramienta analítica válida para evaluar la contaminación atmosférica en Santiago y, por ende, sería posible ampliar la historia ambiental de esta ciudad. No obstante, es importante recalcar que esto solamente ha sido comprobado con respecto a la especie *Cedrus libani* en un parque en particular de Santiago, por lo que sería necesario corroborarlo también en otros parques y otras especies.

Dado que los resultados de la Serie A son los más confiables, y que los elementos del $MP_{2,5}$ que correlacionan con los mismos elementos acumulados en los árboles (con respecto a los meses de máxima concentración en el aire) tienen mayor utilidad al momento de registrar eventos de contaminación asociadas a un grupo de fuentes específicas, pareciera ser que el Fe, Zn, Ni y Mo son los trazadores idóneos para extender los registros históricos de contaminación. Sin perjuicio de lo anterior, el resto de los elementos pueden ser un gran aporte para extender hacia el pasado los registros de las concentraciones de $MP_{2,5}$ y MP_{10} en función de las alteraciones indirectas que provoca el material particulado en la absorción de nutrientes y metales a través de las raíces de los árboles, lo cual debe ser estudiado con mayor profundidad.

5.4. Recomendaciones

- Para poder tener mayor seguridad de si las variaciones en las concentraciones de los elementos en la madera son representativas de los cambios en la composición del material particulado, o simplemente responden a alteraciones biológicas, es recomendable ampliar este estudio incluyendo datos de temperatura, precipitaciones y ancho de anillos como nuevas variables independientes, y complementarlo con una caracterización del suelo del Parque Quinta Normal, de donde se extrajeron los tarugos. Esto ayudaría a entender qué factores están teniendo mayor influencia en la absorción de estos elementos por los árboles y evaluar sus efectos.
- Es aconsejable buscar un sitio cercano, en lo posible con niveles de concentración de contaminantes bastante inferiores a los de Santiago, del que se pudieran extraer más muestras de *Cedrus libani*. De tal forma, de distinguir entre los patrones naturales que siguen los elementos dentro de la madera en esta especie, y los patrones atribuibles a eventos de contaminación.
- Se sugiere que para próximos estudios dendroquímicos se consideren muestras de angiospermas de porosidad anular, pues el hecho de que conduzcan la savia bruta por el anillo más reciente podría dar como resultado una mejor resolución anual.

Referencias

- Aguirre, V. (30 de Julio de 2015). *Remodelación de la Quinta Normal de Agricultura · Santiago, 2009-[2015]*. Obtenido de <http://www.lofscapes.com/blog/2015/7/24/remodelacin-de-la-quinta-normal-de-agricultura-santiago-2009-2015>
- Alvarado, G. (Diciembre de 2006). *Estimación del aporte de diferentes fuentes a la contaminación atmosférica por partículas en Santiago, mediante un modelo de balance de masas de elementos químicos*. Obtenido de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2006/alvarado_g/sources/alvarado_g.pdf
- Arredondo, B. (2014). *Evaluación de los cambios en el medio ambiente químico del Complejo Industrial Ventanas a través de registros históricos y anillos de crecimiento de árboles*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Ambiental, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Valparaíso, Chile.
- Badenier, P. (2004). *Evolución de la Calidad del Aire en Santiago 1997 / 2004*. Obtenido de http://www.sinia.cl/1292/articles-39731_recurso_1.pdf
- Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A., & Gallardo, L. (2017). Temporal evolution of main ambient PM_{2.5} sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Bondietti, E., Momoshima, N., Shortle, W., & Smith, K. (1990). A historical perspective on divalent cation trends in red spruce stemwood and the hypothetical relationship to acidic deposition. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(12), 1850-1858.
- Bukata, A., & Kyser, T. (2008). Tree-ring elemental concentrations in oak do not necessarily passively record changes in bioavailability. *Science of the Total Environment*, 390(1), 275-286.
- Cantin, M. (2003). *Utilización de anillos de crecimiento de ciprés (Cupressus macrocarpa Hartw.) para inferir el patrón temporal de contaminación en Ventanas, V Región, (1960-2000)*. Taller de Licenciatura, Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía, Quillota, Chile.
- CEPAL/OCDE. (2016). *Evaluaciones del desempeño ambiental: Chile 2016*. Santiago, Chile.
- CEPIS. (1982). *Red Panamericana de Muestreo de la Contaminación del Aire (REDPANAIRES); informe final 1967-1980*. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/013553/013553.html>
- Cereceda, F. (2015). Orígenes y distribución de contaminantes atmosféricos. *Capítulo 2: La Atmósfera*. Clase Química del Medio Ambiente. UTFSM.
- Chaney, W. (2000). *Water and chemical movement beneath the bark*. Obtenido de <http://woodlandsteward.squarespace.com/storage/past-issues/WATERANDCHEMICAL.htm>
- CMMCh. (2011). *Análisis de Tendencia Para Material Particulado en la Región Metropolitana (2008-2010)*.

- CMMCh. (2015). *Análisis de tendencia del material particulado en la Región Metropolitana 2012-2014*.
- CMMCh. (2017). *Caracterización del material particulado fino y grueso en la Región Metropolitana*.
- Cortés, C. (7 de Julio de 2014). Contaminación: así miden la calidad del aire las 207 estaciones de monitoreo del país. *La Tercera*.
- Delgado, L. (1996). *Estudio comparativo de contenido de cobre en bosques de clima mediterráneo de Chile central*. Tesis Magíster, Universidad Católica de Chile, Facultad de Ciencias, Santiago.
- Flis, P., Ouerdane, L., Grillet, L., Curie, C., Mari, S., & Lobinski, R. (2016). Inventory of metal complexes circulating in plant fluids: a reliable method based on HPLC coupled with dual elemental and high-resolution molecular mass spectrometric detection. *New Phytologist*.
- Gallego, A., González, I., Sánchez, B., Fernández, P., Garcinuño, R., Bravo, J., Pradana, J., García, M., Senén, J. (2012). *Contaminación Atmosférica*. Madrid: UNED.
- Garreaud, R., & Rutllant, J. (2006). Factores Meteorológicos de la contaminación atmosférica. En R. Morales, *Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación atmosférica en la ciudad de Santiago* (págs. 35-54). Editorial Universitaria.
- Giménez, A., Moglia, J., Hernández, P., & Gerez, R. (2005). *Anatomía de madera*.
- Gómez, M. (20 de Noviembre de 2016). *UD 5. La nutrición de las plantas*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/martabiogeo/ud-5-nutricion-de-las-plantas>
- Gramsch, E., Reyes, F., Vásquez, Y., Oyola, P., & Rubio, M. (2016). Prevalence of Freshly Generated Particles during Pollution Episodes in Santiago de Chile. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(9), 2172-2185 .
- Grantz, D., Garner, J., & Johnson, D. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29, 213– 239.
- Hagemeyer, J., & Schäfer, H. (1995). Seasonal variations in concentrations and radial distribution patterns of Cd, Pb and Zn in stem wood of beech trees (*Fagus sylvatica* L.). *The Science of the Total Environment*, 166, 77-87.
- Hanne, M. (2013). *Informe de Fiscalización Ambiental - Inspección Ambiental Red MACAM III*.
- Hoffmann, A. (2010). *El árbol urbano en Chile*. Santiago, Chile: Fundación Claudio Gay.
- Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, 43(1), 68-78.
- Hristovski, S., & Melovski, L. (2010). Radial patterns of 13 elements in the tree rings of beech trees from Mavrovo National Park, FYROM. *Archives of Biological Sciences*, 62(2), 351-361.
- INE. (s.f.). *Transporte y comunicaciones - Parque de Vehículos* . Obtenido de <http://www.ine.cl/estadisticas/economicas/transporte-y-comunicaciones?categoria=Anuarios>

- Jhun, I., Oyola, P., Moreno, F., Castillo, M., & Koutrakis, P. (2013). PM_{2.5} mass and species trends in Santiago, Chile, 1998 to 2010: The impact of fuel-related interventions and fuel sales. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(2), 161-169.
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press.
- Katz, R. (2006). Contaminación del aire en Santiago: estamos mejor que lo que creemos pero a mitad de camino. En A. Galetovic, *Santiago. Dónde estamos y hacia dónde vamos*. CEP.
- Kurz-Besson, C., Lousada, J., Gaspar, M., Correia, I., David, T., Soares, P., Cardoso, R., Russo, A., Varino, F., Meriaux, C., Trigo, R., Gouveia, C. (2016). Effects of Recent Minimum Temperature and Water Deficit Increases on Pinus pinaster Radial Growth and Wood Density in Southern Portugal. *Frontiers in Plant Science*, 7(1170).
- Landreneau, J., & Ray, A. (2009). *Muestreo de Contaminantes con Monitores de PM Continuos*. Obtenido de http://www.servir.net/images/imageviewer/aire_entrenamiento/200904_costa_rica_t raining_slides/1-Muestreo_de_Contaminantes.ppt
- Lepp, N. (1975). The potential of tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns. *Environmental Pollution*, 9, 49-61.
- Martin, M., & Coughtrey, P. (1982). *Biological Monitoring of Heavy Metal Pollution: Land and Air*. Applied Science Publishers.
- Met One Instruments, Inc. (2008). *BAM-1020 Particulate Monitor Operation Manual*. Obtenido de https://www.arb.ca.gov/airwebmanual/instrument_manuals/Documents/BAM-1020-9800%20Manual%20Rev%20G.pdf
- Miranda, C. (16 de Febrero de 2017). *Experto asegura que las muertes por contaminación no disminuirán sustancialmente en los próximos veinte años*. Obtenido de <http://www.usach.cl/news/experto-asegura-las-muertes-contaminacion-no-disminuiran-sustancialmente-los-proximos-veinte>
- Mitra, G. (2017). Essential Plant Nutrients and Recent Concepts about their Uptake. En M. Naeem, A. Ansari, & S. Gill, *Essential Plant Nutrients* (págs. 3-36). Springer.
- MMA. (Agosto de 2014). *Informe técnico de antecedentes para declarar a la Región Metropolitana como Zona Saturada por MP_{2,5}*. Santiago.
- MMA. (Octubre de 2016). *Santiago Respira: Nuevo Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica por MP_{2,5}*. Obtenido de <http://cdn.plataformaurbana.cl/wp-content/uploads/2016/10/ppt-plan-descontaminacio%CC%81n.pdf>
- MMA. (2017). *Tercera Encuesta Nacional de Medio Ambiente*. Obtenido de http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/04/Presentacion_ENMA-MMA.pptx
- Mogollon, R. (7 de Junio de 2016). *Fuentes Fijas*. Obtenido de <https://www.emaze.com/@ACQCZTIL/FUENTES-FIJAS>
- Momoshima, N., & Bondietti, E. (1990). Cation binding in wood: applications to understanding historical changes in divalent cation availability to red spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(12), 1840-1849.

- Morales, J. (24 de Junio de 2015). Detalles de la nube negra que atormenta a los santiaguinos. *LUN*, pág. 20.
- 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. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(12), 1410-1421.
- Municipalidad de Santiago. (s.f.). *Parque Quinta Normal*. Obtenido de <http://www.santiagocapital.cl/fichas/home/parque-quinta-normal/parques-y-plazas/>
- Muñoz, M. (1992). *La contaminación atmosférica en Santiago: Impacto sobre la salud de la población*. Obtenido de https://www.cepchile.cl/cep/site/artic/20160303/asocfile/20160303184615/rev45_munoz.pdf
- Muñoz, V. (2017). *Informe Técnico cumplimiento de normas de calidad del aire por MP2,5, MP10, O3, SO2, NO2 Y CO - Red MACAM III*.
- Museo Nacional de Historia Natural. (2014). *Parque Quinta Normal, un laboratorio natural*. Obtenido de http://www.mnhn.cl/613/articles-53794_archivo_01.pdf
- Nagda, N., Rector, H., & Koontz, M. (1986). *Guidelines For Monitoring Indoor Air Quality*. CRC Press.
- Nilo, F. (2012). *Contaminación atmosférica por material particulado fino y su relación con la configuración sinóptica en la Región Metropolitana*. Santiago.
- Odabasi, M., Tolunay, D., Kara, M., Ozgunerge Falay, E., Tuna, G., Altioek, H., Dumanoglu, Y., Bayram, A., Elbir, T. (2016). Investigation of spatial and historical variations of air pollution around an industrial region using trace and macro elements in tree components. *Science of The Total Environment*, 550, 1010-1021.
- Osses, A., Gallardo, L., & Faundez, T. (2013). Analysis and evolution of air quality monitoring networks using combined statistical information indexes. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 65.
- Prasad, M. (2001). *Metals in the Environment: Analysis by Biodiversity*.
- Préndez, M., Ortiz, J., Cortés, E., & Cassorla, V. (1984). Elemental Composition of Airborne Particulate Matter from Santiago City, Chile, 1976. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 34(1), 54-56.
- Regent Instruments Canada Inc. (2014). *WinDENDRO™ 2014a for tree-ring analysis*.
- Registro Civil. (s.f.). *Registro de Vehículos Motorizados*. Obtenido de <https://www.registrocivil.cl/Servicios/Estadisticas/Archivos/vehiculosMotorizados/vehic.html>
- Romo-Kroeger, C., Avila, M., Eaton, L., & López, L. (1996). Analysis of contaminating elements in tree rings in Santiago. *International Journal of PIXE*, 6(1-2), 331-337.
- Rutllant, J. (1994). *On the generation of coastal lows in central Chile*. Internal report IC/94/167, International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italia.

- Savard, M., Bégin, C., Parent, M., Marion, J., & Smirnoff, A. (2006). Dendrogeochemical distinction between geogenic and anthropogenic emissions of metals and gases near a copper smelter. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 6(2-3), 237–247.
- Sax, S., Koutrakis, P., Ruiz, P., Cereceda, F., Gramsch, E., & Oyola, P. (2007). Trends in the Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57(7), 845-855.
- Schulman, E. (1956). *Dendroclimatic changes in semiarid America*. Tucson: University of Arizona Press.
- Seinfeld, J., & Pandis, S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, Inc.
- SEREMI del Medio Ambiente R.M. (2017). *Informe Final para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica por Material Particulado Respirable (MP10) - Periodo 2016*.
- Sibtec Scientific. (Junio de 2004). *Increment Borers*. Obtenido de <http://www.sibtec.com/incrementborers.html>
- SINCA. (s.f.). *Información histórica - Región Metropolitana de Santiago*. Obtenido de <http://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/M>
- Smith, K., & Shortle, W. (1996). Tree biology and dendrochemistry. En J. Dean, D. Meko, & T. Swetnam, *Tree Rings, Environment, and Humanity* (págs. 629-635). Tucson, Arizona: Radiocarbon.
- Thermo Fisher Scientific Inc. (2007). *Operating Manual, TEOM Series 1400a Ambient Particulate (PM-10) Monitor*. Obtenido de <https://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/EPM-manual-TEOM1400ab.pdf>
- Trier, A. (1984). Observations on inhalable atmospheric particulates in Santiago, Chile. *Journal of Aerosol Science*, 15(3), 419-421.
- Trier, A., & Silva, C. (1987). Inhalable urban atmospheric particulate matter in a semi-arid climate: The case of Santiago De Chile. *Atmospheric Environment*, 21(4), 977-983.
- UC Davis. (2008). *Secondary Growth in Woody Plants*. Obtenido de <http://www231.pair.com/fzwester/courses/bis10v/week8/12secondarygrowth.html>
- UNNE. (2013). *Tema 16. Tejidos conductores o vasculares - Floema*. Obtenido de <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema16/tema16.htm>
- USEPA. (16 de Junio de 2017). *List of designated reference and equivalent methods*. Obtenido de https://www3.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/criteria/AMTIC_List_June_2017_update_6-19-2017.pdf
- Valdés, A., Zanobetti, A., Halonen, J., Cifuentes, L., Morata, D., & Schwartz, J. (2012). Elemental concentrations of ambient particles and cause specific mortality in Santiago, Chile: a time series study. *Environmental Health*, 11(82).
- Vazquez, N., & Esquivel, J. (26 de Noviembre de 2014). *Propiedades de los materiales*. Obtenido de <https://www.emaze.com/@AOOCRLWL/Presentation-Name>

Watmough, S. (1999). Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal.
Environmental Pollution, 106(1999), 391-403.

WHO. (20 de Mayo de 2016). *Ambient Air Pollution Database*. Obtenido de
[http://www.who.int/entity/phe/health_topics/outdoorair/databases/WHO_AAP_data
base_May2016_v3web.xlsx](http://www.who.int/entity/phe/health_topics/outdoorair/databases/WHO_AAP_data_base_May2016_v3web.xlsx)

WHO. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*.
Geneva, Suiza.

Anexos

Anexo A: Cálculo de la concentración de $MP_{2,5}$

La concentración estándar de partículas, en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, es calculada corrigiendo el volumen colectado en base a mediciones de temperatura y presión (25°C y 160 mm Hg) (CMMCh, 2011). Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

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

$MP_{2,5}$: 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, en [g].

W_f : Masa promedio final del filtro expuesto, en [g].

10^6 : Factor de conversión para transformar de [g] a $[\mu\text{g}]$.

V_{std} : Volumen de aire, en $[\text{m}^3]$, que pasó a través del filtro, corregido a las condiciones estándares de presión y temperatura.

Anexo B: Coordenadas árboles muestreados

Tabla 15. Coordenadas árboles muestreados

Código identificador	Latitud [°]	Longitud [°]
QUI 01	-33,438959	-70,681709
QUI 02	-33,441291	-70,680931
QUI 03	-33,441555	-70,680763
QUI 04	-33,440751	-70,681538
QUI 05	-33,441201	-70,681538
QUI 06	-33,441340	-70,682016
QUI 07	-33,441196	-70,682256
QUI 08	-33,442704	-70,681119
QUI 09	-33,442869	-70,681985
QUI 10	-33,441337	-70,682802
QUI 11	-33,441113	-70,682614
QUI 12	-33,441159	-70,682448
QUI 13	-33,441198	-70,682893
QUI 14	-33,441132	-70,683344
QUI 15	-33,440540	-70,683679
QUI 16	-33,440560	-70,683833
QUI 17	-33,441669	-70,684623
QUI 18	-33,441541	-70,684857
QUI 19	-33,440911	-70,686837
QUI 20	-33,440815	-70,686797
QUI 21	-33,439499	-70,685931
QUI 22	-33,439481	-70,685619

Anexo C: Otros resultados

Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ en el aire y la acumulación de elementos químicos en los anillos de crecimiento

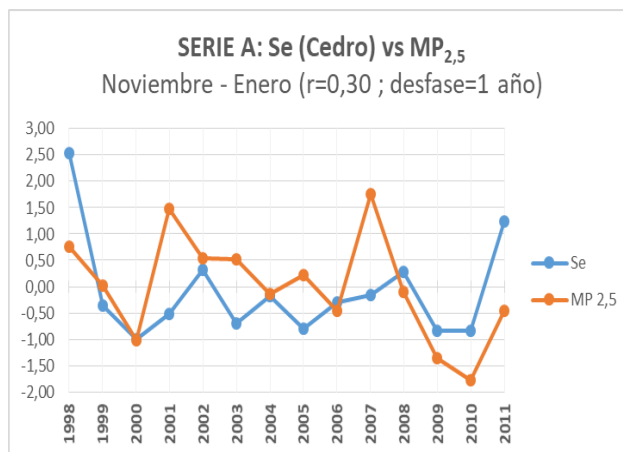


Figura 138. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Se en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

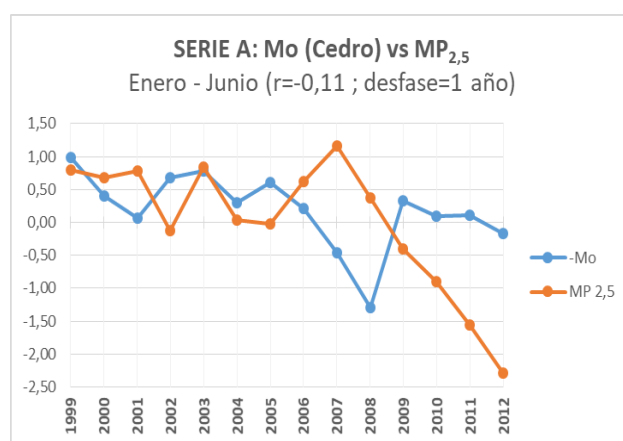


Figura 139. Relación entre la concentración de $MP_{2,5}$ y la acumulación de Mo en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

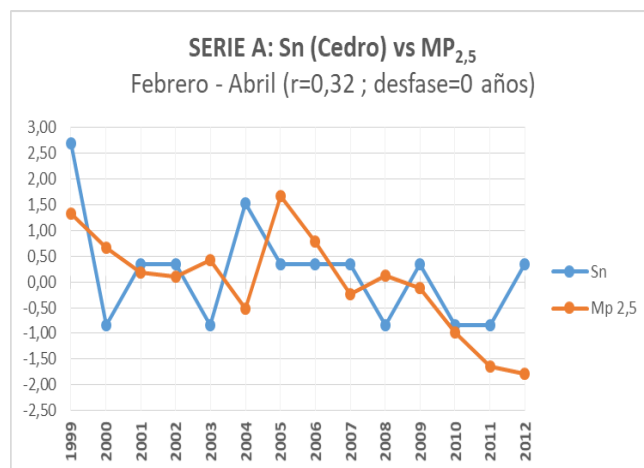


Figura 140. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Sn en los anillos de la Serie A

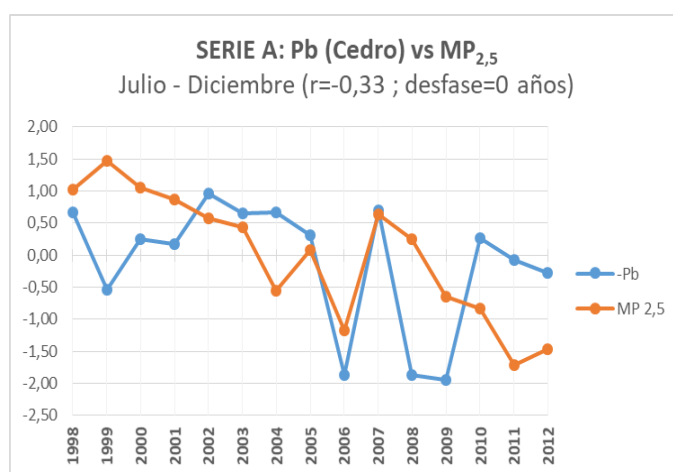


Figura 141. Relación entre la concentración de MP_{2,5} y la acumulación de Pb en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

Relación entre la concentración de elementos químicos en el MP_{2,5} y la acumulación de los mismos en los anillos de crecimiento

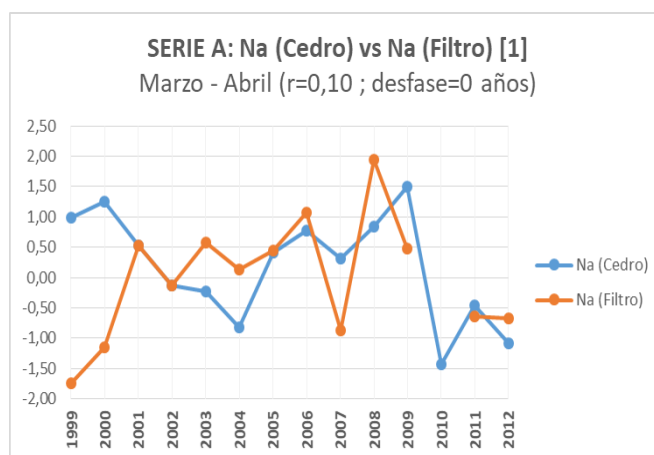


Figura 142. Relación entre la concentración de Na en el MP_{2,5} y su acumulación en los anillos de la Serie A

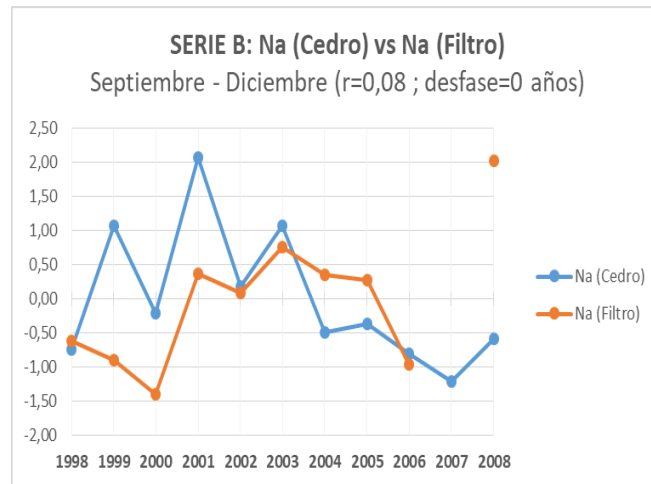


Figura 143. Relación entre la concentración de Na en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

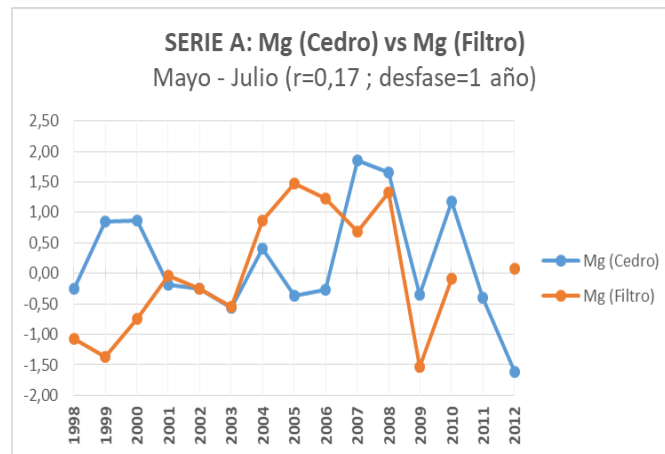


Figura 144. Relación entre la concentración de Mg en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

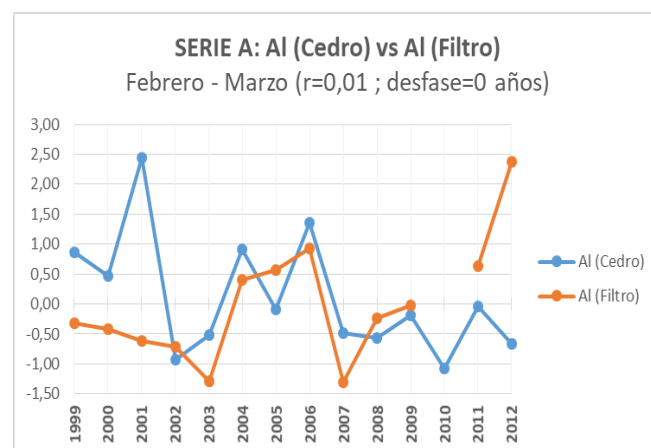


Figura 145. Relación entre la concentración de Al en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

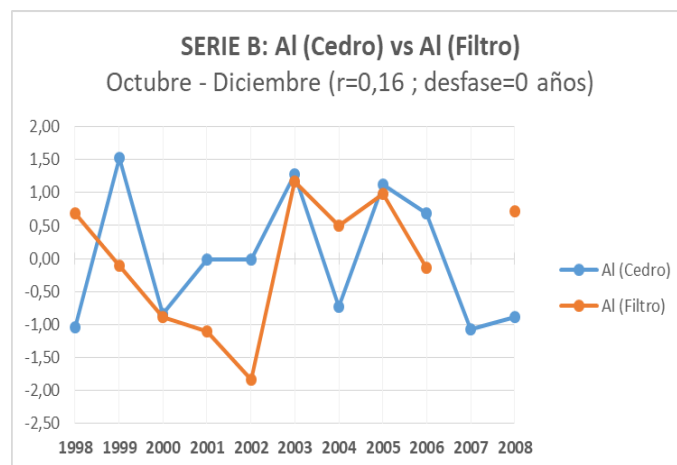


Figura 146. Relación entre la concentración de Al en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

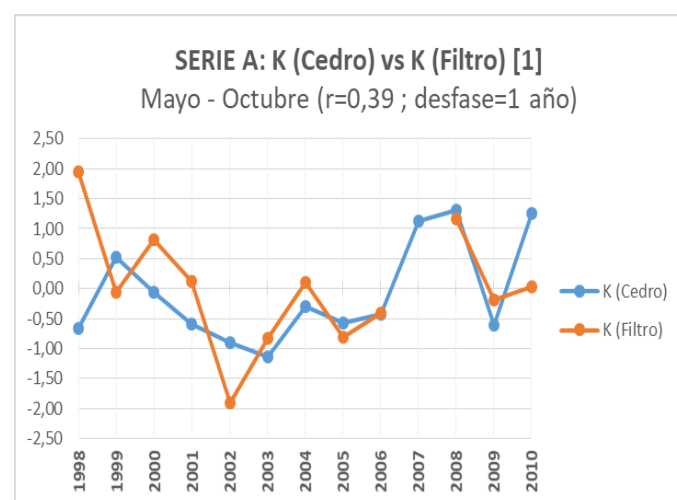


Figura 147. Relación entre la concentración de K en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

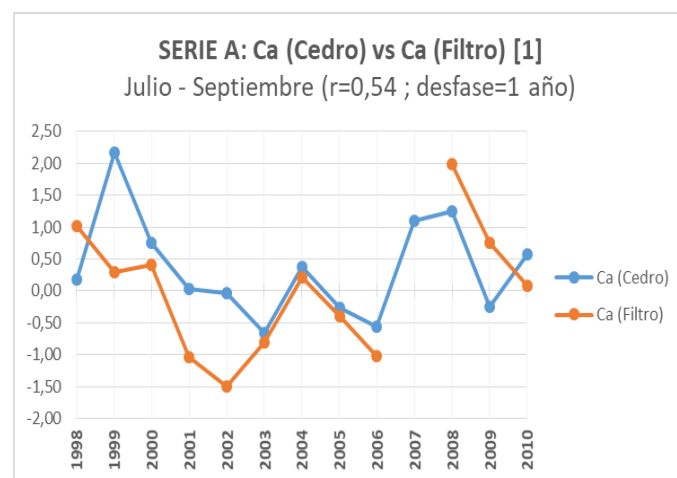


Figura 148. Relación entre la concentración de Ca en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

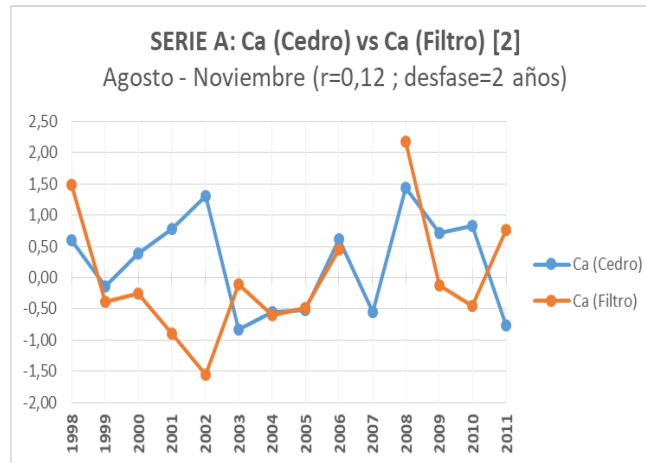


Figura 149. Relación entre la concentración de Ca en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

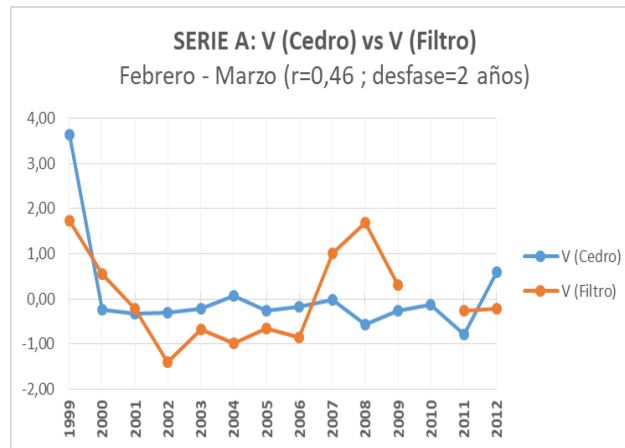


Figura 150. Relación entre la concentración de V en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

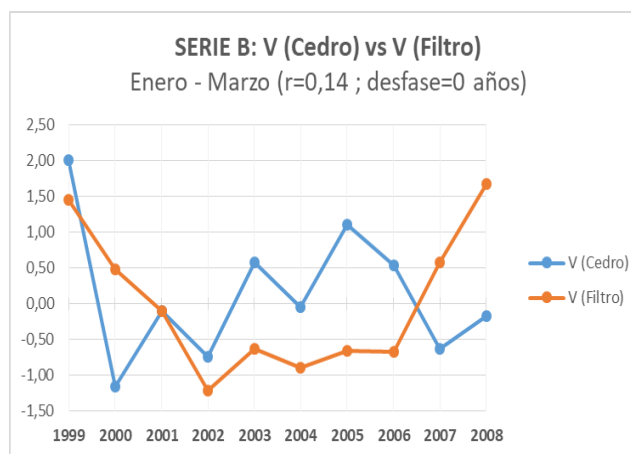


Figura 151. Relación entre la concentración de V en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

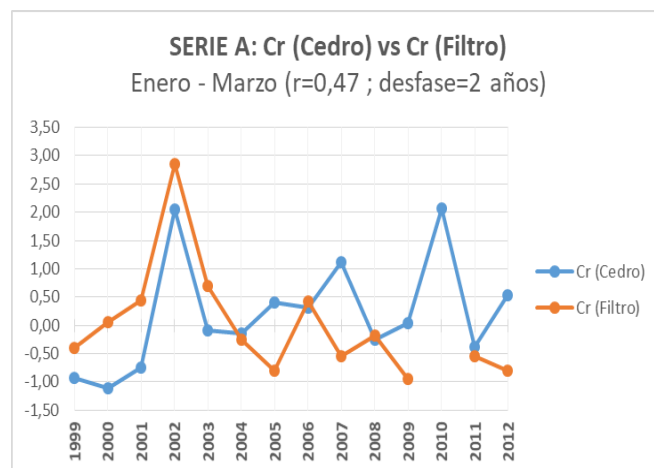


Figura 152. Relación entre la concentración de Cr en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

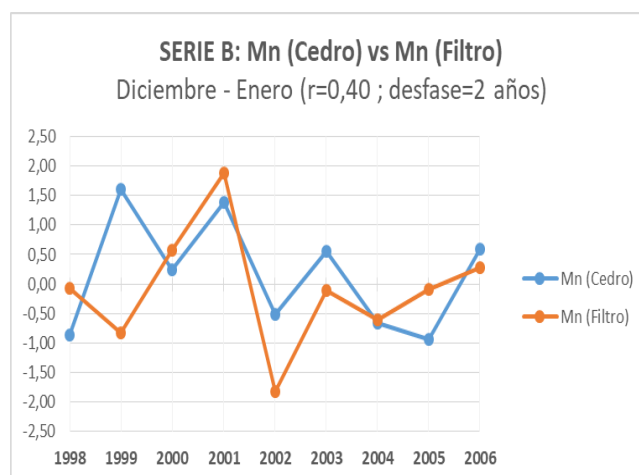


Figura 153. Relación entre la concentración de Mn en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

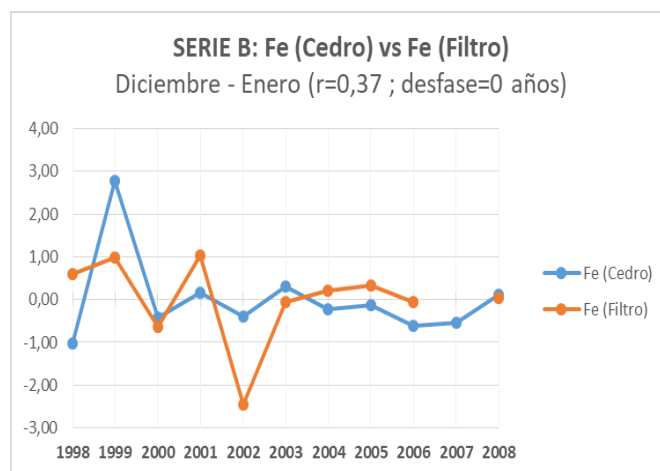


Figura 154. Relación entre la concentración de Fe en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

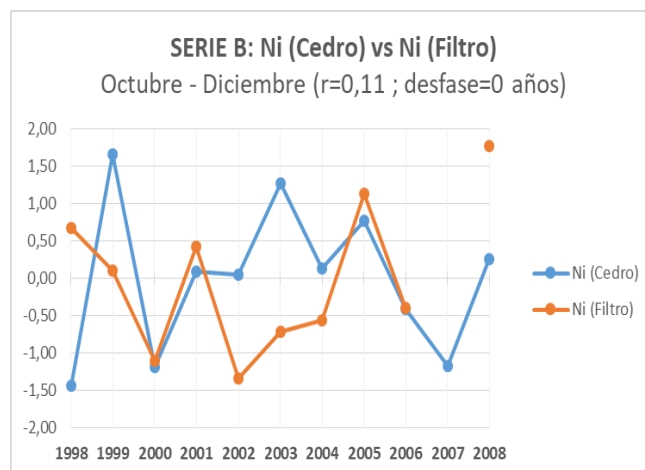


Figura 155. Relación entre la concentración de Ni en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

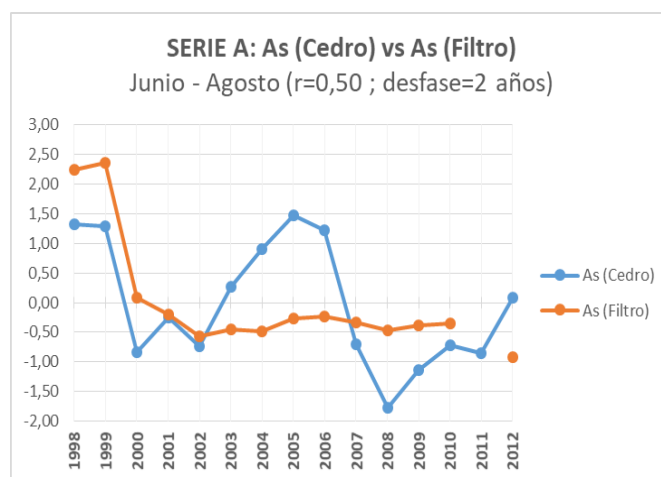


Figura 156. Relación entre la concentración de As en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

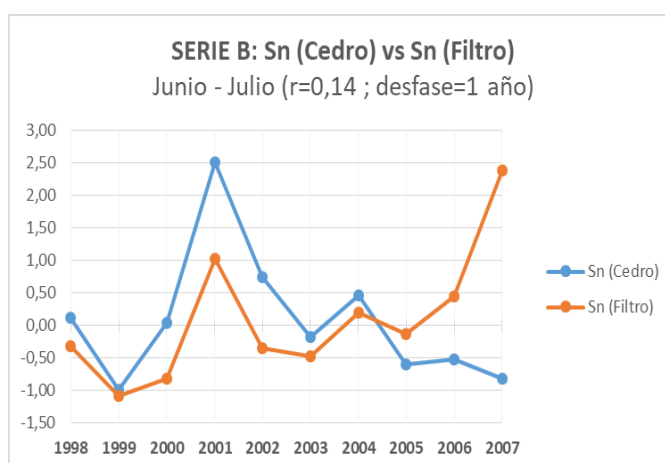


Figura 157. Relación entre la concentración de Sn en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

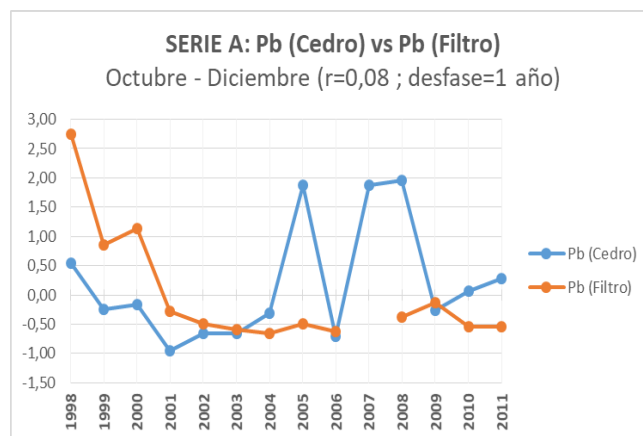


Figura 158. Relación entre la concentración de Pb en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

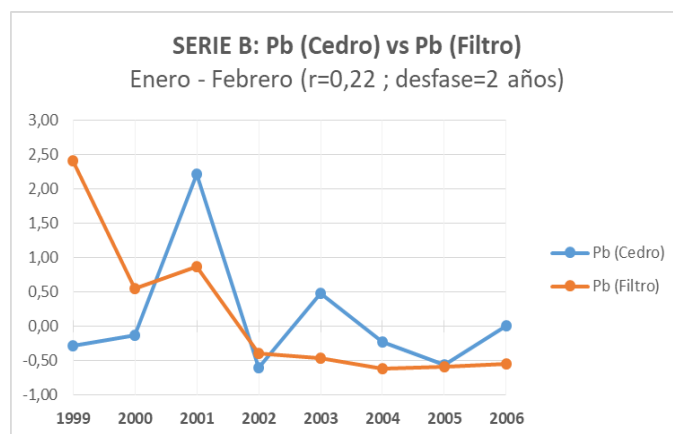


Figura 159. Relación entre la concentración de Pb en el $MP_{2,5}$ y su acumulación en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

Relación entre la concentración de MP_{10} en el aire y la acumulación de elementos químicos en los anillos de crecimiento

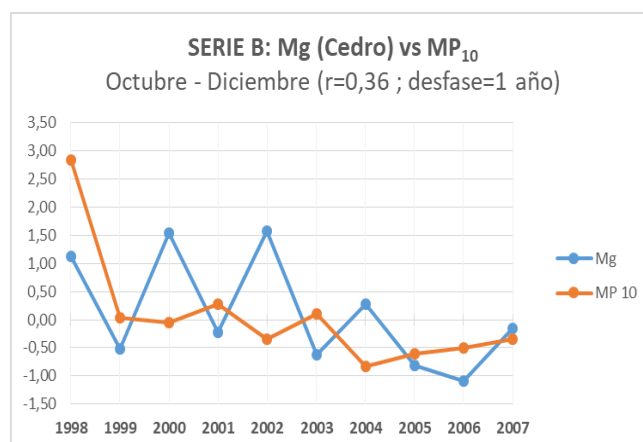


Figura 160. Relación entre la concentración de MP_{10} y la acumulación de Mg en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

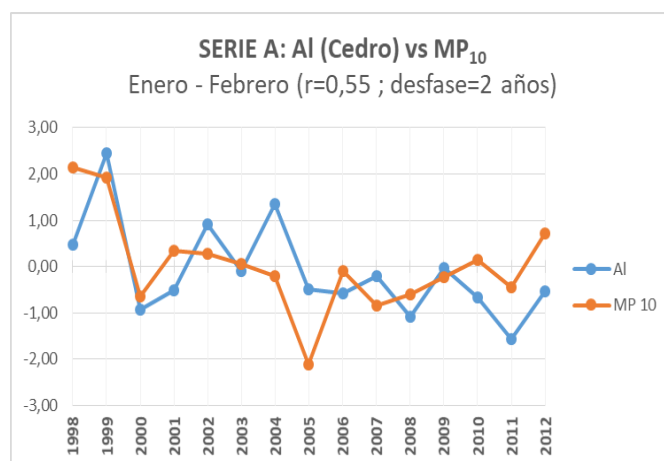


Figura 161. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de AI en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

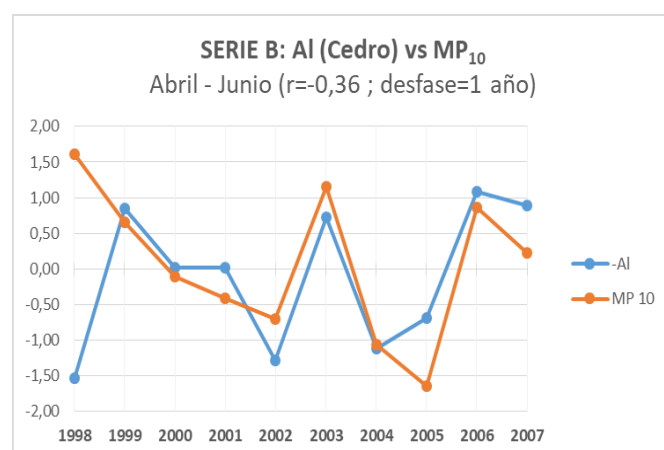


Figura 162. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de AI en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

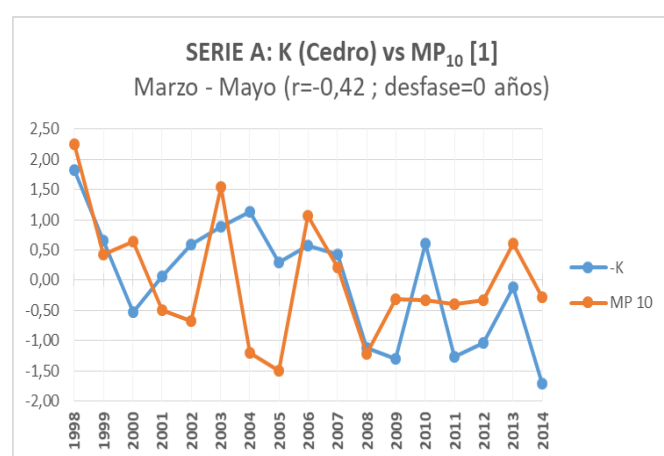


Figura 163. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de K en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron invertidos (multiplicados por -1).

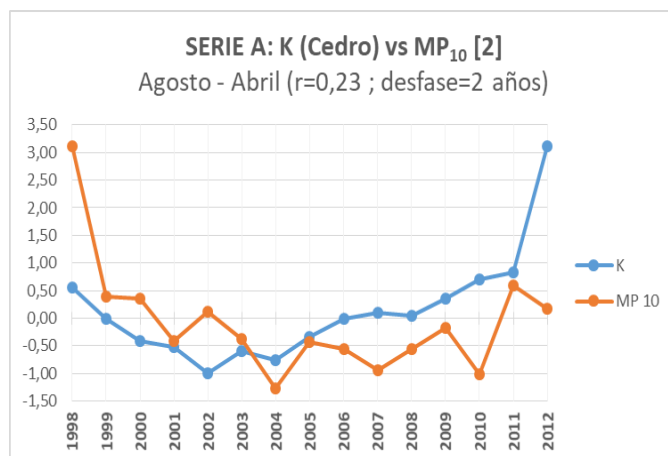


Figura 164. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de K en los anillos de la Serie A (Corrección)

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

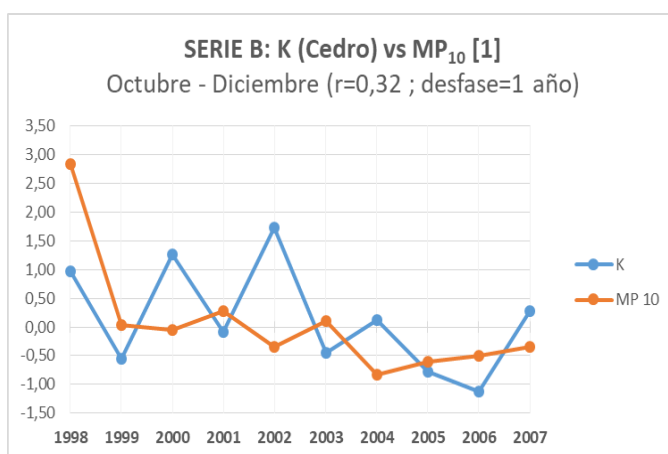


Figura 165. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de K en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

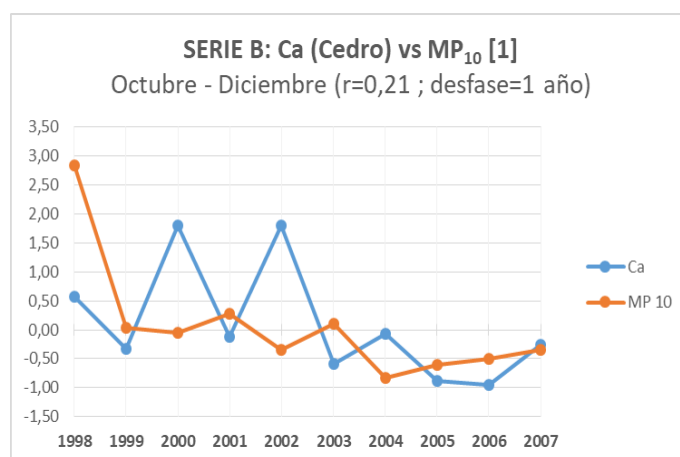


Figura 166. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Ca en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

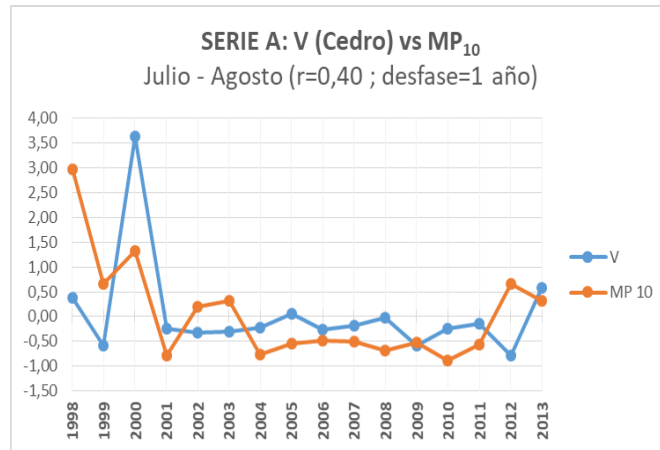


Figura 167. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de V en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

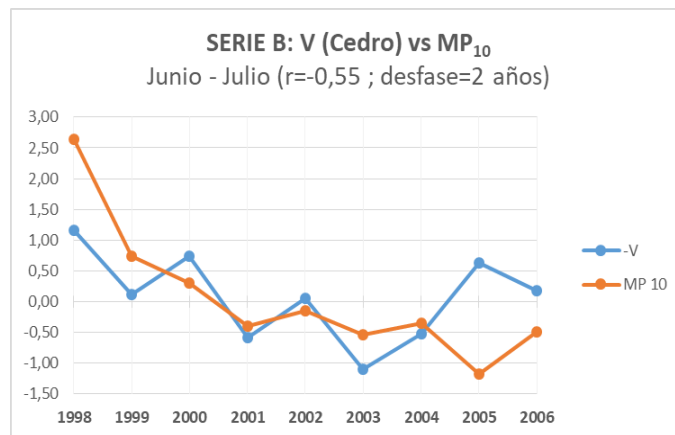


Figura 168. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de V en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

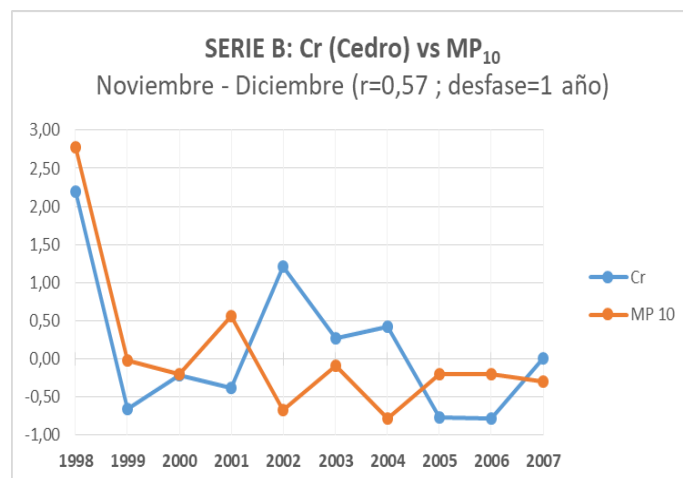


Figura 169. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Cr en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

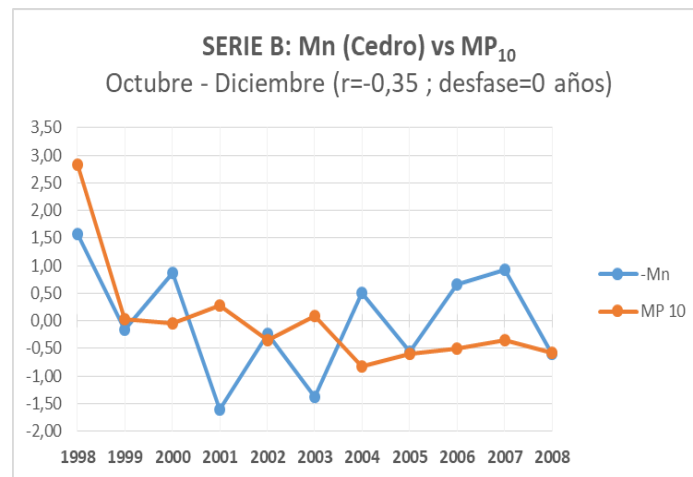


Figura 170. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Mn en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1).

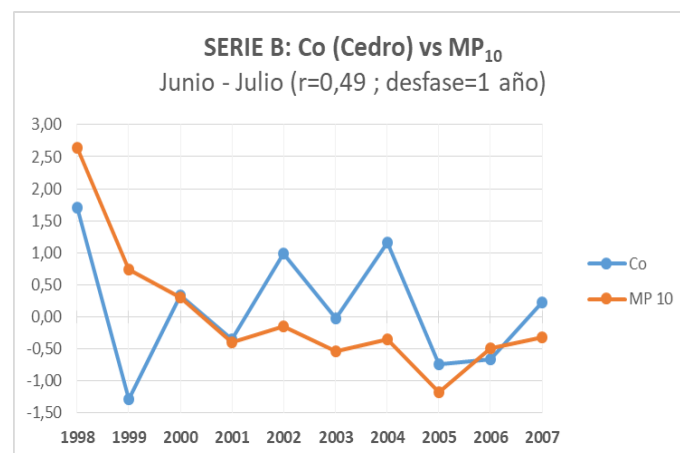


Figura 171. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Co en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

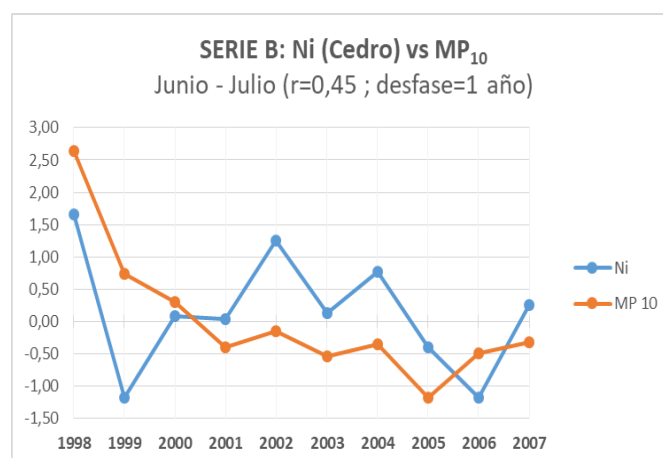


Figura 172. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Ni en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

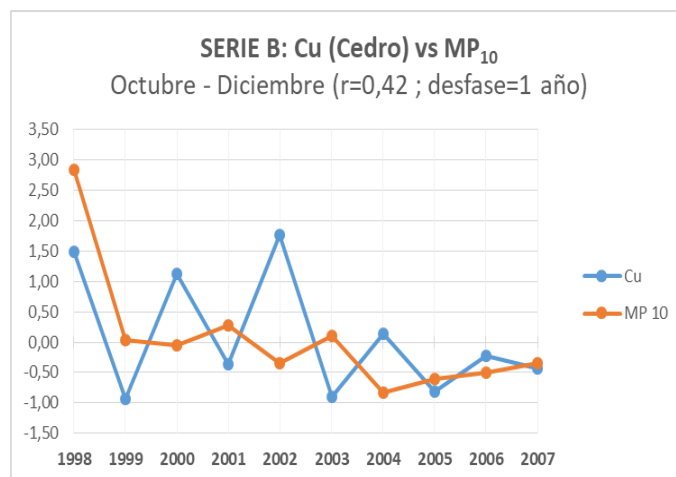


Figura 173. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Cu en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

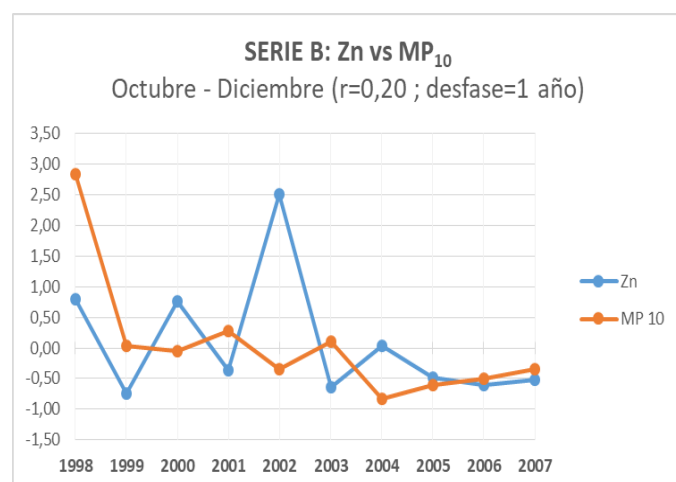


Figura 174. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Zn en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

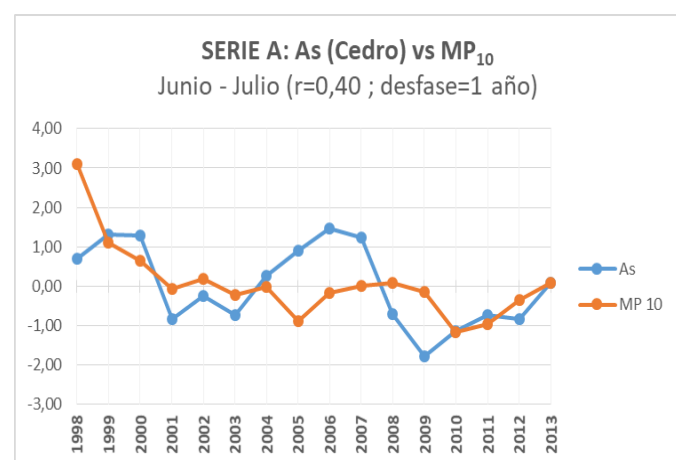


Figura 175. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de As en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

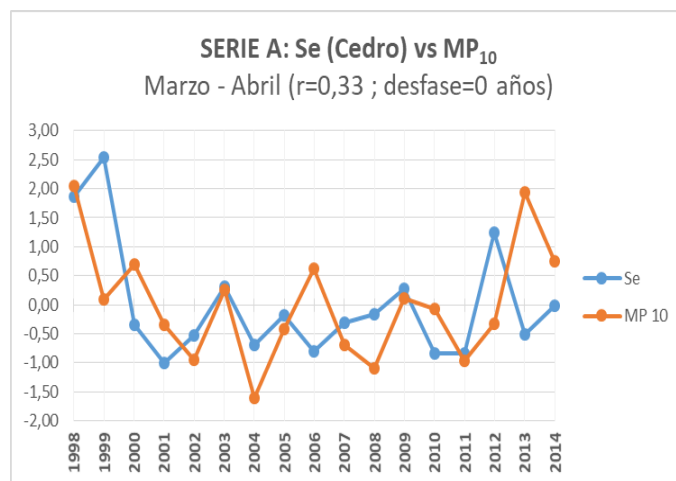


Figura 176. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Se en los anillos de la Serie A

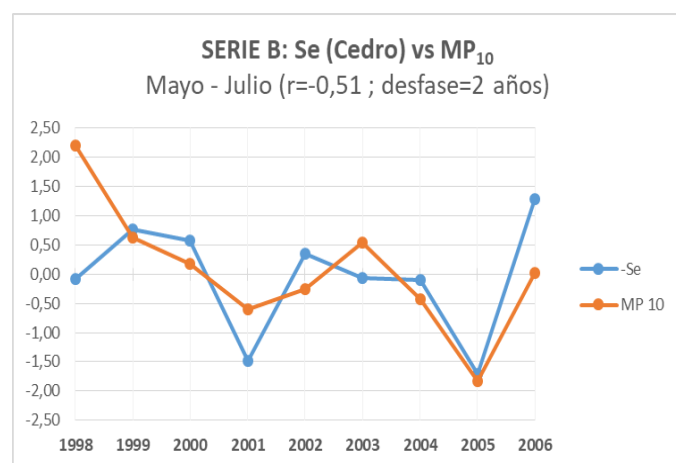


Figura 177. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Se en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

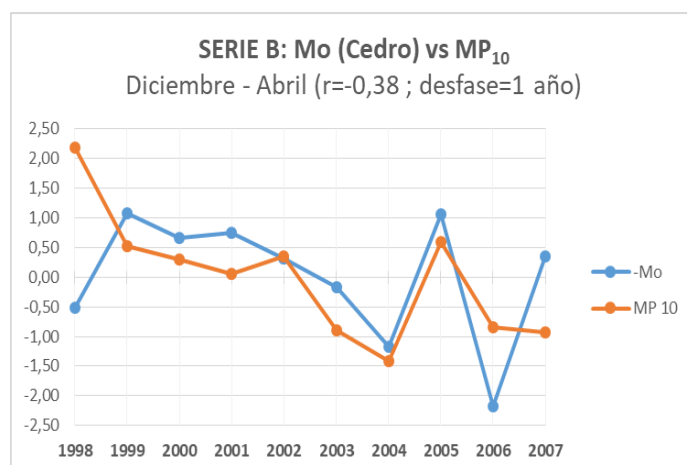


Figura 178. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Mo en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

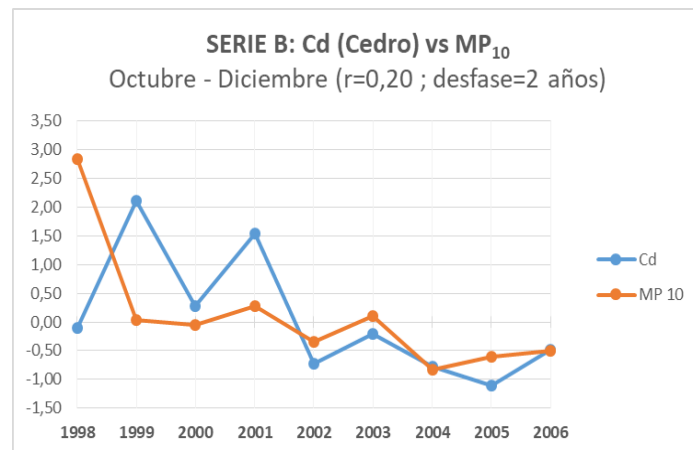


Figura 179. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Cd en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron desplazados 2 años hacia adelante para compensar el desfase.

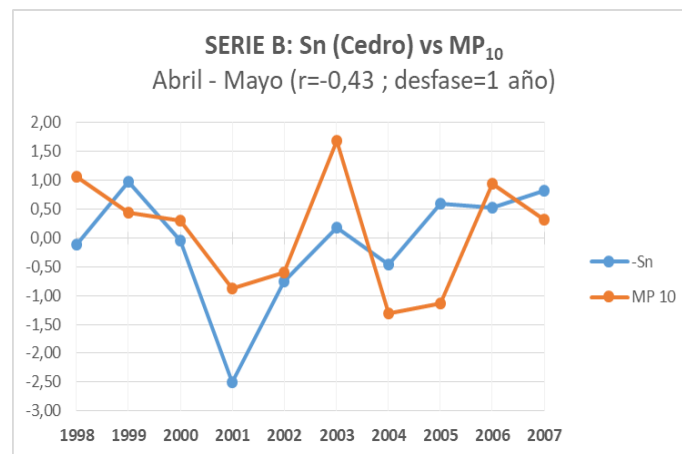


Figura 180. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Sn en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1) y desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

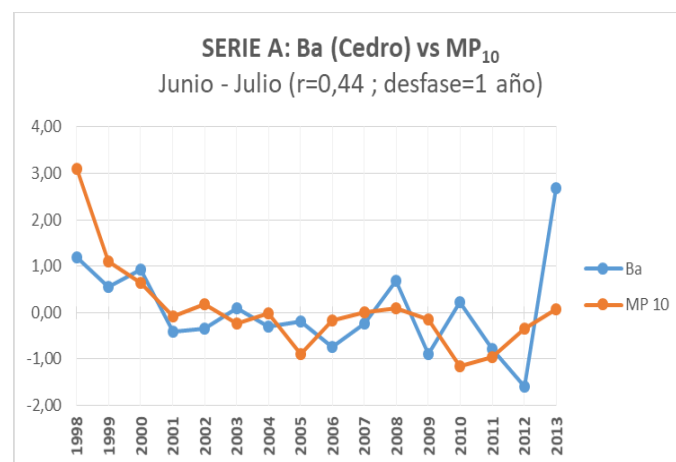


Figura 181. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Ba en los anillos de la Serie A

Nota: Los datos de la Serie A fueron desplazados 1 año hacia adelante para compensar el desfase.

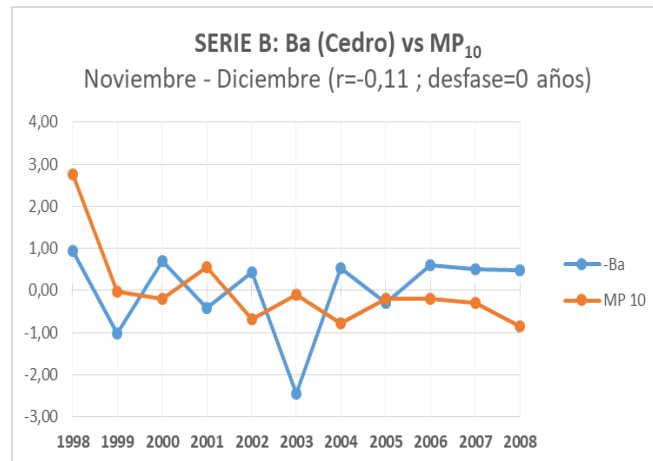


Figura 182. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Ba en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1).

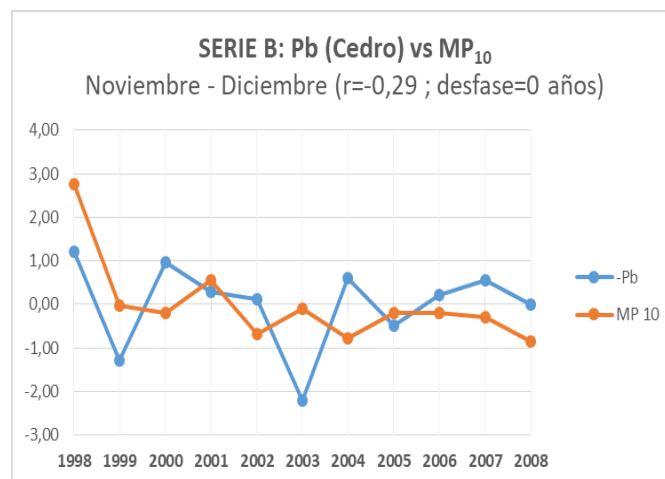


Figura 183. Relación entre la concentración de MP₁₀ y la acumulación de Pb en los anillos de la Serie B

Nota: Los datos de la Serie B fueron invertidos (multiplicados por -1).

Anexo D: Crecimiento del Parque Automotriz

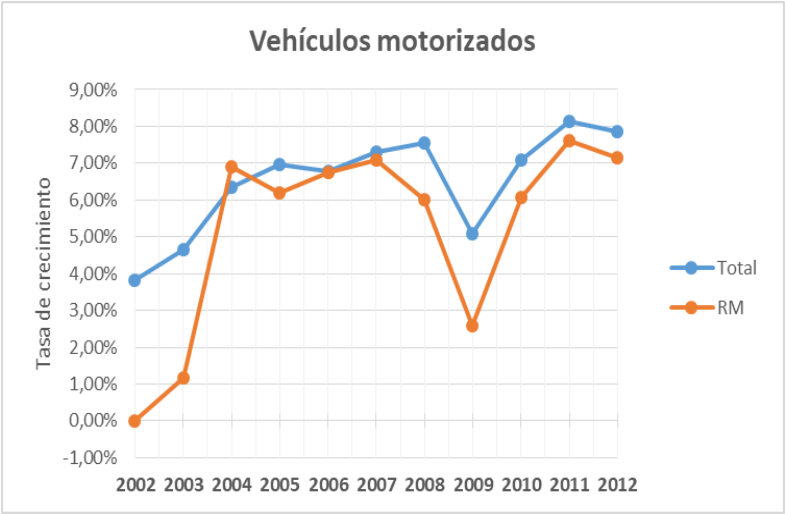


Figura 184. Crecimiento del Parque Automotriz

Fuente: Elaborado por el autor a partir de datos del INE y del Registro Civil