



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
PROGRAMA INTERFACULTADES MAGÍSTER EN
GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES
ANTROPOGÉNICOS EN ESPECIES ARBÓREAS URBANAS EN
SANTIAGO**

Proyecto de grado presentado como parte de los requisitos para optar al grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental.

Mauricio Antonio Araya Quijada

Profesora Guía

Dra. Margarita Préndez Bolívar

Santiago, Chile. 2024



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
PROGRAMA INTERFACULTADES MAGÍSTER EN
GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN AMBIENTAL

Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental.

Profesora guía Dra. Margarita Préndez Bolívar

Nota: 7,0

Firma: _____

Profesor consejero Dr. Manuel Leiva Guzmán

Nota: 6,8

Firma: _____

Profesor consejero Dr. Horacio Bown Intveen

Nota: 6,7

Firma: _____

*...Dedicado a Natalia y Dominga,
por ser gran parte de mi núcleo.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a la profesora Dra. Margarita Préndez por su dedicación excepcional y orientación experta a lo largo de esta travesía académica. Su sabiduría y apoyo constante han sido pilares fundamentales en el desarrollo y éxito de esta tesis. Agradezco profundamente su eterna paciencia y compromiso, que no solo han enriquecido mi trabajo, sino que también han contribuido significativamente a mi crecimiento como profesional con miras a la investigación. Siempre recuerdo las conversaciones en donde me indicaba que la química debe ser parte de la solución y no solo del problema.

Además, extendiendo mi gratitud a Javier Vera, cuyas valiosas aportaciones y perspectivas han enriquecido aún más este proyecto. Sus contribuciones en el ámbito estadístico han sido esenciales para abordar los desafíos y lograr los objetivos planteados.

A mi familia y amigos, les agradezco de todo corazón por su apoyo incondicional y comprensión durante este intenso período de investigación. Especialmente a Natalia, por su constante apoyo y ocuparse de los asuntos esenciales en este camino, y junto a Dominga ambas son una fuente de amor latente y de constante inspiración.

Agradezco sinceramente al Instituto de Salud Pública de Chile porque me ha dado las herramientas técnicas para el correcto desarrollo de este trabajo y por extrapolar la forma de abordar los desafíos a este trabajo de investigación, permitiéndome disponer del instrumental analítico, tiempo y espacio físico para su ejecución. Extiendo el agradecimiento al programa de magíster y su cuerpo académico por ampliar el espectro y considerar la interrelación como un camino preponderante en mi formación.

Este trabajo no solo es un producto de investigación, sino también un testimonio de la dedicación y colaboración de aquellos que han sido parte de mi trayectoria. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte de este importante capítulo académico.

Contenido

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	14
MARCO TEÓRICO	16
Aspectos generales.....	16
Factores que afectan la calidad del aire en Santiago	17
Parque automotriz como fuente de contaminación.....	18
Ozono troposférico.....	19
Remoción de compuestos orgánicos volátiles.....	21
Arbolado urbano.....	22
Mecanismos de retención de COV por parte de las hojas de árboles.....	24
OBJETIVOS	26
Objetivo General	26
Objetivos Específicos.....	26
MATERIALES Y MÉTODO	27
Selección de especies arbóreas.....	27
Elección de sitios de muestreo.....	27
Muestreo de material foliar.....	32
Tratamiento analítico de las muestras.....	32
Microextracción en fase sólida por Espacio de Cabeza.....	32
Condiciones instrumentales para la determinación de COVA.....	33
Análisis estadístico de los datos.....	35
Análisis de Correlogramas.....	35

Evaluación de los perfiles de concentración y representación gráfica de los resultados.....	35
Evaluación estadística	36
Estimación de la reactividad fotoquímica.....	36
Índice de control de la reactividad	37
RESULTADOS	39
Objetivo 1: Establecer la relación entre las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos encontrados en el material foliar de las especies arbóreas <i>Platanus x acerifolia</i> y <i>Liriodendron tulipífera</i> y su distancia a una estación de distribución de combustibles.	39
Objetivo 2: Establecer la relación entre las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos medidos en material foliar de las especies arbóreas <i>Platanus x acerifolia</i> y <i>Liriodendron tulipífera</i> y el tráfico vehicular como principal fuente de emisión.....	45
Perfiles de concentración.....	45
Variabilidad en las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos con la fuente de contaminación y la estacionalidad.....	48
Estimación de los potenciales de formación de ozono	51
Objetivo 3: Evaluar la capacidad del material foliar de dos especies arbóreas, <i>Robinia pseudoacacia</i> y <i>Quillaja saponaria</i> , para capturar compuestos orgánicos volátiles antropogénicos y establecer si existen diferencias estadísticamente significativas. .	53
Perfiles de concentración.....	53
Variabilidad en la concentración de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos en <i>Quillaja saponaria</i> y <i>Robinia pseudoacacia</i>	55

Estimación de los potenciales de formación de ozono.....	58
DISCUSIÓN.....	60
<i>Liriodendron tulipifera</i> y <i>Platanus x acerifolia</i>	60
Perfiles de concentración.....	61
Variabilidad en las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos con la fuente de contaminación y la estacionalidad.	62
Estimación de los potenciales de formación de ozono.....	63
<i>Quillaja saponaria</i> y <i>Robinia pseudoacacia</i>	64
Perfiles de concentración.....	64
Variabilidad en la concentración de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos en <i>Quillaja saponaria</i> y <i>Robinia pseudoacacia</i>	64
Estimación de los potenciales de formación de ozono.....	65
Implicaciones de los resultados.....	65
Limitaciones del estudio.....	66
Sugerencias para investigaciones futuras.....	66
CONCLUSIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS.....	78

Índice de figuras

Figura 1. A) Esquema de la formación de ozono troposférico en estado de equilibrio fotoquímico; B) Esquema de la formación de ozono troposférico en presencia de COV. (Atkinson, 2000)

Figura 2. Gráfico de isopletras de concentración de ozono. (Finlayson-Pitts and Pitts, 1993)

Figura 3. Sitios de muestreo en Santiago, Chile. (A) Parque Bicentenario, Comuna de Vitacura (*L. tulipifera*); (B) Avenida Vicuña Mackenna, Comuna de La Florida (*L. tulipifera*); y (C) Avenida Vitacura, Comuna de Vitacura (*P. x acerifolia*). Los puntos rojos identifican a los individuos muestreado en cada sitio.

Figura 4. Sitio de muestreo para la especie *Liriodendron tulipifera* en avenida Vicuña Mackenna, comuna de La Florida. LD: Individuo de la especie *L. tulipifera*; CDC: Centro de distribución de combustibles.

Figura 5. Sitio de muestreo para la especie *Platanus x acerifolia* en avenida Vitacura, comuna de Vitacura. PO: Individuo de la especie *P. x acerifolia*; CDC: Centro de distribución de combustibles.

Figura 6. Sitios de muestreo para las especies *Q. saponaria* y *R. pseudoacacia* en Estaciones de Monitoreo (EM) de calidad de aire: EM-C: Estación de Monitoreo Cerrillos, EM-CN: Estación de Monitoreo Cerro Navía, EM-EB: Estación de Monitoreo El Bosque, EM-I: Estación de Monitoreo Independencia, EM-LF: Estación de Monitoreo La Florida, EM-LC: Estación de Monitoreo Las Condes, EM-PO: Estación de Monitoreo Parque O'Higgins, EM-PA: Estación de Monitoreo Puente Alto, EM-Q: Estación de Monitoreo Quilicura, CA: Campus Antumapu.

Figura 7. Esquema de actividades desarrolladas en el presente estudio

Figura 8. Correlogramas de individuos de la especie *Liriodendron tulipifera*, muestreado en avenida Vicuña Mackenna para: a) Primavera; b) Verano.

Figura 9. Correlogramas de individuos de la especie *Platanus x acerifolia*, muestreado en avenida Vitacura para: a) Primavera; b) Verano.

Figura 10. Perfiles de concentración de COVA, en porcentajes relativos, para cada sitio de muestreo en primavera y verano: (a) Avenida Vicuña Mackenna (*L. tulipifera*), (b) Parque Bicentenario (*L. tulipifera*), y (c) Avenida Vitacura (*P. x acerifolia*).

Figura 11. Concentraciones totales de COVA en el contenido foliar de *Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia* en los sitios de muestreo de av. Vicuña Mackenna, Parque Bicentenario de Vitacura y Av. Vitacura, para los dos periodos de muestreo, realizados en primavera y verano. Las concentraciones se expresan como ng de C. En cada caja: X = media aritmética; línea horizontal = mediana.

Figura 12. Concentraciones de COVA individuales en el contenido foliar de *Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia* en los sitios de muestreo de Avda. Vicuña Mackenna, Parque Bicentenario de Vitacura y Avda. Vitacura, en primavera y verano. Las concentraciones se expresan como ng de C. X = media aritmética; línea horizontal = mediana.

Figura 13. Índices de control de la reactividad (ICR) de los COVA retenidos en el material foliar en los sitios de muestreo correspondientes a av. Vicuña Mackenna, Parque Bicentenario y av. Vitacura, en primavera y verano.

Figura 14. Perfiles de concentración de COVA en *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia*, evaluados en porcentajes relativos, para cada sitio de muestreo próximo a cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Figura 15. Concentraciones totales de COVA en el contenido foliar de *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia* ubicadas en las cercanías de cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). Las concentraciones se expresan como ng de C. X = media aritmética; línea horizontal = mediana. Las concentraciones se expresan como ng de C. En cada caja: X = media aritmética; línea horizontal = mediana.

Figura 16. Concentraciones de COVA individuales en el contenido foliar de *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia* en los sitios de muestreo de las cercanías de cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), agrupados en niveles de concentración. En cada caja: X = media aritmética; línea horizontal = mediana.

Figura 17. Índices de control de la reactividad (ICR) de los COVA en el material foliar de *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia* en los sitios de muestreo próximos a cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Índice cuadros

Cuadro 1. Transiciones correspondientes a los iones (m/z) cuantificadores y verificadores junto con los tiempos de retención para cada analito evaluado.

Cuadro 2. Concentraciones de especies químicas en muestras de hojas de individuos de *L. tulipifera* ubicados en Av. Vicuña Mackenna.

Cuadro 3. Concentraciones de especies químicas en muestras de hojas de individuos de *P. x acerifolia* ubicados en Av. Vitacura.

Cuadro 4. Concentraciones de especies químicas en muestras de hojas de individuos de *L. tulipifera* ubicados en el Parque Bicentenario de Vitacura.

Cuadro 5. Concentraciones de Prop-equiv(i) (ppbC) y PFO(i) (ppbC) de COVA para los sitios de muestreo de Av. Vicuña Mackenna, Parque Bicentenario y Av. Vitacura, para los dos periodos de primavera y verano.

Cuadro 6. Concentraciones de compuestos orgánicos volátiles en muestras de hojas de *R. pseudoacacia* y *Q. saponaria* recolectados en las cercanías de cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Cuadro 7. Concentraciones de Prop-equiv(i) (ppbC) y PFO(i) (ppbC) de COVA calculados para las especies *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia*, correspondientes a los sitios de muestreo próximos a cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Índice de Anexos

Anexo 1. Coeficiente de Gini e Índice de Capital Humano para países pertenecientes al Grupo Regional de América latina y el Caribe (GRULAC) y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), (www.datos.bancomundial.org).

Anexo 2. a) Carta de presión, pronosticada para el 6 de septiembre de 2020, se observa el Anticiclón semi-permanente del Pacífico sur, adicionalmente en la costa central se sitúa una vaguada costera. Fuente: DIRECTEMAR; b) Representación esquemática de la Celda de Hadley, sistema de circulación atmosférica cerrada, en el Pacífico sur. Fuente: Garreaud, DGF-UCh 2011.

Anexo 3. Instrumentación y Preparación de Estándares.

Anexo 4. Condiciones de operación para la molienda criogénica.

Anexo 5. Condiciones asignadas en el Combipal para la técnica de extracción HS-SPME.

Anexo 6. Condiciones cromatográficas para la determinación de COVA mediante GC/MSD.

RESUMEN

La Región Metropolitana de Santiago es una zona saturada por ozono y otras especies químicas contaminantes. El ozono troposférico es un contaminante secundario y el compuesto más representativo de los oxidantes fotoquímicos, afectando negativamente la salud y el bienestar humano. Se forma a través de reacciones químicas donde participan radicales OH, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV), en presencia de la luz solar. Los compuestos orgánicos volátiles antropogénicos (COVA) constituyen una de las principales emisiones gaseosas de la región, siendo los sectores residenciales y transporte las fuentes preponderantes.

La utilización de las capacidades que tienen las hojas de diferentes especies arbóreas de capturar contaminantes es una buena estrategia para lograr atenuar la contaminación atmosférica en espacios urbanos.

En este trabajo, se colectaron muestras de material foliar de individuos de cuatro especies arbóreas (*Liriodendron tulipifera*, *Platanus x acerifolia*, *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia*) sometidas a distintas condiciones ambientales vinculadas al transporte vehicular, ubicadas en diferentes zonas de Santiago.

La colección del material foliar de los individuos de *Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia* se orientó a su cercanía a sitios con alto tráfico vehicular y centros de distribución de combustibles. En el caso de *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia*, se colectaron muestras compuestas de material foliar en las cercanías de cada estación oficial de monitoreo SINCA.

A partir de los compuestos retenidos en el material foliar se estableció como parámetro cuantificable la eliminación de los precursores (COVA) de la generación de O₃, expresándolos en términos de equivalentes de Propileno (Prop-equiv) y Potenciales de Formación de Ozono (PFO). Todas las muestras se analizaron mediante la técnica de

microextracción en fase sólida por espacio de cabeza con el uso de cromatografía gaseosa con detector selectivo de masas (HS-SPME-GC/MSD) para determinar su concentración de COVA.

El objetivo general de este trabajo fue estimar la capacidad del material foliar de las cuatro especies arbóreas de capturar compuestos orgánicos volátiles antropogénicos, COVA, vinculados al transporte vehicular, para utilizarlos en proyectos de forestación urbana de forma más racional y científicamente fundada.

Los resultados obtenidos mostraron que los individuos de *Liriodendron tulipifera*, expuestos a la emisión de contaminantes producto del alto flujo vehicular, exhibieron siempre valores más altos que individuos de *Platanus x acerifolia* en términos de cantidad de COVA y de estimadores de reactividad; además, algunos compuestos químicos presentaron relaciones estadísticamente significativas con su distancia al centro de distribución de combustibles, comparados con los individuos de *Platanus x acerifolia*. Los individuos de *Quillaja saponaria* mostraron mayor adsorción de COVA y presentaron mayores valores respecto a los estimadores de formación de ozono troposférico, en comparación con *Robinia pseudoacacia*. Todo ello implica que *Liriodendron tulipifera* y *Quillaja saponaria* son mejores opciones para atenuar la formación de ozono troposférico que *Platanus x acerifolia* y *Robinia pseudoacacia*.

Los resultados de este trabajo permiten evidenciar la variabilidad especie-específica que presentan las especies arbóreas estudiadas frente a la exposición a fuentes de contaminación atmosférica importantes: el tráfico vehicular y la distribución de combustibles. De esta manera, se incorpora un aspecto importante al momento de seleccionar especies arbóreas para reforestar espacios urbanos.

ABSTRACT

The Metropolitan Region of Santiago is an area saturated by ozone and other pollutants. Tropospheric ozone (O_3) is a secondary pollutant and the most representative compound of photochemical oxidants, negatively affecting human health and well-being. It formed through chemical reactions involving OH radicals, emissions of nitrogen oxides (NO_x), and volatile organic compounds (VOCs), in the presence of sunlight. Anthropogenic volatile organic compounds (AVOCs) constitute one of the main gaseous emissions in the region, with the residential sectors and transportation being the predominant sources. Utilizing the abilities of leaves from different tree species to capture pollutants is a good strategy for mitigating atmospheric pollution in urban spaces. In this work, foliar material samples were collected from individuals of four tree species subjected to various environmental conditions related to vehicular transport, located in different areas of Santiago.

The collection of foliar material from *Liriodendron tulipifera* and *Platanus x acerifolia* individuals was directed toward their proximity to high vehicular traffic sites and fuel distribution centers. In the case of *Quillaja saponaria* and *Robinia pseudoacacia*, composite samples of foliar material were collected from the vicinity of each SINCA monitoring station.

From the compounds retained in the foliar material, the removal of ozone generation precursors (AVOCs) was established as a quantifiable parameter, expressed in terms of Propylene equivalents (Prop-equiv) and Ozone Formation Potentials (OFP). All samples were analyzed using the solid-phase microextraction technique in the headspace with the use of gas chromatography with a mass selective detector (HS-SPME-GC/MSD) to determine their AVOCs concentration.

The general objective of this work was to estimate the capacity of the foliar material of the four tree species to capture anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) linked to vehicular transport, to use them in urban reforestation projects in a more rational and scientifically based manner.

The results showed that *Liriodendron tulipifera* individuals, exposed to emissions from high vehicular traffic, always exhibited higher values than *Platanus x acerifolia* individuals in terms of AVOC quantity and reactivity estimators; additionally, some chemical compounds presented statistically significant relationships with their distance to the fuel distribution center, compared to *Platanus x acerifolia* individuals. On other hand, *Quillaja saponaria* individuals showed greater adsorption of AVOCs and higher values concerning tropospheric ozone formation estimators, compared to *Robinia pseudoacacia*. All this implies that *Liriodendron tulipifera* and *Quillaja saponaria* are much better options to attenuate the formation of tropospheric ozone than *Platanus x acerifolia* and *Robinia pseudoacacia*.

The results of this study highlight the species-specific variability that the studied tree species exhibit when exposed to important sources of atmospheric pollution: vehicular traffic and fuel distribution. In this way, an important aspect is incorporated when selecting tree species to reforest urban spaces.

INTRODUCCIÓN

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son especies químicas que participan activamente en la formación de oxidantes fotoquímicos en la atmósfera (contaminantes secundarios); un ejemplo es el ozono troposférico. Los compuestos orgánicos volátiles antropogénicos (COVA), originados por la actividad humana, representan el tercer mayor aporte en emisiones gaseosas en la Región Metropolitana, emisiones dominadas en gran medida por el sector residencial y transporte ([Gramsch, 2014](#), [Álamos et al., 2022](#)) y debido a sus características tóxicas o mutagénicas, sumadas a condiciones atmosféricas dadas, causan un grave perjuicio a la salud de la población y una disminución en el crecimiento y desarrollo de especies vegetales ([Malik et al., 2023](#); [Cape et al., 2003](#)). Los COV antropogénicos de mayor interés son el benceno y sus derivados y las especies aromáticas policíclicas. Estos compuestos se originan por gasificación o por evaporación de sustancias derivadas del petróleo o de otras sustancias orgánicas, mediante la quema de combustibles fósiles y la evaporación desde pinturas, pegamentos y solventes, entre otras fuentes importantes ([Kumar et al., 2018](#); [Li et al., 2017](#); [Shao et al., 2016](#)).

Diferentes autores ([Dzierzanowski et al., 2011](#); [Marando et al., 2016](#); [Muñoz et al., 2017](#); [Farías et al., 2022](#)) informan acerca de la capacidad de depuración atmosférica de las especies vegetales, sobre todo en ambientes urbanizados, respecto a la captura de CO₂ por el proceso de fotosíntesis, la capacidad de las hojas para retener material particulado y la mitigación de los efectos de las islas de calor urbana, entre otras funciones. Sin embargo, existe menos información sobre la posibilidad de capturar contaminantes atmosféricos por medio de las hojas de los árboles expuestos a fuentes definidas de contaminación, específicamente para COV antropogénicos; en Chile, la información es reducida ([Araya et al., 2019](#)). Es necesario entonces generar información para estimar

cuantitativamente la captura por especies vegetales específicas de contaminantes emitidos en atmósferas urbanas, pudiendo establecer cuál(es) especie(s) arbórea(s) son más eficientes para incorporarlos en proyectos de forestación en ambientes urbanizados o bien como bioindicadores de contaminación.

En este trabajo se propone establecer como parámetro cuantificable la eliminación de los precursores (COVA) que generan O_3 , expresándolos en términos de equivalentes de propileno (Prop-equiv) y Potenciales de Formación de Ozono (PFO). Esto es, a partir de los compuestos retenidos en el material foliar, establecer sus capacidades de formación de ozono y de esta forma, estimar de manera representativa la posibilidad que tiene la especie arbórea para atenuar la formación de O_3 a nivel troposférico.

El propósito de esta tesis es estimar la capacidad del material foliar de cuatro especies arbóreas de capturar compuestos orgánicos volátiles antropogénicos provenientes de dos fuentes urbanas: distribuidores de combustibles y tráfico vehicular. Se recolectaron muestras de individuos de *Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia* en zonas de alto tráfico vehicular y de individuos cercanos a centros de distribución de combustibles, y de *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia* en las proximidades de estaciones de monitoreo SINCA.

El desarrollo y ejecución de este proyecto proveerá de información nueva, adecuada a las condiciones que rigen en la región y útil en cuanto a incorporar un punto no considerado a la fecha para una mejor elección de especies para forestar ambientes urbanos.

MARCO TEÓRICO

Aspectos generales

La emisión a la atmósfera de contaminantes, la reducida ventilación y las condiciones atmosféricas específicas, pueden ocasionar mala calidad del aire con el consiguiente efecto sobre la salud humana ([Rui et al., 2016](#)). La Organización de las Naciones Unidas ([ONU, 2022](#)) informa que la mayor parte de la población mundial (56%) habita en núcleos urbanos y estima que para el año 2050 esta cifra aumente a un 68%, lo que convierte el problema en una afección significativa para la población a nivel mundial. La Organización Mundial de la Salud ([OMS, 2022](#)) establece que la contaminación atmosférica constituye uno de los riesgos para la salud ambiental más urgentes que enfrenta la población mundial. Se estima que contribuyen a 7 millones de muertes prematuras al año, el 7% por cáncer de pulmón, el 18% por enfermedades pulmonares (EPOC), el 20% por accidentes cerebrovasculares y el 34% por enfermedades cardíacas. Además, se calcula que el 99% de la población mundial respira un aire tóxico.

Las ciudades de rápido crecimiento en los países en desarrollo se caracterizan por una distribución espacial desorganizada, áreas urbanas en expansión y un mayor tráfico de vehículos, lo que conduce a una mala calidad del aire ([Henríquez y Romero, 2019](#)). Chile posee un índice de Capital Humano destacado a nivel regional y cercano a valores de países europeos, sin embargo, la distribución de la riqueza expresado por el Coeficiente de Gini evidencia la alta desigualdad existente, comparado tanto a nivel regional en América Latina y el Caribe como con los países de la OCDE (anexo 1).

Santiago, la capital de Chile perteneciente a la Región Metropolitana (RM); según el Instituto Nacional de Estadísticas, proyecta una población a 2023 de 8,4 millones de

habitantes, correspondiente al 42% de la población total. La RM está compuesta por las provincias de Chacabuco, Cordillera, Maipo, Melipilla, Santiago y Talagante, con un total de 52 comunas, la gran mayoría enteramente urbanas y otras con una parte rural. La Provincia de Santiago, compuesta por 32 comunas, concentra el 78% de la población regional, comprende 32 municipios que son administrados de manera autónoma por gobiernos locales con su propio alcalde, concejo y presupuestos. El rasgo distintivo de la estructura socioeconómica y espacial del gran Santiago, es la constante segmentación social intercomunal ([Fuentes et al., 2017](#)), existiendo una correlación entre la localización de los grupos socioeconómicos y aspectos como la infraestructura verde, las islas de calor y los servicios básicos, donde la gran mayoría vive en áreas con poca vegetación y, solo los vecindarios de zonas con mayores ingresos, principalmente en las áreas del noreste de la ciudad, tienen una infraestructura verde cercana a la adecuada ([Romero, 2019](#)). Los componentes verdes son un reflejo real de la desigualdad y la fragmentación que caracteriza a la ciudad ([Vásquez, 2016](#)).

Factores que afectan la calidad del aire en Santiago

El sistema mundial de monitoreo del aire, AirVisual (www.iqair.com/world-air-quality-report), compara datos publicados durante 2022 respecto a material particulado fino, MP_{2,5}, (partículas de aerosol de diámetro $\leq 2,5 \mu\text{m}$), siendo uno de los contaminantes atmosféricos medidos de forma rutinaria y comúnmente considerado el más dañino para la salud humana debido a su prevalencia en el medio ambiente y a la amplia gama de efectos en la salud. Santiago se ubica en el puesto 32° de las capitales más contaminadas a nivel mundial en este parámetro, siendo la primera capital más contaminada en el continente y encontrándose dentro de las quince ciudades más

contaminadas en Latinoamérica y el Caribe, Quilpué (Chile) y Coyhaique (Chile) se encuentran dentro de las cinco primeras en dicha lista.

En promedio, Santiago más que quintuplica las concentraciones medias anuales recomendadas por la OMS para $MP_{2,5}$, especialmente durante el período otoño-invierno. Además, la normativa chilena para el ozono (O_3) se supera varios días en la parte oriental de la ciudad durante la temporada primavera-verano ([Préndez et al., 2019](#), [Farías et al., 2022](#)).

La geografía y el clima de la cuenca de Santiago, junto con su altitud promedio de 520 metros y la presencia de montañas que la rodean, dificultan la dispersión de contaminantes atmosféricos, exacerbando los altos niveles de contaminación tanto en invierno como en primavera-verano. La influencia del anticiclón subtropical del Pacífico suroriental, ubicado alrededor de 30° S y 90° W, agrava aún más la situación al generar una extensa área de subsidencia atmosférica (anexo 2). La combinación de estos factores contribuye a la formación de fenómenos atmosféricos como la vaguada costera y la subsidencia forzada en el valle central, lo que incrementa la contaminación atmosférica. A pesar de los esfuerzos realizados desde la década de 1990 para abordar este problema, el aumento en la cantidad de vehículos y las distancias de viaje ha sido constante. ([Plan operacional GEC, 2023, MMA](#)).

Parque automotriz como fuente de contaminación

En las zonas urbanas, las emisiones de los vehículos ([Shao et al., 2016](#); [Li et al., 2017](#)) son los principales contribuyentes en la emisión de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos (COVA). Los gases de los combustibles líquidos que contienen compuestos aromáticos se emiten al aire; la mayoría de estos compuestos aromáticos se agregan a la gasolina con fines antidetonantes, como reemplazo de plomo

([Kountouriotis et al., 2014](#); [Cui et al., 2018](#)). Los vehículos son importantes emisores de precursores de ozono, incluidas las partículas y los gases orgánicos e inorgánicos, como los óxidos de nitrógeno (NO_x). Los vehículos de la Región Metropolitana emiten alrededor de 39.000 toneladas de NO_x por año ([Gramsch, 2014](#), [Álamos et al., 2022](#)). Durante los últimos años, Santiago ha aumentado fuertemente su flota de vehículos; en el año 2022 existía una flota de 2.235.482 vehículos con permiso de circulación, registrando un aumento significativo en comparación a los años previos a la pandemia por COVID-19; el 78% corresponde a vehículos de gasolina, el 21,6% a vehículos Diesel y solamente 0,3% a vehículos a gas o eléctricos ([INE, 2022](#)).

Ozono troposférico

La tropósfera se extiende desde la superficie de la Tierra hasta la tropopausa a 12-18 km, dependiendo de la latitud, longitud y la estación del año, siendo más alto en los trópicos y más baja en las regiones polares durante el invierno (anexo 2, b). En esta sección atmosférica se produce la formación de ozono, relevante para este trabajo. En condición de equilibrio fotoquímico, el NO_2 presente en la atmósfera se fotoliza, genera una molécula de NO y un átomo de oxígeno que reacciona con otra molécula de O_2 presente en la atmósfera, generando una molécula de ozono. Esta molécula de ozono puede reaccionar con NO, formando nuevamente NO_2 , como se esquematiza en la figura 1A. En presencia de COV en la atmósfera este equilibrio se interrumpe (figura 1B), debido a reacciones radicalarias en las que participa el radical OH generando radicales orgánicos que reaccionan con NO_2 , propiciando la generación de O_3 en la tropósfera ([Atkinson, 2000](#)). Esta condición hace del O_3 troposférico un importante contaminante secundario del aire urbano formado como resultado de reacciones atmosféricas con

compuestos orgánicos volátiles, antropogénicos (COVA) y/o biogénicos (COVB), radicales OH y óxidos de nitrógeno ([Kansal, 2009](#); [Préndez et al., 2013](#); [Guo et al., 2016](#)).

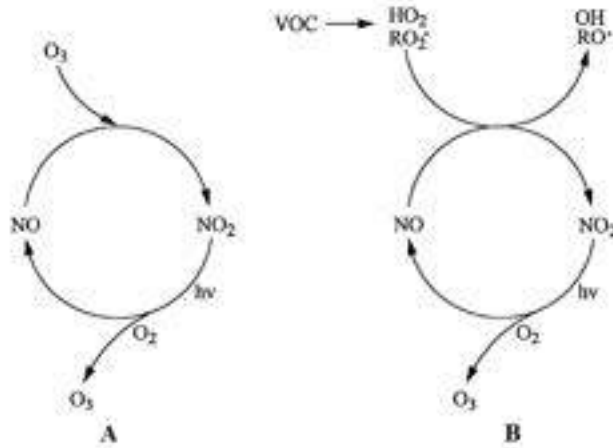


Figura 1. A) Esquema de la formación de ozono troposférico en estado de equilibrio fotoquímico; B) Esquema de la formación de ozono troposférico en presencia de COV ([Atkinson, 2000](#)).

La formación de O_3 fotoquímico es una función no lineal que depende de las concentraciones relativas de COV y NO_x , clasificando la formación de O_3 bajo dos categorías: formación limitada por COV y la formación limitada por NO_x , tal como se muestra en la figura 2, que corresponde a una isopleta general de la formación de O_3 , identificando claramente ambas categorías. Bajo el primer régimen, la relación $[COV]/[NO_x]$ es baja, indicando que la formación de O_3 fotoquímico decrece con la disminución de los niveles de COV, por lo tanto, hay un mayor beneficio reduciendo las concentraciones de COV sobre NO_x para estrategias de control de la formación de O_3 mientras más cercanas a la fuente de emisión se encuentre, al igual que en zonas urbanas. Por otra parte, si la relación $[COV]/[NO_x]$ es alta, la formación de O_3 se encuentra limitada por NO_x , una reducción de la concentración de NO_x disminuirá la formación de O_3 fotoquímico ([Guo et al., 2016](#)), como ocurriría en áreas rurales. Es

importante determinar si la formación fotoquímica de O₃ está limitado por COV o NO_x para desarrollar las medidas de control adecuadas.

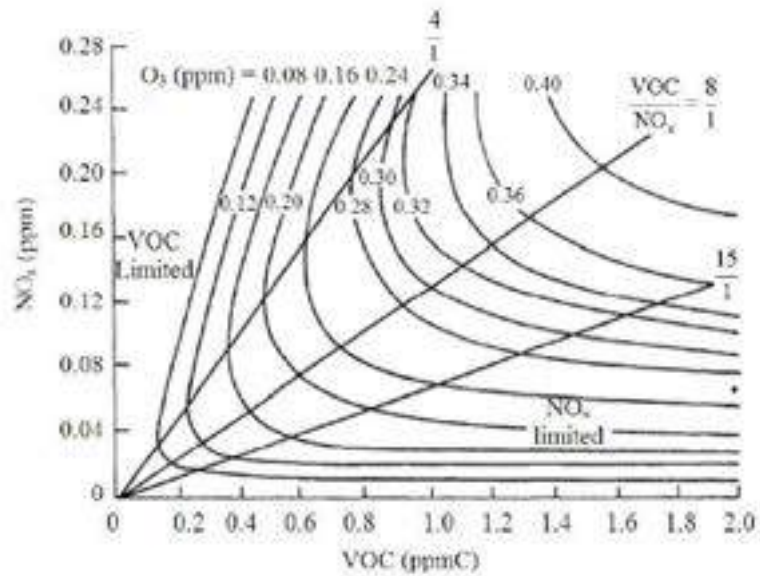


Figura 2. Gráfico de isopletas de concentración de ozono (Finlayson-Pitts and Pitts,1993).

Bajo la premisa de que la formación de O₃ fotoquímico se encuentra limitado por COV y, por lo tanto, es sensible a cualquier modificación de éstos, es posible estimar la contribución de cada COV que reacciona en la atmósfera para formar O₃, suponiendo que todos los COV en la atmósfera son atacados por el radical OH y forman O₃.

Remoción de compuestos orgánicos volátiles

Las técnicas de remoción de COV en el aire se pueden dividir en tres categorías: métodos físicos, químicos y biológicos.

- Los métodos físicos incluyen técnicas como adsorción utilizando en la superficie carbón activado, zeolitas, gel de sílice, alúmina activada, arcilla mineral y algunos polímeros; separación mediante membranas, como membranas basadas en

zeolitas, membranas poliméricas permeables a la humedad, alcohol polivinílico con cloruro de litio como aditivo, polivinilpirrolidona, membranas de poliacrilamida y membranas de polidimetilsiloxano ([Gan et al., 2023](#)).

- Los métodos químicos tradicionales incluyen la incineración y la combustión catalítica para degradar gases residuales. En contraste con la oxidación térmica catalítica tradicional, que requiere altas temperaturas (200-1200 °C), la oxidación fotocatalítica (PCO, por sus siglas en inglés) permite la degradación y mineralización de COV a temperatura ambiente, utilizando catalizadores como TiO₂, ZnO, ZnS, CdS, Fe₂O₃ y SnO₂ ([Almaie et al., 2022](#)).
- El tratamiento biológico de los COV generalmente utiliza la degradación por microorganismos de los gases residuales. La biofiltración es la técnica principal, en la que los COV se transfieren de la fase gaseosa a la biopelícula y posteriormente son metabolizados por los microorganismos. Los biorreactores de uso común incluyen biorreactores de lecho empacado, biodepuradores, filtros biotrickling (BTF) y biorreactores de membrana ([Wu et al., 2023](#); [Vergara-Fernández et al., 2018](#); [Wu et al., 2024](#)).

Arbolado urbano

Los árboles son una parte importante de la biomasa de los entornos urbanos y juegan un papel esencial en la calidad de vida de la población. Varios investigadores han informado sobre el uso de bosques urbanos en la provisión de servicios ecosistémicos en diferentes continentes, climas y condiciones socioeconómicas ([O'Brien et al., 2022](#); [Wei et al., 2022](#); [Nesbitt et al. 2017](#)). Dichos bosques cubren las funciones básicas del ecosistema, como la productividad primaria ([Costanza et al., 2007](#)) y los servicios ecosistémicos, incluida la mejora de la calidad del aire ([Escobedo et al., 2011](#)), especialmente la eliminación de partículas ([Dzierzanowski et al., 2011](#); [Marando et al.,](#)

[2016](#); [Préndez et al., 2022](#)). [Muñoz et al. \(2017\)](#) en un estudio de partículas magnéticas en hojas de árboles urbanos y muestras de polvo urbano de dos comunas de la ciudad de Santiago mostraron que la mayoría de las muestras contienen magnetita como el magnético principal, que eran emitidas principalmente por los tubos de escape de los vehículos y una de las principales fuentes de partículas en suspensión en el aire en Santiago. [Paoletti \(2009\)](#) ha analizado la ventaja/desventaja de las emisiones de COVB, mientras que [Tallis et al. \(2011\)](#) han demostrado que las hojas de los árboles pueden eliminar gases y aerosoles de la atmósfera de manera más eficiente que otras superficies.

La emisión de COVB por parte de la vegetación son una fuente importante de algunos contaminantes altamente reactivos derivados de sus funciones ecofisiológicas que contribuyen a la formación de ozono ([Kansal, 2009](#); [Préndez et al., 2013](#); [Shao et al., 2016](#)). Los COVB incluyen alcanos, alquenos, carbonilos, alcoholes, ésteres, éteres y ácidos ([Kesselmeier y Staudt, 1999](#)), los COVB más importantes son los terpenos, cuya molécula básica es el isopreno (2-metil-1,3-butadieno, C₅H₈) y algunos monoterpenos. El último inventario de contaminantes atmosféricos en Santiago ([Gramsch, 2014](#)) reveló que las emisiones de COV correspondían a 97.028 t / año de las cuales solo el 15% corresponde a COVB, que son principalmente isopreno, monoterpenos y sesquiterpenos. Otros gases son 2-Metil-3-buten-2-ol (2,3,2-MBO), metanol, acetona y CO. Los COVA representan la tercera fuente de emisiones gaseosas a la atmósfera después del CO₂ y el CO. No hay información específica sobre benceno, tolueno y xilenos (BTX) u otros derivados de benceno ([Gramsch, 2014](#), [Álamos et al., 2022](#)). Para estimar las emisiones de fuentes biogénicas, se utilizó el programa MEGAN2.1, incluidas las últimas mejoras implementadas en 2012 por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Estados Unidos, NCAR por sus siglas en inglés ([Guenther et al., 2012](#)). [Préndez et al. \(2019\)](#) y [Farías et al., 2022](#) cuantificaron experimentalmente las emisiones

de COVB de diferentes especies de árboles urbanos en Santiago, que corresponden principalmente a terpenos (isopreno y monoterpenos).

Una selección de especies junto a una ubicación adecuada de la vegetación urbana puede mejorar significativamente la calidad del aire, no solo por el efecto directo sobre los gases y las partículas atmosféricas, sino también al generar ventilación local y regional ([Hebbert y Webb, 2012](#)). Por lo tanto, el uso de árboles para mejorar el aire puede ser un proceso más económico, estéticamente agradable, ecológico y sostenible que se puede utilizar para una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos. A nivel mundial, hay investigaciones limitadas sobre la probabilidad de adsorción y/o absorción de contaminantes atmosféricos por las hojas de los árboles expuestos a fuentes de contaminación, específicamente para los COVA ([Anyanwu y Kanu, 2006](#); [Saphores y Li, 2012](#); [Keymeulen et al., 2001](#)).

La utilización de estimadores de la reactividad fotoquímica de los diferentes COV con radicales OH atmosféricos y otras especies reactivas, expresados en términos de equivalentes de propileno (Prop-equiv) y potencial de formación de ozono (PFO), permite cuantificar el efecto que tienen estos compuestos COVA adsorbidos en las hojas sobre la formación de O₃ troposférico. Usar dichos estimadores permite entonces estimar cuánta es la influencia en su atenuación, mejorando así la calidad del aire y la salud de la población ([Araya et al., 2019](#)).

Mecanismos de retención de COV por parte de las hojas de árboles.

Los árboles eliminan los COVA retenidos a través de procesos definidos por la estructura anatómica de sus hojas y procesos fisiológicos complejos. Según lo informado por [Brilli et al. \(2018\)](#), los mecanismos de eliminación y retención de COV por las hojas incluyen la absorción a través de los estomas y su degradación metabólica; y adsorción no estomática, donde la adsorción de COV puede depender de la composición de la cutícula

de la hoja ([Wararat et al., 2014](#)). Las sustancias hidrofóbicas o lipofílicas pueden ser absorbidas directamente por la cutícula o difundirse a la hoja a través de la cutícula ([Libbert, 1974](#); [Niinemets et al., 2014](#)), mientras que los compuestos hidrofílicos, como los contaminantes gaseosos y líquidos, pueden ser absorbidos por la cutícula en cierta medida ([Agarwal et al., 2018](#)). Los COV en la atmósfera ingresan al espacio intercelular a través de los estomas, dependiendo de los parámetros fisicoquímicos de cada COV. Algunos COV se metabolizan (enzimáticamente o no enzimáticamente) en el citoplasma de las células mesofílicas, lo que facilita la división de los COV en las células, lo que aparece como un proceso de "absorción" de COV por las plantas. La absorción de COV conduce a cambios en el metabolismo celular; por ejemplo, la acumulación de glucósidos o el aumento potencial redox ([Matsui, 2016](#)).

Además de la cutícula y estomas que constituyen barreras para la difusión gaseosa, las paredes celulares, las membranas y las células mesofílicas causan otro tipo de resistencia a la difusión gaseosa. La resistencia mesofílica depende principalmente de la solubilidad de los contaminantes gaseosos, la difusión gas-líquido y la geometría del tamaño de la hoja, y están influenciados por algunos factores ambientales, como la velocidad del viento ([Khan y Abbasi, 2000](#)).

OBJETIVOS

Objetivo General

Estimar la capacidad del material foliar de cuatro especies arbóreas de capturar compuestos orgánicos volátiles antropogénicos provenientes de dos fuentes urbanas, con el objeto de utilizarlos en proyectos de forestación urbana de forma más racional y científicamente fundada.

Objetivos Específicos

1. Establecer la relación entre la concentración de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos encontrados en el material foliar de las especies arbóreas *Platanus x acerifolia* y *Liriodendron tulipifera* y su distancia a una estación de distribución de combustibles.
2. Establecer la relación entre las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos medidos en material foliar de las especies arbóreas *Platanus x acerifolia* y *Liriodendron tulipifera* y el tráfico vehicular como principal fuente de emisión.
3. Evaluar la capacidad del material foliar de dos especies arbóreas, *Robinia pseudoacacia* (exótica) y *Quillaja saponaria* (nativa), para capturar compuestos orgánicos volátiles antropogénicos y establecer si existen diferencias estadísticamente significativas entre una y otra.

MATERIALES Y MÉTODO

En este estudio, se utilizaron diversos materiales, equipos y reactivos para llevar a cabo los experimentos. Los detalles completos sobre los materiales utilizados, el equipamiento empleado, los reactivos y los estándares, así como la preparación de los estándares, se encuentran en el anexo 3.

Selección de especies arbóreas

Las especies arbóreas que se abordaron en este trabajo corresponden a: *Liriodendron tulipifera*, *Platanus x acerifolia*, *Robinia pseudoacacia* (exótica), *Quillaja saponaria* (nativa).

La selección de los individuos de *Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia* se orientó a su cercanía a sitios con alto tráfico vehicular y centros de distribución de combustibles. Para *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia*, se colectaron muestras compuestas de material foliar disponibles en las proximidades a cada estación oficial de monitoreo SINCA.

Elección de sitios de muestreo

Para abordar las especies *L. tulipifera* y *P. x acerifolia*, se seleccionaron tres sitios de muestreo: dos con tráfico vehicular y presencia de un centro de distribución de combustibles. El tercer sitio seleccionado corresponde a un parque urbano (sin tráfico vehicular interno), como se explica a continuación y se muestra en la figura 3.

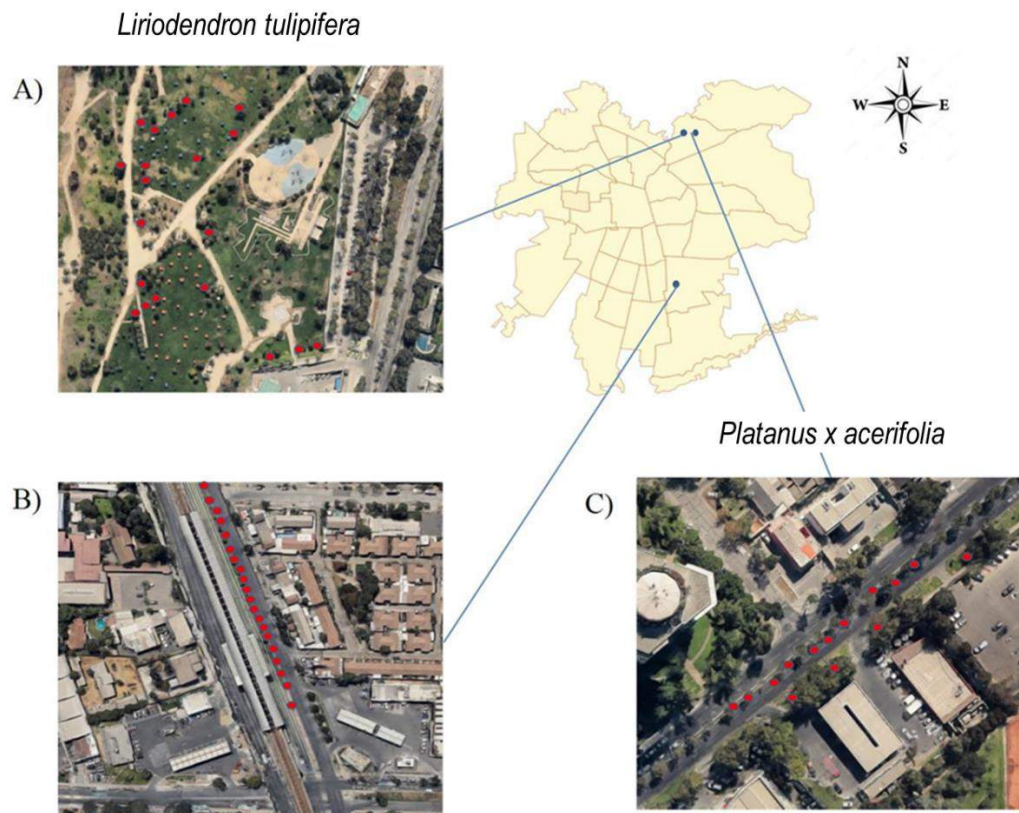


Figura 3. Sitios de muestreo en Santiago, Chile. (A) Parque Bicentenario, Comuna de Vitacura (*L. tulipifera*); (B) Avenida Vicuña Mackenna, Comuna de La Florida (*L. tulipifera*); (C) Avenida Vitacura, Comuna de Vitacura (*P. x acerifolia*). Los puntos rojos identifican a los individuos muestreados en cada sitio.

En el primer sitio, se colectaron muestras, para cada individuo, de hojas soleadas bien desarrolladas y directamente expuestas al alto tráfico de vehículos a una distancia $< 2\text{m}$ (velocidad operativa de 26.5 km/h , UOCT, 2019); las muestras corresponden a veinte individuos de *L. tulipifera* ($n = 20$) a lo largo de la avenida Vicuña Mackenna en la Comuna de La Florida; en este sitio de muestreo existe un centro de distribución de combustibles. Los individuos muestreados y sus correspondientes distancias al centro de distribución de combustible se muestran en la figura 4.



Figura 4. Sitio de muestreo para la especie *Liriodendron tulipifera* en avenida Vicuña Mackenna, comuna de La Florida. LD: Individuo de la especie *L. tulipifera*; CDC: Centro de distribución de combustibles.

En el segundo sitio, y en condiciones similares al primero (velocidad operativa de 29.5 km/h, UOCT, 2019) y proximidad al flujo vehicular (distancia < 2m), se colectaron muestras de catorce individuos de *P. x acerifolia* ($n = 14$) a lo largo de la avenida Vitacura en la Comuna de Vitacura; en este sitio existe un centro de distribución de combustibles. Los individuos de *P. x acerifolia* muestreados y sus correspondientes distancias al centro de distribución de combustible se muestran en la figura 5.



Figura 5. Sitio de muestreo para la especie *Platanus x acerifolia* en avenida Vitacura, comuna de Vitacura. PO: Individuo de la especie *P. x acerifolia*; CDC: Centro de distribución de combustibles.

En el tercer sitio, se colectaron hojas soleadas bien desarrolladas de veinte individuos de *L. tulipifera* ($n = 20$), ubicados en un parque urbano llamado Parque Bicentenario, comuna de Vitacura.

Todos los individuos fueron muestreados en dos campañas llevadas a cabo en la primavera (noviembre) de 2016 y el verano austral (febrero) de 2017. Cada campaña de muestreo en cada sitio duró aproximadamente 6 h.



Figura 6. Sitios de muestreo para las especies *Q. saponaria* y *R. pseudoacacia* en Estaciones de Monitoreo (EM) de calidad de aire: EM-C: Estación de Monitoreo Cerrillos, EM-CN: Estación de Monitoreo Cerro Navia, EM-EB: Estación de Monitoreo El Bosque, EM-I: Estación de Monitoreo Independencia, EM-LF: Estación de Monitoreo La Florida, EM-LC: Estación de Monitoreo Las Condes, EM-PO: Estación de Monitoreo Parque O'Higgins, EM-PA: Estación de Monitoreo Puente Alto, EM-Q: Estación de Monitoreo Quilicura, CA: Campus Antumapu, U de Chile.

En el caso de las especies *R. pseudoacacia* y *Q. saponaria*, se colectaron muestras compuestas de material foliar de 10 individuos de cada especie arbórea disponible en las cercanías de cada estación de monitoreo SINCA; estos individuos eran parte del proyecto Fondecyt del Dr. Jaime Hernández ([Acuña-Ruz et al. 2016](#)). Los puntos de muestreo considerados fueron las cercanías de las estaciones de La Florida, Las Condes, Parque O'Higgins, Independencia, Cerrillos; El Bosque, Cerro Navia, Puente Alto, Quilicura, Campus Antumapu de la Universidad de Chile (sin estación de monitoreo cercana). Los puntos de muestreo seleccionados se indican en la figura 6. La campaña de muestreo se ejecutó durante la temporada de verano austral de 2017 (enero).

Muestreo de material foliar

En todos los casos, las hojas seleccionadas de cada individuo de *L. tulipifera* y *P. x acerifolia* se recolectaron en un rango de altura de 1,7 y 2,5 m por todo el perímetro de cada individuo, hasta completar aproximadamente 30 g de biomasa foliar, (alrededor de 40 hojas). Todas las muestras se congelaron inmediatamente in situ en hielo seco y se almacenaron a -20 °C hasta el momento del análisis químico.

En el caso de las muestras de material foliar de los individuos de *Robinia pseudoacacia* y *Quillaja saponaria* no fue posible establecer los mismos criterios de rango de altura, porque los individuos poseían 1,6 metros como altura máxima, pero se realizó un muestreo perimetral de los 10 individuos hasta completar aproximadamente 30 g de biomasa foliar (muestra compuesta para cada especie) en cada punto de muestreo.

Tratamiento analítico de las muestras

La muestra de biomasa foliar colectada se cortó en fragmentos más pequeños. Posteriormente, se sometió a molienda criogénica cuyas condiciones instrumentales se describen en el anexo 4. Se masaron 2 g de la muestra molida y se introdujeron en un vial para análisis Head Space de 20 mL; se agregó el estándar interno sellando el envase con tapa magnética con ayuda de un crimper.

Microextracción en fase sólida por Espacio de Cabeza.

La Microextracción en fase sólida por Espacio de Cabeza (HS-SPME, por sus siglas en inglés) es una técnica analítica basada en el principio de adsorción/absorción y desorción; se utilizó una fibra recubierta para concentrar los compuestos volátiles y semivolátiles de una muestra, ubicados en el espacio de cabeza del vial. El proceso se encuentra automatizado, el sistema con el inyector Combipal se encuentra acoplado al

cromatógrafo gaseoso (GC/MSD); las condiciones para la técnica se describen en el anexo 5.

Condiciones instrumentales para la determinación de COVA

La determinación cuantitativa se realiza por Cromatografía Gaseosa acoplada a un detector selectivo de Masas (GC/MSD) en el modo de ionización electrónica (EI, 70 eV), empleando Helio (99,999%) como gas transportador. La programación de las condiciones en el equipo se presenta en el anexo 6. En el método se implementó el modo de monitoreo de iones selectivo SIM (Selected Ion Monitoring por sus siglas en inglés), logrando disminuir el efecto ruido y aumentar la ganancia de la señal. En el cuadro 1 se resumen los datos de los iones cuantificadores y el par de iones verificadores para cada uno de los analitos estudiados.

Cuadro 1. Transiciones correspondientes a los iones (m/z) cuantificadores y verificadores junto con los tiempos de retención para cada analito evaluado.

Analito	Nº CAS	Ion Cuantificador Q (m/z)	Ion verificador q1 (m/z)	Ion Verificador q2 (m/z)	Tiempo de Retención (min)
1,1-Dicloroetano	75-35-4	61	96	98	1,90
Diclorometano	75-09-2	49	84	86	1,97
cis-1,2-Dicloroetano	156-59-2	61	96	98	2,13
1,1-Dichloroetano	75-34-3	63	65	83	2,22
trans-1,2-Dicloroetano	156-60-5	61	96	98	2,43
Triclorometano	67-66-3	83	85	47	2,54
Bromoclorometano	74-97-5	49	130	128	2,54
2,2-Dicloropropano	594-20-7	77	41	79	2,52
1,2-Dicloroetano	107-06-2	62	64	49	2,90
1,1,1-Tricloroetano	71-55-6	97	99	61	2,85
1,1-Dicloro-1-propeno	563-58-6	75	39	110	2,98
Benceno	71-43-2	78	77	51	3,06
Tetraclorometano	56-23-5	117	119	121	3,06
Dibromometano	74-95-3	93	174	95	3,73
Tricloroetano	79-01-6	95	130	132	3,69
1,2-Dicloropropano	78-87-5	63	62	41	3,68

Analito	Nº CAS	Ion Cualificador Q (m/z)	Ion verificador q1 (m/z)	Ion Verificador q2 (m/z)	Tiempo de Retención (min)
Bromodichlorometano	75-27-4	83	85	47	3,84
aaa-Trifluorotolueno (EI)	98-08-8	146	127	96	3,96
cis-1,3-Dicloropropeno	1061-01-5	75	77	110	4,72
trans-1,3-Dicloropropeno	1061-02-6	75	77	110	4,72
Tolueno	108-88-3	91	92	65	5,55
1,1,2-Tricloroetano	79-00-5	97	83	99	5,75
1,3-Dicloropropano	142-28-9	76	41	78	6,22
Dibromoclorometano	124-48-1	127	129	131	6,53
1,2-Dibromoetano	106-93-4	107	109	93	6,91
Tetracloroetano	127-18-4	166	164	131	7,05
Clorobenceno	108-90-7	112	77	114	8,47
1,1,1,2-Tetracloroetano	630-20-6	131	133	117	8,65
Etilbenceno	100-41-4	91	106	51	9,18
m-Xileno	108-38-3	91	106	105	9,58
p-Xileno	106-42-3	91	106	105	9,58
Tribromometano	75-25-2	173	171	175	10,24
Estireno	100-42-5	104	78	51	10,69
o-Xileno	95-47-6	91	106	105	10,80
1,1,2,2-Tetracloroetano	79-34-5	83	85	61	11,85
1,2,3-Tricloropropano	96-18-4	75	105	77	12,06
Isopropilbenceno	98-82-8	105	120	77	12,22
Bromobenceno	108-86-1	77	156	158	12,34
2-Clorotolueno	95-49-8	91	126	89	13,17
n-Propilbenceno	103-65-1	120	65	78	13,35
4-Clorotolueno	106-43-4	126	128	89	13,43
1,3,5-Trimetilbenceno	108-67-8	105	120	77	13,50
tert-Butilbenceno	98-06-6	119	91	41	15,11
1,2,4-Trimetilbenceno	95-63-6	105	120	77	13,98
1,3-Diclorobenceno	541-73-1	146	148	111	15,39
sec-Butilbenceno	135-98-8	105	120	77	15,45
1,4-Diclorobenceno	106-46-7	146	148	111	15,53
4-Isopropiltolueno	99-87-6	119	134	91	15,70
1,2-Diclorobenceno	95-50-1	146	148	111	15,86
1,2-Dibromo-3-cloropropano	96-12-8	157	75	155	16,38
1,2,4-Triclorobenceno	120-82-1	180	145	184	17,24
Naftaleno	91-20-3	128	102	127	17,31

Analito	N° CAS	Ion Cualificador Q (m/z)	Ion verificador q1 (m/z)	Ion Verificador q2 (m/z)	Tiempo de Retención (min)
1,2,3-Triclorobenceno	87-61-6	180	182	74	17,25
Hexacloro-1,3-butadieno	87-68-3	225	227	223	17,56

Análisis estadístico de los datos

Análisis de Correlogramas

Se utilizó el análisis de correlograma o matriz de correlación para explorar la interdependencia de los valores de una observación. Una matriz de correlación muestra los coeficientes de correlación entre conjuntos de variables. Cada variable aleatoria está correlacionada con cada uno de los otros valores. Esto permite ver qué pares tienen la correlación más alta. En los correlogramas la intensidad de color es proporcional al coeficiente de correlación, con las cajas más oscuras indicando las correlaciones más fuertes entre dos variables, cercanas a +1 o -1 (coeficiente de correlación de Pearson).

Evaluación de los perfiles de concentración y representación gráfica de los resultados

Se establecieron estrategias comparativas para analizar los resultados, ya sea de una misma especie arbórea, expuesta y no expuesta a una fuente de contaminación directa, o entre distintas especies arbóreas, expuestas a condiciones similares de interacción con la fuente de contaminación.

La evaluación de los perfiles de concentración corresponde a distribuciones de frecuencias relativas, que muestran la frecuencia relativa de cada valor en un conjunto de datos como un porcentaje de todas las frecuencias. Los resultados se presentaron

mediante diagramas de cajas y bigotes o box plot, permitiendo resumir la información en medidas descriptivas. Se utilizó el software Microsoft 365.

Evaluación estadística

Se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos para comprobar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de datos correspondientes a las especies arbóreas estudiadas. Este análisis fue respaldado con pruebas de p-valor a un nivel de confianza del 95%, utilizando la prueba t de Student para determinar si hay una diferencia significativa entre las medias de dos grupos.

Estimación de la reactividad fotoquímica

En entornos urbanos ([Guo et al., 2016](#)), en donde las fuentes de emisión de COV están cercanas físicamente, la formación de O₃ fotoquímico se encuentra limitada y es sensible a cualquier modificación de la concentración de COV; entonces, se pueden utilizar ecuaciones para estimar la contribución de cada COV que reacciona en la atmósfera para formar O₃, suponiendo que todos los COV en la atmósfera reaccionan con el radical OH y forman O₃. En este trabajo se usaron los estimadores de la reactividad fotoquímica de los COV y/o potencial de formación de ozono, se incluyen los cálculos de concentración equivalente de Propileno (Prop-Equiv) descrito por [Chameides et al. \(1992\)](#) y el Potencial de Formación de Ozono (PFO) informado por [Cai et al. \(2010\)](#), [Wu et al. \(2017\)](#) y [Kumar et al. \(2018\)](#).

Para calcular la concentración de equivalente de Propileno de cada COVA individual, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Prop - Equiv}(i) = \text{conc}(i) \times \text{KOH}(i)/\text{KOH}(\text{C}_3\text{H}_6) \quad \text{Ec. 1}$$

donde, Prop-Equiv(i) es la concentración de i, según [Atkinson and Arey \(2003\)](#).

El potencial de formación de ozono (PFO) para los COVA individuales, usando el método de la velocidad incremental máxima (MIR), se describe en la ecuación 2:

$$PFO(i) = \text{conc}(i) \times \text{MIRcoef}(i) \quad \text{Ec. 2}$$

donde, PFO(i) es el PFO de la especie COVA, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$; conc (i) es la concentración de COVA expresada en ppbC; MIRcoef(i) es el coeficiente de reactividad incremental máxima del compuesto i, expresado en gO_3/gCOV .

En consecuencia, la formación de O_3 fotoquímico debiera decrecer con la disminución de los niveles de COV. De esta forma, es posible indicar que los COVA retenidos en el material foliar ya no son susceptibles de interactuar en el medio ambiente, disminuyendo con ello la formación de O_3 troposférico.

Se fijó, como parámetro cuantificable, la eliminación de los precursores (COVA) que generan O_3 y se expresan en términos de equivalentes de Propileno (Prop-equiv) y Potenciales de Formación de Ozono (PFO). A partir de los compuestos retenidos en el material foliar, se establecieron sus capacidades de formación de O_3 y de esta forma, se estimó, de manera representativa, la posibilidad que tiene la especie arbórea para atenuar la formación de O_3 a nivel troposférico ([Araya et al., 2019](#)).

Índice de control de la reactividad

Se definió un índice de control de reactividad balanceado (ICR), normalizando las expresiones anteriormente descritas, para establecer las especies químicas más incidentes en términos de reactividad mediante la ecuación 3.

$$ICR_i = K_1 \times \frac{\text{Prop-equiv}(i) - \text{Prop-equiv}(min)}{\text{Prop-equiv}(max) - \text{Prop-equiv}(min)} + K_2 \times \frac{\text{PFO}(i) - \text{PFO}(min)}{\text{PFO}(max) - \text{PFO}(min)} \quad \text{Ec. 3}$$

donde, ICR_i es el índice de control de reactividad normalizado de la especie i de COV;

k es el peso, y k_1 y k_2 se establecieron en 0,5;

Prop-equiv_(min) y Prop-equiv_(max), son el mínimo y el máximo de Prop-equiv_(i) entre las especies de COV. PFO_{min} y PFO_{max} son el PFO_i mínimo y máximo entre las especies de COV (S. Fu et al., 2020).

El siguiente esquema resume las actividades que se desarrollan en este trabajo y que se abordan en los objetivos.

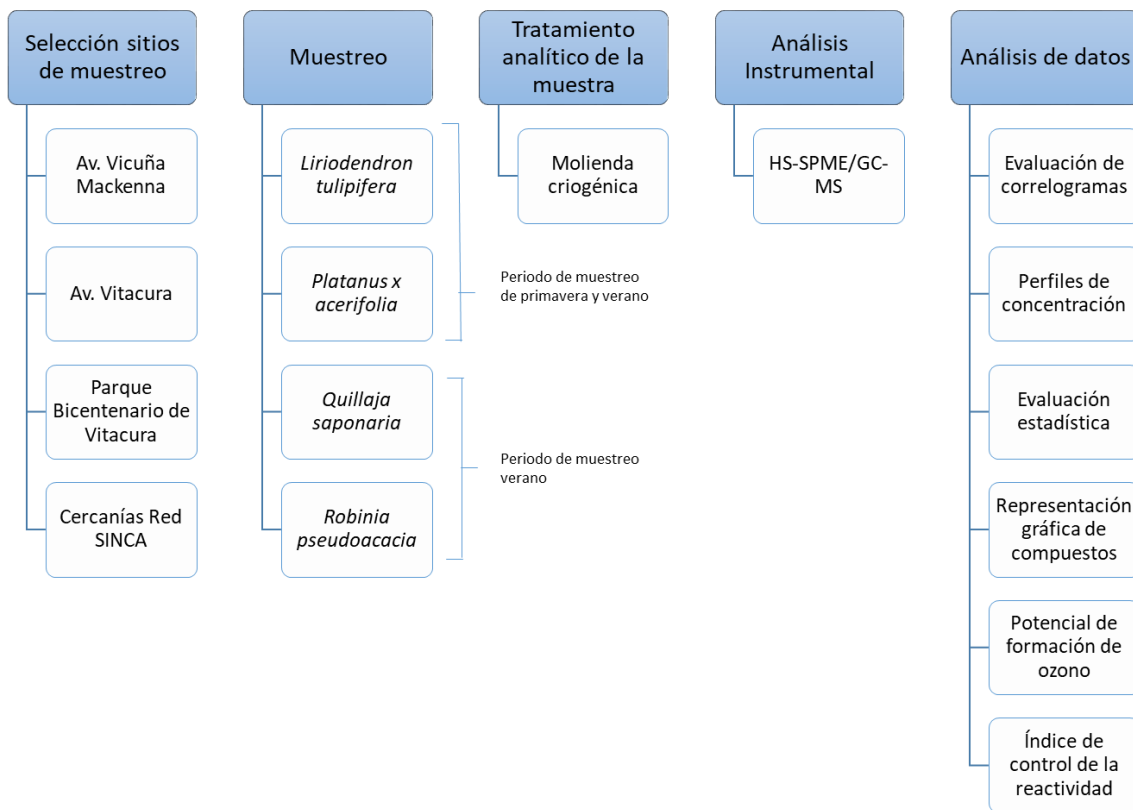


Figura 7. Esquema conceptual de las actividades desarrolladas para este trabajo

RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos a partir de los análisis detallados de las muestras foliares de las cuatro especies arbóreas estudiadas. Los datos colectados se organizan y discuten en relación con los objetivos específicos planteados en este estudio. Se examinan las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos (COVA) presentes en el material foliar, y se evalúan las diferencias entre las especies y sus respectivos entornos. Se analizan las correlaciones entre los niveles de contaminación y la proximidad a fuentes de emisión, como áreas de alto tráfico vehicular y centros de distribución de combustibles. Este enfoque integral permite una mayor comprensión de la capacidad de las especies arbóreas para actuar como bioindicadores de la calidad del aire urbano.

Objetivo 1: Establecer la relación entre las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos encontrados en el material foliar de las especies arbóreas *Platanus x acerifolia* y *Liriodendron tulipifera* y su distancia a una estación de distribución de combustibles.

El cuadro 2 muestra los resultados de los análisis de las muestras de *L. tulipifera*. Se cuantificaron los siguientes compuestos: etilbenceno, estireno, tolueno, 1,3,5-trimetilbenceno (1,3,5-TMB), 1,2,4-trimetilbenceno (1,2,4-TMB), o-xileno, m/p-xileno y naftaleno y las respectivas distancias al centro de distribución de combustibles para cada individuo, para los periodos de primavera y verano. El cuadro 3 muestra los resultados del análisis de los individuos de *P. x acerifolia*, cuantificando los siguientes compuestos: etilbenceno, estireno, tolueno, 1,3,5-TMB, 1,2,4-TMB, o-xileno, m/p-xileno, naftaleno, tricloroetano e isopropilbenceno.

Cuadro 2. Concentraciones de especies químicas en muestras de hojas de individuos de *L. tulipifera* ubicados en Av. Vicuña Mackenna

Individuos	Localización		Distancia al Centro de Distribución de Combustibles (m)	ETILBENCENO		ESTIRENO		TOLUENO		1,3,5-TMB	
				Av. Vicuña Mackenna		Av. Vicuña Mackenna		Av. Vicuña Mackenna		Av. Vicuña Mackenna	
	Latitud	Longitud		Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano
				Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)	
1	-33.397880	-70.601570	47	3,05 ± 0,23	2,30 ± 0,24	28,95 ± 1,73	28,95 ± 4,29	80,81 ± 15,25	161,98 ± 46,86	1,60 ± 0,20	0,46 ± 0,04
2	-33.397980	-70.601480	67	3,01 ± 0,22	1,90 ± 0,17	26,47 ± 2,66	22,62 ± 2,14	55,85 ± 15,58	90,14 ± 7,77	1,73 ± 0,30	0,39 ± 0,04
3	-33.397760	-70.601460	78	3,25 ± 0,25	2,16 ± 0,33	25,78 ± 2,27	23,89 ± 4,50	173,53 ± 11,24	301,21 ± 54,11	1,52 ± 0,06	0,54 ± 0,20
4	-33.397770	-70.601460	81	3,32 ± 0,37	2,04 ± 0,42	29,67 ± 4,12	21,25 ± 6,58	197,08 ± 85,43	108,32 ± 130,88	0,92 ± 0,04	0,54 ± 0,20
5	-33.397810	-70.601300	88	3,00 ± 0,18	2,04 ± 0,15	30,69 ± 1,55	21,90 ± 1,62	218,00 ± 13,17	124,20 ± 17,16	1,12 ± 0,15	0,43 ± 0,06
6	-33.397780	-70.601160	96	2,95 ± 0,15	2,47 ± 0,78	25,94 ± 1,89	32,39 ± 0,95	83,45 ± 7,39	79,62 ± 8,85	1,31 ± 0,08	0,56 ± 0,21
7	-33.397660	-70.602280	102	3,04 ± 0,14	2,19 ± 0,12	41,42 ± 2,34	15,12 ± 1,79	380,98 ± 37,69	148,38 ± 12,48	1,31 ± 0,49	0,41 ± 0,03
8	-33.397870	-70.602350	111	2,78 ± 0,27	3,36 ± 0,18	28,66 ± 3,56	14,41 ± 4,44	218,76 ± 18,48	163,03 ± 13,47	0,97 ± 0,12	0,57 ± 0,06
9	-33.397850	-70.602280	118	2,85 ± 0,07	3,27 ± 0,46	40,82 ± 10,70	14,73 ± 1,61	251,42 ± 68,98	97,81 ± 8,33	1,32 ± 0,40	0,64 ± 0,22
10	-33.396880	-70.602370	125	2,84 ± 0,20	2,88 ± 0,58	34,17 ± 6,18	9,83 ± 2,20	160,38 ± 56,57	111,06 ± 16,82	0,87 ± 0,02	0,73 ± 0,33
11	-33.396880	-70.602420	132	2,21 ± 0,17	4,34 ± 0,24	25,03 ± 2,91	19,93 ± 4,80	229,25 ± 39,41	92,78 ± 35,54	1,24 ± 0,31	1,00 ± 0,29
12	-33.396820	-70.602390	140	5,11 ± 0,77	3,40 ± 1,60	66,51 ± 7,44	15,97 ± 7,93	144,06 ± 31,22	152,66 ± 66,42	1,11 ± 0,34	0,69 ± 0,02
13	-33.396820	-70.602430	147	3,13 ± 0,10	3,46 ± 0,66	39,94 ± 0,14	8,92 ± 3,45	83,00 ± 23,63	228,69 ± 39,57	1,05 ± 0,18	1,04 ± 0,45
14	-33.396510	-70.602510	154	2,68 ± 0,40	2,00 ± 0,21	29,32 ± 5,29	27,06 ± 2,58	157,44 ± 24,10	375,37 ± 86,30	0,98 ± 0,18	0,47 ± 0,10
15	-33.396580	-70.602510	163	2,41 ± 0,11	1,81 ± 0,33	21,62 ± 3,65	21,93 ± 2,69	192,71 ± 11,42	471,29 ± 71,29	1,01 ± 0,23	0,45 ± 0,17
16	-33.396680	-70.602330	170	2,89 ± 0,49	2,07 ± 0,32	34,61 ± 2,74	23,39 ± 4,40	120,10 ± 70,50	198,44 ± 44,84	1,12 ± 0,22	1,04 ± 0,16
17	-33.396620	-70.602210	180	2,92 ± 0,29	2,14 ± 0,30	31,84 ± 2,74	25,55 ± 4,65	113,38 ± 15,11	338,56 ± 50,06	0,85 ± 0,01	0,54 ± 0,11
18	-33.396620	-70.602140	187	2,76 ± 0,21	2,38 ± 0,49	26,69 ± 2,00	25,31 ± 4,24	307,33 ± 20,72	267,60 ± 60,06	0,97 ± 0,08	0,40 ± 0,14
19	-33.396510	-70.602080	193	2,79 ± 0,38	2,96 ± 0,68	36,75 ± 5,87	32,57 ± 8,06	112,43 ± 29,10	161,10 ± 32,57	0,85 ± 0,03	0,59 ± 0,10
20	-33.396590	-70.601850	201	2,95 ± 0,32	2,71 ± 0,10	32,59 ± 7,40	22,82 ± 1,91	97,21 ± 4,82	487,86 ± 23,37	0,95 ± 0,18	0,21 ± 0,04

Individuos	Localización		Distancia al Centro de Distribución de Combustibles (m)	1,2,4-TMB		O-XILENO		NAFTALENO		m-p-XILENO	
				Av. Vicuña Mackenna		Av. Vicuña Mackenna		Av. Vicuña Mackenna		Av. Vicuña Mackenna	
	Latitud	Longitud		Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano
				Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)	
1	-33.397880	-70.601570	47	69,22 ± 4,49	<LC	3,79 ± 0,50	1,65 ± 0,96	3,10 ± 0,52	0,10 ± 0,02	8,63 ± 1,62	<LC
2	-33.397980	-70.601480	67	54,30 ± 5,23	<LC	3,50 ± 0,35	1,67 ± 0,25	4,46 ± 1,09	0,24 ± 0,17	6,04 ± 1,48	<LC
3	-33.397760	-70.601460	78	41,34 ± 1,94	<LC	3,68 ± 0,51	1,76 ± 0,49	3,63 ± 0,49	0,14 ± 0,05	6,33 ± 1,66	<LC
4	-33.397770	-70.601460	81	128,74 ± 19,73	11,28 ± 0,26	4,15 ± 1,08	1,82 ± 0,42	2,54 ± 0,47	0,54 ± 0,51	5,41 ± 1,96	<LC
5	-33.397810	-70.601300	88	80,06 ± 7,23	4,13 ± 0,45	3,34 ± 0,38	1,53 ± 0,19	1,65 ± 1,39	<LC	4,74 ± 0,74	<LC
6	-33.397780	-70.601160	96	20,21 ± 2,03	5,47 ± 0,64	3,31 ± 0,11	1,87 ± 0,36	2,13 ± 0,12	0,10 ± 0,02	4,99 ± 0,95	<LC
7	-33.397660	-70.602280	102	9,78 ± 0,82	10,21 ± 4,96	4,32 ± 0,29	2,16 ± 1,10	2,73 ± 0,41	<LC	<LC	<LC
8	-33.397870	-70.602350	111	15,95 ± 1,13	<LC	<LC	3,60 ± 0,99	1,70 ± 0,57	1,72 ± 1,46	3,17 ± 0,63	1,87 ± 1,03
9	-33.397850	-70.602280	118	16,28 ± 1,19	<LC	6,41 ± 0,24	3,09 ± 0,53	1,45 ± 0,21	0,35 ± 0,28	<LC	1,24 ± 0,87
10	-33.396880	-70.602370	125	37,65 ± 7,40	29,54 ± 3,36	<LC	2,82 ± 0,58	1,95 ± 0,78	<LC	<LC	6,63 ± 0,45
11	-33.396880	-70.602420	132	107,65 ± 14,98	7,34 ± 0,51	<LC	4,92 ± 0,41	0,76 ± 0,35	0,89 ± 0,39	<LC	5,62 ± 1,97
12	-33.396820	-70.602390	140	<LC	14,57 ± 3,98	<LC	3,43 ± 1,43	2,78 ± 0,28	0,28 ± 0,02	10,21 ± 3,24	4,75 ± 4,87
13	-33.396820	-70.602430	147	10,92 ± 0,96	29,70 ± 7,93	<LC	4,04 ± 0,67	0,92 ± 0,38	0,99 ± 0,80	2,38 ± 0,37	4,88 ± 1,25
14	-33.396510	-70.602510	154	86,09 ± 9,93	7,49 ± 1,17	<LC	1,68 ± 0,43	0,84 ± 0,20	0,45 ± 0,42	2,83 ± 1,99	2,09 ± 1,21
15	-33.396580	-70.602510	163	30,99 ± 3,35	34,06 ± 2,82	<LC	1,40 ± 0,29	1,12 ± 0,27	<LC	<LC	1,36 ± 0,75
16	-33.396680	-70.602330	170	124,11 ± 23,57	<LC	<LC	1,65 ± 0,45	0,88 ± 0,42	0,21 ± 0,12	<LC	0,21 ± 0,12
17	-33.396620	-70.602210	180	53,50 ± 7,96	<LC	<LC	2,14 ± 1,39	1,42 ± 0,42	<LC	1,38 ± 0,90	<LC
18	-33.396620	-70.602140	187	84,62 ± 17,15	<LC	<LC	2,23 ± 0,67	0,69 ± 0,13	0,38 ± 0,22	<LC	0,53 ± 0,57
19	-33.396510	-70.602080	193	10,15 ± 1,55	11,25 ± 3,35	3,29 ± 1,27	3,26 ± 2,01	1,89 ± 0,65	<LC	<LC	0,38 ± 0,25
20	-33.396590	-70.601850	201	26,51 ± 4,53	<LC	<LC	1,82 ± 0,32	0,59 ± 0,09	<LC	1,72 ± 1,50	0,40 ± 0,31

Concentración expresada en ng de C; LC, límite de cuantificación (0,10 ng e C.)

Cuadro 3. Concentraciones de especies químicas en muestras de hojas de individuos de *P. x acerifolia* ubicados en Av. Vitacura

Individuo	Localización		Distancia al Centro de Distribución # Combustibles	ETILBENCENO		ESTIRENO		TOLUENO		M.E.-TMB	
	Latitud	Longitud		Av. Vitacura		Av. Vitacura		Av. Vitacura		Av. Vitacura	
				Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano
				Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)	
1	-33.38369°	-78.87286°	21	44,76 ± 0,71	47,28 ± 1,22	116,45 ± 9,28	28,90 ± 8,59	2,78 ± 4,90	148,68 ± 4,67	8,82 ± 0,10	0,19 ± 4,82
2	-33.38347°	-78.87288°	23	17,00 ± 1,88	21,87 ± 9,31	43,34 ± 3,84	15,52 ± 8,08	1,98 ± 4,32	6,48 ± 0,84	0,94 ± 0,48	0,87 ± 4,82
3	-33.38389°	-78.87288°	24	8,08 ± 2,77	32,14 ± 4,88	72,38 ± 19,09	21,08 ± 1,88	7,25 ± 2,80	119,57 ± 14,77	8,44 ± 0,49	0,55 ± 4,20
4	-33.38343°	-78.87287°	28	5,84 ± 2,41	3,05 ± 8,27	65,69 ± 4,44	13,56 ± 8,53	5,38 ± 2,18	4,44 ± 0,26	8,58 ± 0,48	0,61 ± 8,78
5	-33.38388°	-78.87288°	32	18,24 ± 1,62	66,83 ± 8,57	86,21 ± 4,93	23,34 ± 2,52	88,24 ± 3,23	182,44 ± 4,93	0,44 ± 0,33	0,23 ± 4,82
6	-33.38383°	-78.87287°	34	16,57 ± 8,64	41,78 ± 3,23	72,75 ± 2,15	23,58 ± 2,28	5,67 ± 4,50	128,48 ± 2,64	1,13 ± 0,33	0,69 ± 4,34
7	-33.38389°	-78.87289°	38	4,82 ± 8,42	38,73 ± 5,78	66,81 ± 2,77	85,14 ± 4,23	1,84 ± 4,82	128,21 ± 22,18	8,83 ± 0,48	0,28 ± 8,13
8	-33.38389°	-78.87289°	38	11,28 ± 8,88	26,83 ± 8,21	74,57 ± 2,22	23,82 ± 5,44	8,58 ± 2,28	84,72 ± 2,44	8,22 ± 0,48	0,28 ± 4,88
9	-33.38344°	-78.87284°	38	12,83 ± 0,51	42,81 ± 4,34	63,38 ± 2,22	29,51 ± 7,18	2,38 ± 4,76	144,29 ± 8,87	8,85 ± 0,48	0,58 ± 8,88
10	-33.38349°	-78.87289°	38	8,89 ± 0,41	22,84 ± 8,85	16,84 ± 1,74	16,88 ± 5,44	3,97 ± 8,55	76,57 ± 29,88	8,89 ± 0,47	0,58 ± 8,88
11	-33.38346°	-78.87287°	41	7,95 ± 0,88	54,75 ± 48,28	89,88 ± 1,88	26,88 ± 8,85	8,24 ± 1,18	188,38 ± 68,28	8,24 ± 0,48	0,61 ± 8,28
12	-33.38378°	-78.87288°	52	8,83 ± 0,88	27,88 ± 1,88	47,24 ± 1,88	41,37 ± 8,78	8,54 ± 1,11	188,84 ± 8,88	8,24 ± 0,48	0,61 ± 8,28
13	-33.38325°	-78.87288°	58	4,54 ± 0,88	27,18 ± 0,88	78,83 ± 6,88	3,54 ± 0,23	88,78 ± 4,28	126,28 ± 8,28	1,84 ± 0,24	0,52 ± 8,88
14	-33.38389°	-78.87288°	105	18,87 ± 3,21	80,72 ± 8,61	88,58 ± 5,44	28,04 ± 8,85	8,84 ± 8,20	16,38 ± 1,88	8,89 ± 0,24	1,88 ± 8,28

Individuo	Localización		Distancia al Centro de Distribución # Combustibles	1,2,4-TMB		O-XILENO		MMPALENO		mp-XILENO	
	Latitud	Longitud		Av. Vitacura		Av. Vitacura		Av. Vitacura		Av. Vitacura	
				Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano
				Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)	
1	-33.38389°	-78.87288°	21	1,18 ± 0,08	0,78 ± 0,22	1,82 ± 0,11	11,69 ± 0,82	0,31 ± 0,88	< LC	0,25 ± 0,48	17,88 ± 0,81
2	-33.38347°	-78.87288°	23	1,29 ± 0,04	0,24 ± 4,87	1,88 ± 0,35	1,88 ± 0,34	0,53 ± 0,14	< LC	< LC	< LC
3	-33.38389°	-78.87288°	24	1,23 ± 0,81	0,29 ± 4,87	2,18 ± 0,81	4,14 ± 1,78	0,87 ± 4,88	< LC	1,43 ± 4,88	88,73 ± 5,21
4	-33.38343°	-78.87287°	28	1,88 ± 0,04	0,46 ± 4,87	2,42 ± 0,11	1,87 ± 8,07	0,59 ± 4,88	< LC	1,78 ± 0,22	< LC
5	-33.38388°	-78.87288°	32	1,82 ± 0,88	8,24 ± 4,87	2,32 ± 0,45	13,84 ± 1,22	0,81 ± 4,82	< LC	1,82 ± 0,37	28,88 ± 4,82
6	-33.38383°	-78.87287°	34	1,88 ± 0,87	8,46 ± 4,85	2,34 ± 0,27	8,58 ± 2,28	0,78 ± 4,74	< LC	1,88 ± 0,36	88,83 ± 1,84
7	-33.38389°	-78.87289°	38	1,23 ± 8,75	0,21 ± 4,89	1,88 ± 0,22	3,83 ± 2,54	0,75 ± 4,88	< LC	8,44 ± 0,39	12,31 ± 5,44
8	-33.38389°	-78.87289°	38	1,85 ± 0,88	8,24 ± 4,87	2,18 ± 0,11	4,84 ± 2,22	0,78 ± 4,27	< LC	2,11 ± 0,45	18,84 ± 8,31
9	-33.38344°	-78.87288°	38	1,23 ± 8,05	8,45 ± 4,18	1,83 ± 0,86	15,24 ± 2,03	0,44 ± 4,88	< LC	8,58 ± 0,82	21,88 ± 3,51
10	-33.38389°	-78.87289°	38	1,27 ± 8,04	8,42 ± 8,88	1,25 ± 4,28	7,28 ± 1,78	0,18 ± 4,88	< LC	0,71 ± 0,48	8,44 ± 3,81
11	-33.38346°	-78.87287°	41	1,44 ± 8,04	8,42 ± 4,88	1,88 ± 4,18	18,83 ± 3,88	0,58 ± 4,88	< LC	1,88 ± 0,18	25,84 ± 4,77
12	-33.38378°	-78.87288°	52	1,42 ± 8,08	8,23 ± 8,88	1,23 ± 8,18	8,21 ± 8,29	0,15 ± 4,88	< LC	< LC	8,34 ± 3,22
13	-33.38325°	-78.87288°	58	1,84 ± 0,18	0,21 ± 8,81	2,45 ± 8,17	8,15 ± 8,29	0,54 ± 8,29	< LC	2,88 ± 0,54	88,74 ± 1,88
14	-33.38389°	-78.87288°	105	1,74 ± 0,16	0,38 ± 8,81	2,28 ± 8,38	2,85 ± 8,89	0,68 ± 8,88	< LC	1,88 ± 0,64	1,85 ± 8,88

Individuo	Localización		Distancia al Centro de Distribución # Combustibles	TETRACILOFENENO		BISPROPILBENCENO	
	Latitud	Longitud		Av. Vitacura		Av. Vitacura	
				Primavera	Verano	Primavera	Verano
				Valor (ng de C)		Valor (ng de C)	
1	-33.38389°	-78.87288°	21	0,88 ± 0,04	0,78 ± 0,88	0,09 ± 0,88	1,41 ± 0,88
2	-33.38347°	-78.87288°	23	0,87 ± 0,28	0,84 ± 0,88	0,08 ± 0,82	0,38 ± 0,28
3	-33.38389°	-78.87288°	24	1,88 ± 0,18	0,86 ± 0,81	0,02 ± 0,18	1,31 ± 0,98
4	-33.38343°	-78.87287°	28	0,33 ± 0,81	0,78 ± 0,22	0,07 ± 0,11	1,83 ± 0,82
5	-33.38388°	-78.87288°	32	0,34 ± 0,04	1,88 ± 0,86	1,88 ± 0,84	1,18 ± 0,88
6	-33.38383°	-78.87287°	34	0,84 ± 0,04	0,79 ± 0,84	0,25 ± 0,33	1,18 ± 0,34
7	-33.38389°	-78.87289°	38	0,36 ± 0,87	0,82 ± 0,84	1,11 ± 0,83	1,29 ± 1,84
8	-33.38389°	-78.87289°	38	0,88 ± 8,08	0,22 ± 8,88	1,88 ± 8,88	1,38 ± 8,28
9	-33.38344°	-78.87288°	38	0,34 ± 8,04	1,88 ± 4,18	1,88 ± 0,82	1,88 ± 8,82
10	-33.38389°	-78.87289°	38	1,81 ± 8,04	8,33 ± 4,18	1,84 ± 0,82	1,23 ± 8,54
11	-33.38346°	-78.87287°	41	0,38 ± 8,07	1,88 ± 8,28	1,82 ± 8,88	1,35 ± 8,44
12	-33.38378°	-78.87288°	52	0,35 ± 8,05	8,75 ± 8,24	1,88 ± 8,88	1,38 ± 1,83
13	-33.38325°	-78.87288°	58	0,85 ± 0,87	0,86 ± 8,83	1,23 ± 0,81	< LC
14	-33.38389°	-78.87288°	105	0,87 ± 0,83	8,25 ± 8,87	1,88 ± 0,82	1,87 ± 8,32

Concentración expresada en ng de C; LC, límite de cuantificación (0,10 ng de C).

Los compuestos químicos con una mayor concentración en el material foliar de *L. tulipifera* en Av. Vicuña Mackenna son tolueno, 1,2,4-TMB y estireno, tanto en primavera como en verano. El 1,2,4-TMB presentó menor incidencia en verano (cuadro 3 y figura 10a). En los individuos de *P. x acerifolia* ubicados en Av. Vitacura, los compuestos químicos con mayores concentraciones en el material foliar son estireno, etilbenceno y tolueno, en ese orden para primavera y tolueno, etilbenceno y estireno para el verano (cuadro 4 y figura 10c).

Las figuras 8 y 9 corresponden a los correlogramas correspondientes a las especies *Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia*, para primavera y verano, a y b respectivamente.

La interrelación entre las variables muestra que existe una correlación marcadamente negativa entre algunos de los COVA encontrados en el material foliar y la distancia al centro de distribución de combustibles. Se evidencia que, a mayor distancia del individuo al centro de distribución de combustibles, la concentración de la especie química en el material foliar disminuye, como se muestra en la figura 8 a, en primavera en los individuos de *L. tulipifera*, ubicados en Av. Vicuña Mackenna. Las especies químicas m/p-xilenos, o-xileno, 1,3,5-TMB y naftaleno, presentan altas correlaciones negativas, esto es, existe una relación estadísticamente significativa entre estas especies químicas y la distancia al centro de distribución de combustibles.

La figura 8 a, muestra también que las especies químicas con una correlación negativa con la distancia al centro de distribución de combustibles presentan entre ellas correlaciones positivas, indicando con ello, que se pueden atribuir a la misma fuente de contaminación ([Ohura et al., 2006](#)).

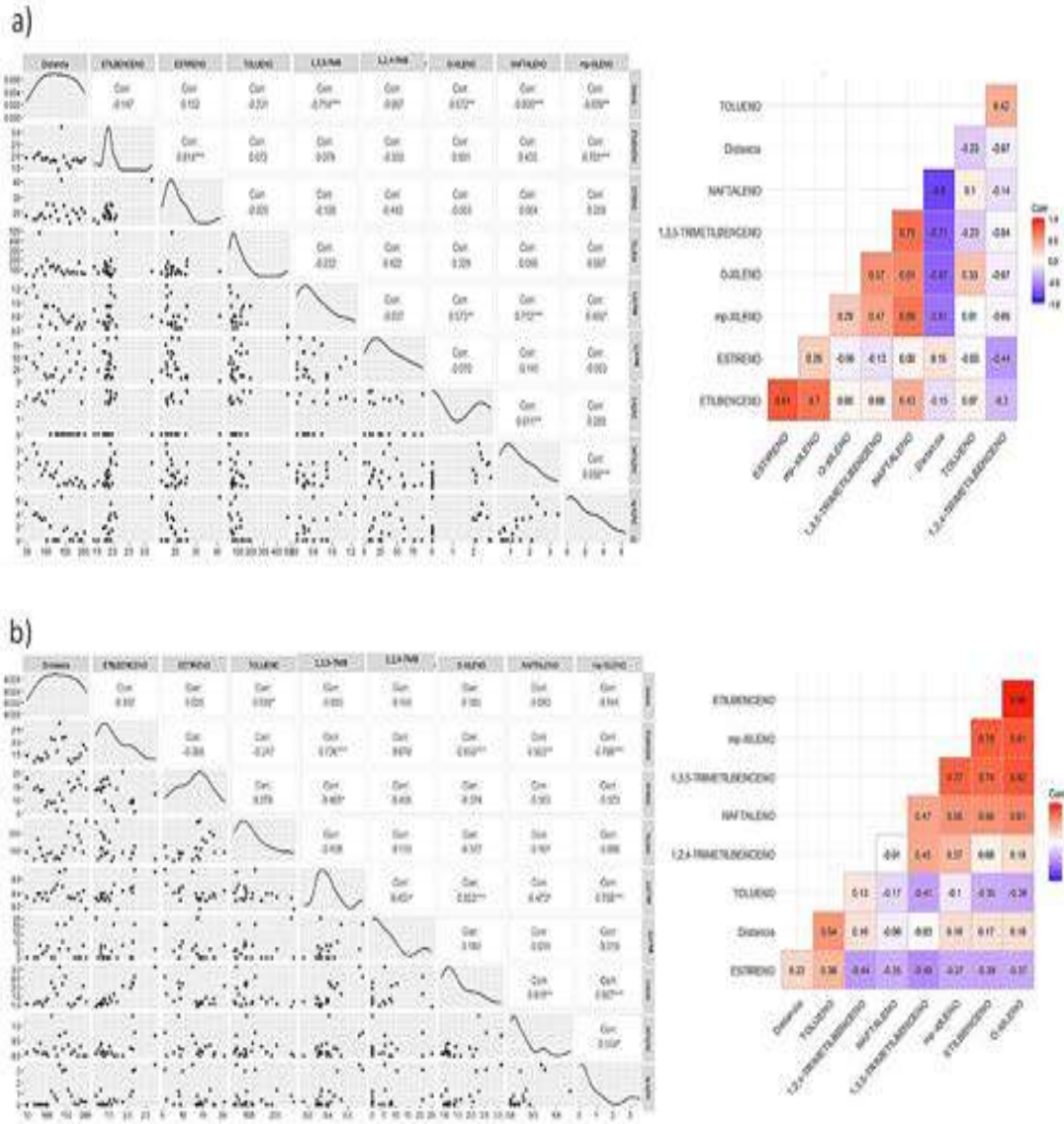


Figura 8. Correlogramas de individuos de la especie *Liriodendron tulipifera*, muestreado en avenida Vicuña Mackenna para: a) Primavera; b) Verano.

El muestreo de verano realizado a los individuos de *L. tulipifera* ubicados en Av. Vicuña Mackenna y el muestreo de primavera de los individuos de *P. x acerifolia* en Vitacura, no evidencian relaciones estadísticamente significativas en los COVA en función de la distancia al centro de distribución de combustibles. (figuras 8b y figura 9a).

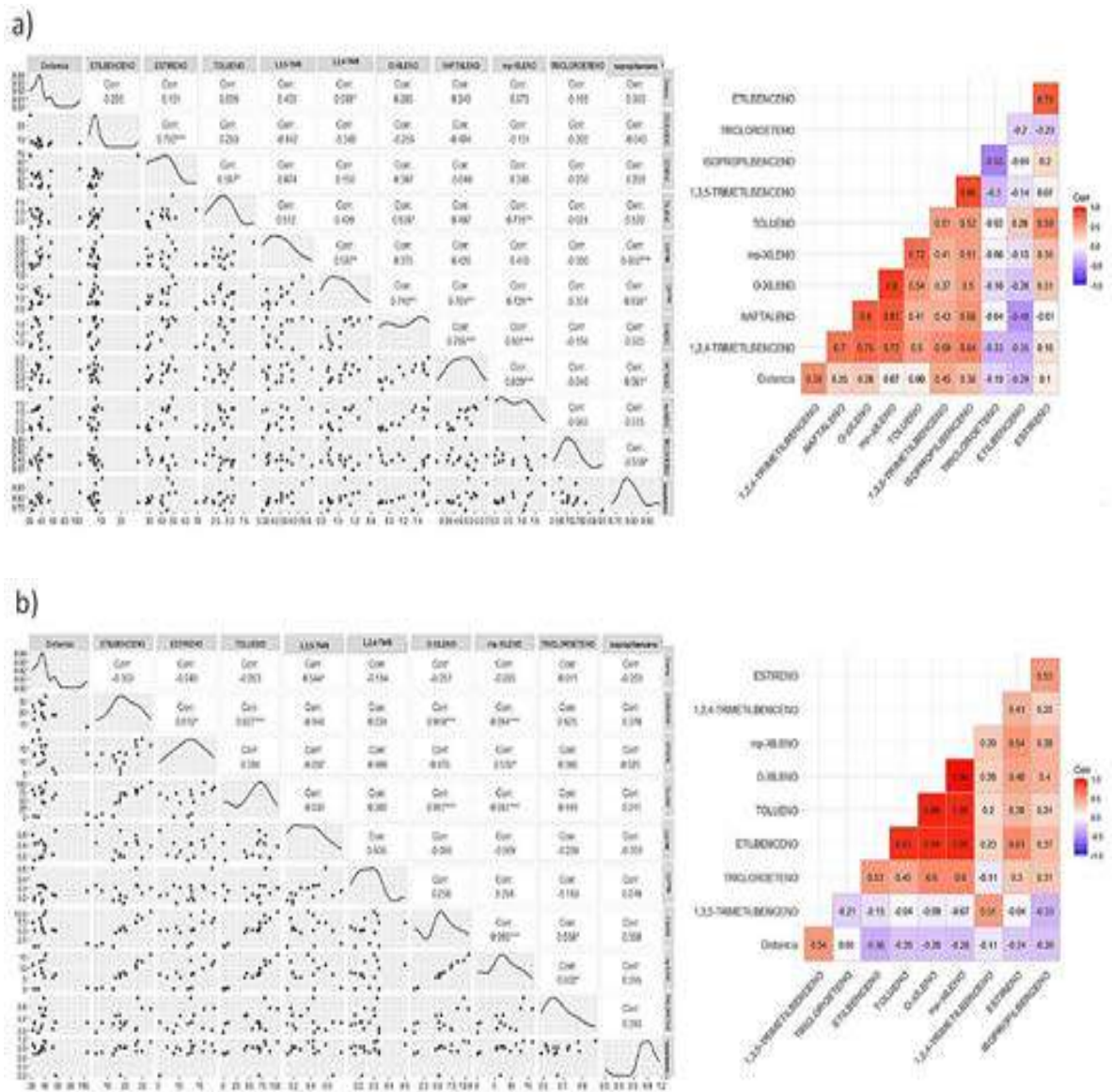


Figura 9. Correlogramas de individuos de la especie *Platanus x acerifolia*, muestreado en avenida Vitacura para: a) Primavera; b) Verano.

En verano en los individuos de la especie *P. x acerifolia* en la comuna de Vitacura (figura 9b), la mayoría de las especies químicas presentan correlaciones negativas en función con la distancia al centro de distribución de combustibles, sin embargo, éstas presentan una baja potencia estadística que indiquen relaciones significativas.

Objetivo 2: Establecer la relación entre las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos medidos en material foliar de las especies arbóreas *Platanus x acerifolia* y *Liriodendron tulipifera* y el tráfico vehicular como principal fuente de emisión.

El cuadro 4, muestra las concentraciones de COVA en el material foliar de 20 individuos de *L. tulipifera* ubicados en el Parque Bicentenario, sin tráfico interno de vehículos motorizados. Se cuantificaron los siguientes compuestos: etilbenceno, estireno, tolueno, 1,3,5-TMB, 1,2,4-TMB, o-xileno, m/p-xileno y naftaleno. Los compuestos químicos con las mayores concentraciones son tolueno y estireno en primavera. En verano, se observa también el compuesto 1,2,4-TMB (cuadro 4 y figura 10b).

Perfiles de concentración

La figura 10 muestra los perfiles de concentración retenidos por el material foliar de las distintas especies arbóreas, expresados en porcentajes relativos de los diferentes COVA. Hay diferencias al comparar los perfiles de concentración de *L. tulipifera*, ubicados en Vicuña Mackenna y en el Parque Bicentenario (figuras 10a y 10b), principalmente durante el muestreo de primavera. Es preponderante la presencia de 1,2,4-TMB en los individuos expuestos al flujo vehicular, además de los compuestos químicos que generan mayores porcentajes relativos que están presentes en ambos sitios de muestreo (tolueno y estireno). En verano los individuos en ambos sitios de muestreo generan perfiles de concentración sin mayores diferencias.

Cuadro 4. Concentraciones de especies químicas en muestras de hojas de individuos de *L. tulipifera* ubicados en el Parque Bicentenario de Vitacura.

Individuo	Localización		ETILBENCENO				ESTIRENO				TOLUENO				1,3,5-TMB			
			Parque Bicentenario		Parque Bicentenario		Parque Bicentenario		Parque Bicentenario		Parque Bicentenario		Parque Bicentenario		Parque Bicentenario			
			Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano		
Latitud	Longitud	Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)						
1	-33.546230	-70.88780°	2,51 ± 0,46	2,51 ± 0,82	21,45 ± 2,68	15,42 ± 3,21	95,64 ± 33,52	131,93 ± 57,38	1,18 ± 0,25	0,14 ± 0,02								
2	-33.546230	-70.88798°	1,61 ± 1,06	2,20 ± 0,37	16,78 ± 2,93	9,96 ± 1,49	263,81 ± 68,97	91,66 ± 47,84	1,26 ± 0,07	0,18 ± 0,04								
3	-33.546130	-70.88804°	0,39 ± 0,01	2,26 ± 0,41	29,73 ± 8,44	11,32 ± 2,52	148,16 ± 12,77	171,45 ± 39,38	1,02 ± 0,25	0,30 ± 0,03								
4	-33.546910	-70.88806°	1,26 ± 0,27	2,22 ± 0,24	18,04 ± 6,51	8,65 ± 0,76	137,49 ± 3,95	175,22 ± 23,04	0,85 ± 0,02	0,22 ± 0,18								
5	-33.546950	-70.88809°	1,35 ± 0,42	3,15 ± 0,59	19,99 ± 3,65	14,65 ± 3,11	120,05 ± 15,47	241,72 ± 44,95	0,57 ± 0,02	0,28 ± 0,11								
6	-33.546790	-70.88817°	2,49 ± 0,23	2,56 ± 0,80	21,27 ± 3,46	11,09 ± 2,16	51,08 ± 8,98	198,24 ± 49,81	1,20 ± 0,56	0,36 ± 0,06								
7	-33.546560	-70.88815°	1,49 ± 1,56	4,61 ± 0,64	26,12 ± 2,81	9,24 ± 1,67	136,92 ± 17,11	202,63 ± 16,19	0,95 ± 0,20	0,32 ± 0,08								
8	-33.546440	-70.88822°	1,87 ± 0,44	2,32 ± 0,16	25,53 ± 4,41	7,97 ± 0,46	90,80 ± 13,94	101,40 ± 12,13	0,89 ± 0,04	0,43 ± 0,12								
9	-33.546270	-70.88829°	4,46 ± 0,51	3,57 ± 0,65	28,65 ± 0,90	14,23 ± 3,04	178,47 ± 3,40	158,10 ± 50,98	1,11 ± 0,41	0,28 ± 0,16								
10	-33.546190	-70.88832°	3,13 ± 0,48	1,66 ± 0,18	22,34 ± 3,82	9,10 ± 0,94	78,98 ± 13,20	108,41 ± 3,21	1,12 ± 0,07	0,28 ± 0,02								
11	-33.546090	-70.88844°	1,94 ± 0,50	1,85 ± 0,14	22,17 ± 0,55	10,51 ± 0,56	254,89 ± 6,14	181,80 ± 17,04	0,39 ± 0,11	0,15 ± 0,04								
12	-33.546030	-70.88848°	0,42 ± 0,01	2,50 ± 0,47	20,24 ± 2,74	16,22 ± 4,10	259,20 ± 18,89	128,25 ± 41,15	1,07 ± 0,11	0,31 ± 0,12								
13	-33.546940	-70.88836°	1,54 ± 1,01	3,07 ± 0,10	18,39 ± 2,40	11,08 ± 0,28	117,85 ± 9,39	155,46 ± 2,28	1,23 ± 0,59	0,34 ± 0,04								
14	-33.546830	-70.88869°	2,53 ± 0,26	2,40 ± 0,43	20,17 ± 1,60	12,03 ± 1,97	207,68 ± 24,24	141,56 ± 34,86	1,04 ± 0,16	0,31 ± 0,03								
15	-33.544770	-70.88865°	2,68 ± 0,02	2,80 ± 0,19	22,53 ± 1,89	11,19 ± 1,25	186,54 ± 3,06	91,62 ± 10,88	0,92 ± 0,02	0,39 ± 0,08								
16	-33.544670	-70.88866°	2,10 ± 0,16	2,89 ± 0,06	23,49 ± 4,64	10,28 ± 0,18	189,20 ± 22,08	182,71 ± 2,23	0,95 ± 0,10	0,13 ± 0,04								
17	-33.544620	-70.88864°	0,40 ± 0,01	2,58 ± 0,32	19,83 ± 5,42	18,61 ± 2,46	211,25 ± 62,16	302,72 ± 40,09	0,88 ± 0,08	0,31 ± 0,15								
18	-33.544460	-70.88878°	2,46 ± 0,13	2,51 ± 0,51	20,19 ± 2,49	12,08 ± 2,21	114,30 ± 19,27	162,38 ± 42,48	0,97 ± 0,16	0,23 ± 0,08								
19	-33.544380	-70.88874°	2,11 ± 0,28	2,95 ± 0,43	18,47 ± 1,73	10,33 ± 1,65	145,80 ± 38,35	158,56 ± 30,46	0,97 ± 0,15	0,32 ± 0,07								
20	-33.544310	-70.88885°	2,32 ± 1,05	2,36 ± 0,26	21,93 ± 1,21	11,67 ± 1,52	175,65 ± 6,16	127,94 ± 21,24	0,88 ± 0,02	0,30 ± 0,02								

Individuo	Localización		1,2,4-TMB		O-XILENO		NAFTALENO		mp-XILENO	
			Parque Bicentenario		Parque Bicentenario		Parque Bicentenario		Parque Bicentenario	
			Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano	Primavera	Verano
Latitud	Longitud	Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		Valor (ng de C)		
1	-33.546230	-70.88780°	< LC	< LC	0,44 ± 0,20	1,71 ± 0,64	0,59 ± 0,11	< LC	1,38 ± 0,82	1,28 ± -5,97
2	-33.546230	-70.88798°	< LC	0,09 ± 1,02	1,27 ± 1,00	1,88 ± 0,23	0,52 ± 0,20	< LC	2,83 ± 1,64	< LC
3	-33.546130	-70.88804°	< LC	0,80 ± 1,77	1,36 ± 1,89	1,26 ± 0,39	0,73 ± 0,23	< LC	2,64 ± 1,54	0,44 ± -3,97
4	-33.546910	-70.88806°	< LC	12,07 ± 2,10	0,40 ± 0,13	1,48 ± 0,17	0,21 ± 0,12	< LC	< LC	< LC
5	-33.546950	-70.88809°	< LC	17,12 ± 4,16	0,89 ± 0,45	2,00 ± 0,59	0,31 ± 0,12	< LC	< LC	0,82 ± -1,97
6	-33.546790	-70.88817°	< LC	10,77 ± 2,41	1,98 ± 0,12	1,81 ± 0,65	0,41 ± 0,06	< LC	1,69 ± 1,47	< LC
7	-33.546560	-70.88815°	< LC	11,34 ± 2,89	1,39 ± 0,27	2,91 ± 1,73	0,87 ± 0,41	< LC	3,91 ± 1,39	1,38 ± 0,03
8	-33.546440	-70.88822°	< LC	5,80 ± 0,39	0,88 ± 0,32	0,66 ± 0,24	0,46 ± 0,18	< LC	1,39 ± 0,86	< LC
9	-33.546270	-70.88829°	< LC	0,78 ± 1,89	0,75 ± 0,26	1,29 ± 0,34	0,66 ± 0,02	< LC	3,86 ± 0,20	< LC
10	-33.546190	-70.88832°	< LC	3,67 ± 1,06	0,37 ± 0,01	0,60 ± 0,57	0,48 ± 0,26	< LC	1,85 ± 1,12	< LC
11	-33.546090	-70.88844°	< LC	5,38 ± 0,48	< LC	0,92 ± 0,18	< LC	< LC	< LC	< LC
12	-33.546030	-70.88848°	< LC	4,37 ± 0,94	0,31 ± 0,28	1,38 ± 0,87	0,22 ± 0,21	< LC	< LC	< LC
13	-33.546940	-70.88836°	< LC	4,48 ± 0,17	0,51 ± 0,08	1,53 ± 0,09	< LC	< LC	< LC	< LC
14	-33.546830	-70.88869°	< LC	3,89 ± 0,70	1,92 ± 1,11	1,52 ± 0,45	0,12 ± 0,09	< LC	1,77 ± 1,02	< LC
15	-33.544750	-70.88865°	< LC	7,47 ± 0,97	< LC	2,07 ± 1,20	0,17 ± 0,11	< LC	< LC	< LC
16	-33.544670	-70.88866°	< LC	< LC	< LC	1,24 ± 0,11	0,17 ± 0,10	< LC	< LC	< LC
17	-33.544620	-70.88864°	< LC	13,36 ± 1,83	< LC	1,92 ± 0,43	0,20 ± 0,12	< LC	< LC	< LC
18	-33.544460	-70.88878°	< LC	11,57 ± 2,26	0,58 ± 0,14	1,80 ± 0,40	< LC	< LC	2,43 ± 1,17	< LC
19	-33.544380	-70.88874°	< LC	7,91 ± 1,69	1,58 ± 0,92	1,47 ± 0,65	< LC	< LC	< LC	< LC
20	-33.544310	-70.88885°	< LC	5,12 ± 0,65	< LC	1,47 ± 0,54	0,25 ± 0,09	< LC	< LC	< LC

Concentración expresada en ng de C; LC, límite de cuantificación (0,10 ng e C.).



Figura 10. Perfiles de concentración de COVA, en porcentajes relativos, para cada sitio de muestreo en primavera y verano: (a) Avenida Vicuña Mackenna (*L. tulipifera*); (b) Parque Bicentenario (*L. tulipifera*); (c) Avenida Vitacura (*P. x acerifolia*).

Variabilidad en las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos con la fuente de contaminación y la estacionalidad.

Se cuantificaron los siguientes compuestos orgánicos volátiles: tolueno, 1,2,4-trimetilbenceno (1,2,4-TMB), estireno, etilbenceno, orto, meta y para-xilenos, naftaleno, 1,3,5-trimetilbenceno (1,3,5-TMB), isopropilbenceno y tricloroetano. Benceno y otros COVA de interés toxicológico fueron detectados, pero no se pudieron cuantificar, por encontrarse por debajo del límite de cuantificación de la técnica.

Hubo diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones totales de COVA (sumatoria de los compuestos individuales) en hojas de individuos de *L. tulipifera* expuestos a altas concentraciones de contaminantes (Avda. Vicuña Mackenna) y bajas concentraciones de contaminantes (Parque Bicentenario) debido al tráfico vehicular. Los valores medios de las concentraciones totales de COVA en primavera fueron $246,2 \pm 89,2$ ng de C y $180,9 \pm 58,9$ ng de C, respectivamente [$T_{\text{obs}} = 2,73$; valor $p = 0,01$ ($T_{\text{obs}} > T_{\text{cri}}$; Valor $P < 0,05$)]. En verano, las concentraciones fueron $248,5 \pm 127,0$ ng de C y $167,8 \pm 52,0$ ng de C, respectivamente [$T_{\text{obs}} = 2,63$; valor $p = 0,01$ ($T_{\text{obs}} > T_{\text{cri}}$; Valor $P < 0,05$)].

Las concentraciones totales de COVA en hojas de individuos *P. x acerifolia* (Avda. Vitacura) expuestos a altas concentraciones de contaminantes generados por el tráfico vehicular presentaron concentraciones medias de $91,1 \pm 21,4$ ng de C en primavera y $176,5 \pm 87,7$ ng de C en verano. La figura 11 muestra dichas diferencias. Se compararon las concentraciones de COVA en los grupos de individuos de *L. tulipifera* (Avda Vicuña Mackenna) y *P. x acerifolia* (Avda. Vitacura), expuestos a alto tráfico vehicular. Los resultados muestran que, en primavera, existe una diferencia estadísticamente significativa entre especies vegetales para los COVA totales [$T_{\text{obs}} = 7,48$; valor $p = 1,7\text{E-}07$ ($T_{\text{obs}} > T_{\text{cri}}$; Valor $P < 0,05$)]. En verano no se encontraron diferencias

estadísticamente significativas entre las concentraciones de los grupos de individuos de *L. tulipifera* y *P. x acerifolia* [$T_{obs} = 1,95$; valor $p = 0,06$ ($T_{obs} < T_{cri}$; Valor $P > 0,05$)].

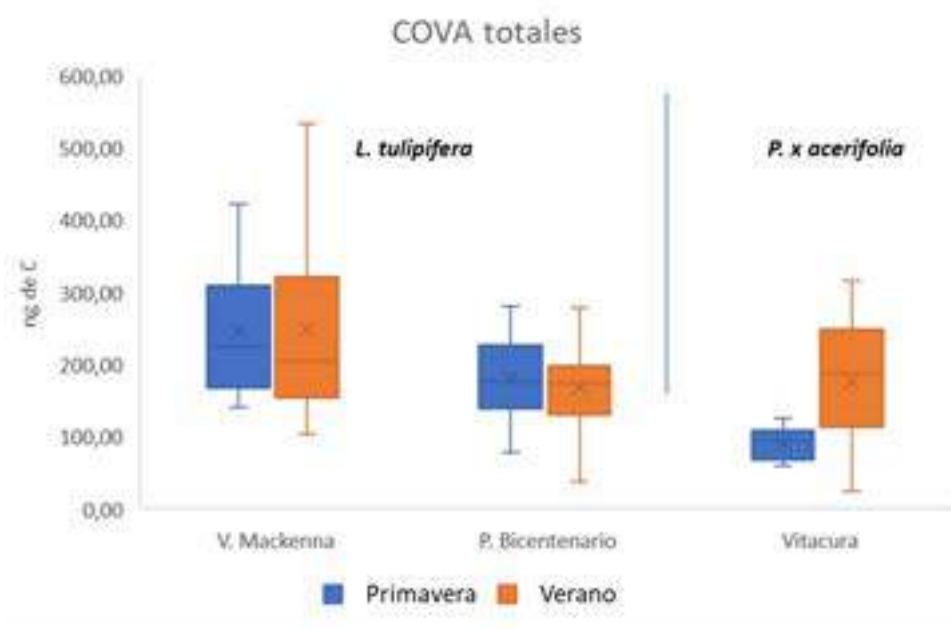


Figura 11. Concentraciones totales de COVA en el contenido foliar de *Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia* en los sitios de muestreo de av. Vicuña Mackenna, Parque Bicentenario de Vitacura y Av. Vitacura, para los periodos de primavera y verano, realizados en primavera y verano. Las concentraciones se expresan como ng de C. X = media aritmética; línea horizontal = mediana.

La figura 12 muestra las concentraciones de COVA individuales, encontrados en el material foliar en los tres sitios de muestreo (Avda. Vicuña Mackenna, Parque Bicentenario y Avda. Vitacura); se evidencia la presencia generalizada de tolueno en altas concentraciones, con la excepción de Avda. Vitacura en primavera. En verano la presencia de etilbenceno, xilenos y tolueno es preponderante en los individuos de *P. x acerifolia*, relacionándose con la emisión de contaminantes provenientes del centro de distribución de combustibles.

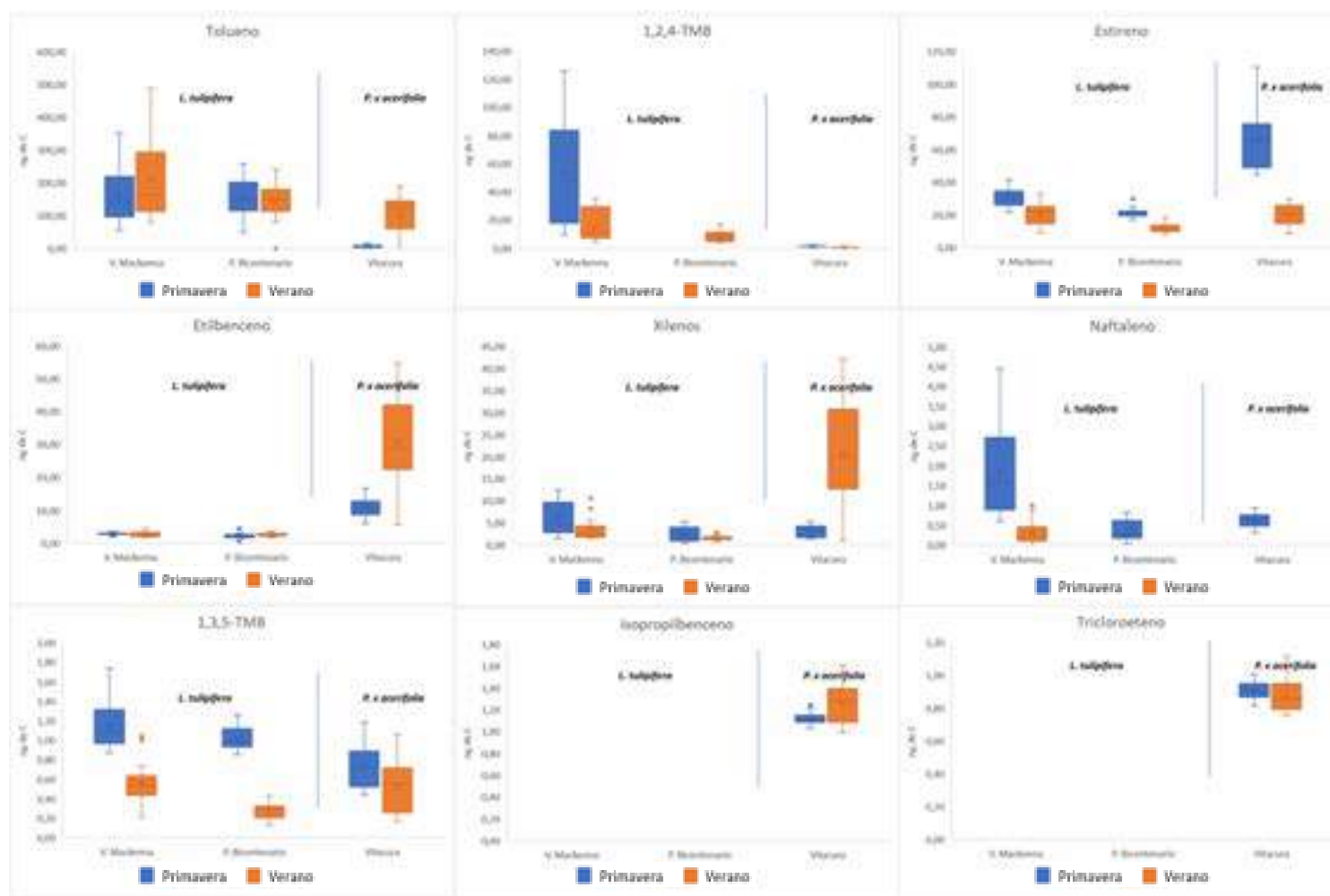


Figura 12. Concentraciones de COVA individuales en el contenido foliar de *Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia* en los sitios de muestreo de Avda. Vicuña Mackenna, Parque Bicentenario de Vitacura y Avda. Vitacura, en primavera y verano. Las concentraciones se expresan como ng de C. X = media aritmética; línea horizontal = mediana.

Estimación de los potenciales de formación de ozono

El cuadro 5, muestra los valores estimados para equivalentes de propileno y potenciales de formación de ozono para los valores de concentración de COVA retenidos en el material foliar de las especies en primavera y verano. Los individuos de *L. tulipifera* más cercanos a la fuente de emisión (Avda. Vicuña Mackenna), muestran siempre los valores más altos de COVA individuales y totales.

Cuadro 5. Concentraciones de Prop-equiv(i) (ppbC) y PFO(i) (ppbC) de COVA para los sitios de muestreo de Av. Vicuña Mackenna, Parque Bicentenario y Av. Vitacura, para los periodos de primavera y verano.

	Prop-equiv (i), ppbC			OFP (i), ppbC		
	<i>L. tulipifera</i>		<i>P. x acerifolia</i>	<i>L. tulipifera</i>		<i>P. x acerifolia</i>
	Av. VMackenna	P. Bicentenario	Av. Vitacura	Av. VMackenna	P. Bicentenario	Av. Vitacura
Primavera						
Etilbenceno	0,9	0,7	3,4	10,2	7,6	38,3
Tolueno	35,1	34,1	1,5	656,9	638,0	28,2
Xilenos	4,6	1,9	2,3	54,9	22,6	27,6
1,2,4-TMB	86,5	0,0	2,3	621,0	0,0	16,7
1,3,5-TMB	3,2	2,9	2,0	17,6	15,7	11,2
Estireno	79,7	53,3	170,1	62,6	41,9	133,7
Naftaleno	2,3	0,5	0,8	8,9	1,8	3,0
Tricloroeteno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
Isopropilbenceno	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	3,7
COVA totales	212,3	93,3	182,8	1432,2	727,5	262,6
Verano						
Etilbenceno	0,8	0,8	9,5	9,1	8,8	108,9
Tolueno	46,4	33,1	22,3	867,2	620,0	417,1
Xilenos	2,7	1,2	15,5	32,5	14,0	185,4
1,2,4-TMB	24,6	13,4	0,6	176,5	96,4	4,1
1,3,5-TMB	1,6	0,8	1,5	8,6	4,3	8,1
Estireno	52,8	30,2	51,3	41,5	23,7	40,3
Naftaleno	0,4	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0
Tricloroeteno	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
Isopropilbenceno	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	4,1
COVA totales	129,3	79,5	101,1	1137,0	767,2	768,3

La ecuación 3 relaciona el índice de control de reactividad (ICR) con Prop- Equiv y PFO permitiendo establecer las especies químicas con mayor reactividad, visualizado claramente en la figura 13; se destacan tolueno, estireno y 1,2,4-TMB en primavera y, tolueno y estireno en verano.

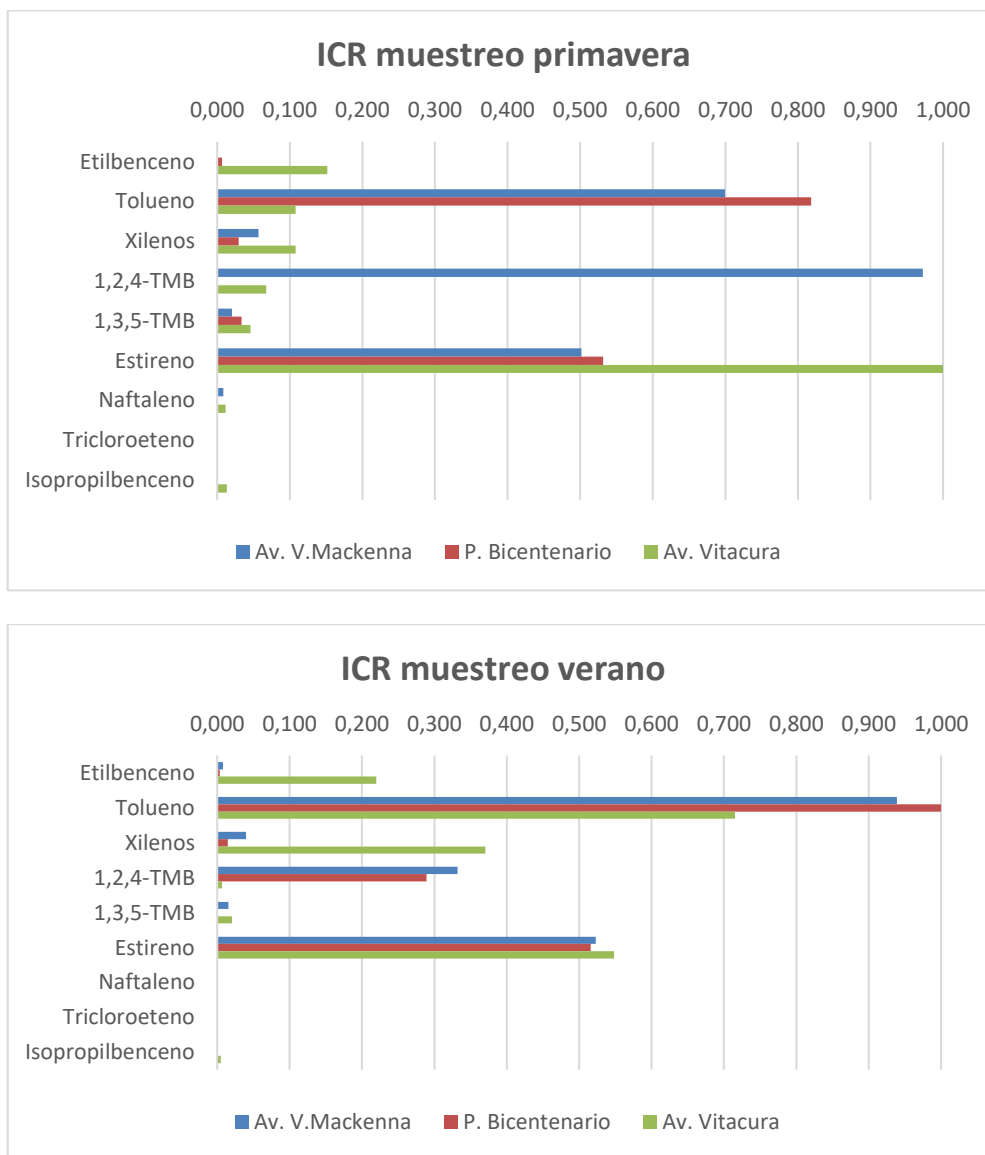


Figura 13. Índices de control de la reactividad (ICR) de los COVA retenidos en el material foliar en av. Vicuña Mackenna, Parque Bicentenario y av. Vitacura, en primavera y verano.

Objetivo 3: Evaluar la capacidad del material foliar de dos especies arbóreas, *Robinia pseudoacacia* y *Quillaja saponaria*, para capturar compuestos orgánicos volátiles antropogénicos y establecer si existen diferencias estadísticamente significativas.

Se analizaron las eventuales diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de los COVA en las muestras foliares de los diez individuos de la especie *Robinia pseudoacacia* y los diez individuos de la especie *Quillaja saponaria* estudiados, colectadas en las cercanías de cada estación de monitoreo ambiental del SINCA. Los resultados se muestran en el cuadro 6. Se cuantificaron los siguientes compuestos: etilbenceno, estireno, tolueno, 1,3,5-trimetilbenceno (1,3,5-TMB), 1,3-diclorobenceno, 4-isopropiltolueno, o-xileno, m/p-xileno y n-propilbenceno. Estireno, tolueno y en una menor medida los xilenos, presentan las mayores concentraciones en ambas especies. Para comparar los resultados entre las distintas especies arbóreas, se establecieron estrategias comparativas similares a las descritas anteriormente.

Perfiles de concentración

La figura 14 muestra el perfil de concentraciones del contenido en las hojas de los diferentes COVA, en porcentajes relativos, para *R. pseudoacacia* y *Q. saponaria*.

Los perfiles de concentraciones entre las especies arbóreas mostraron que el estireno es el compuesto químico retenido de manera mayoritaria. La mayor diferencia observada corresponde a tolueno, que en *Q. saponaria* presenta una mayor concentración relativa. Por su parte, en las muestras de *R. pseudoacacia* se observa la presencia de etilbenceno, mientras que en *Q. saponaria* está presente solamente en cuatro de los sitios de muestreo.

Cuadro 6. Concentraciones de compuestos orgánicos volátiles en muestras de hojas de *R. pseudoacacia* y *Q. saponaria* recolectados en las cercanías de cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Punto de Muestreo	Localización		ETILBENCENO		ESTIRENO		TOLUENO	
	Latitud	Longitud	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>
			Valor (ng de c)		Valor (ng de c)		Valor (ng de c)	
Antumapu	-33,570876°	-70,633697°	< LC	< LC	58,19 ± 1,43	45,08 ± 1,75	34,11 ± 1,38	1,93 ± 0,37
Cerrillos	-33,492879°	-70,719397°	< LC	4,08 ± 0,11	50,30 ± 8,46	67,57 ± 1,95	21,97 ± 4,57	3,33 ± 0,02
Cerro Navia	-33,433088°	-70,732088°	2,00 ± 0,03	3,55 ± 0,19	60,68 ± 0,74	57,54 ± 2,54	38,12 ± 0,40	3,36 ± 0,12
El Bosque	-33,546913°	-70,666728°	1,56 ± 0,03	2,70 ± 0,23	52,81 ± 1,03	37,37 ± 2,34	24,28 ± 1,02	1,99 ± 0,26
Independencia	-33,422224°	-70,651165°	< LC	4,25 ± 0,13	39,51 ± 1,75	70,35 ± 1,78	18,64 ± 1,13	3,59 ± 0,25
La Florida	-33,516623°	-70,588089°	< LC	0,50 ± 0,05	77,18 ± 8,21	25,54 ± 0,35	43,00 ± 8,10	1,04 ± 0,07
Las Condes	-33,376763°	-70,523260°	< LC	0,90 ± 0,05	60,70 ± 8,38	31,04 ± 0,93	29,52 ± 6,01	1,11 ± 0,04
Parque O'Higgins	-33,463379°	-70,658585°	1,26 ± 0,06	3,61 ± 0,60	49,06 ± 3,21	64,11 ± 5,53	21,01 ± 2,28	2,94 ± 0,74
Puente Alto	-33,591361°	-70,594768°	1,95 ± 0,03	5,91 ± 0,15	52,14 ± 1,64	101,04 ± 2,30	38,47 ± 1,30	5,17 ± 0,21
Quilicura	-33,349660°	-70,723693°	< LC	2,71 ± 0,15	72,91 ± 2,20	45,41 ± 2,12	34,20 ± 1,15	2,17 ± 0,39

Punto de Muestreo	Localización		1,3,5-TMB		1,3-DICLOROBENCENO		4-ISOPROPILTOLUENO	
	Latitud	Longitud	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>
			Valor (ng de c)		Valor (ng de c)		Valor (ng de c)	
Antumapu	-33,570876°	-70,633697°	<LC	0,18 ± 0,062	<LC	0,32 ± 0,03	<LC	0,52 ± 0,02
Cerrillos	-33,492879°	-70,719397°	0,21 ± 0,05	0,27 ± 0,025	<LC	0,31 ± 0,05	<LC	0,66 ± 0,02
Cerro Navia	-33,433088°	-70,732088°	0,41 ± 0,05	0,20 ± 0,043	<LC	0,36 ± 0,03	<LC	0,61 ± 0,03
El Bosque	-33,546913°	-70,666728°	0,23 ± 0,03	0,20 ± 0,043	<LC	0,33 ± 0,06	<LC	0,64 ± 0,03
Independencia	-33,422224°	-70,651165°	0,17 ± 0,06	0,33 ± 0,034	<LC	0,40 ± 0,04	0,32 ± 0,05	0,73 ± 0,01
La Florida	-33,516623°	-70,588089°	<LC	<LC	<LC	0,13 ± 0,01	<LC	0,24 ± 0,01
Las Condes	-33,376763°	-70,523260°	0,19 ± 0,06	<LC	<LC	0,22 ± 0,04	<LC	0,30 ± 0,03
Parque O'Higgins	-33,463379°	-70,658585°	<LC	0,29 ± 0,049	<LC	0,46 ± 0,01	<LC	0,70 ± 0,04
Puente Alto	-33,591361°	-70,594768°	<LC	0,36 ± 0,020	<LC	0,51 ± 0,01	<LC	0,57 ± 0,04
Quilicura	-33,349660°	-70,723693°	<LC	0,14 ± 0,016	<LC	0,20 ± 0,09	<LC	0,70 ± 0,03

Punto de Muestreo	Localización		o-XILENO		mp-XILENO		n-PROPILBENCENO	
	Latitud	Longitud	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>
			Valor (ng de c)		Valor (ng de c)		Valor (ng de c)	
Antumapu	-33,570876°	-70,633697°	<LC	0,99 ± 0,09	4,29 ± 0,24	4,03 ± 0,27	<LC	0,46 ± 0,01
Cerrillos	-33,492879°	-70,719397°	2,19 ± 0,15	2,49 ± 0,15	4,27 ± 1,63	7,14 ± 0,20	0,28 ± 0,05	0,62 ± 0,01
Cerro Navia	-33,433088°	-70,732088°	<LC	2,01 ± 0,18	5,50 ± 0,16	6,09 ± 0,28	<LC	0,61 ± 0,02
El Bosque	-33,546913°	-70,666728°	1,13 ± 0,13	1,48 ± 0,08	4,17 ± 0,17	5,27 ± 0,48	<LC	0,37 ± 0,13
Independencia	-33,422224°	-70,651165°	0,93 ± 0,09	2,89 ± 0,10	3,48 ± 0,27	7,83 ± 0,15	<LC	0,70 ± 0,01
La Florida	-33,516623°	-70,588089°	2,03 ± 0,48	<LC	7,19 ± 1,64	1,38 ± 0,05	0,50 ± 0,10	0,13 ± 0,05
Las Condes	-33,376763°	-70,523260°	1,82 ± 0,48	0,20 ± 0,03	6,16 ± 1,60	2,21 ± 0,10	0,31 ± 0,05	0,29 ± 0,01
Parque O'Higgins	-33,463379°	-70,658585°	1,00 ± 0,10	2,88 ± 0,12	4,66 ± 0,71	7,31 ± 0,87	0,43 ± 0,02	0,70 ± 0,03
Puente Alto	-33,591361°	-70,594768°	1,64 ± 0,07	3,62 ± 0,05	5,94 ± 0,16	10,44 ± 0,26	0,37 ± 0,01	0,73 ± 0,01
Quilicura	-33,349660°	-70,723693°	1,60 ± 0,10	1,50 ± 0,13	6,61 ± 0,38	4,37 ± 0,36	<LC	0,39 ± 0,14

Valores expresados en ng de C; LC, límite de cuantificación (0,10 ng de C.)

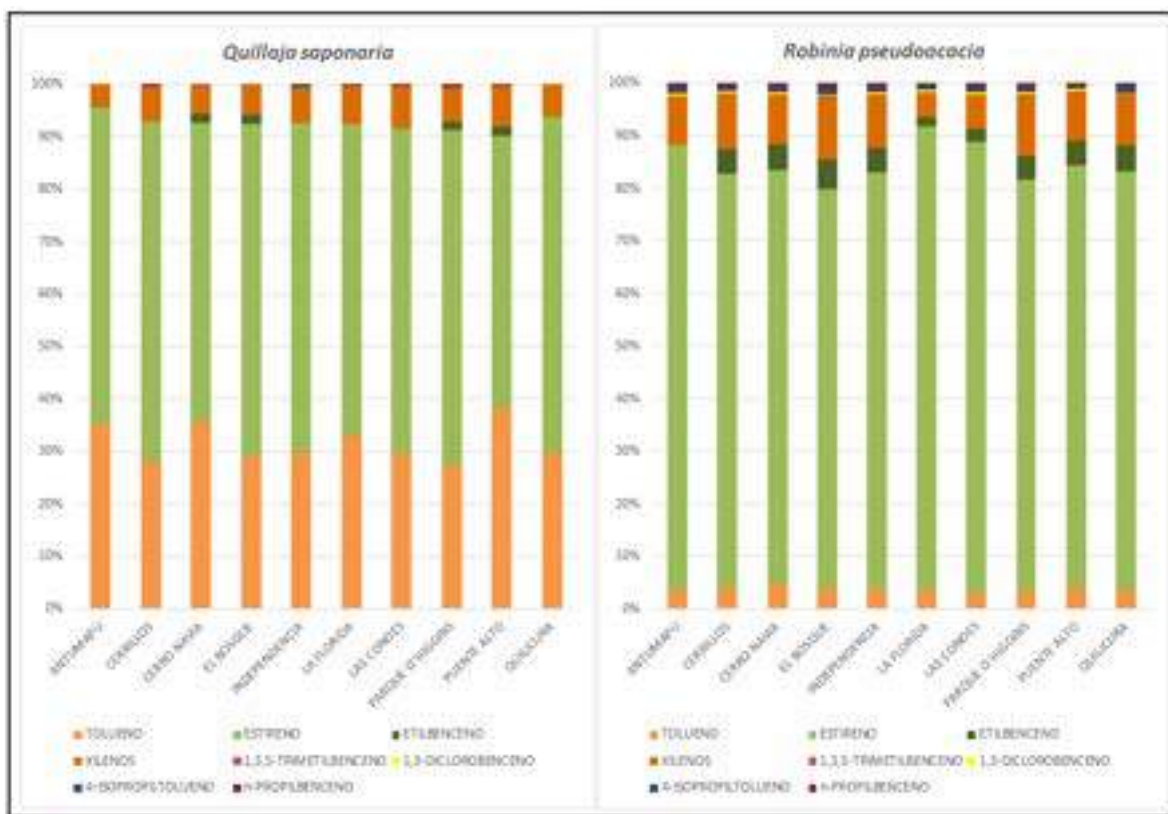


Figura 14. Perfiles de concentración de COVA en *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia*, evaluados en porcentajes relativos, para cada sitio de muestreo próximo a cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

Variabilidad en la concentración de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos en Quillaja saponaria y Robinia pseudoacacia.

Se cuantificaron los siguientes compuestos orgánicos volátiles: etilbenceno, estireno, tolueno, 1,3,5-trimetilbenceno (1,3,5-TMB), orto, meta y para-xilenos, 1,3-diclorobenceno, 4-isopropiltolueno y n-propilbenceno (cuadro 6). Se detectaron benceno y otros COVA de interés toxicológico pero sus concentraciones estuvieron por debajo del límite de cuantificación de la técnica.

Se pudo establecer diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones totales del contenido de COVA en hojas de individuos de *Q. saponaria* y *R.*

pseudoacacia, los valores medios de las concentraciones totales de COVA en *Q. saponaria* fueron $95,2 \pm 19,7$ ng de C y en *R. pseudoacacia* fueron $69,0 \pm 29,7$ ng de C (figura 15), [$T_{\text{obs}} = 2,32$; valor $p = 0,032$ ($T_{\text{obs}} > T_{\text{cri}}$; Valor $P < 0,05$)].

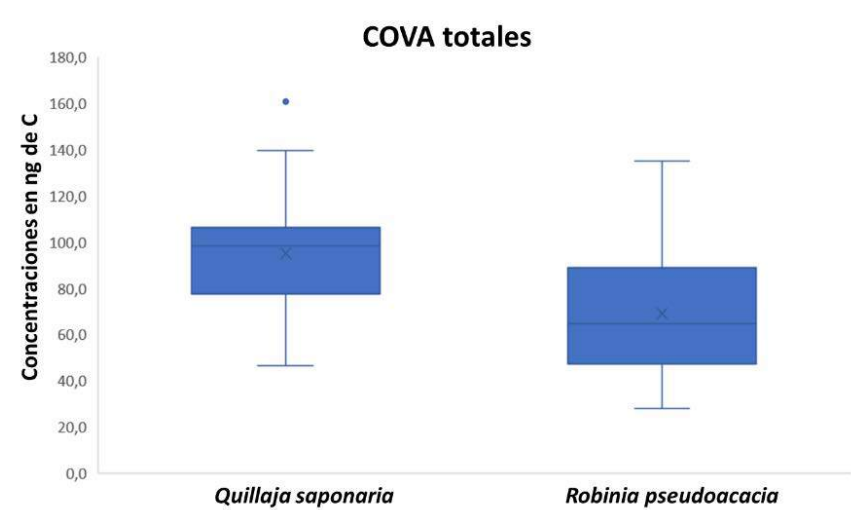


Figura 15. Concentraciones totales de COVA en el contenido foliar de *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia* ubicadas en las cercanías de cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA). Las concentraciones se expresan como ng de C. X = media aritmética; línea horizontal = mediana.

La figura 16 muestra el contenido de COVA individuales en material foliar de *Q. saponaria* y *R. pseudoacacia* en todos los sitios de muestreo; se han ordenado en función de sus concentraciones. Las mayores concentraciones corresponden a estireno y tolueno, compuestos químicos en los que se observa la mayor diferencia en las capacidades de adsorción para ambas especies arbóreas. El valor promedio de tolueno es de $30,3 \pm 10,2$ ng de C para *Q. saponaria* y de $2,6 \pm 1,3$ ng de C para *R. pseudoacacia*. En cambio, no hay diferencias significativas en las concentraciones cuantificadas para estireno en ambas especies arbóreas. Para los niveles medios de concentración (xilenos y etilbenceno) y los niveles bajos de concentración (1,3,5-TMB, 1,3-diclorobenceno, 4-isopropiltolueno y n-propilbenceno), no se observan diferencias en las concentraciones cuantificadas en ambas especies arbóreas.

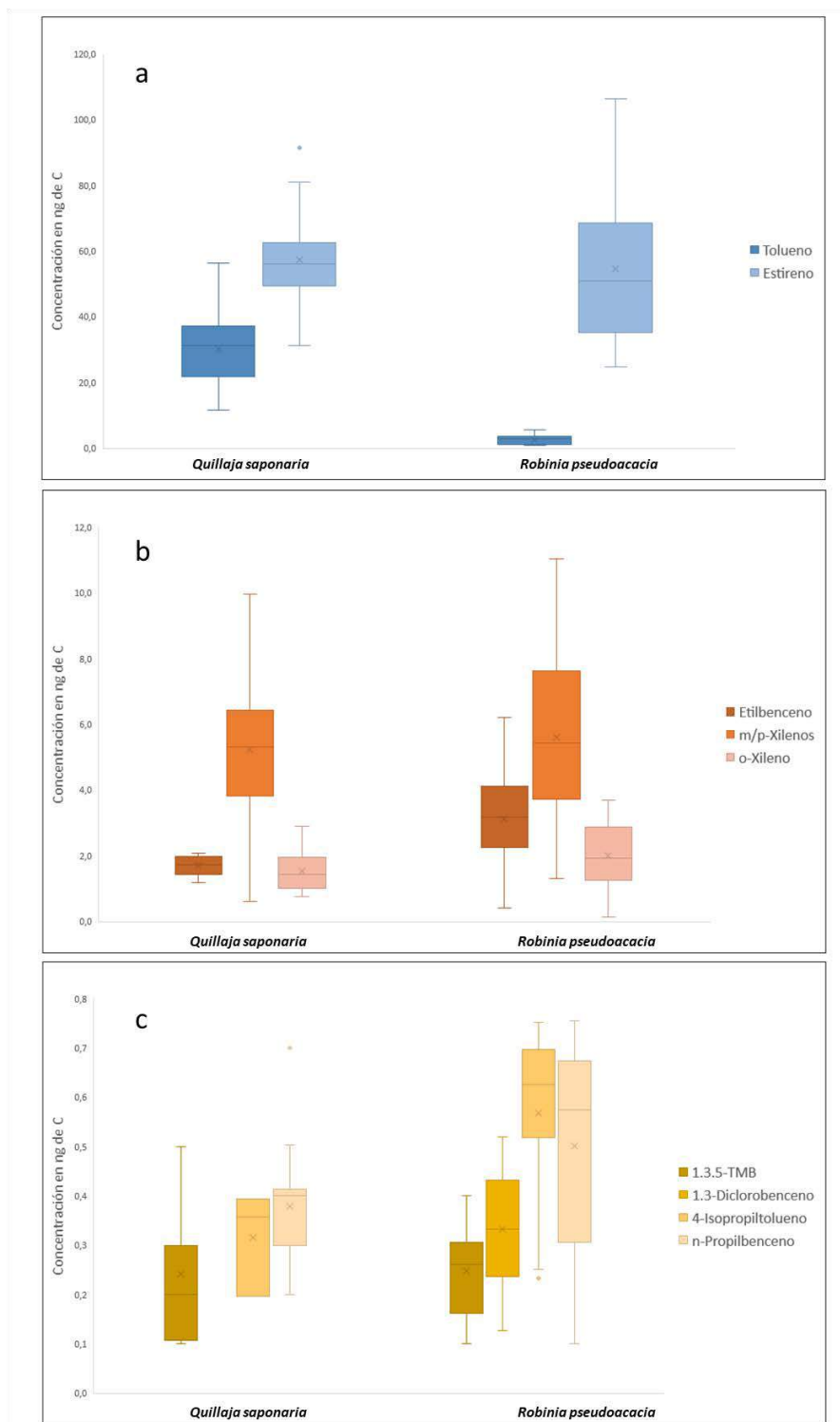


Figura 16. Concentraciones de COVA individuales en el contenido foliar de *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia* en los sitios próximos a cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), agrupados en niveles de concentración (a, b y c). X = media aritmética; línea horizontal = mediana.

Estimación de los potenciales de formación de ozono

El cuadro 7, presenta los valores estimados para equivalentes de propileno y potenciales de formación de O₃, para los valores de concentración promedio de COVA en el material foliar de *Q. saponaria* y *R. pseudoacacia*. Para los COVA totales, ambos indicadores son mayores para *Q. saponaria* que para *R. pseudoacacia*.

Cuadro 7. Concentraciones de Prop-equiv(i) (ppbC) y PFO(i) (ppbC) de COVA calculados para las especies *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia*, correspondientes a los sitios de muestreo próximos a cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

	Prop-equiv (i), ppbC		PFO (i), ppbC	
	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Quillaja saponaria</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>
Etilbenceno	0,5	0,9	5,2	9,7
Tolueno	6,6	0,6	123,7	10,9
Xilenos	4,6	5,1	51,1	58,5
Estireno	128,8	122,4	101,2	96,2
1,3,5-TMB	0,5	0,5	2,8	2,7
n-propilbenceno	0,1	0,1	0,8	1,0
1,3-diclorobenceno	0,0	0,0	0,0	0,1
4-isopropiltolueno	0,0	0,0	1,4	2,6
COVA totales	141,1	129,6	286,3	181,6

La figura 17 muestra los índices de control de reactividad de cada compuesto químico, para cada especie arbórea estudiada. Estireno genera mayor incidencia en ambas especies, situación que varía al establecer el segundo compuesto preponderante, esto es tolueno para *Q. saponaria* y los xilenos para *R. pseudoacacia*.

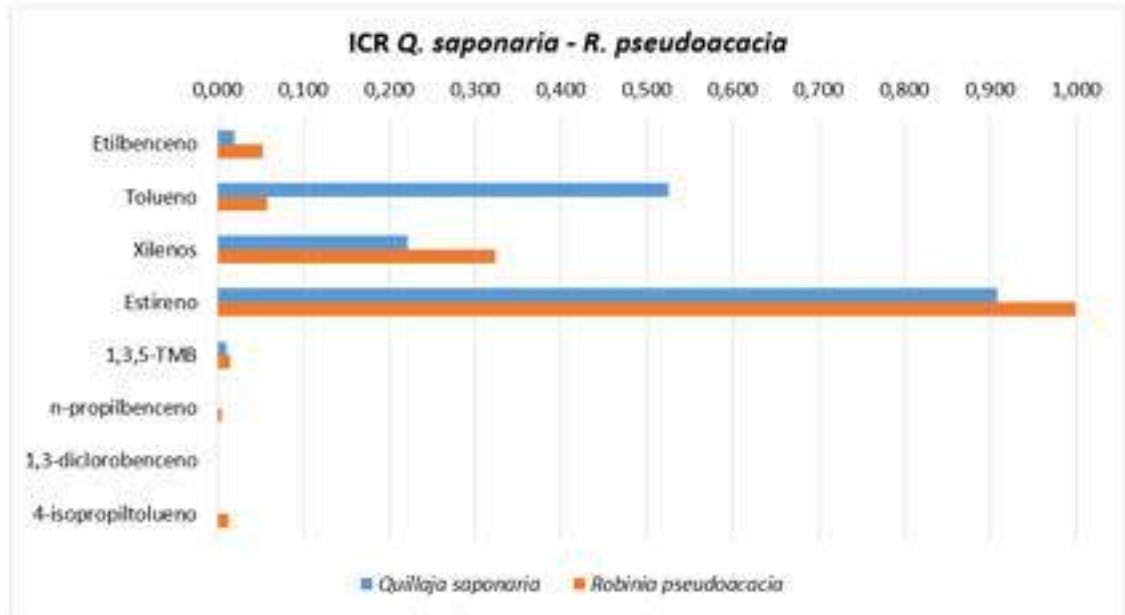


Figura 17. Índices de control de la reactividad (ICR) de los COVA en el material foliar de *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia* en los sitios de muestreo próximos a cada estación de monitoreo ambiental del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

DISCUSIÓN

En esta sección, se interpretan y analizan los resultados de las cuatro especies arbóreas estudiadas. Se contextualizan los hallazgos en relación a la literatura existente y se exploran las implicaciones de estos resultados para la calidad del aire urbano y la gestión ambiental. Se discuten las limitaciones del estudio y se sugieren áreas para futuras investigaciones, con el fin de profundizar en la comprensión del papel de las especies arbóreas en la captura de contaminantes atmosféricos y su potencial uso en estrategias de forestación urbana sostenible.

***Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia*.**

La mayor concentración de compuestos químicos observada como tolueno, 1,2,4-TMB y estireno en *L. tulipifera* en Av. Vicuña Mackenna, y de estireno, etilbenceno y tolueno en *P. x acerifolia* en Av. Vitacura, junto con la correlación negativa entre algunos COV y la distancia al centro de distribución de combustibles, sugiere que la proximidad a fuentes de emisión vehicular y de combustibles influye significativamente en la adsorción de contaminantes por estas especies arbóreas, aunque la relación no siempre es estadísticamente significativa en primavera y verano.

Es complejo establecer una relación biunívoca entre los compuestos químicos presentes en el material foliar y la cercanía a un centro de distribución de combustibles, dado que las especies arbóreas urbanas estudiadas están expuestas a otras fuentes que podrían también proporcionar COV al entorno y éstos ser capturados por las hojas de los árboles. Por ejemplo, es común y esperable que, en las cercanías de un centro de distribución de combustibles, exista una alta circulación vehicular. Por lo tanto, las especies arbóreas presentes estarán expuestas a contaminantes provenientes, tanto del centro de distribución de combustibles, como a los vehículos motorizados y a la emisión de

contaminantes desde el asfalto ([Khare et al.,2020](#)), entre otras fuentes posibles. Por ello, la identificación de las relaciones entre las especies químicas encontradas en el material foliar y la distancia al centro de distribución de combustibles se puede ver un tanto enmascarada por la presencia de COVA de otra proveniencia.

Perfiles de concentración

Los perfiles de concentración de COVA en *L. tulipifera* difieren entre Vicuña Mackenna y el Parque Bicentenario en primavera, con una alta presencia de 1,2,4-TMB en áreas de tráfico vehicular, mientras que, en verano los perfiles de ambos sitios son similares, indicando que las diferencias observadas en primavera podrían estar influenciadas por factores estacionales. La presencia del compuesto 1,2,4-TMB en ambos sitios, con una menor proporción comparada con el muestreo de primavera en Vicuña Mackenna y su ausencia en los individuos ubicados en el Parque Bicentenario en primavera, podrían sugerir que durante el verano, con una mayor temperatura ambiental se produce una desorción térmica de los compuestos capturados por el material foliar, que se transportarían re-depositándose en lugares más alejados, como es el caso de los individuos ubicados en el Parque Bicentenario. Es una hipótesis basada en la idea observada en escalas geográficas distintas con el efecto “saltamontes” o movimiento global de los contaminantes orgánicos persistentes, los que se transportan desde zonas templadas hacia los polos ([Convención de Estocolmo](#)).

Además, la presencia de COVA en *L. tulipifera*, evidencian la capacidad de ser sumidero estacional de contaminantes generados en ambientes urbanos y transportados en la atmósfera, hacia su destino final.

Los perfiles de concentraciones de individuos de *P. x acerifolia* correspondientes a primavera y verano, en avenida Vitacura, (figura 10c), presentaron notorias diferencias entre ambos períodos. Estireno, y en menor medida etilbenceno, muestran mayores

porcentajes relativos en primavera. En verano, la concentración de estireno fue menor, pero aumentaron las de tolueno, xilenos y etilbenceno, compuestos que coincidentemente muestran altas correlaciones entre sí en el análisis de correlograma descrito en la figura 9b. Esto podría sugerir que la emisión de COVA por el centro de distribución de combustibles sea mayor durante el periodo estival, producto de una mayor movilidad de los compuestos a mayores temperaturas y a un mayor volumen de aire debido a la elevación/desaparición de la capa límite atmosférica.

Al comparar los perfiles de concentraciones de *L. tulipifera* (Avda. Vicuña Mackenna) y *P. x acerifolia* (Avda. Vitacura), expuestas a similares fuentes de emisión, se observó que los compuestos químicos con mayores concentraciones relativas difieren en cada especie arbórea (figura 10a y 10c). *L. tulipifera* capturó mayoritariamente tolueno, 1,2,4-TMB y estireno, en cambio *P. x acerifolia* capturó mayoritariamente estireno, etilbenceno y tolueno, en primavera. También se observan diferencias en verano. Las diferencias en los perfiles de concentración de cada especie arbórea sugieren que el material foliar presenta especificidad en la capacidad de retener ciertos compuestos químicos.

Variabilidad en las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos con la fuente de contaminación y la estacionalidad.

La cuantificación de diversos compuestos orgánicos volátiles (COVA) en *Liriodendron tulipifera* y *Platanus x acerifolia* reveló importantes diferencias debidas a la exposición a contaminantes del tráfico vehicular. *L. tulipifera* mostró concentraciones significativamente mayores de COVA en Av. Vicuña Mackenna en comparación con el Parque Bicentenario, con valores medios más altos en primavera y verano, lo que indica una mayor captación de contaminantes en zonas de alto tráfico. Por otro lado, *P. x acerifolia* en Av. Vitacura presentó concentraciones medias de COVA notablemente altas en verano, atribuidas a la emisión de contaminantes de un centro de distribución de

combustibles cercano. La comparación entre *L. tulipifera* y *P. x acerifolia* en zonas de alto tráfico mostró diferencias significativas en primavera, pero no en verano. La presencia predominante de tolueno y otros COVA en todos los sitios de muestreo subraya la relación directa entre la exposición a fuentes de contaminación vehicular y la acumulación de estos compuestos en el material foliar.

Estimación de los potenciales de formación de ozono

Los individuos de *Liriodendron tulipifera* ubicados cerca de la fuente de emisión en Avda. Vicuña Mackenna presentan los valores más altos de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos individuales y totales en términos de equivalentes de propileno y potenciales de formación de ozono, tanto en primavera como en verano. Se confirmó así que la selección y ubicación de las especies arbóreas juegan un rol fundamental a la hora de planificar la arquitectura del paisaje, si en ello se considera la calidad del aire. La reactividad química de los compuestos orgánicos volátiles es específica de cada especie química y no está necesariamente relacionada con sus concentraciones. Esta reactividad varía ampliamente, actuando como una característica distintiva clave de cada compuesto. Las diferencias en los valores de equivalentes de propileno (Prop-Equiv) y el potencial de formación de ozono (PFO) para cada especie química fueron notorias. El índice de control de reactividad (ICR) con Prop-Equiv y PFO, destacó la presencia y abundancia de tolueno, estireno y 1,2,4-TMB en primavera, y de tolueno y estireno en verano. Esto sugiere que estos compuestos no solo son prevalentes en el ambiente estudiado, sino que también tienen un alto impacto potencial en la formación de ozono y en la reactividad química del entorno.

Quillaja saponaria y Robinia pseudoacacia.

Perfiles de concentración

Considerando que las especies arbóreas *Robinia pseudoacacia* y *Quillaja saponaria* ubicadas en las cercanías de cada estación de monitoreo de la red SINCA, están expuestas a las mismas condiciones ambientales y representativas de la calidad del aire para la ciudad de Santiago, de acuerdo con la autoridad, los resultados obtenidos en este trabajo para cada sitio mantienen esas mismas cualidades. La adición del muestreo realizado en La Pintana, permitió aumentar la representatividad de la información entregada para la ciudad de Santiago (figura 6).

Una evaluación intraespecie mostró homogeneidad en sus porcentajes relativos. Una situación particular se observa en las hojas de *R. pseudoacacia*, de la estación de Puente Alto, con una concentración elevada de estireno (cuadro 6), conservándose la proporcionalidad en su perfil de concentraciones, debido a que también se cuantificaron mayores valores en las otras especies químicas.

Variabilidad en la concentración de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos en Quillaja saponaria y Robinia pseudoacacia.

El análisis estadístico estableció que los individuos de *Q. saponaria* adsorben una mayor cantidad de COVA que los individuos de la especie de *R. pseudoacacia*, en similares condiciones de exposición a los contaminantes. [Egas et al., 2018](#), mediante un análisis morfo-anatómicos de las hojas de la especie *Q. saponaria*, mostró las características en la superficie física de ambas epidermis como capaces de retener material particulado sobre ella, lo que se podría extrapolar respecto a una mayor captura de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos en su superficie.

Estimación de los potenciales de formación de ozono

Los valores estimados de equivalentes de propileno y potenciales de formación de ozono fueron mayores en *Q. saponaria* que en *R. pseudoacacia* debido a las altas concentraciones de estireno y tolueno. El estireno es el compuesto con mayor incidencia en ambas especies, seguido por tolueno en *Q. saponaria* y xilenos en *R. pseudoacacia*, reflejando variaciones en la reactividad química según la especie arbórea.

Implicaciones de los resultados

Los resultados del estudio revelaron la presencia significativa en las hojas de los árboles estudiados de compuestos orgánicos volátiles derivados de actividades humanas, como las emisiones vehiculares, las industriales o las domésticas. La presencia de estos compuestos orgánicos volátiles antropogénicos en las hojas sugiere que los árboles actúan como bioindicadores, capturando y acumulando contaminantes atmosféricos presentes en el entorno urbano. [Keymeulen et al.,2001](#) usaron hojas de *Pinus sylvestris* como biomonitor para evaluar BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) en el aire y hojas de pinos en tres lugares (carretera, gasolinera y zona rural) en Bélgica, Hungría y Letonia durante un año. Las concentraciones fueron más bajas en verano, pero cerca de gasolineras, las hojas mostraron niveles significativamente más altos que en otros lugares.

La información obtenida en esta tesis es crucial para ayudar a comprender mejor la exposición de la vegetación urbana a contaminantes atmosféricos específicos y su posible contribución a la calidad del aire en Santiago de Chile. Además, estos resultados pueden tener implicaciones importantes para la salud de los árboles urbanos y su capacidad para desempeñar funciones de purificación del aire en entornos urbanos.

Limitaciones del estudio

Las muestras de material foliar de las especies de *Q. saponaria* y *R. pseudoacacia* corresponden a individuos jóvenes y, por lo tanto, los valores informados podrían no necesariamente representar las capacidades de captura de contaminantes de individuos adultos.

Los compuestos químicos cuantificados en el material foliar de individuos de *Liriodendron tulipifera*, *Platanus x acerifolia*, *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia*, corresponden mayoritariamente a compuestos adsorbidos, retenidos en los intersticios de la superficie de las hojas y no contemplan los compuestos absorbidos por estomas de las hojas, porque ello conlleva una biotransformación de los compuestos químicos que está fuera del alcance de esta tesis. Por ende, las capacidades de captura de los COVA pueden encontrarse subestimados.

Sugerencias para investigaciones futuras

El estudio proporciona una evaluación detallada de la presencia de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos del rango de la gasolina, en las hojas de árboles urbanos en Santiago de Chile y resalta la importancia de los árboles como indicadores de la calidad del aire urbano. Estos hallazgos no solo destacan la capacidad de las especies arbóreas para captar contaminantes del aire, sino que también ofrecen una valiosa base para futuras investigaciones. Estudios futuros podrían ampliar el rango de especies estudiadas, investigar los efectos a largo plazo de la exposición a diferentes tipos de contaminantes, y explorar la integración de estrategias de forestación urbana en la gestión ambiental de la ciudad. Además, sería beneficioso aumentar la variabilidad estacional en especies siempre verdes, así como evaluar los beneficios adicionales de la forestación urbana en la mitigación del cambio climático y la mejora de la salud pública.

CONCLUSIONES

- *Liriodendron tulipifera* presenta relaciones estadísticamente significativas entre la captura de los compuestos químicos m/p-xilenos, o-xileno, 1,3,5-TMB y naftaleno, y su distancia al centro de distribución de combustibles, correlación no existente en el caso de los individuos de *Platanus x acerifolia*.
- Los individuos de *Liriodendron tulipifera* expuestos a un alto tráfico vehicular, capturan una mayor cantidad de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos que los individuos no expuestos a las proximidades de dicha fuente de contaminación. Ello implica que se pueden utilizar como bioindicadores de dicha fuente de COVA.
- Bajo condiciones de exposición semejantes a compuestos orgánicos volátiles antropogénicos provenientes de un alto tráfico vehicular, la especie *Liriodendron tulipifera* captura una mayor cantidad de dichos compuestos químicos que la especie *Platanus x acerifolia*; esta situación es preponderante en primavera. En cambio, en verano, no existen diferencias estadísticamente significativas de captura de COVA entre las especies arbóreas.
- La presencia de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos en el material foliar de los individuos de *Liriodendron tulipifera* ubicados en el parque bicentenario de Vitacura, sin fuentes de contaminación preponderante en sus cercanías, evidencian que este tipo de contaminantes es transportado por la atmósfera urbana, desde sus fuentes de emisión hacia otros sitios.
- Los individuos de *Liriodendron tulipifera*, expuestos a la emisión de contaminantes producto de la cercanía al alto flujo vehicular, presentaron siempre valores más altos, en términos de los estimadores de formación de O₃

troposférico, que los individuos de *Platanus x acerifolia*, con condiciones de exposición semejantes, y con individuos de *Liriodendron tulipifera*, no expuestos directamente a dicha fuente de COVA. Lo cual indica que *L. tulipifera* contribuye más a mejorar la calidad del aire que *P. x acerifolia*.

- El análisis de las muestras de material foliar de las especies arbóreas *Quillaja saponaria* y *Robinia pseudoacacia*, mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones totales del contenido de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos, adsorbiendo los individuos de *Quillaja saponaria* una mayor cantidad de COVA que los individuos de *Robinia pseudoacacia*. En términos de reactividad de los compuestos en la atmósfera, *Quillaja saponaria* presentó mayores valores respecto a los estimadores de formación de ozono troposférico, contribuyendo más a mejorar la calidad del aire que la *Robinia pseudoacacia*.

BIBLIOGRAFÍA

Acuña-Ruz, T., Mattar, C., Hernández, H.J. (2016). Caracterización espectral de Quillaja saponaria (Mol.). REVISTA DE TELEDETECCIÓN Asociación Española de Teledetección. 47, 65-73. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2016.6488>

Agarwal, P., Sarkar, M., Chakraborty, B., and Banerjee, T. (2018). "Phytoremediation of air pollutants: prospects and challenges," in *Phytomanagement of Polluted Sites: Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation*, eds V. C. Pandey and K. Baudh (Oxford, UK: Elsevier Inc.), 221–241. doi: 10.1016/B978-0-12-813912-7.00007-7ANAC, 2021

Álamos, N., Huneeus, N., Opazo, M., Osses, M., Puja, S., Pantoja, N., Denier van der Gon, H., Schueftan, A., Reyes, R., and Calvo, R.: High-resolution inventory of atmospheric emissions from transport, industrial, energy, mining and residential activities in Chile, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 361–379, <https://doi.org/10.5194/essd-14-361-2022>, 2022.

Almaie S., Vatanpour V., Hossein Rasoulifard M., Koyuncu I. Volatile organic compounds (VOCs) removal by photocatalysts: A review, *Chemosphere*, 2022, 306, 135655, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135655>.

Anyanwu, E. C., and Kanu, I. (2006). The role of urban forest in the protection of human environmental in geographically prone unpredictable hostile weather conditions. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 3, 197–201. doi: 10.1007/BF03325926

Araya M, Seelenfreund D, Buscaglia M, Peña-Ahumada B, Vera J, Egas C and Préndez M (2019) Assessment of Anthropogenic Volatile Organic Compounds in Leaves of Two Urban Tree Species in Santiago de Chile. *Front. For. Glob. Change* 2:42. doi: 10.3389/ffgc.2019.00042

Atkinson, R., and Arey, J. (2003). Atmospheric degradation of volatile Organic compounds. *Chem. Rev.* 103, 4605–4638. doi: 10.1021/cr0206420

Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NOX. *Atmos. Environ.* 34, 2063–2101. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00460-4

Brilli, F., Fares, S., Ghirardo, A., de Visser, P., Calatayud, V., Muñoz, A., et al. (2018). Plants for sustainable improvement of indoor air quality. *Trends Plant Sci.* 23, 507–512. doi: 10.1016/j.tplants.2018.03.004

Cai, C.-J., Geng, F.-H., Tie, X.-X., Yu, Q., Li, P., and Zhou, G.-Q. (2010). Characteristics of ambient volatile organic compounds (VOCs) measured in Shanghai, China. *Sensors* 10, 7843–7862. doi: 10.3390/s1008 07843

Cape J.N., Leith I.D., Binnie J., Content J., Donkin M, Skewes M., Price D.N., Brown A.R., Sharpe A.D. (2003). Effects of VOCs on herbaceous plants in an open-top chamber experiment, *Environmental Pollution*, Volume 124, Issue 2, Pages 341-353,ISSN 0269-7491. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00464-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00464-5).

Chameides, W. L., Fehsfield, F., Rodgers, M. O., Cardelino, C., Martinez, J., Parrish, D., et al. (1992). Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere. *J. Geophys. Res.* 97, 6037–6055. doi: 10.1029/91 JD03014

Convención de Estocolmo, <http://chm.pops.int/>

Costanza, R., Fisher, B., Mulder, K., Liu, S., and Christopher, T. (2007). Biodiversity and ecosystem services: a multi-scale empirical study of the relationship between species richness and net primary production. *Ecol. Econ.* 61, 478–491. doi: 10.1016/j.ecolecon.2006.03.021

Cui, L., Wang, X. L., Ho, K. F., Gao, Y., Liu, C., Hang Ho, S. S., et al. (2018). Decrease of VOC emissions from vehicular emissions in Hong Kong from 2003 to 2015: results from a tunnel study. *Atmos. Environ.* 177, 64–74. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.01.020

Dzierzanowski, K., Popek, R., Gawronska, H., Sæbø, A., and Gawronski, S. W. (2011). Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. *Int. J. Phytoremediation* 13, 1037–1046. doi: 10.1080/15226514.2011.552929

Egas, Claudia, Naulin, Paulette I., & Préndez, Margarita. (2018). Contaminación Urbana por Material Particulado y su Efecto sobre las Características Morfo-Anatómicas de Cuatro Especies Arbóreas de Santiago de Chile. *Información tecnológica*, 29(4), 111-118. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000400111>

Escobedo, F. J., Kroeger, T., and Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: analyzing ecosystem services and disservices. *Environ. Pollut.* 159: 2078–2087. doi: 10.1016/j.envpol.2011.01.010

Farías, I.; Préndez, M.; Bown, H.E. Leaf Fluxes of Carbon Dioxide, Methane and Biogenic Volatile Organic Compounds of the Urban Trees *Platanus x acerifolia* and *Schinus molle* in Santiago, Chile. *Atmosphere* 2022, 13, 298. <https://doi.org/10.3390/atmos13020298>

Fuentes, L., Mac-Clure, O., Moya, C., Olivos, C. (2017). Santiago de Chile ¿ciudad de ciudades? Desigualdades sociales en zonas de mercado laboral local. *Revista de la CEPAL*. 121, 93-108.

Gan G., Fan S., Li X., Zhang Z., Hao Z. Adsorption and membrane separation for removal and recovery of volatile organic compounds, *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 123, 96-115, ISSN 1001-0742, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.006>.

Gramsch, E. (2014). Estudio “Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana”. Departamento de Física, Universidad de Santiago de Chile. Available online at: https://sustempo.com/website/wp-content/uploads/2015/07/Inventario-deemisiones- RM_USACH_2014.pdf (accessed January 8, 2019).

Guenther, A.B., Jiang, X., Heald, C.L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L. K., et al. (2012). The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geosci. Model Dev.* 5, 1471–1492. doi: 10.5194/gmd-5-1471-2012

Guo, H., Ling, Z. H., Cheng, H., Simpson, I., Lyu, X., Wang, X., et al. (2016). Tropospheric volatile organic compounds in China. *Sci. Total Environ.* 574, 1021–1043. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.116

Hebbert, M., and Webb, B. (2012). “Towards a liveable urban climate – lessons from Stuttgart,” in *Liveable Cities: Urbanising World (ISOCARP 07)*, eds C. Gossop, and S. Nan (London; New York, NY: Routledge), 132–149 (Chapter 7).

Henríquez, C., and Romero, H. (2019). “Introduction,” in *Urban Climates in Latin America*, eds C. Henríquez and H. Romero (Switzerland AG: Springer Nature), 1–14 (Chapter 1). doi: 10.1007/978-3-319-97013-4

INE (2021). Instituto Nacional de Estadísticas. Available online at: <http://www.ine.cl>

Kansal, A. (2009). Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: a review. *J. Hazard. Mater.* 166, 17–26. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.048

Kesselmeier, J., and Staudt, M. (1999). Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology. *J. Atmos. Chem.* 33, 23–88. doi: 10.1023/A:1006127516791

Keymeulen R., Görgényi M., Héberger K., Priksane A., Van Langenhove H. (2001). Benzene, toluene, ethyl benzene and xylenes in ambient air and *Pinus sylvestris* L. needles: a comparative study between Belgium, Hungary and Latvia. *Atmospheric Environment* 35 (2001) 6327–6335

Khan, F. I., and Abbasi, S. A. (2000). Attenuation of gaseous pollutants by greenbelts. *Environ. Monit. Assess.* 64, 457–475. doi: 10.1023/A:1006278000352

P. Khare, J. Machesky, R. Soto, M. He, A. A. Presto, D. R. Gentner. (2020). Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors. *Sci. Adv.* 6, eabb9785 (2020).

Kountouriotis, A., Aleiferis, P. G., and Charalambides, A. G. (2014). Numerical investigation of VOC levels in the area of petrol stations. *Sci. Total Environ.* 470, 1205–1224. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.064

Kumar, A., Singh, D., Kumar, K., Singh, B. B., and Kumar, J. V. (2018). Distribution of VOCs in urban and rural atmospheres of subtropical India: temporal variation, source attribution, ratios, OFP and risk assessment. *Sci. Total Environ.* 613–614, 492–501. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.096

Li, B., Ho, S. S. H., Xue, Y., Huang, Y., Wang, L., Cheng, Y., et al. (2017). Characterizations of volatile organic compounds (VOCs) from vehicular emissions at roadside environment: the first comprehensive study in Northwestern China. *Atmos. Environ.* 161, 1–12. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.04.029

Libbert, E. (1974). *Lehrbuch der Pflanzenphysiologie*. Jena, VEB Gustav Fischer Verlag.

Manes, F., Marando, F., Capotorti, G., Blasi, C., Salvatori, E., Fusaro, L., et al. (2016). Regulating ecosystem services of forests in ten Italian metropolitan cities: air quality improvement by PM₁₀ and O₃ removal. *Ecol. Indic.* 67, 425–440. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.03.009

Marando, F., Salvatori, E., Fusaro, L., and Manes, F. (2016). Removal of PM₁₀ by forests as a nature-based solution for air quality improvement in the metropolitan city of Rome. *Forests.* 7:150. doi: 10.3390/f7070150

Matsui, K. (2016). Portion of plant airborne communication is endorsed by uptake and metabolism of volatile organic compounds. *Curr. Opin. Plant Biol.* 32, 24–30. doi: 10.1016/j.pbi.2016.05.005

Ministerio del Medio Ambiente (2023). Plan operacional de gestión de episodios críticos (GEC), 2023, Seremi del Medio Ambiente Región Metropolitana de Santiago. <https://airerm.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/06/Plan-Operacional-GEC-2023.pdf>

Muñoz, D., Aguilar, B., Fuentealba, R., Préndez, M. (2017). Environmental studies in two communes of Santiago de Chile by the analysis of magnetic properties of particulate matter deposited on leaves of roadside trees. *Atmospheric Environment*. 152, 617-627. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.047>

Nesbitt L., Hotte N., Barron S., Cowan J., Sheppard S. The social and economic value of cultural ecosystem services provided by urban forests in North America: A review and suggestions for future research. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 25, 103-111. ISSN 1618-8667. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.05.005>.

Niinemets, Ü., Fares, S., Harley, P., and Jardine, K.J. (2014). Bidirectional Exchange of biogenic volatils with vegetation: emission sources, reactions, breakdown and deposition. *Plant Cell Environ*. 37, 1790–1809. doi: 10.1111/pce.12322.

Nidhi Malik, Suresh Pandian Elumalai, Krishan Kumar. (2023). Health risk assessment from exposure to ambient VOCs and particulate matter in different functional zones in Dhanbad, India, *Science of The Total Environment*, Volume 891, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164573>.

O'Brien L., Urbanek R., Gregory J. Ecological functions and human benefits of urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 75, 127707. ISSN 1618-8667. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127707>.

Ohura, T., Amagai, T., Fusuya, M. (2006). Regional assessment of ambient volatile organic compounds in an industrial harbor area, Shizuoka, Japan. *Atmospheric Environment* 40, 238–248. doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.09.064.

Organización de las Naciones Unidas, 2022. Informe mundial de las ciudades. https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf.

Organización Mundial de la Salud, 2022, comunicado de prensa.
<https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>

Paoletti, E. (2009). Ozone and urban forests in Italy. *Environ. Pollu.* 157, 1506–1512. doi: 10.1016/j.envpol.2008.09.019

Préndez, M., Carvajal, V., Corada, K., Morales, J., Alarcón, F., and Peralta, H. (2013a). Biogenic volatile organic compounds from the urban forest of the Metropolitan Region, Chile. *Environ. Pollut.* 183, 143–150. doi: 10.1016/j.envpol.2013.04.003

Préndez, M., Araya, M., Criollo, C., Egas, C., Farías, I., Fuentealba, R., et al. (2019). “Urban trees and its relationships with air pollution by particulate matter and ozone in Santiago de Chile,” in Chapter 8: Urban Climates in Latin America, eds C. Henríquez, and H. Romero (Cham: Springer Nature Switzerland AG), 167–206. doi: 10.1007/978-3-319-97013-4_8

Préndez, M., Carvallo, C., Godoy, N., Egas, C., Aguilar, B., Calzolari, G., Fuentealba, R., Lucarelli, F., Nava, S. (2022). Magnetic and elemental characterization of the particulate matter deposited on leaves of urban trees in Santiago, Chile. *Environ Geochem Health* (2022). <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01367-w>

Romero, H. (2019). “Urban climates and the challenge of sustainable development of Chilean cities,” in Urban Climates in Latin America, eds C. Henríquez, and H. Romero (Cham: Springer), 167–206. doi: 10.1007/978-3-319-97013-4_9

Rui, W., Guan, L., Zhang, F., Zhang, W., and Ding, W. (2016) PM_{2.5}-induced oxidative stress increases adhesion molecules expression in human endothelial cells through the ERK/AKT/NF- κ B-dependent pathway. *J. Appl. Toxicol.*, 36: 48– 59. doi: 10.1002/jat.3143.

Shuang Fu, Meixiu Guo, Jinmin Luo, Deming Han, Xiaojia Chen, Haohao Jia, Xiaodan Jin, Haoxiang Liao, Xin Wang, Linping Fan, Jinping Cheng. (2020). Improving VOCs control strategies based on source characteristics and chemical reactivity in a typical coastal city of South China through measurement and emission inventory. *Science of The Total Environment*. 744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140825>.

Saphores, J., and Li, W. (2012). Landscape and urban planning estimating the value of urban green areas: a hedonic pricing analysis of the single-family housing market in Los Angeles, CA. *Landsc. Urban Plan.* 104, 373–387. doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.11.012

Shao, P., An, J., Xin, J., Wu, F., Wang, J., Ji, D., et al. (2016). Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China. *Atmos. Res.* 176–177, 64–74. doi: 10.1016/j.atmosres.2016. 02.015

Tallis, M., Taylor, G., Sinnett, D., and Freer-Smith, P. (2011). Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landsc. Urban Plan.* 103, 129–138. doi: 10.1016/j.landurbplan.2011. 07.003

Vásquez, Alexis E. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (63), 63-86. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000100005>.

Vergara-Fernández A., Revah S., Moreno-Casas P., Scott F. Biofiltration of volatile organic compounds using fungi and its conceptual and mathematical modeling, *Biotechnology Advances*, 2018, 36, 4, 1079-1093. ISSN 0734-9750. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.03.008>.

Wararat, S., Parinda, S., Sirintip, A., Polawat, K., Atcharaphan, W., Anuchit, S., et al. (2014). Uptake of toluene and ethylbenzene by plants: removal of volatile indoor air

contaminants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 102, 147–151. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.01.032.

Wei H., Zhang J., Xu Z., Hui T., Guo P., Sun Y. The association between plant diversity and perceived emotions for visitors in urban forests: A pilot study across 49 parks in China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 73, 127613. ISSN 1618-8667. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127613>.

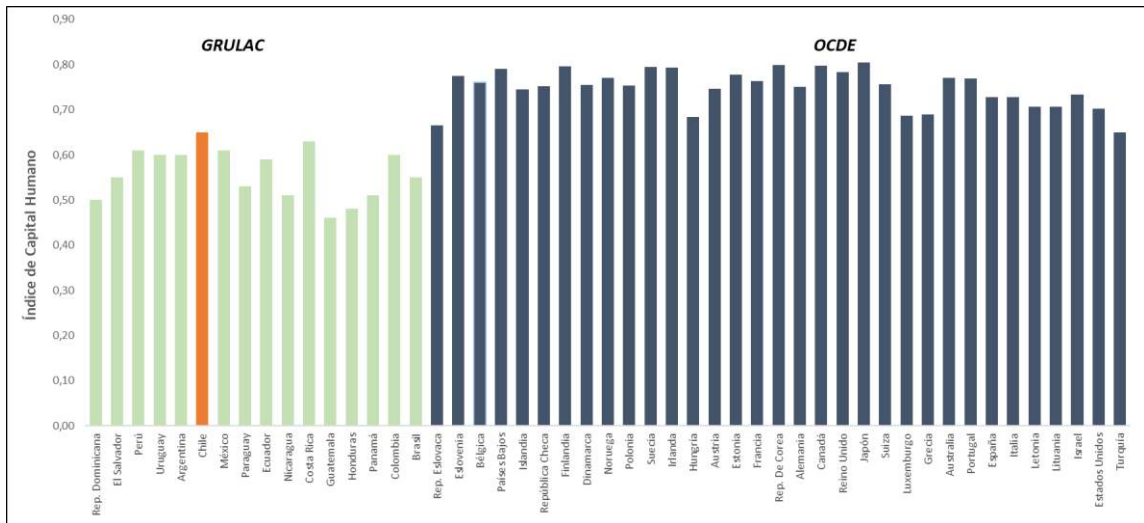
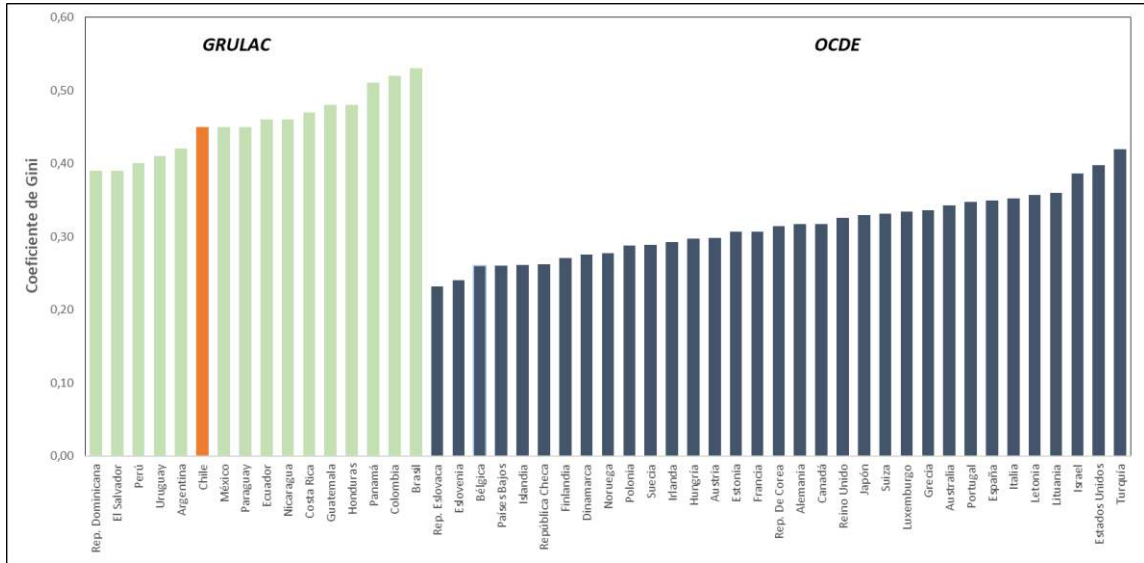
Wu, W., Zhao, B., Wang, S., and Hao, J. (2017). Ozone and secondary Organic aerosol formation potential from anthropogenic volatile organic compounds emissions in China. *J. Environ. Sci.* 53, 224–237. doi: 10.1016/j.jes.2016.03.025.

Wu X., Lin Y., Wang Y., Wu S., Yang C. (2023). Volatile organic compound removal via biofiltration: Influences, challenges, and strategies. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144420. ISSN 1385-8947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144420>.

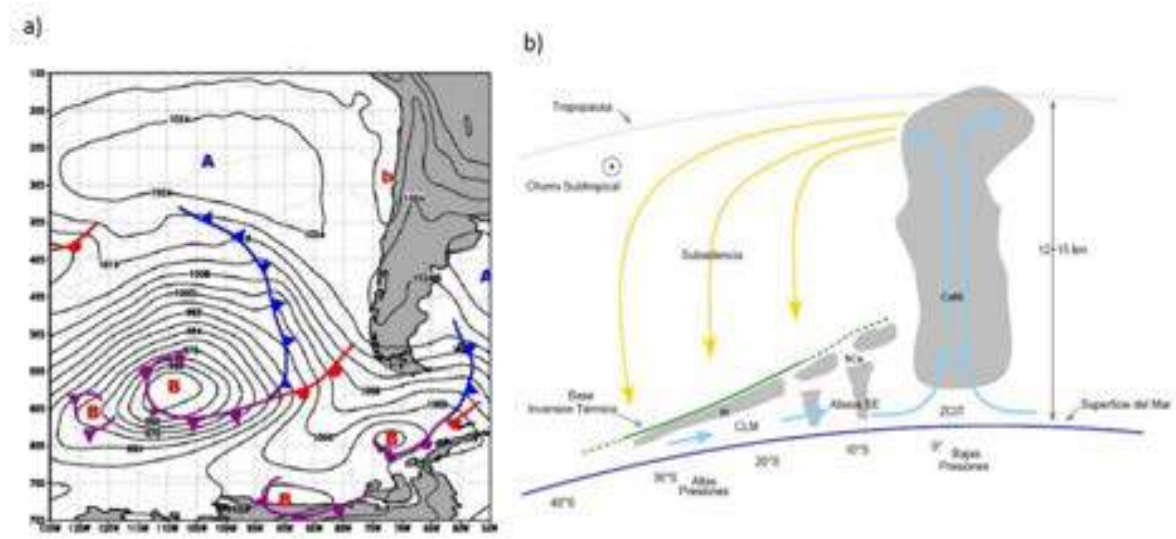
Wu Z., Cao X, Li M., Liu J., Li B. (2024). Treatment of volatile organic compounds and other waste gases using membrane biofilm reactors: A review on recent advancements and challenges. *Chemosphere*, 349, 140843. ISSN 0045-6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140843>.

ANEXOS

Anexo 1. Coeficiente de Gini e Índice de Capital Humano para países pertenecientes al Grupo Regional de América latina y el Caribe (GRULAC) y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), (www.datos.bancomundial.org).



Anexo 2. a) Carta de presión, pronosticada para el 6 de septiembre de 2020, se observa el Anticiclón semi-permanente del Pacífico sur, adicionalmente en la costa central se sitúa una vaguada costera. Fuente: DIRECTEMAR; b) Representación esquemática de la Celda de Hadley, sistema de circulación atmosférica cerrada, en el Pacífico sur. Fuente: Garreaud, DGF-UCh 2011.



Anexo 3. Instrumentación y Preparación de Estándares.

Materiales

- Fibra SPME compuesta por polidimetil siloxano/divinil benceno (PDMS/DVB).
- Columna cromatográfica HP-5MS (0,25 mm x 30 m x 0,25µm)
- Material de vidrio, clase A.
- Viales para análisis de espacio de cabeza (Head Space).
- Sellador de viales Crimper.
- Viales para análisis Head Space de 20 mL ámbar con tapas magnéticas.
- Envase de vidrio de 500 mL y 1000 mL.
- Material de muestreo, bolsas para almacenar la muestra, neveras cooler.
- Materiales de uso cotidiano de laboratorio.

Equipos

- Cromatógrafo gaseoso Agilent Technologies 7890A acoplado a Detector Selectivo de Masa (GC-DSM) Agilent Technologies 5975 C.
- Combi Pal 80 Agilent Technologies, para sistema de inyección de Microextracción en fase Sólida (SPME).
- Molino criogénico, Retsch, modelo Cryomill.
- Balanza analítica resolución 0,1 mg.
- Refrigerador para almacenar muestras y estándares -20°C.
- Campana con extractor de gases.

Reactivos

- Helio 99,999% pureza.
- Nitrógeno líquido.
- Metanol grado HPLC.
- Agua grado HPLC.
- Acetona para lavado de material

Estándares

- Solución Mix de compuestos volátiles, 2000 µg/mL, Supelco.
- Solución de ααα-Trifluorotolueno, 2000 µg/mL, Supelco.

Preparación de soluciones estándar y estándar interno

Las preparaciones de soluciones intermedias de mix de estándares, se utilizan para confeccionar la curva de calibración, generando un intervalo de trabajo de 0,05 ng/g a 50 ng/g, así como también para preparar los controles de aseguramiento de la calidad y la preservación de la trazabilidad metrológica de los resultados.

A las muestras de material foliar, blanco, duplicados, controles y puntos de la curva de calibración, se agrega una alícuota de 100 µL de la solución de 10 µg/L de ααα-trifluorotolueno, solución que es utilizada como estándar interno del método analítico.

Anexo 4. Condiciones de operación para la molienda criogénica.

	Enfriamiento inicial	Molienda	Enfriamiento final
Frecuencia de molienda	5	25	5
Tiempo de molienda (min)	10	6	5
Número de ciclos	2		

Anexo 5. Condiciones asignadas en el Combipal para la técnica de extracción HS-SPME.

Tipo de fibra SPME	PDMS/DVB
Tiempo de pre incubación (s)	1200
Temperatura de incubación (°C)	70
Velocidad de agitación (rpm)	500
Penetración de la aguja en el vial (mm)	10
Exposición de la fibra en el vial (mm)	12
Tiempo de extracción (s)	3000
Penetración de la aguja en el inyector (mm)	32
Exposición de la fibra en el inyector (mm)	22
Tiempo de desorción (s)	400

Anexo 6. Condiciones cromatográficas para la determinación de COVA mediante GC/MSD.

Temperatura inyector	250°C
Flujo helio	1,0 ml/min
Inyección	splitless
Columna	Fused silica 50 m x 32mm d 0.12 um HP-5MS 5%phenyl methyl siloxane
Programa temperatura Horno	Inicio 35°C (5 min) 5°C/min – 50°C (3 min) 20°C/min – 70°C (3 min) 80°C/min - 150 (0 min) 5°C/min – 180°C (0 min) 90°C/min – 225°C (10 min)
Solvent delay	1,0 min
Temperatura de la fuente MS	230°C
Temperatura Quad	150°C
MS	SIM
Tiempo de corrida	32,5 min