

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS



***EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES
BIOGÉNICOS Y SU RELACION CON LA FIJACIÓN DE
CARBONO EN EL BOSQUE URBANO***

**Tesis presentada a la Universidad de Chile para optar al
grado de Magíster en Química y Memoria para optar al Título
de Químico por:**

IVÁN ALEXANDER FARÍAS QUEZADA

Director de Tesis: Dra. Margarita Préndez Bolívar

Santiago-CHILE

Diciembre 2020

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS

INFORME DE APROBACIÓN DE TESIS DE MAGISTER

Se informa a la Dirección de la Escuela de Graduados de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas que la Tesis de Magíster y Memoria de Título presentada por el candidato

IVÁN ALEXANDER FARÍAS QUEZADA

Ha sido aprobada por la Comisión de Evaluadora de Tesis como requisito para optar al grado de Magíster en Química y Título de Química, en el examen público rendido el día _____

Director de Tesis:

Dra. Margarita Préndez _____

Co-director de Tesis:

Dr. Horacio Bown _____

Comisión Evaluadora de Tesis:

Dra. María Báez _____

Dra. María Angélica Rubio _____

Dr. Richard Toro _____

A mi familia, amigos y a la naturaleza.

“Debemos luchar por los que viven... y por los que aún no han nacido.”

Terra

Agradecimientos

Quiero agradecer en primera instancia a mis padres, Maritza y Eric, quienes me han dado todo su apoyo y paciencia en este complicado proceso por la Universidad, sin ellos ni de cerca estaría donde me encuentro ahora. Todos esos días hablando sobre lo que hacía, cuando me escuchaban reclamar por mis deberes o por lo que no funcionaba e incluso cosas pequeñas como dejarme solo cuando lo necesitaba o un dulce para pasar la fatiga, no saben cuánto bien me hacía, siempre sabían lo que necesitaba, supongo es la experiencia por la edad, de verdad muchas gracias por todas esas cosas.

Agradecer también al resto de mi familia, mis hermanos con los que buscaba excusa para distraerme cuando mas lo necesitaba ya fuera simplemente conversando de cuán difícil es estudiar o gritarnos por las tareas del hogar descargando stress. Mis primos, con los que comparto a diario, con quienes rio y enojo casi a partes iguales.

Una parte fundamental de todo este proceso son los amigos, sea mayor o menor medida cada persona cuenta, algunos que me acompañaron hasta el final como Sebastián, Edgardo, Barbara, Belén, Ahirton y José, también otros caídos en el camino como Sergio y Claudio. Se que bastantes nombres faltan, pero creo que ustedes sabrán reconocerse en este texto.

Un especial agradecimiento a cuya persona me ha entregado todo su cariño y comprensión estos últimos años, mi pareja, mi compañera de vida y aventuras, Connie, la motivación para terminar este proyecto nace casi exclusivamente a tus palabras de aliento para dar el último esfuerzo y cerrar este ciclo.

Agradecer al Laboratorio de Química de la atmosfera y Radioquímica y a toda su gente. La Profesora Margarita, quien harta paciencia me ha tenido (GRACIAS!!), y me ha ayudado en todo lo que he necesitado, agradezco bastante la oportunidad de conocer cómo funciona nuestro mundo y de los problemas de contaminación que nos afectan a diario, sin ella probablemente hubiera pasado por alto muchas cosas de nuestro entorno y del grave problema que tenemos entre manos. Al resto de mis compañeros de laboratorio, Egado, Naty, Clau, David, Perrin, mucho aprendí con ustedes, y no solo de contaminación, sino además de gestión, de cómo hacer presentaciones, de cómo cada persona puede tener realidades tan diferentes y de que una reunión puede durar fácilmente hasta las 10 de la noche.

Agradecer al Profesor Horacio y su equipo por la colaboración para llevar a cabo este trabajo, junto con el patrocinio del proyecto FONDECYT N°1150877.

Agradecer a la Sección de Química Ambiental y todo su equipo por su buena acogida, la facilitación de equipos y conocimientos, de verdad me sorprendió el increíble ambiente laboral que poseen, disfrute mucho estar ahí aunque fue durante periodos cortos.

Un último gracias a todos aquellos con los que me he cruzado en esta vida y me han ayudado a forjar quien soy ahora mismo.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	4
2.1. Hipótesis	4
2.2. Objetivo General	4
2.3. Objetivos específicos.....	5
3. MARCO TEÓRICO.....	5
3.1. Atmósfera y contaminación.....	5
3.2. Compuestos orgánicos volátiles (COVs).....	6
3.2.1 Biosíntesis de COVsB	12
3.2.2. Regulación y almacenamiento de COVsB.....	17
3.3. Ozono troposférico	19
3.4. Metano.....	24
3.5. Arbolado urbano.....	27
3.5.1. Estrés en arboles individuales.....	29
3.6. Situación local	31
4. MATERIALES Y MÉTODO	32
4.1. Materiales y reactivos.....	32
4.2. Equipos	33
4.3. Técnicas de medición	34
4.3.1. Cuantificación de COVsB	34
4.3.2. Cuantificación de Metano.....	35
4.3.3. Cuantificación de fotosíntesis.....	36
4.4. Muestreo de metano. Campaña 2017	37
4.4.1. Sitio de muestreo	37
4.4.2. Selección de especies arbóreas	38
4.4.3. Procedimiento de muestreo.....	40
4.5. Muestreo COVsB y metano. Campaña 2018	43
4.5.1. Selección de especies arbóreas	43
4.5.2. Procedimiento de muestreo.....	44
4.6. Análisis químico.....	48

4.6.1. Caracterización y cuantificación en GC/MS	48
4.6.2. Cálculo del factor de emisión (FE) y su normalización.....	51
4.6.3. Cálculo de índice potencial formador de ozono (IPFO)	52
4.7. Obtención de variables ambientales	53
5. RESULTADOS Y DISCUSION	54
5.1. Campaña 2017	54
5.1.1. Fotosíntesis y respiración.....	56
5.1.2. Flujo de Metano	59
5.2. Campaña 2018	62
5.2.1. Emisión de terpenos en <i>Platanus x acerifolia</i>	62
5.2.2. Factores de emisión de <i>Platanus x acerifolia</i>	64
5.2.3. Emisión de terpenos por <i>Schinus molle</i>	69
5.2.4. Factores de emisión en <i>Schinus molle</i>	72
5.2.5. Metano y CO ₂	75
5.2.6. Flujo de Carbono	78
6. CONCLUSIONES	81
7. BIBLIOGRAFIA	83
Anexo 1. Coeficientes y correlación obtenidos desde la curva de calibración	93
Anexo 2. Ecuaciones de normalización de isopreno y monoterpenos	94
Anexo 3. Correlaciones para las concentraciones en <i>Platanus x acerifolia</i>	96
Anexo 4. Correlaciones para los factores de emisión en <i>Platanus x acerifolia</i>	97
Anexo 5. Correlaciones para las concentraciones en <i>Schinus molle</i>	98
Anexo 6. Correlaciones para los factores de emisión en <i>Schinus molle</i>	99

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fotosíntesis simplificada. [a] fase controlada por luz, [b] fase oscura.	13
Figura 2. Gluconeogénesis y glucólisis simplificado.....	14
Figura 3. Biosíntesis de IPP y DMAPP [a]; Ruta de acetato-mevalonato [b], ruta no mevalonato	16
Figura 4. Biosíntesis de terpenos, [a] Ruta de acetato-mevalonato, [b] ruta no mevalonato	17
Figura 5. [1]Generación de Ozono en ausencia de COV (VOC); [2] generación de ozono en presencia de COV	21
Figura 6. Isopleta de ozono y sus regiones limitadas por NOx y COVs.....	23
Figura 7. Tiempo de vida atmosférica de COVsB comunes basados en la reacción con el radical hidroxilo.....	25
Figura 8. Tipos de técnica de encierro, estático [a] y dinámico [b].	35
Figura 9. Sistema de medición de fotosíntesis. [a] Lectura de CO ₂ con fase luminosa, [b] lectura de respiración en oscuridad.	36
Figura 10. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile, Campus Antumapu.	38
Figura 11. Cámara circular sellada con aire concentrado en su interior[a], cámara circular con luz bloqueada[b].	41
Figura 12. Procedimiento y línea de tiempo de medición para COVsB (verde) y metano (azul), procedimiento común en blanco y tiempo de cada paso en amarillo...	45
Figura 13. Cámara de muestreo de COVsB en <i>Platanus x acerifolia</i>	47
Figura 14. Programa de temperatura para caracterización de COVsB, GC-MS.....	48
Figura 15. Asimilación de carbono mediante fotosíntesis, cantidad de moles de CO ₂ fijados por gramo de hoja seca por hora, en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana Campaña 2017.	56
Figura 16. Emisión de CO ₂ por gramo de hoja seca por hora debido a la respiración en ausencia de luz, en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana. Campaña 2017.	57

Figura 17. Flujo Neto de CO ₂ en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana Campaña 2017.	58
Figura 18. Flujo de metano promedio en presencia de luz, en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana. Campaña 2017. (n=5)	60
Figura 19. Flujo de metano promedio en ausencia de luz en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana. Campaña 2017.	61
Figura 20. Concentración promedio 5 días de isopreno y desviaciones standard en Platanus x acerifolia y las variables ambientales RFA, temperatura y humedad relativa a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018.....	62
Figura 21. Concentraciones promedio 5 días de monoterpenos y sesquiterpenos en platanus x acerifolia a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano Campaña 2018	63
Figura 22. Factores de emisión promedio (5 días) normalizados para isopreno emitido por Platanus x acerifolia a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018	64
Figura 23. Factores de emisión promedio (5 días) normalizados de monoterpenos, transcariofileno y alfa-humuleno en Platanus x acerifolia a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018.	67
Figura 24. Concentración promedio 5 días de isopreno y desviaciones standard en Schinus molle y las variables ambientales RFA, temperatura y humedad relativa a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018	70
Figura 25. Concentraciones promedio (5 días) de monoterpenos y sus desviaciones estándar emitidas desde Schinus molle a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018.	71
Figura 26. Factor de emisión normalizado de isopreno desde Schinus molle a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018	73
Figura 27. Factores de emisión promedio normalizados de monoterpenos en Schinus molle a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018.	74
Figura 28. Flujo neto de metano desde <i>Platanus x acerifolia</i> y <i>Schinus molle</i> . en presencia de luz. Campaña 2018; n = 20.	77
Figura 29. Flujo neto CO ₂ desde <i>Platanus x acerifolia</i> y <i>Schinus molle</i> en presencia de luz. Campaña 2018; n = 20.	78

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Algunos compuestos orgánicos volátiles comunes de origen antrópico (izquierda) y biogénico (derecha).....	7
Cuadro 2. Clasificación de terpenos de acuerdo al número de carbonos.....	9
Cuadro 3. Funciones de los COVsB, divididos en factor ecológico, fisiológico y atmosférico	11
Cuadro 5. Especies estudiadas con sus abundancias relativas, fechas de muestreo y origen.	39
Cuadro 6. Fechas de muestreo. Campaña de 2018.....	44
Cuadro 7. Tiempo de retención y masas principales de terpenos	49
Cuadro 8. Límites de detección y cuantificación de los terpenos estudiados	50
Cuadro 9. Valor p de t de Student en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana. ACO ₂ corresponde al CO ₂ fijado por fotosíntesis, RCO ₂ al CO ₂ emitido por respiración, ACH ₄ es el flujo de metano en presencia de luz y RCH ₄ es el flujo de metano en ausencia de luz.....	54
Cuadro 10. Valor p de test de Wilcoxon en las especies estudiadas. ACO ₂ corresponde al CO ₂ fijado por fotosíntesis, RCO ₂ al CO ₂ emitido por respiración, ACH ₄ es el flujo de metano en presencia de luz y RCH ₄ es el flujo de metano en ausencia de luz, en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana...55	55
Cuadro 12. Factores de emisión promedio diarios de terpenos con sus desviaciones estándar, índice potencial de formación de ozono y factor de emisión total para Platanus x acerifolia. Campaña 2018.	68
Cuadro 13. Factores de emisión diarios y sus desviaciones estándar de monoterpenos y factor de emisión total de Schinus molle. Campaña 2018.....	75
Cuadro 14. Valores de p en prueba de t de Student y Wilcoxon para metano y CO ₂ en Platanus x acerifolia y Schinus molle (n=20). Campaña 2018.....	76
Cuadro 15. Flujos de carbono en Platanus x acerifolia. Campaña 2018.....	79
Cuadro 16. Flujos de carbono en Schinus molle. Campaña 2018.....	80

RESUMEN

Se ha estudiado al arbolado urbano como un agente reductor de contaminación en las ciudades, ofreciendo algunos servicios como la reducción del CO₂ ambiental y la captación de material particulado. Sin embargo, los árboles, a nivel global, son la principal fuente de compuestos orgánicos volátiles biogénicos, los cuales forman parte de los precursores de ozono troposférico, molécula altamente reactiva que produce daño a la salud, flora y fauna.

El objetivo de este trabajo es determinar las emisiones de compuestos orgánicos biogénicos por parte de algunas especies arbóreas presentes en el área urbana de la Región Metropolitana de Chile mediante la técnica de encierro estático con micro extracción en fase sólida, con la finalidad de obtener los factores de emisión (FE) por especie que permiten calcular la contribución de ozono a la atmósfera por parte de *Platanus x acerifolia* y *Schinus molle*, especies exótica y nativa, respectivamente. Además, se explora la existencia de flujos de metano por parte de las hojas de un conjunto de especies arbóreas (*Cryptocarya alba*, *Liquidambar styraciflu*, *Maytenus boaria*, *Melia azedarach*, *Platanus x acerifolia*, *Quijalla saponaria*, *Robinia pseudoacacia* y *Schinus molle*), que en conjunto con los factores de emisión

se relacionaron con la fijación de CO₂ mediante fotosíntesis para establecer un flujo neto de carbono entre la especie arbórea y la atmósfera.

En términos generales las especies arbóreas exóticas mostraron FE mayores que las especies nativas. *P. x acerifolia* posee un factor de emisión 6,4 veces mayor que *S. molle*, el cual presenta además una mayor tasa de fotosíntesis.

En ambas especies el compuesto con mayor emisión es isopreno, con valores sobre el 86% del total. Para tener mayor entendimiento de los resultados fue necesario conocer más sobre el funcionamiento interno de estas especies.

No fue posible establecer un flujo de metano estadísticamente distinto de cero para algunas de las especies estudiadas, lo que puede indicar que hay factores externos que afectan los valores de metano detectados.

De acuerdo a este estudio, el *S. molle* es una mejor especie que el *P. x acerifolia* para la captura de CO₂ y su aporte a la reducción del cambio climático; otros estudios deben llevarse a cabo para determinar si efectivamente *S. molle* es una de las mejores opciones para contribuir a la descontaminación atmosférica en la Región Metropolitana.

1. INTRODUCCIÓN

La vegetación es una parte muy importante de nuestro entorno, además de funcionar como una fuente primaria de alimentación, generar O₂ y reducir el CO₂, provee una amplia gama de servicios ecosistémicos, como, por ejemplo: reducir la erosión del suelo y la velocidad del viento, generar sombra que reduce la temperatura, capturar material particulado (MP) y mejorar la calidad del aire, servicios muy valiosos en los centros urbanos (Tyrväinen et al., 2005).

Al igual que los animales, las plantas reaccionan de diferentes maneras al entorno en el que se encuentran; algunos comportamientos normales de observar son: tender a acercarse a los lugares con más luz, extender sus raíces por varios metros hasta encontrar fuentes de agua o secar ramas para controlar de mejor manera el estrés hídrico. Sin embargo, un comportamiento no muy estudiado en nuestro país se refiere a las emisiones de gases hacia el ambiente, entre las cuales destacan especialmente las de los compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Los compuestos orgánicos volátiles pueden ser de origen biogénico (COVsB), es decir, emitidos por la vegetación (Tsui et al., 2009), o de origen

antrópico (COVsA), o generados por procesos industriales, combustión en vehículos motorizados o criaderos de animales, entre otros (Huang et al., 2011).

Todas las especies arbóreas emiten COVsB según una tasa que varía según la especie, etapa de crecimiento y factores externos, como son: la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, la calidad del ambiente y el estrés, entre otros. La liberación de COVsB al ambiente responde a la necesidad de atraer polinizadores o repeler plagas, contramedida a estímulos externos y una forma de comunicación entre distintos individuos (Loreto y Schnitzler et al, 2010).

Los COVsB son bastante comunes en el ambiente y reconocidos por sus fragancias. Esta familia de compuestos se conoce como terpenos y tienen como unidad base el isopreno, molécula de 5 átomos de carbono y dos dobles enlaces, lo cual lo hace muy reactivo en la atmósfera. Los terpenos en general son compuestos insaturados y reaccionan en la atmósfera con el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), óxidos de nitrógeno y otras especies químicas y actúan como precursores de ozono troposférico, el que está relacionado con diferentes problemas de salud humana y/o ambiental a nivel urbano, o bien

generar aerosoles atmosféricos secundarios (Seinfeld et al., 2016; Forester y Wells, 2011).

Actualmente en zonas urbanas puede haber altas concentraciones de ozono debido a la reacción entre los COVs y los NO_x provenientes de procesos de combustión. Dichas concentraciones conllevan riesgos como enfermedades cardio-respiratorias, oxidación de materiales y daños a la flora y fauna (Jerrett et al., 2009).

La ciudad de Santiago de Chile presenta serios problemas con el ozono durante el verano (Elshorbany et al., 2009; SINCA, 2019). Es por esto que resulta necesario identificar las fuentes de emisión de COVs y su potencial como precursor de contaminantes urbanos.

Los objetivos de este trabajo fueron: calcular los factores de emisión (FE) de ciertas especies arbóreas, su contribución a la generación de ozono troposférico y estudiar las emisiones de los COVsB y metano para relacionarlos con la fijación de CO₂ mediante fotosíntesis. Con esto se busca contribuir a mejorar la información y contribuir a generar mejores estrategias de descontaminación atmosférica en la Región Metropolitana.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. Hipótesis

Puesto que se trata de procesos fisiológicos, se cree que la relación carbono fijado/emisiones biogénicas es semejante en las distintas especies arbóreas, independiente de su hábitat originario.

2.2. Objetivo General

Cuantificar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles biogénicos y metano, y la cantidad de CO₂ fijado por fotosíntesis en hojas de especies arbóreas nativas y exóticas presentes en la Región Metropolitana, con el fin de aportar al entendimiento de ciertas reacciones químicas que ocurren en la atmósfera urbana y que generan ozono y aerosoles orgánicos secundarios.

2.3. Objetivos específicos

- Calcular los factores de emisión de los compuestos orgánicos volátiles para determinar las emisiones de las especies arbóreas.
- Analizar la existencia de flujos de metano desde las hojas para determinar de manera más exacta las emisiones orgánicas biogénicas.
- Estimar la relación entre el CO₂ incorporado y la emisión de moléculas orgánicas para obtener un flujo total de carbono en las especies arbóreas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Atmósfera y contaminación

La tropósfera es la región inferior de la atmósfera que se encuentra en contacto con la superficie del planeta y alberga a la mayoría de los seres vivos. Esta zona comprende desde la corteza terrestre hasta unos 10-15 km de altura, dependiendo de diversos factores, como la zona geográfica y el clima. A medida que se aumenta en altitud tanto la presión como la temperatura tienden a disminuir, llegando a valores de 0,13 atm y -55°C,

respectivamente, en su límite superior. La tropósfera está constituida de un fluido conocido como aire, el cual se compone de: N₂, O₂, Ar, CO₂, vapor de agua y variados compuestos en cantidades traza, algunos de éstos considerados contaminantes (Seinfeld et al., 2016)

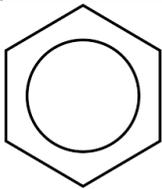
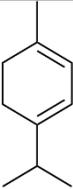
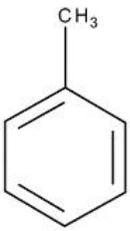
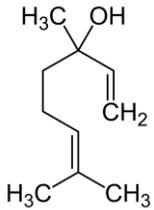
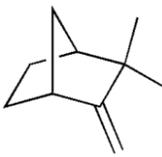
Todo compuesto cuya presencia en el ambiente, a ciertas concentraciones o periodos de tiempo, que pueda tener efectos adversos en la salud humana, animal o vegetal se denomina contaminante atmosférico (Ley N° 19.300, 2007). Estos contaminantes se suelen separar en dos grupos: los primarios, que incluyen a todos los compuestos directamente emitidos a la atmósfera (VOCs, CH₄, CO, NO, entre otros), y los secundarios, compuestos generados en la atmósfera a partir de otras especies (NO₂, O₃, aerosoles secundarios, entre otros) (SINCA, 2015).

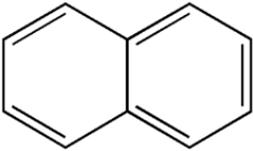
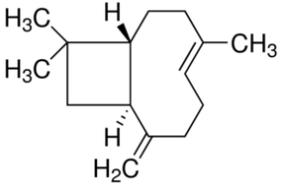
3.2. Compuestos orgánicos volátiles (COVs)

Los COVs comprenden una serie de compuestos químicos comunes presentes en la atmósfera, varios de los cuales han sido catalogados como tóxicos, debido a sus efectos negativos en la salud humana (Pérez-Rial et al.,

2010). Pueden ser de origen antrópico (COVA) emitidos, por ejemplo, por vehículos motorizados, solventes o la industria química (Sun et al., 2016) o bien de origen biogénico (COVsB), provenientes de la vegetación, océanos, sedimentos, depósitos geológicos de hidrocarburos y volcanes (Fehsenfeld et al., 1992). El cuadro 1 muestra COVs típicos de espacios urbanos.

Cuadro 1. Algunos compuestos orgánicos volátiles comunes de origen antrópico (izquierda) y biogénico (derecha).

Especie	Estructura	Especie	Estructura
Benceno		γ -Terpineno	
Tolueno		Linalool	
p - xileno		(-) Canfeno	

Naftaleno		Trans-Cariofileno	
-----------	---	-------------------	---

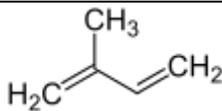
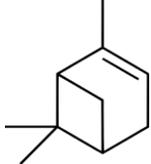
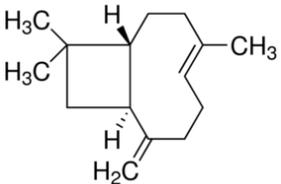
Fuente : Préndez et al., (2013). Wenjing et al., (2017).

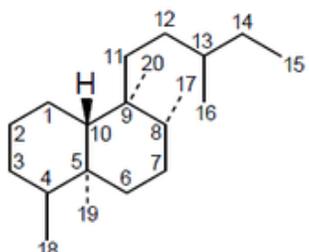
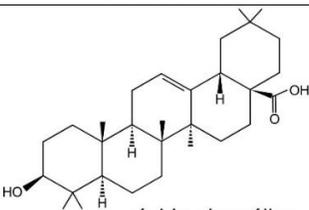
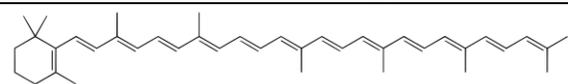
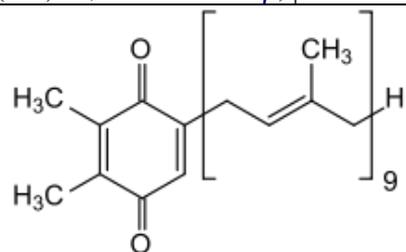
Las emisiones de COVA son aproximadamente de 169 TgC anuales a nivel mundial (Huang et al., 2017), mientras que las emisiones biogénicas del orden de los 660 TgC, conformadas por: 70,4% isopreno, 16,3% monoterpenos, 5,7% metanol, 3,8% acetona y 3,6% sesquiterpenos (Messina et al., 2016).

El compuesto con mayor contribución biogénica, isopreno, es una molécula pequeña formada por 5 átomos de carbono; posee doble insaturación y muy volátil, lo que le confiere alta reactividad en el ambiente (Carlton et al., 2009); su mayor aporte a la atmósfera corresponde a emisiones de origen biogénico, con un valor de aproximadamente 465 TgC anuales (Messina et al., 2016). La respiración humana genera una emisión aproximada de 0,58 mg/L, dependiendo de la condición física de la persona (Rudnicka et al., 2019).

Se denomina terpenos a un grupo de más de 30.000 compuestos orgánicos volátiles que tienen como unidad estructural base al isopreno (Dewick 2002). Estos compuestos se dividen en categorías basadas en la cantidad de carbonos en su estructura, como se muestra en el cuadro 2. Algunas de sus características más destacadas son el aroma, comúnmente floral utilizado en comidas y perfumes, su baja solubilidad en agua, una alta reactividad química, una acción biológica específica, la utilización en terapias, transportadores de electrones y reguladores de crecimiento (Cheng et al. 2007, Tholl 2015, Dubey et al. 2003).

Cuadro 2. Clasificación de terpenos de acuerdo al número de carbonos.

Categoría	Cantidad de Carbonos	Ejemplo
Isopreno	5	
Monoterpenos	10	 <p>α-Pinoeno</p>
Sesquiterpenos	15	 <p>Trans-Cariofileno</p>

Diterpenos	20	 <p>Clerodano</p>
Triterpenos	30	 <p>ácido oleanólico</p>
Tetraterpenos	40	 <p>(3'E)-3',4'-didehidro-β,ψ-caroteno</p>
Politerpenos	40+	 <p>Plastoquinona</p>

El isopreno y los monoterpenos son la fracción más importante de los COVsB emitidos por diversas especies vegetales, con funciones como: atracción de insectos para la polinización, defensa contra plagas y herbívoros o aumento de la tolerancia a la temperatura (Calfapietra et al., 2008). El cuadro 3 muestra distintas funciones de los COVsB en el ámbito ecológico, fisiológico y atmosférico. La cantidad emitida varía en función de la especie y factores

bióticos y abióticos; estos últimos, están relacionados con escasez de agua, sales o estrés oxidativo, los que provocan una variación de las emisiones de COVsB (Sharkey et al., 2008). Factores importantes en la liberación de estos compuestos son la etapa de crecimiento de la especie (Pressley et al., 2004; Préndez et al., 2013) y la concentración de CO₂, la que inhibe la emisión de isopreno (Possell et al., 2004).

Cuadro 3. Funciones de los COVsB, divididos en factor ecológico, fisiológico y atmosférico

Ecológico	Fisiológico	Atmosférico
Interacción planta-planta	Defensa contra patógenos	Capacidad oxidativa
Interacción planta-insecto	Termo protección	Smog fotoquímico
Protección contra herbívoros	Foto protección	Influencia en la permanencia de metano
Atrayente/repelente	Tolerancia al estrés oxidativo	Calidad del aire
Toxinas	Desintoxicación contra especies reactivas de oxígeno	Variación potencial redox de la atmósfera

Fuente: Šimpraga, 2011.

Los factores de emisión (FE) representan la cantidad de componente emitido en un tiempo determinado en un área dada ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) o bien respecto de una masa foliar definida ($\mu\text{g}/\text{ghs}$). Estos factores son propios de cada especie en un lugar determinado ya que responden a los factores bióticos y abióticos

propios de un clima y ambiente definidos. A su vez, el índice potencial de formación de O₃ fotoquímico derivado del FE es la capacidad de una especie arbórea de generar O₃ considerando los diferentes terpenos emitidos y su facilidad para reaccionar en la atmósfera en presencia de otras especies químicas (Préndez et al., 2013).

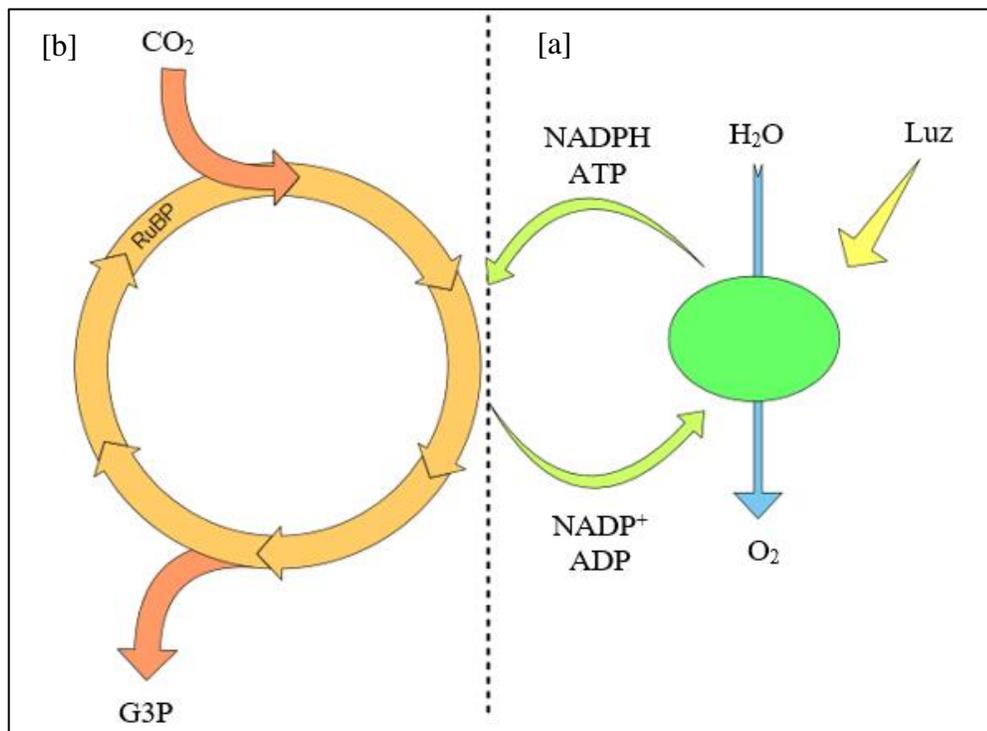
3.2.1 Biosíntesis de COVsB

La formación de los compuestos volátiles en el interior de la planta requiere que el CO₂ captado pase por una serie de cambios bioquímicos, iniciándose en la fijación mediante fotosíntesis.

3.2.1.1 Fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso característico de las plantas que permite la transformación del carbono atmosférico en biomasa. Este proceso de fijación consta de dos etapas, una iluminada y otra oscura. La primera fase utiliza luz y agua para la formación de nicotinamida adenina di-nucleótido fosfato

(NADPH) (Figura 1[a]) y adenosin-5-trifosfato (ATP), que son posteriormente utilizados en la fase oscura (Figura 1[b]) mejor conocida como ciclo de Calvin-Benson. En esta segunda fase, la enzima Rubisco une el CO_2 con la Ribulosa 1,5-bifosfato (RuBP) que luego se somete a diversas reacciones de reducción que producen gliceraldehido-3-fosfato (G3P), precursor de azúcares (glucosa, fructosa, almidón) y otros compuestos orgánicos.

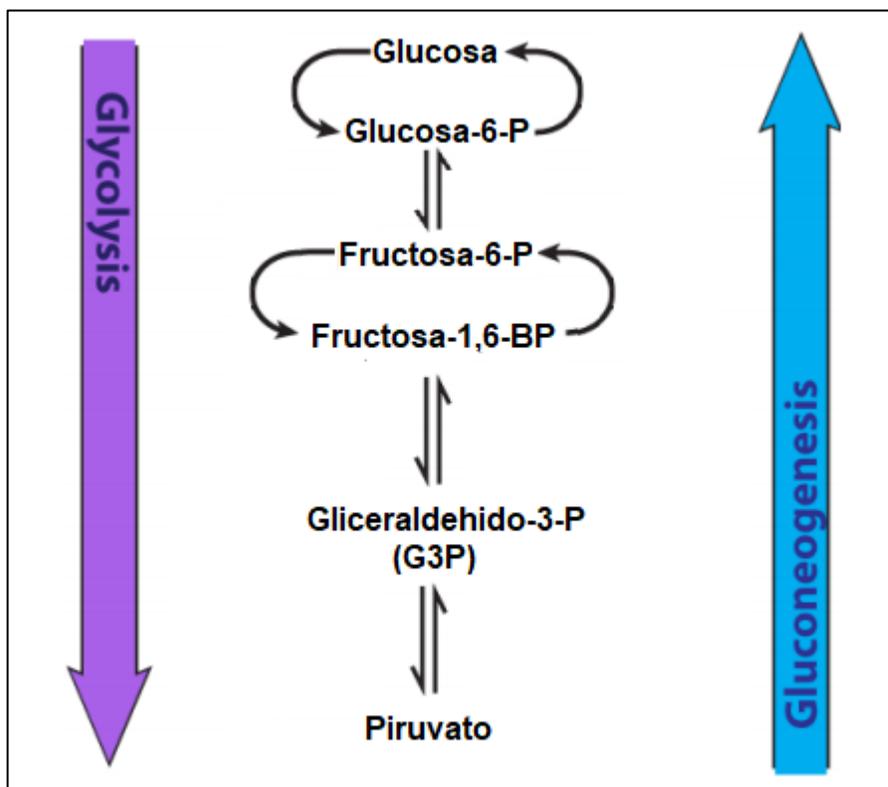


Fuente: Heldt, (2005)

Figura 1. Fotosíntesis simplificada. [a] fase controlada por luz, [b] fase oscura.

3.2.1.2. Gluconeogénesis, glucólisis y oxidación del piruvato

El G3P se conoce como un intermediario de azúcar, el cual puede verse involucrado en distintas rutas metabólicas (Figura 2). En la gluconeogénesis el G3P se convierte en glucosa, que se puede almacenar, o bien puede continuar con la glucólisis que convertirá a la molécula en piruvato (Ahern y Rajagopal, 2019).



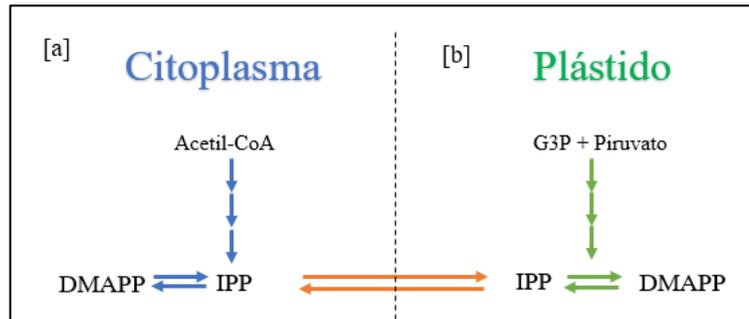
Fuente: Ahern y Rajagopal, (2019)

Figura 2. Gluconeogénesis y glucólisis simplificado

El ácido 2-oxopropanoico, mejor conocido como piruvato, es una de las principales moléculas involucradas en la generación de terpenos (Cheng et al. 2007), ya sea en su forma de ácido directamente o bien al estar transformado en acetil-CoA (DeBrosse y Kerr, 2016), que participa en una ruta alterna de generación de compuestos volátiles.

3.2.1.3. Generación de IPP

La molécula de piruvato, G3P y acetil-Coa, están involucradas en dos cadenas de reacciones que decantan en la generación de isopentenyl diphosphate (IPP) y dimethylallyl diphosphate (DMAPP) (Figura 3), precursores de COVsB; estas vías de síntesis son conocidas como: la de Acetato-Mevalonato (Figura 3[a]) y la No-Mevalonato (Figura 3[b]) (Dubey et al., 2003). La primera ocurre en el citoplasma de la célula y utiliza 3 moléculas de Acetil-CoA, comúnmente con la finalidad de formar tripernoides; mientras que la ruta B se inicia con piruvato y G3P en los plastidios y principalmente provee de IPP a la biosíntesis de monoterpenos (Moses et al. 2013).

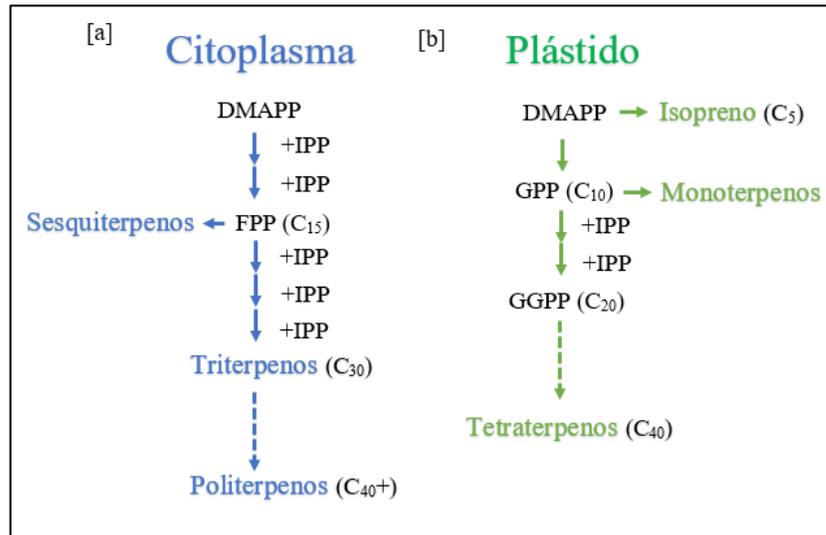


Fuente: Duber et al., (2003)

Figura 3. Biosíntesis de IPP y DMAPP [a]; Ruta de acetato-mevalonato [b], ruta no mevalonato

3.2.1.4. Formación de terpenos

La síntesis de terpenos se basa principalmente en la molécula de DMAPP, como base y la adición de IPP para incrementar el número de carbonos. Como se muestra en la Figura 4, a partir de DMAPP se genera el isopreno, mientras que de su condensación con IPP se genera geranyl diphosphate (GPP), molécula con 10 átomos de carbono y precursor directo de los monoterpenos; en la siguiente adición se forma farnesyl diphosphate (FPP), de 15 carbonos y base de los sesquiterpenos, miembros de los llamados aceites esenciales; con otra incorporación adicional se forma geranylgeranyl diphosphate (GGPP), precursor de diterpenos. Continuando la incorporación de IPP pueden formarse terpenos de mayor peso molecular (Lichtenthaler, 2007).



Fuente: Lichtenthaler, (2007)

Figura 4. Biosíntesis de terpenos, [a] Ruta de acetato-mevalonato, [b] ruta no mevalonato

3.2.2. Regulación y almacenamiento de COVsB

La regulación en la generación de los terpenos es una parte vital para la planta ya que algunos precursores tienen roles claves en otros mecanismos metabólicos, como el caso del IPP que está implicado en la formación de hormonas, membranas y pigmentos fotosintéticos (Mertens et al, 2016).

Una de las principales formas de regulación es la metabólica, que se relaciona con la disponibilidad de precursores para las vías de generación como el Acetil CoA y el piruvato; en escasez de estos componentes primarios la capacidad productiva de terpenos se verá mermada en favor de otros procesos

internos. Otra forma de regulación metabólica es mediante el feedback. Se conocen dos rutas de formación de IPP en donde las mismas moléculas intermediarias son las que inhiben el proceso de formación de terpenos al existir un exceso (Tholl 2015). Por otro lado, se ha encontrado que la síntesis de isopreno presenta una inhibición ante un aumento de la concentración de CO₂ (Rosenstiel et al., 2003).

Existe además una regulación relacionada con la luz, que afecta de formas opuestas a ambas rutas metabólicas. En el caso de la ruta Acetato-Mevalonate, la luz actúa como un inhibidor, disminuyendo la cantidad de terpenos de alto peso molecular generados, mientras que la ruta de No-Mevalonato aumenta con la luz, produciendo mayores cantidades de monoterpenos en estaciones con radiación solar constante. Este tipo de regulación es la que provoca las variaciones en las emisiones de COVsB a lo largo del día en las distintas especies arbóreas (Tholl 2015).

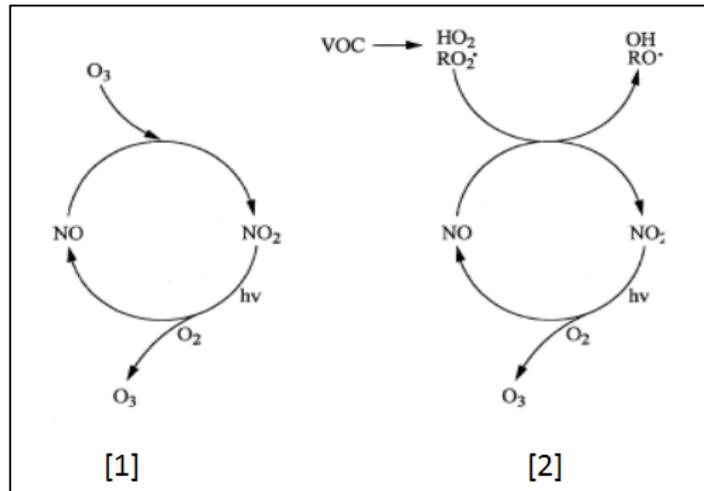
El almacenamiento de los terpenos se encuentra en glándulas de aceites y ductos de resina, siendo especie específica la selección de COVsB que son

retenidos y los que son directamente emitidos (Song, 2012). En particular, el isopreno nunca se almacena (Kesselmeier & Staudt, 1999). Al percibirse peligro, ya sea de insectos o herbívoros, estos compuestos son emitidos por la planta como una forma de defensa directa mediante la formación de phytoalexins o bien indirecta atrayendo otros depredadores (Cheng et al., 2007). En caso de una atmósfera altamente oxidativa algunos COVsB actúan como antioxidantes, liberándose desde las mismas hojas y reaccionando con especies reactivas cercanas (Sharkey et al., 1991; Loreto & Velikova, 2001).

3.3. Ozono troposférico

Los COVsB son compuestos con bajos tiempos de permanencia en el ambiente debido a su reactividad con otros componentes de la atmósfera. Uno de los principales productos de estas reacciones es el ozono, contaminante secundario y molécula altamente oxidante. A nivel de la tropósfera recibe el nombre de ozono troposférico y es capaz de producir daño a seres vivos y a materiales (Lee et al., 1996), mientras que en humanos genera problemas respiratorios y cardiovasculares (Lippman, 1991; Leiva et al., 2011; Criollo et al., 2016).

El ozono troposférico se encuentra en un ciclo balanceado (Figura 5[1]), donde un oxígeno(O) proveniente de la fotólisis del NO_2 , reacciona con una molécula de oxígeno (O_2) del ambiente, produciendo ozono. Mientras que el resultante NO de la fotólisis rápidamente reacciona con otra molécula de ozono para recobrar el oxígeno perdido; de esta manera el ciclo se mantiene con las especies en cantidades constantes (Chameides et al., 1992; Atkinson et al., 2000). La presencia de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera altera este ciclo (Figura 5[2]), desplazando el equilibrio a la formación de ozono troposférico. Los COVs incrementan la aparición de especies radicalarias como los peroxialquilos ($\text{RO}_2\bullet$) y los hidroperoxilos ($\text{HO}_2\bullet$) por reacciones con el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$), común en la atmósfera. Estos radicales reemplazan al ozono dentro de su ciclo, reaccionando con el NO para formar NO_2 , el cual se fotoliza para generar oxígeno y es el precursor directo del ozono.



Fuente: Atkinson et al., (2000).

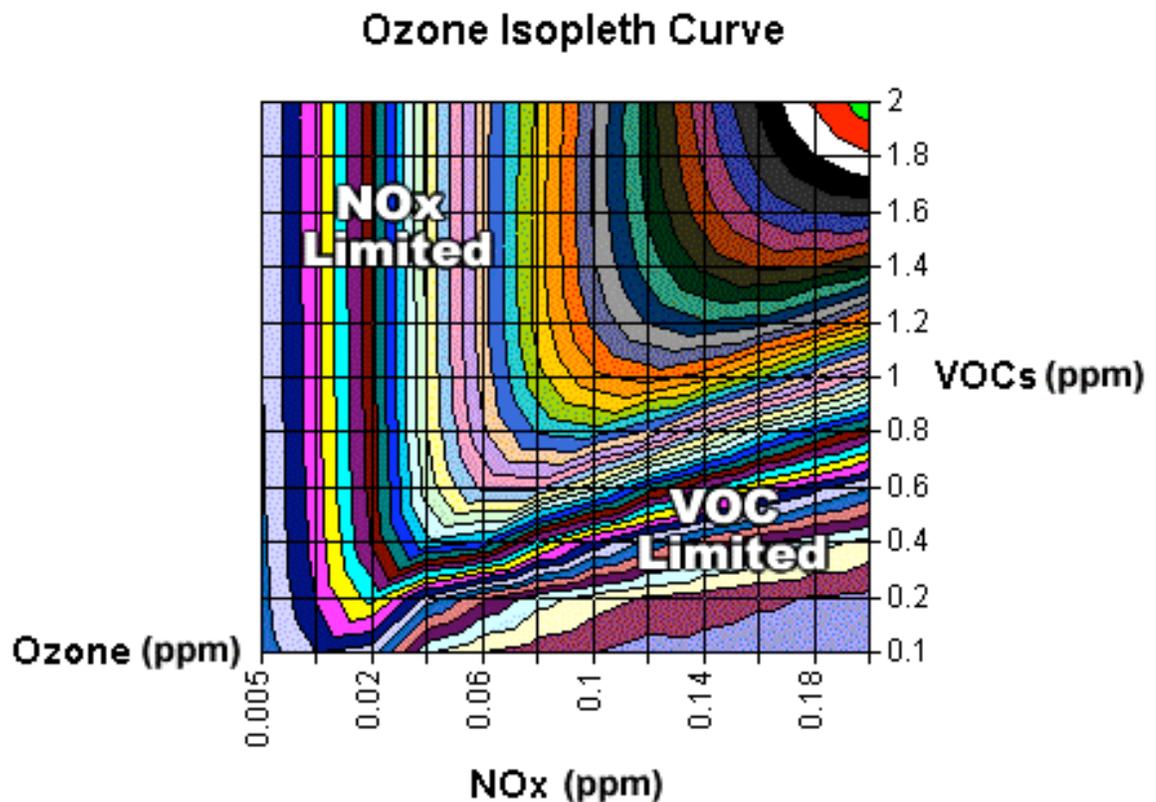
Figura 5. [1] Generación de Ozono en ausencia de COV (VOC); [2] generación de ozono en presencia de COV

Los NO_x se producen en los procesos de combustión a alta temperatura, en que el aire se usa como comburente. Las principales fuentes asociadas a la emisión de NO_x son las empresas generadoras de energía (Frins et al., 2014) y los vehículos motorizados (Carskawa et al., 2013). En Santiago se emiten cerca de 51.386 toneladas al año de NO_x , siendo sus principales fuentes los procesos industriales (9,6%), la combustión para calefacción residencial (10,2%) y las emisiones de escape de vehículos de transporte (76,6%) (Gramsch et al., 2014). El ciclo normal de NO_x presenta dos máximos durante el día, uno en la mañana y otro en la noche, coincidiendo con el mayor flujo vehicular.

Los COVs por su parte presentan una emisión de 97.028 toneladas al año, distribuidas entre residenciales (55,2%), evaporativas (29,3%) y agrícolas (15,5%); de estas últimas, cerca del 99% es de origen biogénico, mientras que el resto de la contribución es de origen netamente antropogénico.

Una isopleta es una representación tridimensional que relaciona las concentraciones de NO_x y COVs con la concentración de ozono. Las curvas, llamadas “isopletas”, permiten determinar la concentración de ozono generado a partir de concentraciones definidas de precursores (figura 6. Lavado, 2012). En la figura se pueden distinguir dos secciones, la limitada por NO_x y la limitada por COVs. La sección limitada por NO_x es común en zonas con alta densidad de vegetación, una variación en los COVs no produce grandes diferencias en la concentración de ozono, por lo que el principal foco es la reducción de NO_x. Por otro lado, la sección limitada por COVs es el caso típico de las grandes ciudades debido a la cantidad de motores a combustión, en este régimen un control sobre los COVs suele ser la manera más efectiva de reducir las concentraciones de ozono. Con la información de

las concentraciones químicas de las emisiones de una ciudad y el conocimiento de las relaciones representadas por estas curvas es posible mejorar las estrategias necesarias para contrarrestar la generación de ozono.



Fuente: Lavado, 2012

Figura 6. Isopleta de ozono y sus regiones limitadas por NOx y COVs.

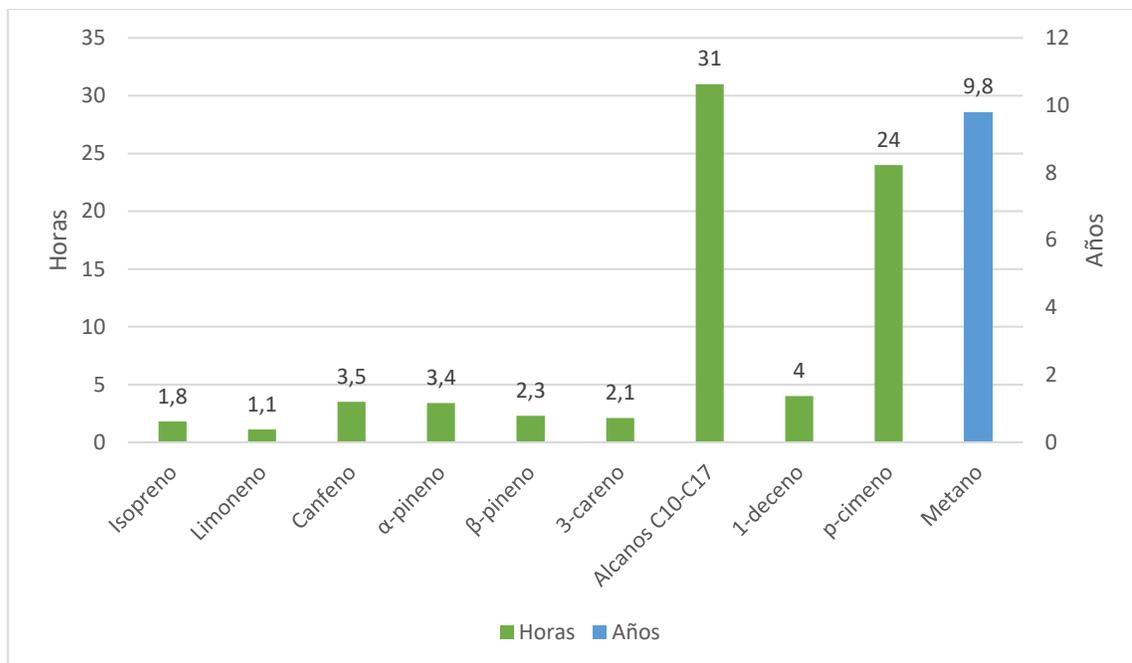
De acuerdo con Toro et al. (2014), y Elshorbany et al. (2009) Santiago presenta un régimen limitado por COVs. Para este caso, la disminución de

COVs es la solución más expedita para reducir las concentraciones de ozono antropogénico, ya que la disminución solamente de NO_x podría conllevar un aumento en la concentración del contaminante secundario. El escenario ideal para mejorar la calidad del aire sería reducir ambos precursores al mismo tiempo, lo que reduciría el ozono y al mismo tiempo el impacto directo de los precursores.

3.4. Metano

El metano es el tercer gas de efecto invernadero (GEI) más abundante en la atmósfera, después del vapor de agua y el CO₂, pero es el segundo gas antropogénico que produce más forzamiento radiativo (Pinti et al., 2016). Químicamente hablando el metano es un compuesto orgánico volátil, pero suele considerarse por separado en los estudios atmosféricos debido a su pequeño tamaño (Chu et al., 2016) lo que complica su evaluación en conjunto con los demás COVsB. Su baja reactividad comparada con el resto de los compuestos químicos del grupo de los COVsB (Camargo et al., 2010; Voulgarakis et al., 2013) le permiten permanecer en el ambiente por años

(alrededor de 10), al contrario de los terpenos que tienen una permanencia menor debido a su alta reactividad (Figura 7).



Fuente: Camargo et al., (2012) Voulgarakis et al., (2013).

Figura 7. Tiempo de vida atmosférica de COVsB comunes basados en la reacción con el radical hidroxilo.

Una de las fuentes más importante de metano son los vertederos urbanos, en los cuales, por descomposición anaeróbica se genera el gas (Spokas et al., 2015), presentando una contribución entre el 1,3% y el 17% de las emisiones anuales a nivel global (Bogner y Spokas, 2010; UNFCCC., 2012). Otras fuentes son los campos de cultivo de arroz, los animales rumiantes y la quema

de combustibles fósiles (Chen et al., 2015, Denman et al., 2007). En Santiago se emiten cerca de 89.697 toneladas de metano al año (Gramsch et al., 2014); en dicha evaluación sólo se incluyen la cantidad emitida por la calefacción a leña que corresponde a 1.626 toneladas anuales y la contribución por rellenos sanitarios de 88.071 toneladas anuales.

Otras fuentes conocidas de emisión de metano, a nivel internacional, son: el suelo (Tassi et al.2015, Tian et al.2017) y los árboles, desde los cuales se emite por diferentes secciones como tronco, tallos, ramas y hojas (Watanabe et al., 2012; Gauci et al., 2010; Pangala et al., 2015). Keppler et al., (2008) plantearon la posibilidad de la generación de metano a partir de la pared celular de las hojas. Por su parte, Messenger et al. (2009), McLeod et al. (2008) y Martel & Qaderi (2016, 2019) mostraron efectos de la radiación UV y las especies reactivas de oxígeno (ROS), aumentando las emisiones de metano a la atmósfera al encontrarse la planta bajo estrés radiactivo y/o oxidativo.

3.5. Arbolado urbano

Los árboles urbanos desarrollan diversos servicios ambientales, sociales y económicos en las ciudades (Salmond et al., 2016). Entre ellos se encuentra: el mejoramiento de la calidad del aire ya sea por fijar CO₂ mediante fotosíntesis (Brito et al., 2014; Wang et al., 2019), retener material particulado en sus hojas (Muñoz et al., 2016; Tong et al., 2016), disminuir las temperaturas debido a su transpiración y sombra generada, reducir la erosión del suelo generando mejor escurrimiento de las aguas y/o reducir la velocidad del viento evitando la re-suspensión de polvo urbano (Rivas, 2013; Chen et al., 2019). Escobedo et al. (2008), postulan la posibilidad de descontaminar el ambiente mediante una correcta selección de especies arbóreas a plantar, asociada a una eficiencia de costos monetarios utilizados en reparaciones materiales, planes de descontaminación y tratamientos médicos.

Al utilizar la vegetación para aminorar los efectos negativos a la calidad del aire generados por el hombre, se debe considerar la formación de O₃ debido

a los COVsB emitidos por la plantación inadecuada de cualquier especie arbórea. Los inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos tienen como propósito aportar información y la validación de las emisiones producidas por actividades antropogénicas y biogénicas en un lugar determinado (Morales, 2013; Peralta, 2009), información que se puede utilizar en la toma de decisiones responsables para el ambiente y adecuando el tipo de árbol requerido a las necesidades del sector donde se desee plantar.

En Chile, el inventario realizado por Gramsch et al. (2014), calculó que las emisiones agrícolas aportaban el 15,5% del total de compuestos orgánicos volátiles; de este valor, cerca del 99% corresponden a emisiones biogénicas, que se traducen en 15.858 toneladas por año. Los datos de este inventario no representan el estado real de las emisiones en nuestro país, ya que se usaron FE extranjeros para las especies exóticas en Chile, cuyos valores no consideran diferencias entre países (acidez y tipo de suelo, temperatura, humedad, radiación, entre otros), por lo que un árbol exótico puede considerarse bajo estrés en tierras chilenas, lo que afectará su rendimiento

como herramienta de descontaminación y a su vez afectará a sus emisiones (Xu et al., 2019; Fraser et al., 2015).

3.5.1. Estrés en árboles individuales

Un individuo se considera estresado cuando alguno de sus procesos fisiológicos se encuentra alterado, disminuyendo su capacidad óptima de trabajo. En el caso de los árboles esos factores alterados pueden ser: la tasa de fotosíntesis, la tasa de respiración, el crecimiento, la reproducción, la absorción de nutrientes, entre otros. En la vegetación, esta alteración puede hacer variar la cantidad de carbono total asimilado. La pérdida de carbono de los árboles debido a las emisiones de COVsB puede ser aproximadamente hasta de un 10% de lo fijado mediante fotosíntesis en condiciones normales (Peñuelas et al, 2003; Firn et al., 2006) y puede incrementarse hasta un 25-36% bajo estrés (Kesselmeier et al., 2002; Brilli et al., 2009)

Los factores más comunes que afectan la fotosíntesis y generación de COVsB del arbolado urbano son, de acuerdo a Šimpraga (2011):

- Luz; la radiación fotosintéticamente activa (RFA) posee una longitud de onda entre 400 y 700 nm, como principal precursor de la fotosíntesis; su deficiencia presenta problemas al momento de formar biomasa para el individuo, produciendo diferencias anatómicas.
- Temperatura; uno de sus principales efectos radica en su influencia en las reacciones químicas, principalmente en aquéllas con enzimas catalizadoras. Además, afecta a la emisión de compuestos a la atmósfera y las concentraciones internas de gases indispensables para la fotosíntesis.
- Humedad; el agua necesaria para la fijación de CO₂ durante la fase oscura de la fotosíntesis y su ausencia produce una disminución de este proceso. Durante épocas de sequía, los estomas de las hojas se cierran para evitar la pérdida de agua, lo que también conlleva a un menor intercambio gaseoso con el ambiente.
- Plagas; los efectos varían en cada caso, principalmente se presenta una disminución del área efectiva para la fotosíntesis y la alteración de la actividad de algunas enzimas, causando cambios en el metabolismo.

3.6. Situación local

Actualmente en Santiago existe una desigualdad entre la cantidad de árboles exóticos y nativos, Correa-Galleguillos y De la Barrera (2014) informaron que cerca del 64% de los individuos de 16 parques de la región metropolitana no son endémicos; en el caso del arbolado urbano cerca del 13% de los individuos son nativos (Hernández et al. 2018). Algunas de las especies exóticas más abundantes son: *Prunus cerasifera* (7,4%), *Liquidambar styraciflua* (7,2%), *Robinia pseudoacacia* (6,4%) y *Acer negundo* (4,7%), mientras que entre los ejemplares nativos más comunes encontramos *Acacia caven* (3,69%) y *Quillaja saponaria* (3,48%). Considerando la contribución que pueden tener los árboles exóticos a la generación de aerosoles atmosféricos secundarios y/o ozono, es de suma importancia la generación de inventarios de emisión locales, que nos permitan estimar de manera más precisa el cómo se afecta la calidad de aire de la ciudad, sobre todo considerando las características geográficas de ésta.

En el caso de ozono, en el año 1996, la Región Metropolitana fue declarada zona saturada de ozono troposférico (D.S. N°131, 1996), y el 2002 se

estableció como norma de calidad de aire $120 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ N}$ (61 ppbv), promedio móvil de 8 horas (D.S. N°112, 2002).

Los problemas de salud asociados al aire contaminado de Santiago se vinculan con un aumento en la mortalidad y admisiones hospitalarias por problemas respiratorios (Sax et al., 2007). Cakmak et al. (2007) encontró una relación directa y positiva entre la mortalidad y los máximos de ozono en la ciudad. Criollo (2016) expresó que es significativo el aporte de ozono desestacionalizado en el asma y la neumonía, aumentando la cantidad de afectados en varias comunas de la Región Metropolitana.

4. MATERIALES Y MÉTODO

4.1. Materiales y reactivos

- Cámara de muestreo de Plexiglas 80L, 50 cm de largo, 40 cm de ancho y 40 cm de alto
- Cámara de muestreo de Plexiglas 2.4L, 31 cm de alto y 4.7 de radio
- Viales headspace Agilent 20 ml
- Fibra Polydimethylsilaxano/divinilbenceno (PDMS/DVB)
- Material analítico de laboratorio
- Jeringas

- Tubos de vidrio al vacío
- Bolsas aislantes marca Ziploc
- Estándar para terpenos cannabis marca Restek
- Estándar isopreno Sigma-Aldrich
- Acetona

4.2. Equipos

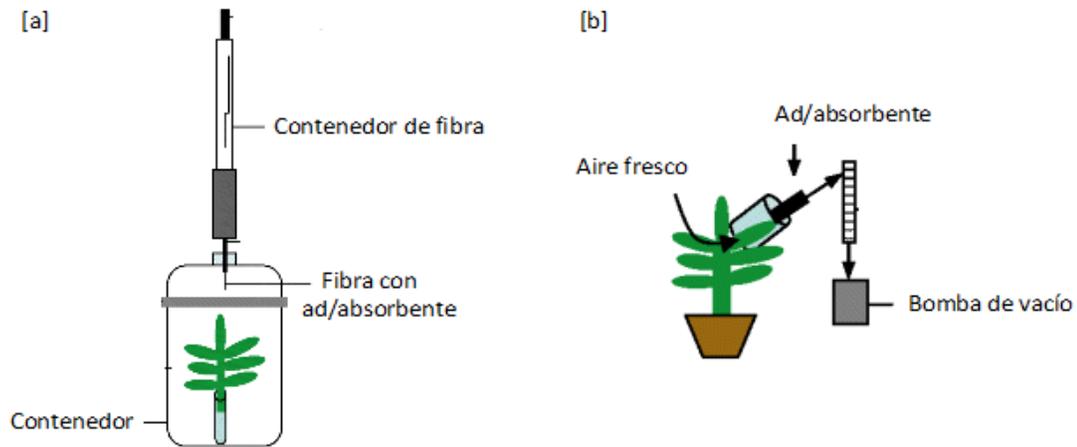
- Cromatógrafo gaseoso Agilent Technologies 7890 con detector de masas y columna HP-5
- Sistema de inyección automático Agilent 80
- EM 50 Data logger
- Sensor radiación, PAR QSO-S
- Sensor humedad relativa y temperatura, ATMOS 14
- Analizador de gases infrarrojo EGM-4 PP Systems (IRGA)
- Bomba de vacío

4.3. Técnicas de medición

4.3.1. Cuantificación de COVsB

La cuantificación de los COVsB ocurre en 2 pasos: uno *in situ* y otro en el laboratorio. El primero consta de la extracción de los compuestos de la matriz, aire en este caso, en un absorbente/adsorbente que los retiene por aproximadamente 20 horas, mientras que la fase dos consta de la detección/cuantificación en el laboratorio.

La extracción se realiza en una cámara transparente que permita el paso de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) y aberturas que permitan la instalación de otros equipos. En este caso se utilizó la técnica de encierro dinámico (Figura 8), debido a las características de la planta (Tholl et al., 2006). El medio de extracción utiliza un contenedor con fibra de PDMS/DVB (Yaman et al., 2015), para facilitar la utilización de un cromatógrafo gaseoso en su desorción.



Fuente: Tholl et al., (2006).

Figura 8. Tipos de técnica de encierro, estático [a] y dinámico [b].

4.3.2. Cuantificación de Metano

La detección y cuantificación de metano se realiza mediante cromatografía gaseosa. Se realizó una recolección de aire *in vivo*, disponiéndolo en un contenedor sellado al vacío y posteriormente enviándolo a análisis en laboratorio (Diaz, 2018). Adicionalmente se intentó realizar una extracción de muestra por medio de la técnica espacio-cabeza; esta matriz fue congelada con Nitrógeno líquido y posteriormente molida; este procedimiento no entregó buenos resultados, por lo que fue descartado. (Watanabe et al., 2012; Moset et al., 2019).

4.3.3. Cuantificación de fotosíntesis

Para la cuantificación de la fotosíntesis se utilizó como referencia la cantidad de CO_2 que se secuestra en un tiempo determinado en un volumen fijo. Para calcular las variaciones de CO_2 se usó un analizador de gases infrarrojo (IRGA) en dos fases: la primera, es la medición en presencia luz donde la fase luminosa de la fotosíntesis se encuentra funcional (Figura 9[a]); la segunda medición se realiza en oscuridad para cuantificar la respiración de la planta (Figura 9[b]).



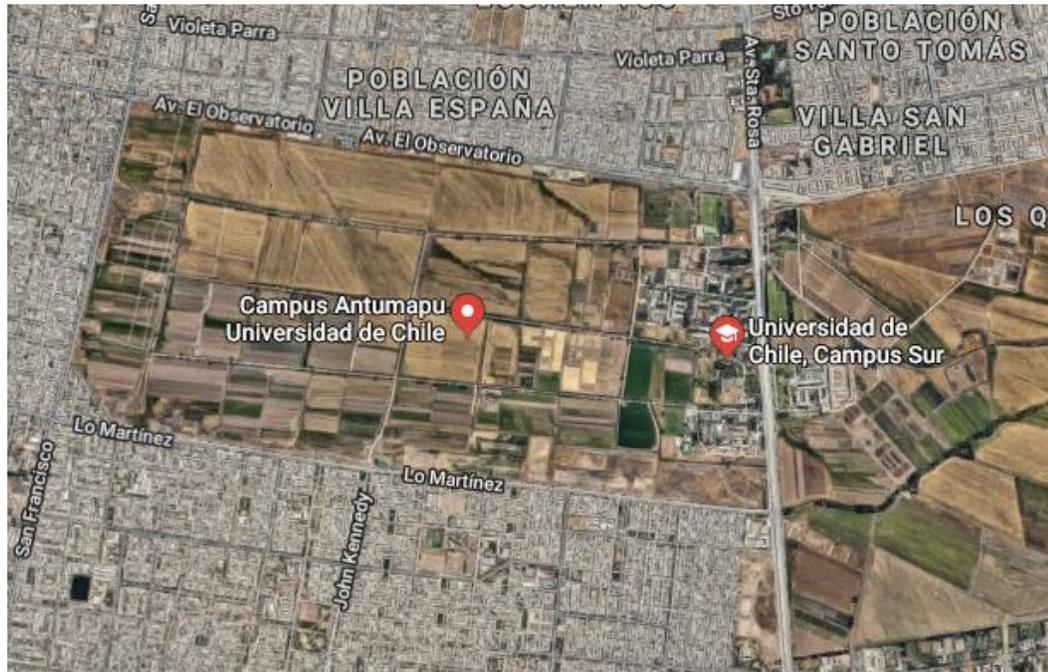
Figura 9. Sistema de medición de fotosíntesis. [a] Lectura de CO_2 con fase luminosa, [b] lectura de respiración en oscuridad.

4.4. Muestreo de metano. Campaña 2017

4.4.1. Sitio de muestreo

La Región Metropolitana (RM) se ubica entre las cordilleras de Los Andes y de La Costa; además por el norte se encuentra el cordón montañoso de Chacabuco mientras que por el sur los cerros de Angostura y Chada, Estos cordones montañosos encierran una amplia y extensa cuenca que rodean la planicie central e imponen fuertes restricciones a la circulación de los vientos y por ende, a la renovación del aire al interior de la cuenca. Por ello, en épocas de estabilidad atmosférica los contaminantes quedan atrapados dentro de la cuenca que alberga a la ciudad de Santiago (D.S. N°58, 2003).

Las especies estudiadas se encuentran al interior de la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile, Avda Santa Rosa 11315, comuna de La Pintana, Región Metropolitana, Santiago de Chile. Referencia geográfica 33° 34'10.2" S 70°37'48.9" W. Ver figura 10.



Fuente: Google maps, 2019

Figura 10. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile, Campus Antumapu.

4.4.2. Selección de especies arbóreas

Se escogieron 5 individuos de cada una de las 8 especies arbóreas, realizando 1 medición diaria ($n=5$): 4 de origen exótico y 4 de origen nativo. La elección se basó en la disponibilidad para realizar mediciones y su porcentaje de abundancia relativa en la Región Metropolitana. El cuadro 5 muestra las especies elegidas con sus abundancias relativas y fechas de muestreo.

Cuadro 4. Especies estudiadas con sus abundancias relativas, fechas de muestreo y origen.

Especie	Abundancia relativa	Fechas de muestreo	Origen
<i>Melia azedarach</i>	1,4%	31 de marzo y 3 de abril	Exótico
<i>Platanus x acerifolia</i>	2,3%	31 de marzo y 5 de abril	Exótico
<i>Robinia pseudoacacia</i>	6,4%	3 y 4 de abril	Exótica
<i>Liquidambar styraciflua</i>	7,2%	3,4 y 5 de abril	Exótico
<i>Quillaja saponaria</i>	3,48%	10, 12 y 13 de abril	Nativo
<i>Cryptocarya alba</i>	0,82%	11 y 12 de abril	Nativo
<i>Maytenus boaria</i>	1,23%	11, 12 y 13 de abril	Nativo
<i>Schinus molle</i>	1,84%	11, 12 y 13 de abril	Nativa

Fuente: Hernández et al. (2018)

4.4.3. Procedimiento de muestreo

Se realizaron dos campañas de muestreo. La primera en 2017 fue exclusivamente para estudiar metano y fotosíntesis/respiración, con el fin de analizar posibles flujos de metano desde las hojas de las especies mencionadas en el cuadro 5.

Para este muestreo se utilizó la técnica de encierro dinámico con una cámara cilíndrica sellada, con una tapa removible de un diámetro coincidente al del detector de CO₂, facilitando el cambio entre la medición del gas y la extracción de muestra de metano. Se adosó la cámara a una rama, dejando espacio suficiente para las hojas en su interior; se instaló el IRGA para medir el intercambio gaseoso durante 90 segundos, corroborando un flujo de CO₂ normal; se retiró el equipo y se selló la cámara durante 10 minutos para permitir la concentración de gases (Figura 11[a]); con una jeringa se extrajeron 25 ml del aire sellado y se inyectaron en un vial al vacío que se envió a análisis de metano. Se cubrió la rama para evitar el paso de la radiación y de este modo detener la fotosíntesis (Figura 11[b]); se dejó

reposar la rama por 10 minutos, para evitar estrés y luego se volvió a instalar el equipo IRGA para medir respiración, finalizando con otra extracción de metano posterior a un segundo sellado de cámara, esta vez en ausencia de luz. Al finalizar el procedimiento se llevó a cabo una extracción de aire exterior a la cámara; la muestra se inyectó en un vial y se utilizó como patrón de comparación para este análisis. Al terminar el ciclo de mediciones se cortó la rama para secarla y obtener su biomasa.



Figura 11. Cámara circular sellada con aire concentrado en su interior[a], cámara circular con luz bloqueada[b].

Se utilizó la siguiente ecuación para obtener el flujo de metano:

$$F_m = \left(\frac{\Delta[CH_4]}{\Delta t} \right) \cdot \frac{K \cdot V}{A} \cdot \left(\frac{P}{R \cdot T} \right) \quad \text{Ecuación 1.}$$

donde F es el flujo de metano ($\mu\text{gCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), $[CH_4]$ es la diferencia de concentración de metano entre la cámara y el blanco, t es el tiempo de concentración (10 minutos), K = factor de cambio de unidades, P es la presión atmosférica ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$), R es la constante de los gases ideales ($0.00831447 \text{ kgm}^2\mu\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}\text{s}^{-2}$), T es la temperatura ($^{\circ}\text{K}$), V es el volumen de la cámara y A es el área de la cámara.

Los flujos de CO_2 se obtuvieron a partir del equipo IRGA y se estandarizaron con respecto a la masa de hoja seca según la ecuación 2:

$$A_{CO_2} = \frac{[CO_2]_{IRGA} \cdot A}{M} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde A_{CO_2} es el flujo de CO_2 de las hojas ($\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$), $[CO_2]_{IRGA}$ es el valor indicado por el equipo ($\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$), A es el área circular de la cámara ($0,00785\text{m}^2$) y M es la masa de hoja seca (ghs).

4.5. Muestreo COVsB y metano. Campaña 2018

La segunda campaña, realizada en 2018, tomó como base la medición de metano y la respiración del muestreo anterior incorporando al procedimiento la captura de COVsB en simultáneo. Para cada individuo se muestreó durante 5 días con 4 mediciones diarias en cada caso, con el fin de aumentar el número de datos para cada variable (n=20).

4.5.1. Selección de especies arbóreas

En esta campaña se trabajó con un individuo de *P. x acerifolia*, especie exótica de hoja caduca y un individuo de *S. molle*, especie nativa de hoja perenne, con una abundancia relativa de 2,3% y 1,84% (cuadro 6). Los individuos seleccionados son árboles adultos localizados en zonas con poco tránsito vehicular. El *P. x acerifolia* es de especial interés debido a que sus factores de emisión no han sido determinados empíricamente en el país, mientras que el *S. molle* es una especie ya estudiada (Préndez et al., 2019) y se utiliza con fines de comparación. El cuadro 6 muestra las fechas de muestreo.

Cuadro 5. Fechas de muestreo. Campaña de 2018.

Especie	Días muestreo
<i>Platanus x acerifolia</i>	7,8,9,12 y 13 de febrero, 2018
<i>Schinus molle</i>	1,2,5,6 y 7 de marzo, 2018

4.5.2. Procedimiento de muestreo

Para las mediciones se utilizaron dos técnicas en paralelo, cada una en su respectiva rama, ambas del mismo individuo, con ramas visualmente sanas, absorción de CO₂ normal en fotosíntesis y cerca de los dos metros de altura con orientación norte para mantener la mayor exposición a la luz solar. En la primera rama se estudiaron los terpenos y en la segunda el metano en conjunto con la fotosíntesis/respiración de cada especie arbórea. La figura 12 muestra la secuencia completa para realizar una medición.

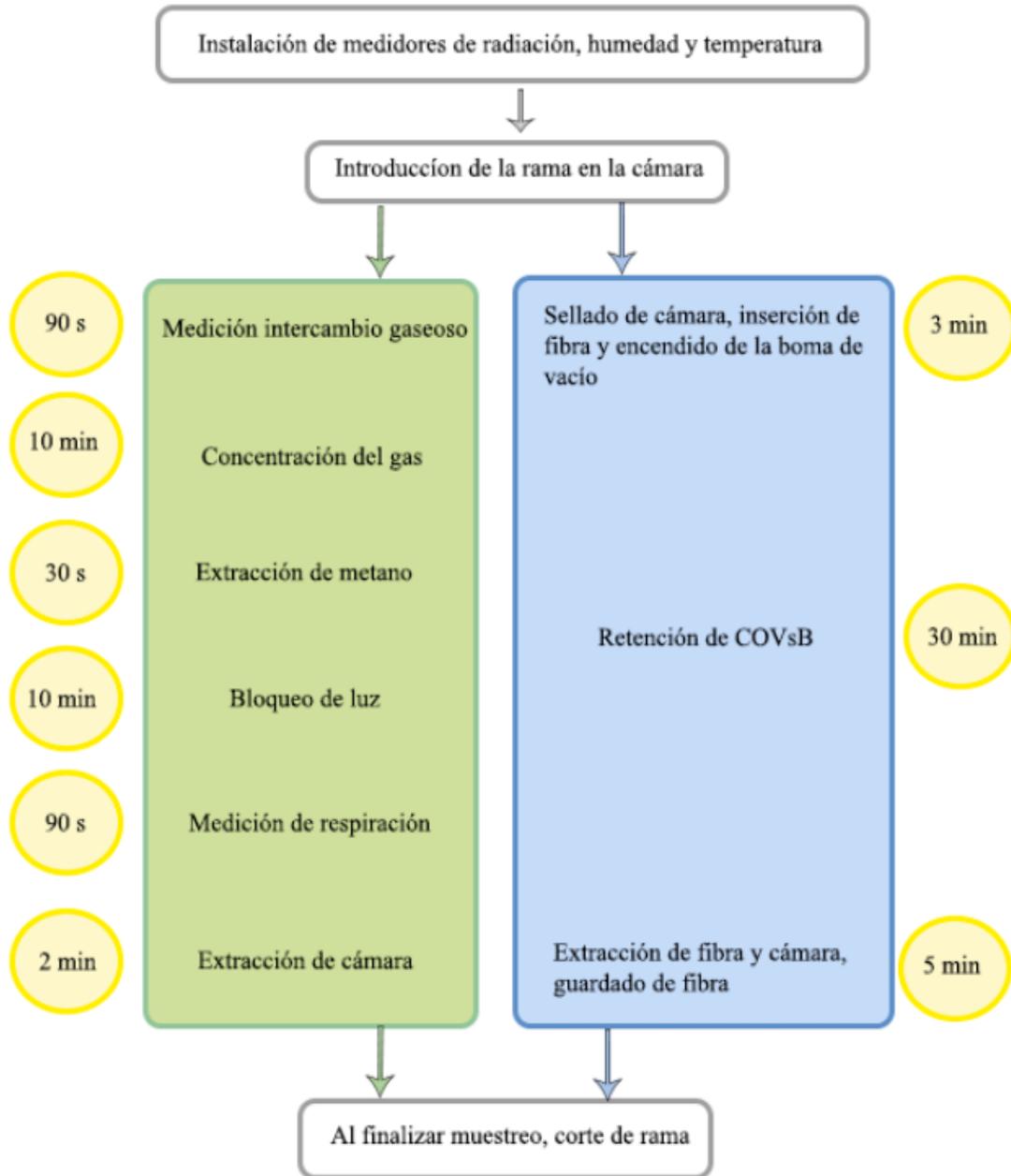


Figura 12. Procedimiento y línea de tiempo de medición para COVsB (verde) y metano (azul), procedimiento común en blanco y tiempo de cada paso en amarillo.

4.5.2.1. Muestreo de COVsB

Se utilizó una combinación de las técnicas de encierro estático de Préndez et al. (2013) que utiliza un flujo de aire constante expuesto a un adsorbente y la extracción por fibra usada por Ehsan et al. (2017). Se seleccionó una rama y se controló utilizando el IRGA, corroborando que efectivamente el individuo realizaba fotosíntesis; se introdujo la rama seleccionada dentro de la cámara de plexiglás evitando tensarla y producirle estrés; luego se introdujo la conexión de la bomba con un flujo de 100mL/min y la fibra; se instalaron los sensores de radiación solar fotosintéticamente activa (RFA), temperatura y humedad relativa y se selló parcialmente la cámara (Figura 13).

Se muestreó durante 30 minutos; el aire retenido en la cámara se succionó mediante la bomba para que entre en contacto con la fibra, que adsorbe los COVsB. Se retiró tanto la rama como la fibra y esta última se guardó en una bolsa aislante a 5°C hasta el momento del análisis químico. En el laboratorio se desorbió térmicamente en el inyector del Cromatógrafo. El mismo procedimiento se repitió 4 veces al día: a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00

horas, durante 5 días. Al finalizar el ciclo se cortó la rama utilizada y se secó en una estufa a 80°C durante 72 horas, con el fin de obtener su biomasa.



Figura 13. Cámara de muestreo de COVsB en *Platanus x acerifolia*.

4.5.2.2. Muestreo de Metano y fotosíntesis/respiración

El muestro fue similar al de la campaña 2017, con la salvedad de no incluir una extracción de metano en ausencia de luz. De igual modo, al terminar el ciclo de mediciones se procedió a cortar la rama para secarla y obtener su biomasa.

4.6. Análisis químico

4.6.1. Caracterización y cuantificación en GC/MS

Para el análisis de los compuestos químicos se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a un detector de masas. Para la caracterización se utilizó un estándar de isopreno y un multiestandar de terpenos, los cuales se prepararon en acetona en viales con 5 ml de agua. Los viales se precalentaron durante 2 minutos a 40° C para luego someterlos a micro extracción con una fibra de PDMS/DVB durante 30 minutos. Posteriormente la fibra se desorbió térmicamente en el inyector del GC/MS a una temperatura de 250°C, con una temperatura de detector de 280°C, flujo de gas de 1,5 ml/min, en una columna de HP-5MS con el programa de temperatura que se muestra en la figura 14.

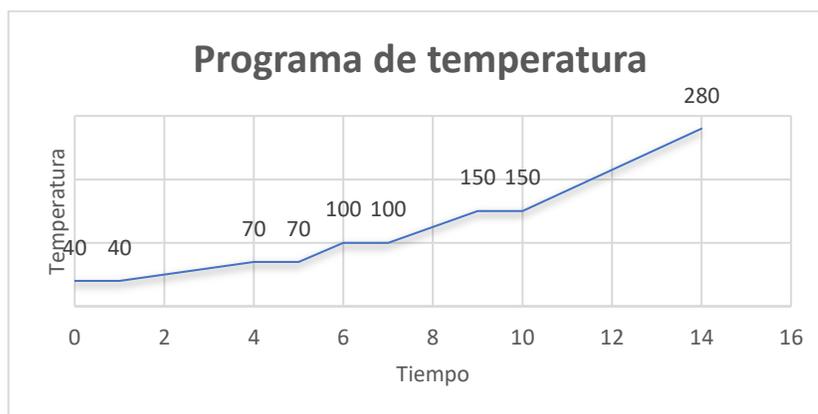


Figura 14. Programa de temperatura para caracterización de COVsB, GC-MS

La identificación se realizó con ayuda de la librería del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de los Estados Unidos (NIST, en inglés), para comparar los fragmentos de masa de los analitos y de esta forma reconocer el pico correspondiente, el tiempo de retención y las masas principales de cada compuesto (Cuadro 7).

Cuadro 6. Tiempo de retención y masas principales de terpenos

Compuesto	Tiempo retención	Masa Principal
Alfa-Pineno	5,45	93
Canfeno	5,66	93
Beta-Pineno	6,00	93
Beta-Mirceno	6,16	93
3-careno	6,36	93
Alfa-terpineno	6,42	121
P-Cymene	6,49	119
Limoneno	6,54	68
Ocimene1	6,61	93
Ocimene2	6,70	93
γ -terpineno	6,80	93
Terpinoleno	7,03	121
Linalol	7,10	71
Transcariofileno	8,82	93
Alfa-Humuleno	8,96	93

Se realizó una curva de calibración para cada terpeno, con 15 inyecciones a diferentes concentraciones, donde se determinó la mayor masa como Ion cuantificador; con esta información se obtuvo la ecuación de la recta para cada compuesto que se muestra en el Anexo 1.

Se realizaron pruebas para determinar el límite de detección (LOD) y cuantificación (LOQ) con 10 muestras de blanco fortificado con analito a una concentración cercana al límite de detección. Los resultados se muestran en el cuadro 8.

Cuadro 7. Límites de detección y cuantificación de los terpenos estudiados

Analito	LOD (ppb)	LOQ (ppb)
Alfa-pineno, 3-careno, humuleno	0,66	2,025
2-canfeno, beta.myrceno, alfa-terpineno, limoneno, gamma-terpineno, Terpinoleno,	0,412	1,252

Beta-pineno, transcariofileno	0,535	1,627
Linalol	1,1	3,35

Las fibras almacenadas de los muestreos se inyectaron directamente al GC/MS bajo las condiciones de caracterización; con la información de la curva de calibración se cuantificó cada COVsB adsorbido y desorbido.

4.6.2. Cálculo del factor de emisión (FE) y su normalización

El FE representa la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera por unidad de masa y tiempo, en este caso por parte de las hojas de los árboles.

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$FE = \frac{C \cdot Q}{M} \quad \text{Ecuación 3.}$$

FE: factor de emisión ($\mu\text{g}/\text{ghs h}$), C: la concentración del compuesto ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),

Q: el flujo de aire medido (m^3/h) y M la biomasa hoja seca (ghs).

Con fines de comparación internacional, los FE se normalizan a 30°C y RFA de 1000 $\mu\text{mol m}^2\text{s}^2$, de acuerdo con Guenther et al, (1993). Las ecuaciones de normalización se encuentran en el Anexo 2.

4.6.3. Cálculo de índice potencial formador de ozono (IPFO)

Para cuantificar las contribuciones de los COVsB a la formación de ozono troposférico se utilizó el índice potencial formador de ozono, fórmula propuesta por Préndez et al., (2013):

$$IPFO_i = FE_i \cdot POCP_i \quad \text{Ecuación 4.}$$

donde FE_i normalizado es el factor de emisión obtenido experimentalmente para cada especie química de COVsB; $POCP_i$ es el Photochemical Ozone Creation Potential calculados por Derwent et al. (2007) para cada especie química utilizando la siguiente fórmula:

$$POCP_i = \frac{Final\ O_{3i} - Final\ O_{3\ zero}}{Final\ O_{3\ etileno} - Final\ O_{3\ zero}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 5.}$$

El $O_{3i\ zero}$ se refiere a la razón de mezcla encontrada al final de cada cálculo de la trayectoria del modelo; O_{3i} es la razón de mezcla de la especie i . El etileno se utiliza como un marcador dado su bajo peso molecular.

4.7. Obtención de variables ambientales

Las variables ambientales se registraron automáticamente mediante el Data logger EM50, el cual almacena los datos cada minuto, lo que permitió tener un valor promedio para las variables requeridas durante el muestreo. Acoplados al Data logger se tenían sensores de humedad relativa, temperatura y radiación; este último posee un rango espectral entre 400 y 700 nm, ideal para la cuantificación de RFA.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Campaña 2017

Se realizó una prueba t de Student para verificar la diferencia significativa de las variables medidas con un valor promedio teórico de cero. Los resultados se muestran en el cuadro 9.

Cuadro 8. Valor p de t de Student en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana. ACO₂ corresponde al CO₂ fijado por fotosíntesis, RCO₂ al CO₂ emitido por respiración, ACH₄ es el flujo de metano en presencia de luz y RCH₄ es el flujo de metano en ausencia de luz.

Especie	t _{ACO2}	t _{RCO2}	t _{ACH4}	t _{RCH4}
<i>Cryptocarya alba</i>	0,0220*	0,025*	0,806	0,398
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0,0003*	0,038*	0,145	0,862
<i>Maytenus boaria</i>	0,0389*	0,022*	0,191	0,265
<i>Melia azedarach</i>	0,725	0,197	0,725	0,479
<i>Platanus x acerifolia</i>	0,076	0,037*	0,846	0,834
<i>Quillaja saponaria</i>	0,082	0,041*	0,143	0,866
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,019*	0,023*	0,652	0,663
<i>Schinus molle</i>	0,008*	0,036*	0,374	0,192

- $t_i < 0,05$ variable distinta de cero*

Considerando los valores de $p < 0,05$ como significativamente distintos de cero se encuentra que: *M. azedarach*, *P. x acerifolia* y *Q. saponaria* muestran problemas en la medición de la fotosíntesis y/o la respiración debido a grandes diferencias observadas entre algunos individuos, pero destacando

que estos valores no están fuera de un rango normal al analizar los datos individualmente. Los valores marcados en el cuadro 9 presentan flujos significativos en fotosíntesis y respiración, comportamiento normal que reflejan fijación y emisión de CO₂ en presencia y ausencia de luz, respectivamente. El valor $p > 0,05$ en metano indica que no existe un flujo de este compuesto, estadísticamente significativo, en ninguna de las especies estudiadas.

Debido a la cantidad de datos y a la no garantía de tener una distribución normal, se realizó adicionalmente una prueba de Wilcoxon con la misma finalidad de encontrar diferencias de 0, estadísticamente significativas.

Cuadro 9. Valor p de test de Wilcoxon en las especies estudiadas. ACO₂ corresponde al CO₂ fijado por fotosíntesis, RCO₂ al CO₂ emitido por respiración, ACH₄ es el flujo de metano en presencia de luz y RCH₄ es el flujo de metano en ausencia de luz, en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana.

Especie	W _{ACO₂}	W _{RCO₂}	W _{ACH₄}	W _{RCH₄}
<i>Cryptocarya alba</i>	0,0625*	0,0625*	0,8125	0,4375
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0,0625*	0,0625*	0,1875	0,8125
<i>Maytenus boaria</i>	0,0625*	0,0625*	0,1875	0,3125
<i>Melia azedarach</i>	0,0625*	0,0625*	0,8125	0,625
<i>Platanus x acerifolia</i>	0,0625*	0,0625*	0,8125	0,625
<i>Quillaja saponaria</i>	0,0625*	0,0625*	0,625	1
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,0625*	0,0625*	0,625	0,625
<i>Schinus molle</i>	0,0625*	0,0625*	0,4375	0,1875

- $W_i < 0,1$ variable distinta de cero*

El cuadro 10 muestra claramente flujos en la fotosíntesis y respiración de todas las especies, mientras que no hay emisión o absorción de metano.

5.1.1. Fotosíntesis y respiración

La Figura 15 muestra la asimilación promedio por medio de fotosíntesis de las ocho especies muestreadas en la campaña 2017.

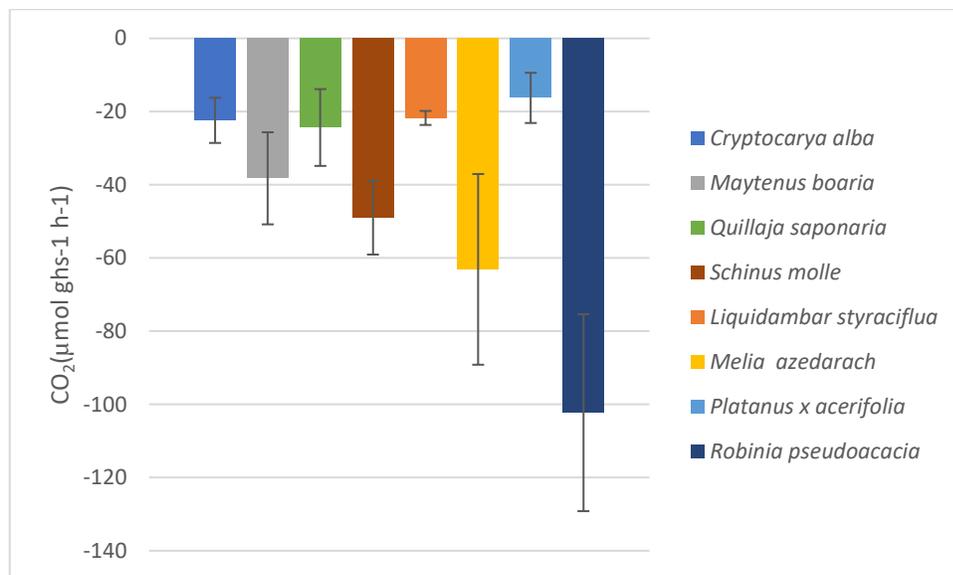


Figura 15. Asimilación de carbono mediante fotosíntesis, cantidad de moles de CO₂ fijados por gramo de hoja seca por hora, en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana Campaña 2017.

La mayor fijación de carbono mediante fotosíntesis pertenece a la *R. pseudoacacia* (-102,2 ± 26,9 μmol CO₂ ghs⁻¹h⁻¹), seguida de *M. azedarach* (-

63,1 ± 26,1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$) y *S. molle* (-48,9 ± 10,1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$). Las menores tasas de fotosíntesis corresponden a *P. x acerifolia*, *L. styraciflua* y *C. alba*, con valores promedio de -16,2, 21,7 y 22,4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$, respectivamente. Pese a la diferencia entre especies todos los individuos presentaron un flujo de CO_2 negativo, indicativo de fijación de carbono, lo que se considera un comportamiento normal.

Las emisiones de CO_2 en las especies estudiadas se muestran en la Figura 16.

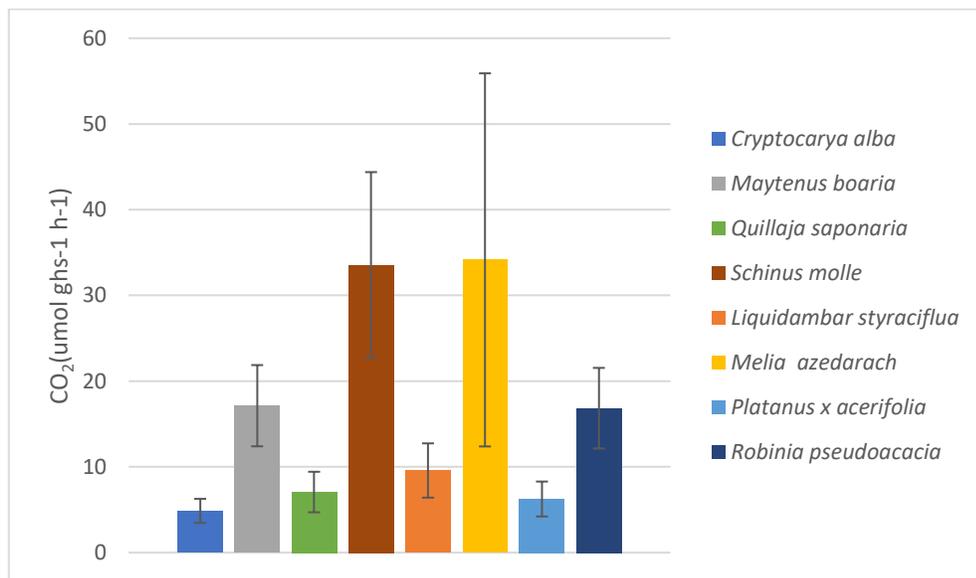


Figura 16. Emisión de CO_2 por gramo de hoja seca por hora debido a la respiración en ausencia de luz, en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana. Campaña 2017.

Se observa que las mayores emisiones corresponden a *M. azedarach* (34,1 ± 21,7 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$) y *S. molle* (33,5 ± 10,8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$), lo que

indica un mayor consumo energético por parte de estas especies. Entre los menores valores se repite tanto la *C. alba* ($4,8 \pm 1,3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$) y el *P. x acerifolia* ($6,2 \pm 2,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$).

A partir de la información presentada en las figuras 15 y 16 se genera la figura 17, la que muestra el flujo neto de CO₂ en las distintas especies estudiadas.

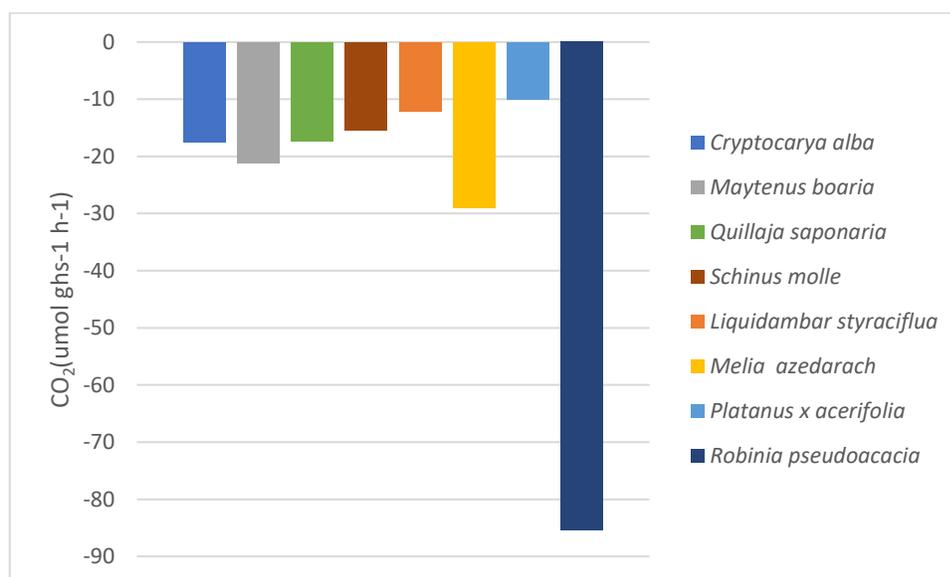


Figura 17. Flujo Neto de CO₂ en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana Campaña 2017.

Los resultados muestran que *R. pseudoacacia* es la especie que acumula más energía para el invierno ($85,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$), seguida de *M. azedarach* ($28,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$); este resultado es esperable ya que estas especies

son de hoja caduca, lo que les impide realizar fotosíntesis en invierno. En el caso particular de *R. pseudoacacia* presenta un flujo neto mayor que las demás especies; esto podría deberse a la diferencia de edad entre las especies, donde los demás individuos eran ejemplares adultos, mientras que las *R. pseudoacacia* eran jóvenes. Por otra parte, *Liquidambar* y *P. x acerifolia* pese a ser de hoja caduca, no presentan una diferencia tan notoria entre sus flujos; esto podría deberse a que, además de estar almacenando energía para el invierno, las primeras especies se encuentran aún en fase de crecimiento. Para descartar esta hipótesis habría que hacer un estudio considerando las edades de las especies estudiadas y sus ciclos de crecimiento, lo que va más allá del alcance de este trabajo.

5.1.2. Flujo de Metano

Las Figuras 18 y 19 muestran los flujos de metano en presencia y ausencia de luz, respectivamente para las ocho especies estudiadas.

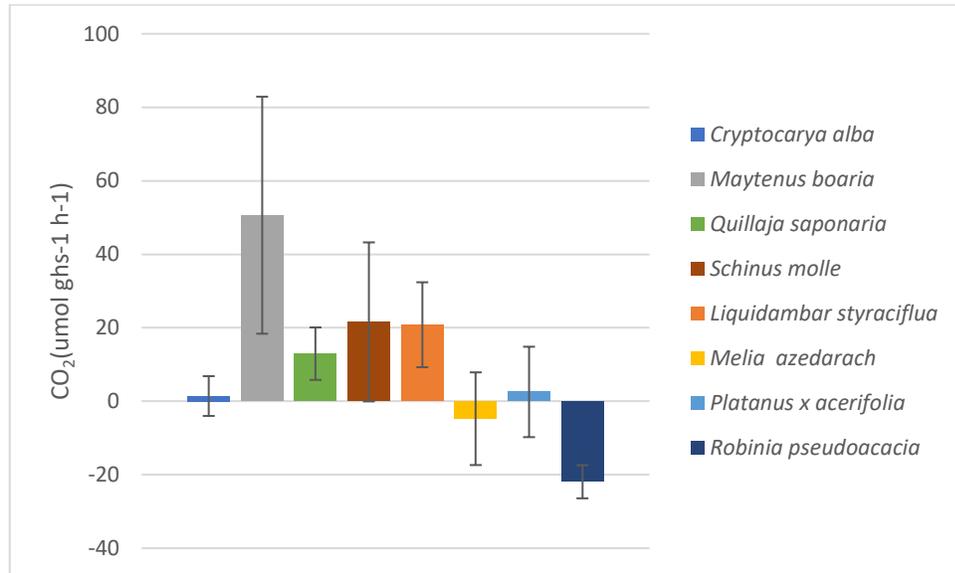


Figura 18. Flujo de metano promedio en presencia de luz, en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana. Campaña 2017. (n=5)

Pese a que los resultados del estudio t mostraron que no existe un flujo de metano significativamente distinto de cero, la figura 17 parece indicar una tendencia a la emisión de metano desde las especies *L. styraciflua*, *M. boaria*, *Q. saponaria* y *S. molle*, mientras que las especies *R. pseudoacacia* y *M. azedarach* tienden a la absorción de metano en la presencia de luz.

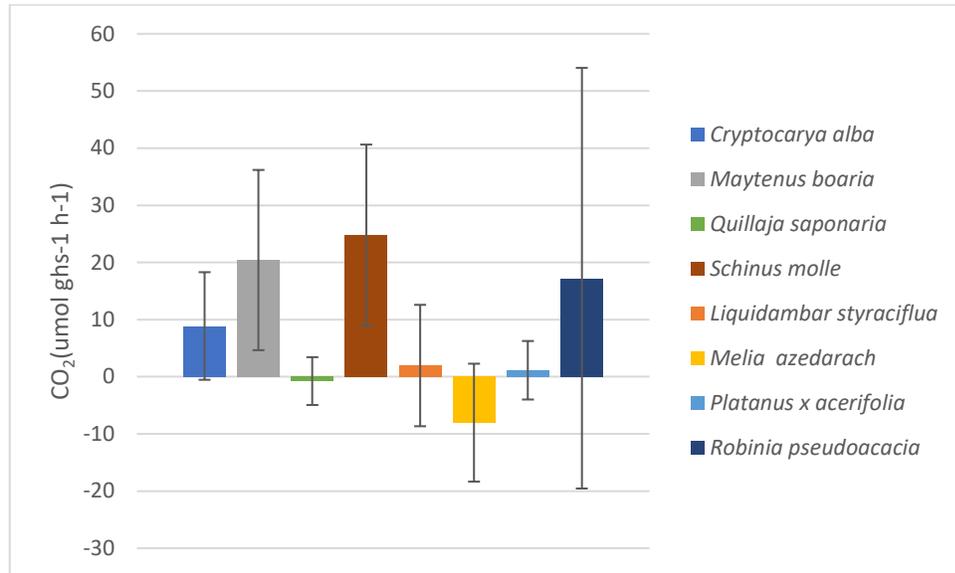


Figura 19. Flujo de metano promedio en ausencia de luz en especies arbóreas nativas y exóticas de la Región Metropolitana. Campaña 2017.

En el estudio con privación de luz, *M. boaria* y *S. molle* mantienen su tendencia a la emisión de metano, a la cual se suma *C. alba*. Por su parte, *R. pseudoacacia* pese a presentar un promedio positivo presenta una alta variabilidad en su comportamiento, lo que no permite establecer una tendencia clara, caso similar a la *M. azedarach* y su flujo promedio negativo de metano. Sería necesario un estudio más amplio con un mayor número de individuos para poder aclarar el comportamiento de las especies.

5.2. Campaña 2018

5.2.1. Emisión de terpenos en *Platanus x acerifolia*

La Figura 20 muestra las concentraciones promedio (5 días) de isopreno emitidas a diferentes horas del día. La mayor emisión se presenta a las 11:00 con una concentración de $27.199 \pm 29.457 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la menor a las 13:00 con $20.481 \pm 19.609 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No se encontró una relación entre la concentración de isopreno, las variables ambientales y la fotosíntesis o respiración.

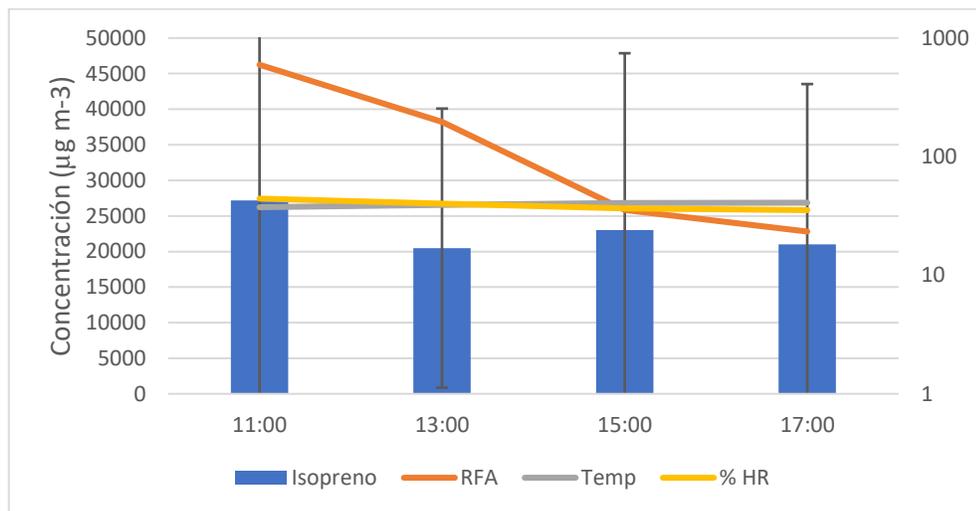


Figura 20. Concentración promedio 5 días de isopreno y desviaciones standard en *Platanus x acerifolia* y las variables ambientales RFA, temperatura y humedad relativa a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018

Las concentraciones promedio de los 5 días de medición de monoterpenos y sesquiterpenos se muestran en la figura 21. A lo largo del día el compuesto

mayormente emitido es el linalol, con concentraciones entre $280 \pm 182 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 17:00 y $485 \pm 545 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15:00 horas. Los siguientes compuestos mayormente emitidos son p-cimeno y limoneno. Los compuestos con menores emisiones son los sesquiterpenos transcariofileno y alfa-humuleno, con concentraciones máximas de $29,1 \pm 10,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $13,5 \pm 3,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

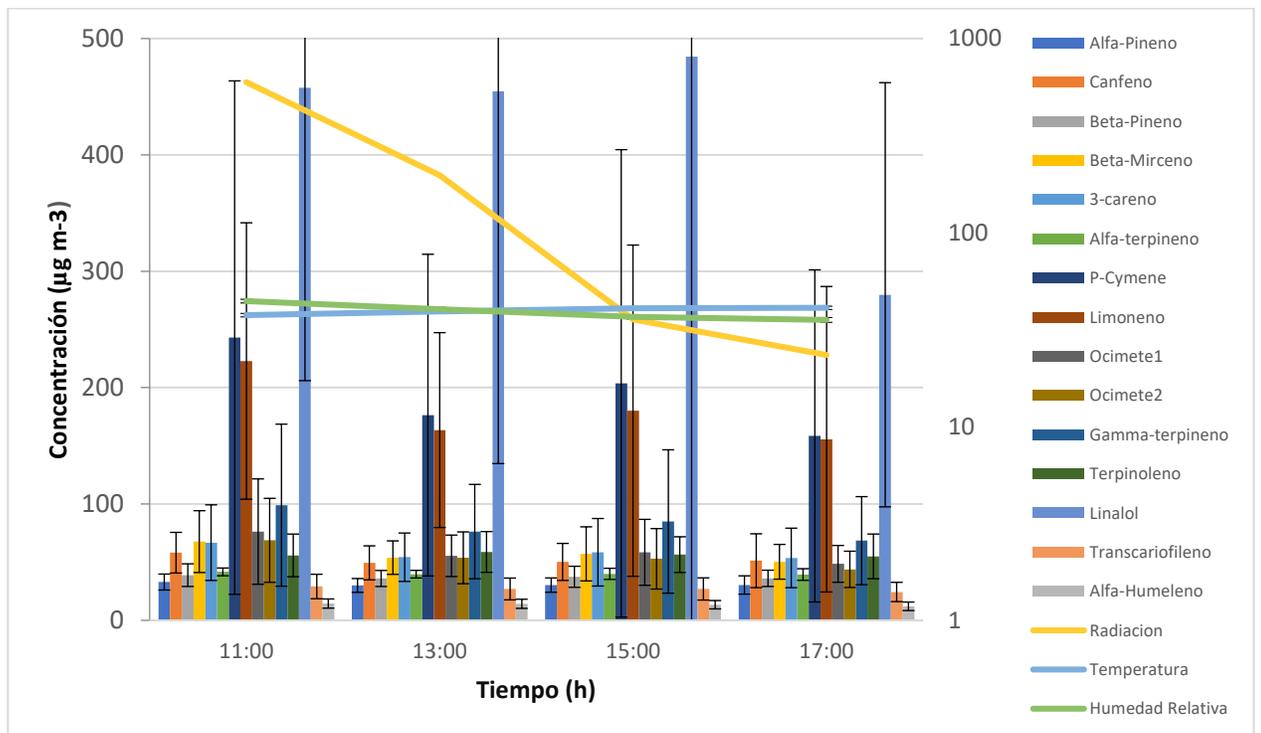


Figura 21. Concentraciones promedio 5 días de monoterpenos y sesquiterpenos en *platanus x acerifolia* a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano Campaña 2018

El análisis entre las concentraciones de terpenos y las variables ambientales no mostró ninguna correlación significativa. El cuadro completo se muestra en el Anexo 3.

5.2.2. Factores de emisión de *Platanus x acerifolia*

Se calcularon y normalizaron los factores de emisión de *P. x acerifolia* como se muestra en la figura 22.

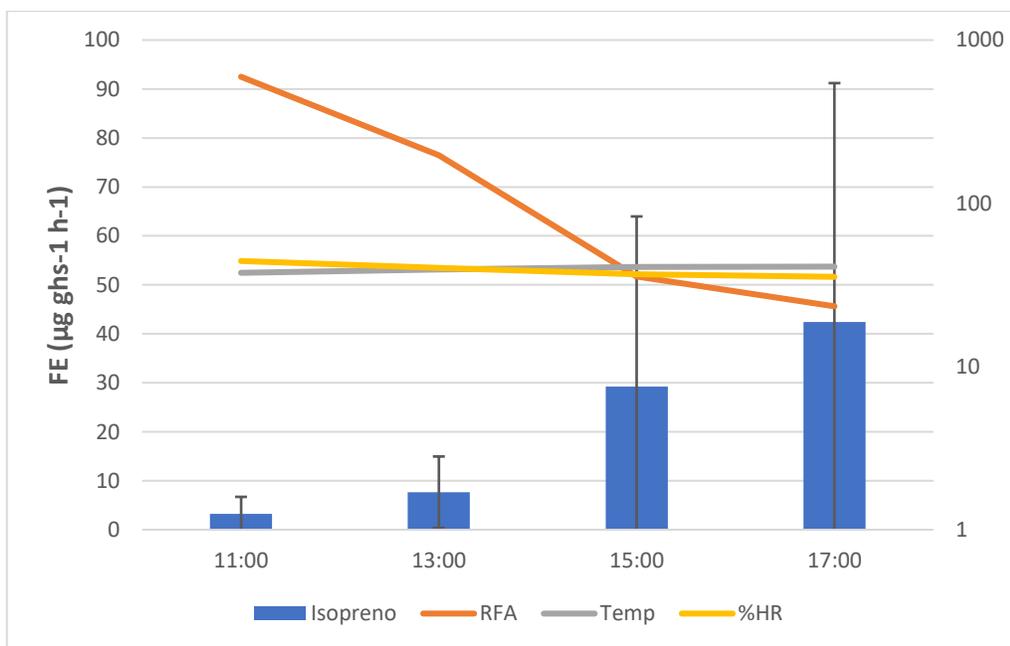


Figura 22. Factores de emisión promedio (5 días) normalizados para isopreno emitido por *Platanus x acerifolia* a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018

El mayor FE se obtiene a las 17:00 h con un valor de $42,4 \pm 48,8 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ y el menor (13 veces inferior) a las 11:00 con un valor de $3,2 \pm 3,46 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$. Se observa claramente el aumento del FE a lo largo del día, situación derivada de la alta contribución de la radiación en el factor de normalización del isopreno; este arreglo matemático permite realizar comparaciones de carácter interregional, pero claramente dificulta los análisis de comportamiento de las especies a nivel local. En los FE sin normalizar no se presentan variaciones tan importantes a lo largo del día. Así, el promedio del FE normalizado obtenido para isopreno es de $20,62 \pm 18,41 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$, valor en el rango del obtenido por Scholz (2019) de $18,5 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ en Suecia, en tanto Aydin et al. (2014) obtuvieron un FE de $27 \pm 25,3 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ en individuos de la especie *Platanus orientalis* en Turquía. Ehsan et al. (2017) obtuvo valores promedio de emisión de entre 1,5 y $45 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ dependiendo de la temporada en Irán en la variante *P. orientalis*, lo que podría indicar una fuerte dependencia de las emisiones con respecto a la época del año.

La figura 23 muestra los FE promedio (5 días) normalizados de los monoterpenos más sesquiterpenos totales. En general estos compuestos tienen mayores emisiones en la mañana y disminuyen en la tarde, lo que se contrapone al comportamiento del isopreno normalizado. Un motivo matemático puede ser que la normalización de los monoterpenos contempla la temperatura únicamente, la que fue estable durante el día, mientras que el isopreno contiene un factor dependiente de la radiación, la cual presentó grandes variaciones a lo largo de la campaña.

En el caso de los monoterpenos y sesquiterpenos, el mayor FE pertenece al linalol con un valor de $0,047 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ a las 11:00 horas, mientras que el menor es el FE del alfa-humuleno con $0,0009 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ a las 17:00 horas y un FE promedio para monoterpenos totales de $0,11 \pm 0,03 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$. Scholz (2019) informó un FE de monoterpenos totales entre 0,1 y $3,9 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ en *Platanus x hispánica* (o *P.x acerifolia*). Aydin et al. (2014) informó un FE de monoterpenos totales de $0,025 \pm 0,006 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ en *Platanus orientalis*.

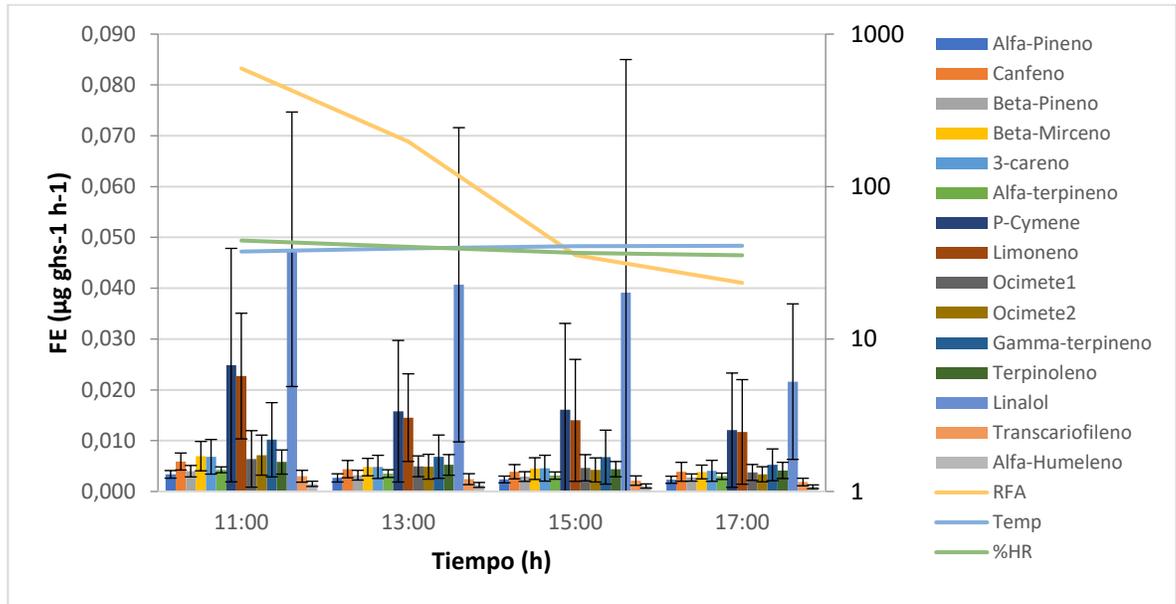


Figura 23. Factores de emisión promedio (5 días) normalizados de monoterpenos, transcariofileno y alfa-humuleno en *Platanus x acerifolia* a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018.

El cuadro 12 muestra los FE promedio diarios de todos los compuestos analizados, el FE total de *P. x acerifolia* y sus respectivos IPFO. La contribución de isopreno al FE total es de 99,4% y en el IPFO representa un 99,6%, lo que mantiene al isopreno como la emisión biogénica de *P.x acerifolia* principal en la generación potencial de ozono.

Cuadro 10. Factores de emisión promedio diarios de terpenos con sus desviaciones estándar, índice potencial de formación de ozono y factor de emisión total para *Platanus x acerifolia*. Campaña 2018.

Compuesto	Factor de emisión	Desviación estándar	IPFO
Isopreno	20,6	18,4	2351
Alfa-Pineno	0,0026	0,00048	0,18
Canfeno	0,0045	0,00095	0,031
Beta-Pineno	0,0032	0,00055	0,23
Beta-Mirceno	0,0050	0,0014	-
3-careno	0,0051	0,0012	0,12
Alfa-terpineno	0,0034	0,00057	0,52
P-Cymene	0,017	0,0054	-
Limoneno	0,015	0,0048	1,1
Ocimene1	0,0049	0,0011	-
Ocimene2	0,0049	0,0016	-
γ -terpineno	0,0073	0,0021	1,1
Terpinoleno	0,0049	0,00076	0,35
Linalol	0,037	0,011	3,7
Transcariofileno	0,0024	0,00049	0,35
Alfa-Humuleno	0,0012	0,00025	0,18
total	20,7	18,5	2359

Las correlaciones entre los FE y las variables ambientales fueron significativas entre la humedad relativa y los compuestos Alfa-terpineno y alfa-humuleno, con valores de 0,646 y 0,635 respectivamente dentro del intervalo de confianza del 99%. El cuadro completo de correlaciones encuentra en el Anexo 4.

5.2.3. Emisión de terpenos por *Schinus molle*

La figura 24 muestra las concentraciones de isopreno emitidas a distintas horas del día, presentando un aumento importante a lo largo del día desde las 11:00 con $3286 \pm 2608 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta las 17:00 con $9823 \pm 7058 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Morales et al. (2013) obtuvo concentraciones de entre 71,1 y 122 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante otoño y entre 70,1 y 483 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante primavera en un ejemplar adulto de *S. molle*, con una tendencia a la disminución de isopreno con el avance del día. En este caso el muestreo se efectuó en verano y las diferencias en concentración y distribución horaria podrían deberse principalmente a la época del año en la que se realizó el estudio, ya que las condiciones meteorológicas y amenazas externas, como plagas u otras son diferentes en estos períodos. Otras posibilidades son la variabilidad individual de la especie, donde se puede considerar su edad y ciclos de crecimiento, o las diferencias en el método de muestreo y cuantificación de las especies químicas.

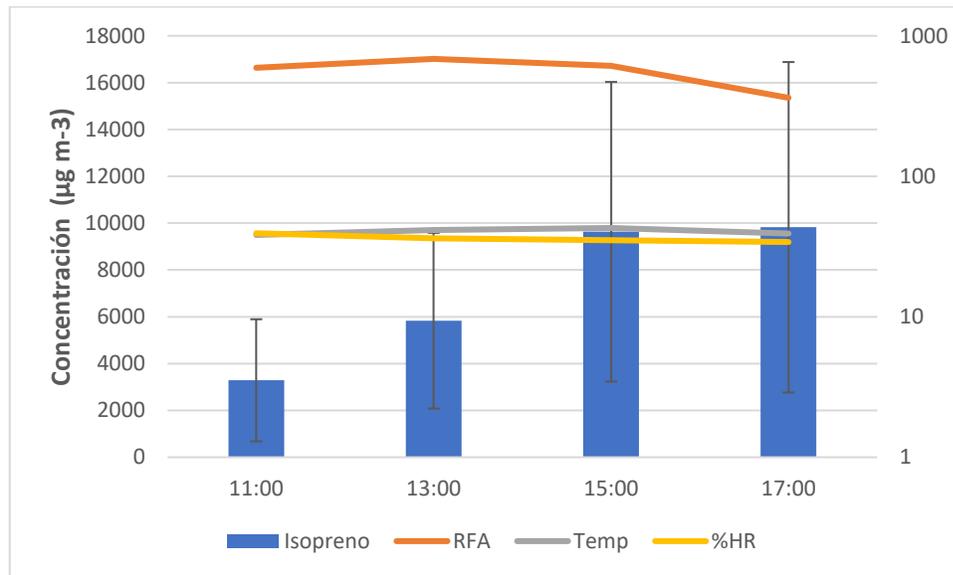


Figura 24. Concentración promedio 5 días de isopreno y desviaciones standard en *Schinus molle* y las variables ambientales RFA, temperatura y humedad relativa a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018

Las concentraciones de monoterpenos se muestran en la figura 25. En esta especie no se detectaron emisiones de ocimene, alfa-humuleno, linalol ni transcariofileno. Morales et al. (2013) cuantificó linalol, pero no encontró emisiones de canfeno y alfa terpineno durante otoño, lo que podría indicar emisiones específicas de algunos terpenos en determinadas estaciones del año. El monoterpeno mayormente emitido fue limoneno, seguido de terpinoleno; en el caso de Morales et al. (2013) la mayor emisión fue de 1,8 cineol, seguido de beta-mirceno y limoneno. En general, la emisión de limoneno mostró un comportamiento similar al isopreno, con su menor

concentración a las 11:00 h con $509,1 \pm 273,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mayor a las 17:00 h con $1.496 \pm 1.388 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El resto de los compuestos, exceptuando beta pineno, presentaron un aumento de las 11:00 a las 15:00 h y luego una disminución a las 17:00 horas; esta diferencia en comportamiento puede deberse a que los monoterpenos tienden a almacenarse en la hoja y se liberan de acuerdo a necesidad del árbol, mientras que el isopreno se produce y libera inmediatamente al ambiente.

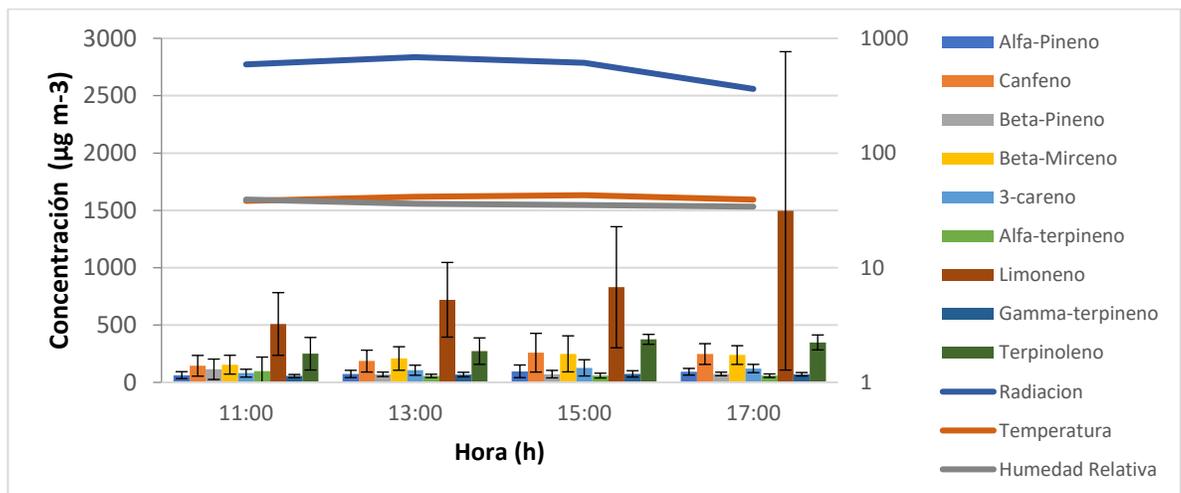


Figura 25. Concentraciones promedio (5 días) de monoterpenos y sus desviaciones estándar emitidas desde *Schinus molle* a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018.

El análisis entre las concentraciones de terpenos y las variables ambientales mostró ser significativa sólo para la relación terpinoleno-temperatura. El cuadro completo de correlaciones se encuentra en el anexo 5.

5.2.4. Factores de emisión en *Schinus molle*

Los FE normalizados para isopreno que se muestran en la figura 26; presentan un aumento con el avance del día, pasando de un valor mínimo de $1,1 \pm 0,8 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ hasta $4,4 \pm 2,9 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$. Pese a presentar un comportamiento similar al *P. x acerifolia*, los FE en *S. molle* son un 33,2%, 26,1%, 12,35% y 10,35% menores que los FE de *P. x acerifolia* a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas, respectivamente, lo que demuestra emisiones de isopreno, bastante menores por parte del *S. molle* con respecto al *P. x acerifolia* con la correspondiente implicancia para la potencial generación de ozono.

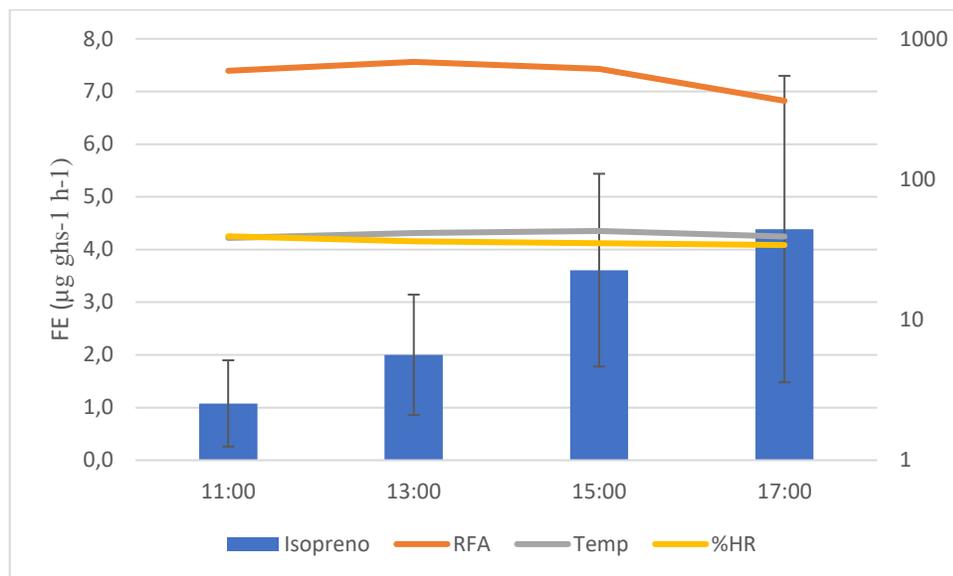


Figura 26. Factor de emisión normalizado de isopreno desde *Schinus molle* a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018

La figura 27 muestra los FE de monoterpenos y sesquiterpenos para *S. molle*. El aumento de las emisiones es constante a lo largo del día, exceptuando al beta-pineno que disminuye desde las 11:00 horas. El compuesto mayormente emitido es el limoneno con un FE de $0,32 \pm 0,2 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$, seguido de terpinoleno, canfeno y beta-mirceno con FE de $0,09 \pm 0,02 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$, $0,063 \pm 0,027 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ y $0,061 \pm 0,029 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$, respectivamente y todos a las 17:00 horas. Con respecto al trabajo de Morales et al. (2013) se aprecia que el compuesto con mayor FE es el 1,8 cineol, no cuantificado en este estudio, seguido por el beta-mirceno y luego el limoneno, este último presentando concentraciones inferiores, en todas las épocas del año; estos 3 compuestos

presentaron las mayores emisiones de los monoterpenos, cambiando el orden solamente en primavera, donde el beta-mirceno superó a las emisiones de 1.8 cineol.

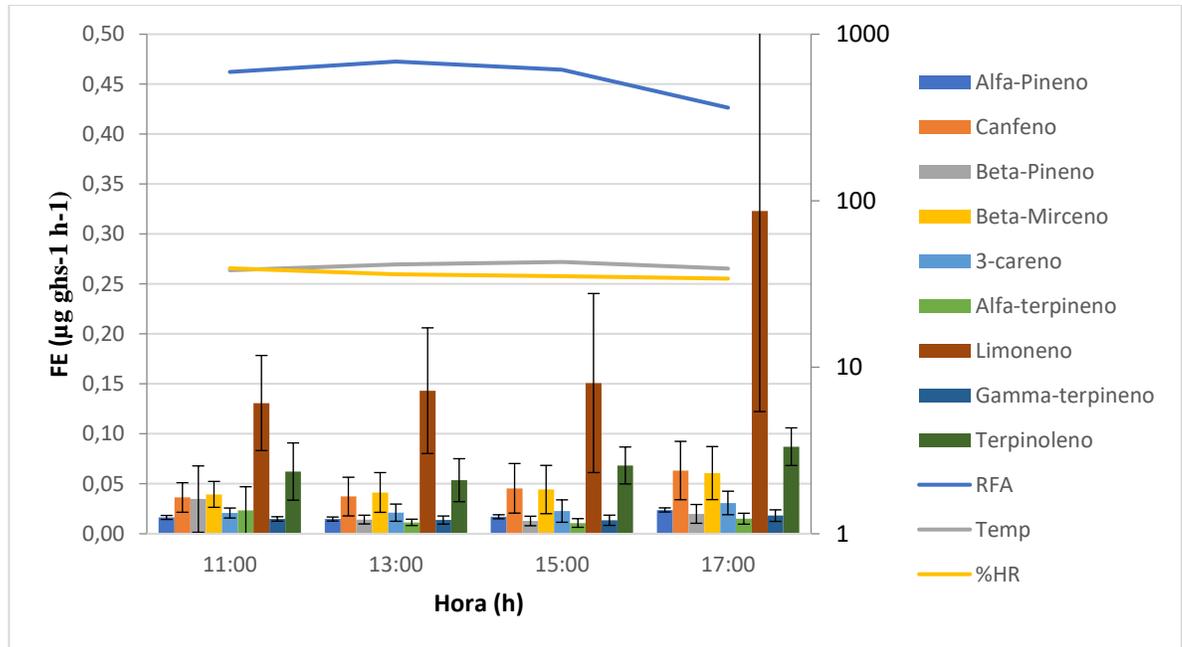


Figura 27. Factores de emisión promedio normalizados de monoterpenos en *Schinus molle* a las 11:00, 13:00, 15:00 y 17:00 horas en verano. Campaña 2018.

El cuadro 13 muestra los FE promedio diarios de todos los compuestos detectados, el FE total de *S. molle* y su IPFO. La contribución de isopreno al FE es de 86,3%. *S. molle* presenta menor cantidad de monoterpenos, pero con mayores emisiones que el *P. x acerifolia*. El IPFO total de *Schinus molle* está constituido en un 92,1% por el factor de emisión de isopreno, lo que convierte a este compuesto en el principal precursor de ozono por parte de esta especie.

Cuadro 11. Factores de emisión diarios y sus desviaciones estándar de monoterpenos y factor de emisión total de *Schinus molle*. Campaña 2018.

Compuesto	Factor de emisión	Desviación estándar	IPFO
Isopreno	2,7	1,5	315
Alfa-Pineno	0,018	0,0040	1,2
Canfeno	0,046	0,012	0,32
Beta-Pineno	0,020	0,010	2,3
Beta-Mirceno	0,046	0,0097	-
3-careno	0,024	0,0047	0,57
Alfa-terpineno	0,015	0,0058	2,3
Limoneno	0,19	0,091	13,2
γ -terpineno	0,015	0,0021	2,
Terpinoleno	0,068	0,014	4,9
FE total	3,2	1,6	342

No se encontraron correlaciones significativas entre los FE de *S. molle* y las variables ambientales estudiadas. Pueden verse los resultados de este análisis en el anexo 6.

5.2.5. Metano y CO₂

El cuadro 14 muestra los valores p de la prueba t de Student, donde $p < 0,05$ indica que existe una diferencia significativa de cero en la variable. En la campaña 2018 se realizó un análisis con un mayor número de repeticiones (n=20) que en la campaña 2017 (n=5). No se encontró un flujo

significativamente diferente de cero de metano desde las especies estudiadas en ninguna de las dos campañas.

Cuadro 12. Valores de p en prueba de t de Student y Wilcoxon para metano y CO₂ en *Platanus x acerifolia* y *Schinus molle* (n=20). Campaña 2018.

Especie	t _{CH₄}	t _{CO₂}	W _{CH₄}	W _{CO₂}
<i>Platanus x acerifolia</i>	0,4881	0,0001919	0,5706	0,000001907
<i>Schinus molle</i>	0,5165	0,002713	0,5958	0.001086

La figura 28 muestra el flujo de metano en las especies estudiadas, con valores promedio de $0,0095 \pm 0,06 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ y $-0,061 \pm 0,41 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ para *P. x acerifolia* y *S. molle*, respectivamente, donde los valores positivos indican emisión del compuesto y los valores negativos indican absorción.

Diferentes investigadores han encontrado emisiones variables de metano en plantas pequeñas (Terazawa et al. 2007; Gauci et al. 2010; Diaz et al. 2018); en estas investigaciones las cámaras de concentración de metano están conectadas al suelo o muy cerca de este, por lo que los resultados podrían incluir contribuciones de metano debidas a la cercanía con el suelo; en

cambio, en este caso se trabajó en altura de modo eventuales contribuciones desde el suelo estarían disminuidas, resultando en flujos no significativos.

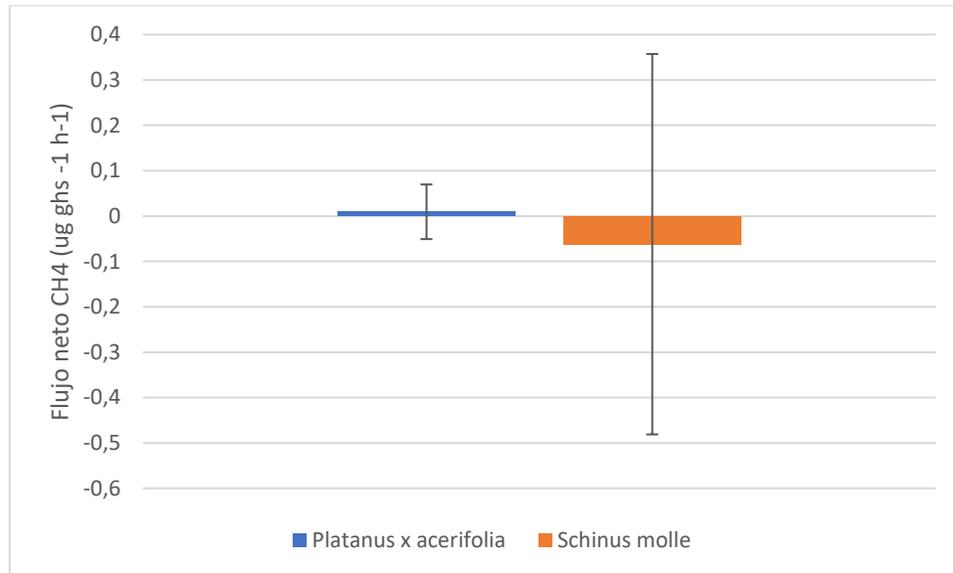


Figura 28. Flujo neto de metano desde *Platanus x acerifolia* y *Schinus molle*. en presencia de luz. Campaña 2018; n = 20.

La figura 29 muestra el flujo neto de CO₂. El valor promedio de absorción de CO₂ es $-0,0033 \pm 0,0032$ g ghs⁻¹h⁻¹ en *P. x acerifolia* y $-0,00424 \pm 0,0055$ g ghs⁻¹h⁻¹ en *S. molle*. En ambos casos existe un promedio negativo, lo que indica una fijación de carbono por ambas especies, siendo un 29% mayor para *S. molle*. Se esperaría que la fijación de CO₂ de *P. x acerifolia* fuera mayor debido a que su FE total es 6,4 veces el de *S. molle*, sin embargo, no es el caso.

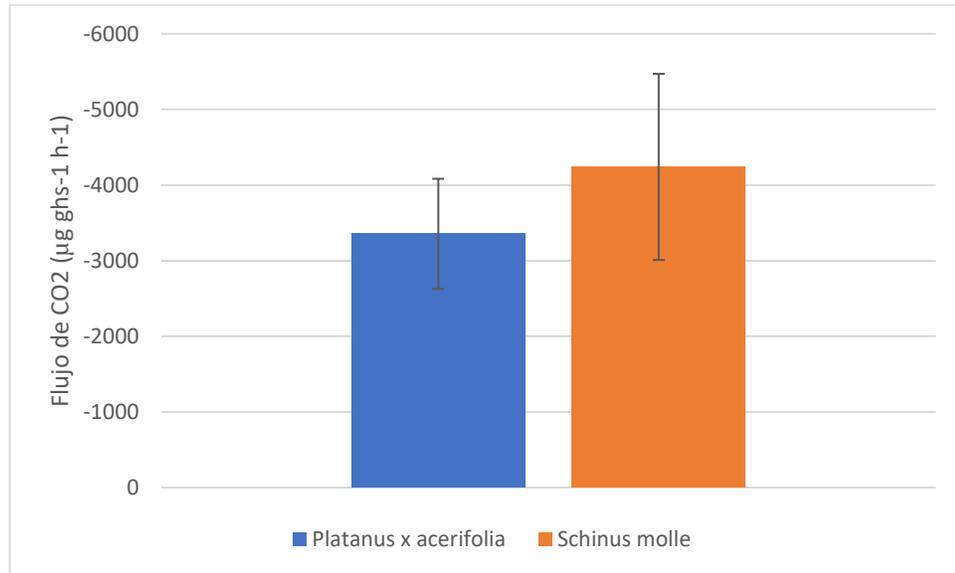


Figura 29. Flujo neto CO₂ desde *Platanus x acerifolia* y *Schinus molle* en presencia de luz. Campaña 2018; n = 20.

5.2.6. Flujo de Carbono

El cuadro 15 muestra los FE de los terpenos estudiados y el flujo de CO₂ de *P. x acerifolia*. La fijación por fotosíntesis es el mayor flujo de carbono variando en 2% por las emisiones de terpenos. Isopreno es el mayor contribuyente de C a la atmósfera dado su alto factor de emisión comparado con los monoterpenos y los sesquiterpenos. Linalol, p-cimeno y limoneno son los monoterpenos con mayores flujos de C.

Cuadro 13. Flujos de carbono en *Platanus x acerifolia*. Campaña 2018.

Compuesto	Cantidad de carbonos	FE/Flujo compuesto ($\mu\text{g ghs}^{-1} \text{h}^{-1}$)	Flujo carbono ($\mu\text{g ghs}^{-1} \text{h}^{-1}$)
Isopreno	5	20,6	18,2
Alfa-Pineno	10	0,0026	0,0024
Canfeno	10	0,0045	0,0040
Beta-Pineno	10	0,0032	0,0028
Beta-Mirceno	10	0,0050	0,0044
3-careno	10	0,0051	0,0045
Alfa-terpineno	10	0,0034	0,0031
P-Cymene	10	0,017	0,015
Limoneno	10	0,016	0,014
Ocimene1	10	0,0049	0,0044
Ocimene2	10	0,0049	0,0043
γ -terpineno	10	0,0073	0,0064
Terpinoleno	10	0,0049	0,0043
Linalol	10	0,037	0,029
Transcariofileno	15	0,0024	0,0021
Alfa-Humuleno	15	0,0012	0,0011
CO ₂	1	-3355	-914
Total			-896

El flujo de carbono fijado por *S. molle*, que se muestra en el cuadro 16, varía en 0,24% debido a las emisiones de terpenos. El isopreno es la principal vía de emisión de carbono, seguida de limoneno.

El flujo total de carbono se presenta como un valor negativo, lo que indica una fijación de carbono por parte de ambas especies. Esta incorporación es un 28,64% mayor en *S. molle*. Considerando la información de los FE se tiene que el *P. x acerifolia* realiza menor fijación y mayor emisión de carbono,

convirtiéndolo en una peor alternativa en lo que respecta a reducir el carbono en la atmósfera; por otro lado, el *S. molle* al estar fijando más C estaría generando una mayor cantidad de biomasa que podría tener como objetivo aumentar el tamaño del individuo. Otra posible explicación para la diferencia en el flujo de carbono va relacionada al rendimiento interno del árbol, donde el *S. molle* puede que necesite mayor cantidad de moléculas con base carbonada para sus procesos metabólicos. El *P. x acerifolia* es una especie exótica en Chile, por lo tanto, puede que se encuentre bajo un estado constante de estrés que realce sus emisiones por sobre otras especies como las estudiadas en el artículo de Préndez et al. (2013).

Cuadro 14. Flujos de carbono en *Schinus molle*. Campaña 2018.

Compuesto	Cantidad de carbonos	FE/Flujo compuesto ($\mu\text{g ghs}^{-1} \text{h}^{-1}$)	Flujo carbono ($\mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$)
Isopreno	5	2,7	2,4
Alfa-Pineno	10	0,018	0,016
Canfeno	10	0,046	0,040
Beta-Pineno	10	0,020	0,018
Beta-Mirceno	10	0,046	0,041
3-careno	10	0,024	0,021
Alfa-terpineno	10	0,015	0,013
Limoneno	10	0,19	0,16
γ -terpineno	10	0,015	0,013
Terpinoleno	10	0,068	0,060
CO ₂	1	-4240	-1156
Total			-1153

6. CONCLUSIONES

- ❖ No se encontraron flujos de emisión de metano significativos en ninguna de las 8 especies estudiadas
- ❖ El factor de emisión total de *P. x acerifolia* es $20,7 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$, mientras que en *Schinus molle* es de $3,2 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$. Ambos a nivel de hojas.
- ❖ El isopreno es el terpeno con mayor emisión registrada en ambas especies, con una contribución al factor de emisión total del 99,4% y 86,3% en *P. x acerifolia* y *S. molle*, respectivamente.
- ❖ La emisión de isopreno normalizada aumenta a lo largo del día, llegando a su máximo a las 17:00 tanto en *P. x acerifolia* como en *S. molle*
- ❖ En *P. x acerifolia* la mayor emisión de monoterpenos corresponde al linalol con $0,047 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ a las 11:00, en tanto que en *S. molle* el monoterpeno mayoritario fue el limoneno con un FE de $0,32 \mu\text{g ghs}^{-1}\text{h}^{-1}$ a las 17:00 horas

- ❖ No se encontraron correlaciones significativas entre las variables ambientales y las concentraciones y/o FE normalizados de terpenos, exceptuando la relación terpinoleno-temperatura en *Schinus molle*.
- ❖ El IPFO total en *S. molle* es de 342 y se encuentra constituido en un 92,1% por isopreno. El *P. x acerifolia* presenta un IPFO total de 2359, esto es 6,9 veces mayor, con una contribución del isopreno del 99,6%. Ambos a nivel de hojas.
- ❖ El *S. molle* presenta una fijación de C mediante fotosíntesis de un 26,4% mayor que en *P. x acerifolia*.
- ❖ La fijación de carbono total en *S. molle* es mayor que en *P. x acerifolia*, lo que lo convierte en una mejor alternativa para realizar secuestro de CO₂ desde la atmósfera.
- ❖ En *P. x acerifolia* la fijación de carbono representa el 98% del flujo total de carbono, en *S. molle* la fijación equivale a 99,7%

7. BIBLIOGRAFIA

- Ahern, K., & Rajagopal, I. (2019). *Biochemistry Free & Easy*. Oregon, USA.
- Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x. *Atmospheric Environment* 34, 2063-2101.
- Aydin, Y., Yaman, B., Koca, H., Dasmedir, O., Kara, M., Altiok, H., & Elbir, T. (2014). Biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from forested areas in Turkey: Determination of specific emission rates for thirty-one tree species. *Science of The Total Environment* 490, 239-253.
- Bogner, J., & Spokas, K. (2010). Landfill Methane. En *Methane and Climate Change* (págs. 175-200).
- Brilli, F., Frattoni, M., Prestininzi, M., Franco Spanedda, A., & Loreto, F. (2009). Constitutive and herbivore-induced monoterpenes emitted by *Populus × euroamericana* leaves are key volatiles that orient *Chrysomela populi* beetles. *Plant, Cell and Environment* 32, 542-552.
- Brito, C., Bown, H., Fuentes, J., Franck, N., & Perez-Quezada, J. (2014). Mesophyll conductance constrains photosynthesis in the three common sclerophyllous species in Central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 87, 1-12.
- Cakmak, S., Dales, R., & Blanco, V. (2007). Air pollution and mortality in Chile: susceptibility among the elderly. *Environmental Health Perspectives* 115, 524-527.
- Calfapietra, C., Pallozzi, E., & Lusini, I. (2008). Modification of BVOC Emissions by changes in Atmospheric CO₂ and air Pollution. En U. Niinemets, & R. Monson (Edits.), *Biology, Controls and Models of Tree Volatile Organic Compound Emissions* (págs. 253-284). Estonia: Springer.
- Camargo, Y., Bolaño, T., & Álvarez, A. (2010). EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES DE ORIGEN. *Revista del Instituto de Investigaciones Tropicales*, 77-86.
- Carlton, A., Wiedinmyer, C., & Krol, J. (2009). A review of Secondary Organic Aerosol (SOA). *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 4987–5005.
- Carskawa, D., & Rhys-Tyler, G. (2013). New insights from comprehensive on-road measurements of NO_x, NO₂ and NH₃ from vehicles emission remote sensing in london, UK. *Atmospheric Environment*, 339-347.

- Chameides, W., Fehsenfeld, F., Rodgers, M., Cardelino, C., Martinez, J., Parrish, D., . . . Wang, T. (1992). Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere. *Journal of Geophysical research, atmospheres* 97, 6037-6055.
- Chen, D., Chen, X., Tu, Y., Wand, B., Lou, C., Ma, T., & Diao, Q. (2015). Effects of the mulberry leaf flavonoid and resveratrol on methane emission and nutrient digestion in sheep. *Animal Nutrition* 1, 362-367.
- Chen, H., Wang, B., Xia, D.-S., Fan, Y.-J., Liu, H., Tang, Z.-r., & Ma, S. (2019). The influence of roadside trees on the diffusion of road traffic pollutants and their magnetic characteristics in a typical semi-arid urban area of Northwest China. *Environmental Pollution* 252, 1170-1179.
- Cheng, A., Lou, Y., Mao, Y., Lu, S., Wang, L., & Chen, X. (2007). Plant Terpenoids: Biosynthesis and Ecological Functions. *Journal of Integrative Plant Biology* 49, 179-186.
- Chu, L., Deng, S., Zhao, R., Deng, J., & Kang, X. (2016). Comparison of Adsorption/Desorption of Volatile Organic Compounds (VOCs) on Electrospun Nanofibers with Tenax TA for Potential Application in Sampling. *PLoS One* 11.
- Correa-Galleguillos, P., & De la Barrera, F. (2014). Análisis de la estructura y de la composición del arbolado en parques del área metropolitana de Santiago. *Chloris Chilensis* 17.
- Criollo, C., Assar, R., Cáceres, D., & Préndez, M. (2016). Arbolado urbano, calidad del aire y afecciones. *Revista chilena de enfermedades respiratorias* 32, 77-86.
- DeBrosse, S., & Kerr, D. (2016). Chapter 12 - Pyruvate Dehydrogenase Complex Deficiency. En *Mitochondrial Case Studies, Underlying Mechanisms and Diagnosis* (págs. 93-101). Usa: Elsevier Academic Press.
- Decreto Supremo N° 112/02, (2002). Del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, que Aprueba la Norma de Calidad Primaria de Aire para Ozono (O3).
- Decreto Supremo N° 131/96, (1996). Declara Zona Saturada por Ozono, Material Particulado Respirable, Partículas en Suspensión y Monóxido de Carbono y Zona Latente por Dióxido de Nitrógeno, al Área que Indica. (Región Metropolitana).
- Decreto Supremo N° 131/96, (1996). Declara Zona Saturada por Ozono, Material Particulado Respirable, Partículas en Suspensión y Monóxido de Carbono y Zona Latente por Dióxido de Nitrógeno, al Área que Indica. (Región Metropolitana).
- Denman, K., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P., Dickinson, R., . . . Zhang, X. (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. En L. Kenneth, & G. Brasseur, *Climate Change* (págs. 501-568).

- Derwent, R., Jenkin, M., Passant, N., & Pilling, M. (2007). Photochemical ozone creation potentials (POCPs) for different emission sources of organic compounds under European conditions estimated with a Master Chemical Mechanism. *Atmospheric Environment* 41, 2570-2579.
- Dewick, P. (2002). The biosynthesis of C5-C25 terpenoid compounds. *Natural Product Reports* 19, 181-222.
- Díaz, M. (2018). *Flujos de CO₂ y CH₄ en suelos de matorrales y bosques esclerófilos en la Reserva Nacional Roblería del Cobre de Loncha, Región Metropolitana*. Santiago: Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniera Forestal.
- Dubey, V., Bhalla, R., & Luthra, R. (2003). An overview of the non-mevalonate pathway for terpenoid biosynthesis in plants. *Journal of biosciences*, 637-646.
- Ehsan, K., Anoushirvan, S., Mohammad, A., & Thomas, S. (2017). In situ emission of BVOCs by three urban woody species. *Urban Forestry & Urban Greening* 21, 153-157.
- Elshorbany, Y., Kleffmann, J., Kurtenbach, R., Rubio, M., Lissi, E., Villena, G., . . . Wiesen, P. (2009). Summertime photochemical ozone formation in Santiago, Chile. *Atmospheric Environment* 43, 6398-6407.
- Escobedo, F., & Chacalo, A. (2008). Estimación preliminar de la descontaminación atmosférica por parte del arbolado urbano de la Ciudad de México. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América* 33, 29-33.
- Fehsenfeld, F., Calvert, J., Fall, R., Goldan, P., Guenther, A., Hewitt, C., . . . Zimmermann, P. (1992). Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry. *Global Biogeochemistry* 6, 389-430.
- Firn, R., & Joenes, C. (2006). Do we need a new hypothesis to explain plant VOC emissions? *Trends Plant Science* 11, 112-113.
- Forester, C., & Wells, J. (2011). Hydroxyl radical yields from reactions of terpene mixtures with. *Indoor Air*, 400-409.
- Fraser, W., Blei, E., Fry, S., Newmann, M., Reay, D., Smith, K., & McLeod, A. (38). Emission of methane, carbon monoxide, carbon dioxide and. *Plant, Cell and Environment*, 980-989.
- Frins, E., Bobrowski, N., Osorio, M., Casaballe, N., Berlsterli, G., Wagner, T., & Platt, U. (2014). Scanning and mobile multi-axis DOAS measurements of SO₂ and NO₂ emissions from an electric power plant in Montevideo Uruguay. *Atmospheric Environment*, 348-356.
- Gauci, V., Gowing, D., Hornibrook, E., Davis, J., & Dise, N. (2010). Woody stem methane emission in mature wetland alder trees. *Atmospheric Environment* 44, 2157-2160.

- Gramsch, E., Gianni, L., Gidhagen, L., Segersson, D., Castillo, M., Vasquez, Y., . . . Donoso, R. (2014). *Informe Final: Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana*. Santiago, Chile.
- Guenther, A., Jiang, X., Heald, C., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L., & Wang, X. (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. *Geoscientific Model Development* 5, 1471-1492.
- Guenther, A., Zimmerman, P., Harley, P., Monson, R., & Fall, R. (1993). Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical research, Atmospheres* 98, 12609-12617.
- Heldt, H. (2005). *Plant Biochemistry Third Edition*. Londres, UK: Elsevier Academic Press.
- Hernández, H. (2016). *Estructura y composición del arbolado de Santiago: actualización al 2014. Informe de Proyecto Fondecyt 1140319*. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de <http://www.gep.uchile.cl/ecourbe>
- Hernandez, J., & Villaseñor, N. (2018). Twelve-year change in tree diversity and spatial segregation in the Mediterranean city of Santiago, Chile. *Urban Forestry & Urban Greening* 29, 10-18.
- Huang, C., Chen, C., Li, L., Cheng, Z., Wang, H., Huang, H., . . . Cheng, Y. (2011). Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 4105-4120.
- Huang, G., Brook, R., Crippa, M., Janssens-Maenhout, G., Schieberle, C., Dore, C., . . . Friedrich, R. (2017). Speciation of anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds: a global gridded data set for 1970–2012. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 7683–7701.
- IQAir. (28 de Julio de 2019). *AirVisual*. Recuperado el 25 de Junio de 2019, de <https://www.airvisual.com/world-air-quality-ranking>
- Jerrett, M., Burnett, R., Pope, C., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., . . . Thun, M. (2009). Long-Term Ozone Exposure and Mortality. *The New England Journal of Medicine* 360, 1085-1095.
- Jie, S., Wu, F., Hu, B., Tang, G., Zhang, J., & Wand, Y. (2016). VOC characteristics, emissions and contributions to SOA formation during hazy episodes. *Atmospheric Environment*, 560-570.
- Kansal, A. (2009). Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: a review. *Journal of Hazardous Materials* 166, 17-26.

- Keppler, F., Hamilton, J., McRoberts, W., Vigano, I., Braß, M., & Röckmann, T. (2008). Methoxyl groups of plant pectin as a precursor of atmospheric methane: evidence from deuterium labelling studies. *New Phytologist* 178, 808-814.
- Kesselmeier, J., & Staudt, M. (1999). Biogenic Volatile Organic Compounds (VOC): An Overview on Emission, Physiology and Ecology. *Atmospheric Chemistry* 33, 23-88.
- Kesselmeier, J., Ciccioli, P., Kuhn, U., Stefani, P., Biesenthal, T., Rottenberger, S., . . . Andreae, O. (2002). Volatile organic compound emissions in relation to plant carbon fixation and the terrestrial carbon budget. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 73-1-73-9.
- Kinoyama, M., Nitta, H., Watanabe, A., & Ueda, H. (2008). The potential impact of ozone on materials in the U.K. *Atmospheric Environment* 30, 1053-1065.
- Lavado, A. (2012). *Las Condes como punto focal de la contaminación estival por ozono en la ciudad de Santiago*. Santiago: Memoria de Tesis para optar al título de Magister en Gestión y Planificación ambiental.
- Lee, D., Holland, M., & Falla, N. (1996). The potential impact of ozone on materials in the U.K. *Atmospheric Environment*, 1053-1065.
- Leiva, M., Araya, C., Mancilla, C., Seguel, R., & Norris, J. (2011). Uncertainty of ozone measurements with the primary standard reference photometer (SRP45). *Talanta*, 71-81.
- Lichtenthaler, H. (2007). Biosynthesis, accumulation and emission of carotenoids, α -tocopherol, plastoquinone and isoprene in leaves under high photosynthetic irradiance. *Photosynthetic Research* 92, 169-179.
- Lippmann, M. (1991). Health effects of tropospheric ozone. *Environmental Science & Technology* 25, 1954-1962.
- Loreto, F., & Schnitzler, J. P. (2010). Abiotic stresses and induced BVOCs. *Trends in the Plant Science*, 154-166.
- Loreto, F., & Velikova, V. (2001). Isoprene Produced by Leaves Protects the Photosynthetic Apparatus against Ozone Damage, Quenches Ozone Products, and Reduces Lipid Peroxidation of Cellular Membranes. *ENVIRONMENTAL STRESS AND ADAPTATION*, 1781-1787.
- Martel, A., & Qaderi, M. (2017). Light quality and quantity regulate aerobic methane emissions from plants. *Journal of Physiologia Plantarum* 159, 313-328.
- Martel, A., & Qaderi, M. (2019). Unravelling the effects of blue light on aerobic methane emissions from canola. *Journal of Plant Physiology* 233, 12-19.

- McLeod, A., Fry, S., Loake, G., Messenger, D., Reay, D., Smith, K., & Yun, B. (2008). Ultraviolet radiation drives methane emissions from terrestrial plant pectins. *New Phytologist* *180*, 124-132.
- Mertens, J., Van Moerkercke, A., Vanden Bossche, R., Pollier, J., & Goossens, A. (2016). Clade IVa Basic Helix-Loop-Helix Transcription Factors Form Part of a Conserved Jasmonate Signaling Circuit for the Regulation of Bioactive Plant Terpenoid Biosynthesis. *Plant and Cell Physiology* *57*, 2564-2575.
- Messenger, D., McLeod, A., & Fry, S. (2009). The role of ultraviolet radiation, photosensitizers, reactive oxygen species and ester groups in mechanisms of methane formation from pectin. *Plant, Cell and Environment* *32*, 1-9.
- Messina, P., Lathière, K., Sindelarova, K., Vuichard, N., Granier, C., Ghattas, J., . . . Hauglustaine, D. (2016). Global biogenic volatile organic compound emissions in the ORCHIDEE and MEGAN models and sensitivity to key parameters. *Atmospheric Chemistry and Physics* *16*, 14169-14202.
- Morales, J. (2013). *Estudio de las emisiones de terpenos por la especie nativa Schinus molle L. (Pimiento), sus variaciones temporales y su contribución al mejoramiento del inventario de emisiones de la región metropolitana*. Santiago: Memoria de Tesis para optar al título de Químico. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile.
- Moses, T., Pollier, J., Thevelein, J., & Goossens, A. (2013). Bioengineering of plant (tri)terpenoids: from metabolic engineering of plants to synthetic biology in vivo and in vitro. *The New Phytologist* *200*, 27-43.
- Moset, V., Hille, S., Rubæk, G., Møllera, H., Wahid, R., & Baattrup-Pedersen, A. (2019). Indicators of biomass and methane yields in vegetated buffer strips. *Journal of Cleaner Production* *210*, 907-915.
- Pangala, S., Hornibrook, E., Gowing, D., & Gauci, V. (2015). The contribution of trees to ecosystem methane emissions in a temperate forested wetland. *Global Change Biology* *21*, 2642-2654.
- Peñuelas, J., & Llusia, J. (2003). BVOCs: plant defence against climate warming? *Trends in Plant Science* *8*, 105-109.
- Peralta, H. (2009). *Contribución a las estrategias de descontaminación atmosférica, considerando el aporte de Compuestos Orgánicos Volátiles Biogénicos emitidos por especies arbóreas nativas en la Región Metropolitana*. Santiago: Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental.

- Pérez-Rial, D., López-Mahía, P., & Tauler, R. (2010). Investigation of the source composition and temporal distribution of volatile organic compounds (VOCs) in a suburban area of the northwest of Spain using chemometric methods. *Atmospheric Environment*, 5122-5132.
- Pinti, D., Gelinas, Y., Moritz, A., Larocque, M., & Sano, Y. (2016). Anthropogenic and natural methane emissions from a shale gas exploration area of Quebec, Canada. *Science of The Total Environment* 566-567, 1329-1338.
- Possell, M., Heath, J., Hewitt, C., Ayres, E., & Kersti, E. (2004). Interactive effects of elevated CO₂ and soil fertility on isoprene emissions from *Quercus robur*. *Global Change Biology* 10, 1835-1843.
- Prendez, M. (2019). Urban Trees and Their Relationship with Air Pollution by Particulate Matter and Ozone in Santiago, Chile. En *Urban Climates in Latin America* (págs. 167-206). Springer.
- Préndez, M., Carvajal, V., Corada, K., Morales, J., Alarcón, F., & Peralta, H. (2013). Biogenic volatile organic compounds from the urban forest of the Metropolitan Region, Chile. *Environment pollution* 183, 143-150.
- Préndez, M., Corada, K., & Morales, J. (2013). Emission factors of biogenic volatile organic compounds in various stages of growth present in the urban forest of the Metropolitan Region, Chile. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 108-116.
- Pressley, S., Lamber, B., Westberga, H., Guenther, A., Chena, J., & Allwinea, E. (2004). Monoterpene emissions from a Pacific Northwest Old-Growth Forest and impact on regional biogenic VOC emission estimates. *Atmospheric Environment* 38, 3089-3098.
- Rivas D. (2013). *rivasdaniel*. Obtenido de http://www.rivasdaniel.com/Pdfs/Beneficios_Arboles_Urbanos.pdf
- Rosenstiel, R., Potosnak, M., Griffin, K., Fall, R., & Monson, R. (2003). Increased CO₂ uncouples growth from isoprene emission in an agriforest ecosystem. *Nature* 421, 256-259.
- Rudnicka, J., Kowalkowski, T., & Buszewski, B. (2019). Searching for selected VOCs in human breath samples as potential markers of lung cancer. *Lung Cancer* 135, 123–129.
- Salmond, J., Tadaki, M., Vardoulakis, S., Arbuthnott, K., Coutts, A., Demuzere, M., . . . Wheeler, B. (2016). Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health* volume 15.
- Sax, S., Koutrakis, P., Rudolph, P., Cereceda-Balic, F., Gramsch, E., & Oyola, P. (2007). Trends in the elemental composition of the fine particulate matter in Santiago, Chile, from 1998 to 2003. *Journal of Air and Waste Management Association* 57, 845-855.

- Schmitz, R. (2005). Modelling of air pollution dispersion in Santiago de Chile. *Atmospheric Environment* 39, 2035-2047.
- Scholz, L. L. (2019). *Estimation of the potential BVOC emissions by the different tree species in Malmö*. Dept of Physical Geography and Ecosystem Science.
- Seguel, R., Morales, R., & Leiva, M. (2012). Ozone weekend effect in Santiago, Chile. *Environmental Pollution* 162, 72-79.
- Seinfeld, J., & Pandis, S. (2016). Chemistry of the Troposphere. En J. Seinfeld, & S. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (págs. 208-211). New Jersey: Atmospheric Chemistry and physics.
- Sharkey, T., Holland, E., & Mooney, H. (1991). *Trace gas emissions by plants*. San Diego: Elsevier Academic Press.
- Sharkey, T., Wiberley, A., & Donohue, A. (2008). Isoprene emission from plants: Why and How. *Annals for Botany* 101, 5-18.
- Simpraga, M. (2011). *Understanding the link between, Thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor (PhD) in Applied Biological Sciences*.
- Sinca. (15 de Julio de 2015). *www.Sinca.cl*. Obtenido de <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/glosario>
- Song, W. (2012). *Laboratory and field measurements of enantiomeric and non-enantiomeric biogenic VOCs and anthropogenic BTEX compounds*. Maguncia, Alemania: Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Spokeas, K., Bogner, J., Corcoran, M., & Wolker, S. (2015). From California dreaming to California Data: Challenging historic models for Landfill CH4 emissions. *Elementa Science of the Anthropocene* 3, 51.
- Tassi, F., Venturi, S., Canassi, J., Vaselli, O., Gelli, O., Cinti, D., & Capecchiacci, F. (2015). Biodegradation of CO₂, CH₄ and volatile organic compounds (VOCs) in soil gas from Vicano-Cimino hydrothermal system (central Italy). *Organic Geochemistry* 86, 81-93.
- tholl, D. (2015). Biosynthesis and Biological Functions of Terpenoids in Plants. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* 148, 63-106.
- Tholl, D., Boland, W., Hansel, A., Loreto, F., Rose, U., & Schnitzler, J. (2006). Practical approaches to plant volatile analysis. *The Plant Journal: for cell and molecular biology* 45, 540-560.

- Tian, M., Chen, G., Lu, C., Xu, X., Rem, W., & Zhang, B. (2015). Global methane and nitrous oxide emissions from terrestrial ecosystems due to multiple environmental changes. *Ecosystem Health and Sustainability* 1, 1-20.
- Tong, Z., Baldauf, R., Isakov, V., Deshmukh, P., & Zhang, K. (2016). Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air. *Science of the Total Environment* 541, 920–927.
- Toro, R., Morales, R., Canales, S., Gonzalez-Rojas, C., & Leiva, M. (2014). and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. *Building and Environment* 79, 115-123.
- Toro, R., Seguel, R., & Morales, R. (2014). Ozone, nitrogen oxides, and volatile organic compounds in a central zone of Chile. *Air Quality, Atmosphere & Health* .
- Tsui, J., Guenther, A., Yip, W., & Chen, F. (2009). A biogenic volatile organic compound emission inventory for Hong Kong. *Atmospheric Environment* 43, 6442-6448.
- Tyrväinen, L., Pauleit, S., Seeland, K., & de Vries, S. (2005). Benefits and Uses of Urban Forests and Trees. En C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup, & J. Schipperijn (Edits.), *Urban Forests and Trees* (págs. 81-144). Springer, Berlin, Heidelberg.
- UNFCCC, U. N. (30 de Agosto de 2018). *United Nations Framework Convention on Climate Change Flexible GHG Data Queries*. Obtenido de <http://unfccc.int/di/FlexibleQueries/Setup.do>
- Voulgarakis, A., Naik, V., Lamarque, J., Shindell, D., Young, P., Prather, M., & et al. (2013). Analysis of present day and future OH and methane lifetime in the. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 2563–2587.
- Wang, W.-M., Wang, X.-K., Su, Y.-B., & Zhang, H.-X. (2019). Land pavement depresses photosynthesis in urban trees especially under drought stress. *Science of The Total Environment* 653, 120-130.
- Watanabe, M., Watanabe, Y., Suk Kim, Y., & Koike, T. (2012). Dark aerobic methane emission associated to leaf factors of two Acacia and five Eucalyptus species. *Atmospheric Environment* 54, 277-271.
- Wenjing, W., Bin, Z., Shuxiao, W., & Jiming, H. (2017). Ozone and secondary organic aerosol formation potential from anthropogenic volatile organic compounds emissions in China. *Journal of Environmental Sciences* 53, 224-237.
- Xu, Y., Feng, Z., Shang, B., Dai, L., Uddling, J., & Tarvainen, L. (2019). Mesophyll conductance limitation of photosynthesis in poplar under elevated ozone. *Science of The Total Environment* 657, 136-145.

Yaman, B., Aydin, Y., Koca, H., Dasdemir, O., Kara, M., Altiok H, . . . Elbir, T. (2015). Biogenic Volatile Organic Compound (BVOC) Emissions from Various Endemic Tree Species in Turkey. *Aerosol and Air Quality Research* 15, 341-356.

Anexo 1. Coeficientes y correlación obtenidos desde la curva de calibración

Compuesto	Lineal	Constante	r2
Alfa-Pineno	2,751E+05	-1,017E+05	0,99548
Canfeno	1,664E+05	-8,050E+04	0,99526
Beta-Pineno	2,117E+05	-1,006E+05	0,99540
Beta-Mirceno	9,603E+04	-5,357E+04	0,99317
3-careno	1,779E+05	-8,745E+04	0,99530
Alfa-terpineno	9,252E+04	-5,112E+04	0,99374
P-Cymene	2,229E+05	-8,044E+04	0,99723
Limoneno	9,458E+04	-4,192E+04	0,99543
Ocimene1	2,466E+04	-1,238E+04	0,99111
Ocimene2	4,969E+04	-2,271E+04	0,99190
γ-terpineno	1,126E+05	-5,743E+04	0,99525
Terpinoleno	7,341E+04	-3,621E+04	0,99571
Linalol	1,247E+04	-2,517E+03	0,99441
Transcariofileno	5,715E+04	-1,452E+04	0,99847
Alfa-Humuleno	1,350E+05	-1,806E+04	0,99973

Anexo 2. Ecuaciones de normalización de isopreno y monoterpenos

Para isopreno, las ecuaciones utilizadas son:

$$I = I_s \cdot C_T \cdot C_L$$

Ecuación 1.

$$C_L = \frac{\alpha \cdot C_{L1} \cdot L}{\sqrt{1 + \alpha^2 \cdot L^2}}$$

Ecuación 2.

$$C_T = \frac{e^{\frac{C_{T1}(T-T_s)}{R \cdot T \cdot T_s}}}{C_{T3} + e^{\frac{C_{T2}(T-T_M)}{R \cdot T \cdot T_s}}}$$

Ecuación 3.

El término I representa emisión isopreno a temperatura T, I_s es la emisión estándar de isopreno a 30°C, L la radiación fotosintéticamente activa, $\alpha = 0,0027$, $C_{L1} = 1,066$. R es la constante de gases ideales $8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, T

la temperatura de la hoja. $T_S = 303^\circ\text{K}$, $T_M = 314 \text{ K}$, $C_{T1} = 95000 \text{ J mol}^{-1}$ y $C_{T2} = 230000 \text{ Jmol}^{-1}$, $C_{T3} = 0,961$.

Para monoterpenos la ecuación de normalización es:

$$M = M_S \cdot e^{\beta(T-T_S)} \quad .$$

Ecuación 4

Con M como la emisión monoterpenos a temperatura T y M_S la emisión monoterpenos a 30°C , $T_S = 30^\circ\text{C}$ (303°K) y $\beta = 0,09$.

Anexo 3. Correlaciones para las concentraciones en *Platanus x acerifolia*

	Metano	Respiración	Fotosíntesis	Radiación	Temperatura	Humedad Relativa
Isopreno	-0,14658173	-0,17639701	0,11096742	0,068585	-0,10193675	-0,17851264
Alfa-Pineno	-0,04354119	-0,25649876	0,15366545	0,16364601	-0,01750563	-0,32496959
Canfeno	-0,0193147	-0,26939239	0,16500657	0,18808167	0,02902089	-0,37440928
Beta-Pineno	-0,12025686	-0,21228121	0,13214241	0,09377981	-0,08957928	-0,20420736
Beta-Mirceno	-0,1707895	-0,02369432	-0,06953625	0,2488189	-0,20430955	-0,0585489
3-careno	-0,10133873	-0,20243183	0,11384015	0,15819682	-0,08309983	-0,21452872
Alfa-terpineno	-0,06257969	-0,28387203	0,18094788	0,22381681	0,01657558	-0,35283756
P-Cymene	-0,12958832	-0,1614319	0,08972509	0,13361956	-0,11512484	-0,16046045
Limoneno	-0,12491651	-0,23221028	0,11932584	0,19360942	-0,06132556	-0,25525762
Ocimete1	-0,23383759	0,1858264	-0,24641752	0,23681535	-0,31416464	0,13319739
Ocimete2	-0,20526378	0,14635222	-0,20209587	0,22126023	-0,38521935	0,2076117
Gamma-terpineno	-0,15356548	-0,08840416	0,01968576	0,14237558	-0,18089753	-0,06635184
Terpinoleno	-0,04733794	-0,38272477	0,33569426	0,02648001	0,04476446	-0,33693806
Linalol	-0,18572878	-0,09179544	0,03337349	0,08379118	-0,19270301	0,02623424
Transcariofileno	-0,20580386	-0,08953037	0,03699152	0,08544844	-0,22830638	-0,01253196
Alfa-Humeleno	-0,44048977	0,13657502	-0,23150572	0,04485211	-0,40619083	0,32188737
Metano	1	-0,09548225	0,24030904	0,07461298	0,4569469	-0,45463798
Respiración		1	-0,80336926	0,26075572	-0,24505088	0,28601529
Fotosíntesis			1	-0,43193711	0,47340741	-0,41027454
Radiación				1	-0,30087034	0,05797726
Temperatura					1	-0,88609778
Humedad Relativa						1

Anexo 4. Correlaciones para los factores de emisión en *Platanus x acerifolia*

	Metano	Respiración	Fotosíntesis	Radiación	Temperatura	Humedad Relativa
Isopreno	-0,19205827	-0,29217479	0,36654461	-0,41316264	0,29647991	-0,39005766
Alfa-Pineno	-0,32210784	0,00913819	-0,24191271	0,36802773	-0,69823688	0,37647838
Canfeno	-0,23389631	-0,08782765	-0,12500995	0,35955958	-0,50664291	0,14753829
Beta-Pineno	-0,35184794	0,03510809	-0,24290165	0,30990245	-0,70579982	0,42608747
Beta-Mirceno	-0,30052987	0,13183099	-0,29808554	0,37126821	-0,58045455	0,32520866
3-careno	-0,22516822	-0,0682932	-0,0958387	0,29229212	-0,44275251	0,13895906
Alfa-terpineno	-0,42520455	0,12621483	-0,38220232	0,41525578	-0,8962083	0,64667489
P-Cymene	-0,16466887	-0,08988069	-0,01804175	0,21378098	-0,28489124	0,00626056
Limoneno	-0,20997646	-0,13886388	-0,03446771	0,30264522	-0,33768062	0,00903356
Ocimete1	-0,33987908	0,3379744	-0,46309347	0,16340004	-0,45606563	0,26797535
Ocimete2	-0,27112026	0,26238075	-0,36117582	0,32102754	-0,58944631	0,41273047
Gamma-terpineno	-0,2115869	0,01255064	-0,12554865	0,24192083	-0,39776139	0,14844064
Terpinoleno	-0,27871153	-0,19040919	-0,00590645	0,22059826	-0,54683275	0,24262128
Linalol	-0,2242068	-0,01120545	-0,0845733	0,17688423	-0,36778403	0,18747222
Transcariofileno	-0,32823185	0,08269273	-0,21881366	0,24592379	-0,60759123	0,36676836
Alfa-Humeleno	-0,50482061	0,2932541	-0,46004816	0,22577144	-0,74517465	0,63534141
Metano	1	-0,09584189	0,24104817	0,07572418	0,4527633	-0,45159886
Respiración		1	-0,80336926	0,26075572	-0,24505088	0,28601529
Fotosíntesis			1	-0,43193711	0,47340741	-0,41027454
Radiación				1	-0,30087034	0,05797726
Temperatura					1	-0,88609778
Humedad Relativa						1

Anexo 5. Correlaciones para las concentraciones en *Schinus molle*

	Metano	Respiración	Fotosíntesis	Radiación	Temperatura	Humedad Relativa
Isopreno	-0,23207334	-0,25860082	0,19947344	-0,14704152	0,30229531	-0,00494307
Alfa-Pineno	0,08233704	-0,11808081	0,02393987	-0,0452031	0,34010259	-0,65952761
Canfeno	0,08944693	-0,1337592	0,04015142	-0,05727914	0,34591832	-0,62519154
Beta-Pineno	-0,27007183	-0,2699648	0,26049058	0,01756199	-0,2803542	-0,1711173
Beta-Mirceno	0,09740079	-0,10475243	0,03928765	0,02222617	0,36279387	-0,65487671
3-careno	0,08145467	-0,12878324	0,06641762	0,00753478	0,37947214	-0,62879308
Alfa-terpineno	-0,04649736	0,2747511	-0,43586314	0,17881626	0,12785968	-0,406729
Limoneno	-0,49722692	-0,27319427	0,15413783	-0,46522855	0,3205094	-0,33905624
Gamma-terpineno	0,06900095	-0,11857738	0,07493412	0,07294678	0,41611391	-0,60390816
Terpinoleno	0,03588895	-0,02451556	-0,17840672	-0,11706773	0,60148415	-0,54766538
Metano	1	0,14221928	-0,03677823	0,11288503	-0,15341061	0,08393113
Respiración		1	-0,74774866	0,51008373	0,2413772	0,02054797
Fotosíntesis			1	-0,39023067	-0,25006758	-0,02328898
Radiación				1	0,30982417	-0,00881141
Temperatura					1	-0,48479225
Humedad Relativa						1

Anexo 6. Correlaciones para los factores de emisión en *Schinus molle*

	Metano	Respiración	Fotosíntesis	Radiación	Temperatura	Humedad Relativa
Isopreno	-0,32090135	-0,34540658	0,22832759	-0,34740744	0,36060626	-0,07094335
Alfa-Pineno	0,24572181	-0,30574679	0,1702521	-0,34148303	-0,36854992	-0,35283662
Canfeno	0,25212223	-0,27991746	0,14629289	-0,31130543	-0,21783258	-0,40116868
Beta-Pineno	-0,21475232	-0,32634809	0,30552794	-0,10670504	-0,57496872	0,07162222
Beta-Mirceno	0,24009638	-0,26539602	0,16773364	-0,24439699	-0,25575095	-0,41551921
3-careno	0,24088899	-0,31397202	0,21957944	-0,29124714	-0,34419872	-0,32967421
Alfa-terpineno	0,00457894	0,18741228	-0,35451371	0,06242754	-0,18366093	-0,26975519
Limoneno	-0,42462379	-0,37268593	0,23247331	-0,61406774	0,01808197	-0,25915693
Gamma-terpineno	0,23928744	-0,36720525	0,30241561	-0,32116916	-0,65616146	-0,06633188
Terpinoleno	0,32268662	-0,22181571	-0,010024	-0,45149395	-0,32327775	-0,08969541
Metano	1	0,13987928	-0,03582502	0,10794533	-0,15326392	0,0835895
Respiración		1	-0,74774866	0,51008373	0,2413772	0,02054797
Fotosíntesis			1	-0,39023067	-0,25006758	-0,02328898
Radiación				1	0,30982417	-0,00881141
Temperatura					1	-0,48479225
Humedad Relativa						1