

Estimación de las emisiones biogénicas urbanas en Bogotá de compuestos orgánicos volátiles. Caso de estudio especie *Eucalyptus globulus* Labill.

Estimation of Bogota's Urban Biogenic Emissions of Volatile Organic Compounds. Case Study Eucalyptus globulus Labill.

Oscar A. Fajardo^a, Linda V. Cruz^a, Cristian C. Velandia^a, Angela P. Navas^b

RESUMEN

Los compuestos orgánicos volátiles son unos de los compuestos químicos de mayor importancia en la química atmosférica en años recientes dada su participación en la formación de aerosol secundario y ozono en la atmósfera. Son compuestos liberados mediante procesos naturales (biogénicos) o por actividades antropogénicas. Este trabajo buscó estimar de forma teórica las emisiones biogénicas de los compuestos orgánicos volátiles isopreno y monoterpenos tomando como caso de estudio la ciudad de Bogotá para el año 2019, teniendo como fuente de emisión la especie *Eucalyptus globulus* y evaluando la sensibilidad a variables meteorológicas como temperatura, humedad y radiación solar. Los valores de emisión obtenidos fueron de 0,27 t al año observando una relación directamente proporcional entre la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y las emisiones de isopreno, así mismo, se encontró que la emisión de monoterpenos se encuentra más relacionada con la temperatura atmosférica. Este trabajo permitió tener un aporte en la cuantificación teórica de las emisiones de compuestos orgánicos biogénicos emitidas por esta especie, el cual puede ser considerado como línea base para el levantamiento de un inventario general de emisiones biogénicas de este tipo que se realicen en el país.

PALABRAS CLAVE: radiación fotosintéticamente activa; monoterpenos; isopreno; emisiones atmosféricas biogénicas.

ABSTRACT

Volatile organic compounds are one of the most important chemical compounds in atmospheric chemistry in recent years due to their participation in the formation of secondary aerosols and ozone in the atmosphere. They are compounds released by natural (biogenic) processes or by anthropogenic activities. This work sought to theoretically estimate the biogenic emissions of volatile organic compounds Isoprene and monoterpenes, taking as a case study the city of Bogotá for the year 2019, taking the *Eucalyptus globulus* species as the source of emission, under the consideration of meteorological variables such as temperature, humidity, and solar radiation. The estimated emission values obtained were 0,27 t per year observing a directly proportional relationship between photosynthetically active radiation (PAR) and isoprene emissions, likewise, it was found that the emission of monoterpenes is more closely related to atmospheric temperature. This work made it possible to have a contribution in the theoretical quantification of the emissions of biogenic organic compounds emitted by the species, which can be considered as a baseline for the drawing up of a general inventory of emissions of this type that are carried out in the country.

KEYWORDS: photosynthetically active radiation; monoterpenes; isoprene; biogenic atmospheric emissions.

a Universidad Central, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Departamento de Ingeniería Ambiental. Bogotá, Colombia. ORCID Fajardo, O.A.: 0000-0002-6735-2137 ORCID Cruz, L.V.: 0000-0001-8016-1493; ORCID Velandia, C.C.: 0000-0001-6802-0655

b Universidad Central, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Departamento de Biología. Bogotá Colombia, ORCID: Navas, A.P.: 0000-0002-4149-4217

c Autor de correspondencia: ofajardom@ucentral.edu.co

Introducción

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son compuestos químicos presentes tanto en ambientes cerrados como en la atmósfera, y son de interés para el estudio de la calidad del aire como contaminantes en ambos espacios. Mendoza-Domínguez et al. (2010) afirman que los COV tienen una alta presión de vapor (0,01 kPa a 20°C) y una baja solubilidad en el agua. También están constituidos por una mezcla compleja de compuestos de bajo peso molecular, con un número de átomos de carbono comprendido entre 2 y 12, y contienen elementos como hidrógeno, oxígeno, entre otros (Derley et al. 2014). Algunos de compuestos se liberan a la atmósfera por procesos bioquímicos naturales en suelos, océanos y vegetación (Sindelarova et al., 2014). Son de relevancia en el estudio de la calidad del aire por ser importantes precursores del ozono troposférico y del aerosol orgánico secundario que tienen importantes efectos en el deterioro de la calidad del aire regional (Wyche et al., 2014; Faiola et al., 2015; Ghirardo et al., 2016). Su degradación iniciada por los radicales hidroxilo (OH) producen radicales RO₂ seguido por la conversión de óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) que resultan en la acumulación de ozono (O₃) (Jing et al., 2020). La producción de ozono en grandes áreas boscosas puede afectar las zonas urbanas debido al arrastre por el viento, exponiendo a la población a altos niveles de contaminación (Im et al., 2011). La interacción de emisiones biogénicas con las emisiones antropogénicas también influye en la oxidación de metano y en la producción global de CO (Leung et al., 2011; Pratt et al., 2012). Los impactos de las emisiones son diferentes en las ciudades, primero por la concentración de emisión, la ubicación relativa y las condiciones meteorológicas incluyendo el transporte horizontal y la difusión vertical (Situ et al., 2013; He et al., 2020).

La vegetación forestal es la que más contribuye con emisiones de compuestos orgánicos volátiles biogénicos en la atmósfera global, tales como isopreno, monoterpenos y sesquiterpeno, múltiples estudios se han llevado a cabo en diferentes partes del mundo confirmando estos hallazgos (Laothawornkitkul et al., 2008; Aydin et al., 2014; Bourtsoukidis et al., 2014; Acton et al., 2016), sugiriendo que se encuentran involucradas en el crecimiento,

producción y defensa de las plantas y son emitidas a través de sus hojas (Mochizuki et al., 2015). En las zonas tropicales las fuentes más importantes de emisión de COV son la vegetación y bosques tropicales (Yáñez-Serrano et al., 2020) en donde el isopreno representa el 45 % de las emisiones generadas en fuentes naturales, debido a la anatomía de la hoja, los árboles tropicales componen el 70 % de las emisiones totales (Mohd et al., 2021).

Este isopreno es uno de los compuestos más relevantes para análisis debido a su alta reactividad con el radical hidroxilo, el O₃ y los óxidos de nitrógeno (NO_x), lo que lo convierte en una fuente sustancial de aerosol orgánico secundario (SOA) contaminantes que pueden afectar considerablemente la calidad del aire (Rovelli et al., 2019). Adicionalmente su proceso de fotooxidación provoca que sea uno de los principales precursores de la química atmosférica en regiones boscosas (Wang et al., 2018). Este compuesto comprende aproximadamente la mitad de la emisión global de COV con alrededor de 1 Pg. Guidolotti et al. (2019) realizaron la estimación de emisiones para la especie *Eucalyptus camaldulensis* demostrando que al estar expuestas las hojas a altas temperaturas entre 40-45°C se emitían grandes cantidades de isopreno y cuando la emisión disminuía se emitían otros COV, entre ellos monoterpenos.

Por su parte, los monoterpenos ascienden a aproximadamente el 15 % de la emisión global estimada de COV. Con estudios en Estados Unidos, en el año 2012, y en Japón, en el año 2018, se concluyó que el isopreno es el COV dominante a nivel mundial, seguido de los monoterpenos y sesquiterpeno, impactando la atmósfera superior (Guenther et al., 2012). Sin embargo, Mendoza et al. (2019) evidenciaron en Ecuador con un estudio de tres especies (*Pinus radiata*, *Alnus acuminata* y *Eucalyptus globulus*), que las emisiones de monoterpenos para el año 2017 habían presentado una reducción para la especie *E. globulus* debido a la disminución de su cobertura vegetal, alcanzando emisiones de 49,05 t año⁻¹, encontrando emisiones más altas hacia noviembre y más bajas en julio. Sawers (2019), confirmó la variabilidad de emisiones de acuerdo con la especie evaluada en Estados Unidos, pero en todos los casos puede llegar a contribuir de manera importante a una mala calidad del aire en la zona de análisis.

Debido a la importancia que han adquirido los COV para la calidad del aire, se han realizado inventarios de emisiones que tienen como finalidad cuantificar y modelar las concentraciones de dichos compuestos, al simular diversas condiciones meteorológicas y el comportamiento de las fuentes que los emiten. Entre las metodologías más utilizadas para estimar estos compuestos se encuentran el uso del *software* MEGAN (Leung et al., 2010; Gastelum et al., 2016; Sakulyanontvittaya et al. 2016; Bauwens et al., 2018; Wu et al., 2020), la cromatografía de gases (Derley et al., 2014; Boix et al., 2016) o las imágenes satelitales (Morfopoulos et al., 2013; Khan et al., 2018; Dimitropoulou et al., 2018).

MEGAN (*Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature*), es un programa que se utiliza a nivel global para estimar las emisiones de COV, mediante imágenes satelitales con una resolución espacial de $\sim 1 \text{ km}^2$ o menos, allí se evidencia la variación de emisiones por especies acorde a las condiciones ambientales del territorio. Es usado para estudios de más de 10 especies donde se puede identificar de manera adecuada la variación significativa que tiene cada una de estas junto con la cobertura atmosférica y la composición química del aire en un espacio de tiempo. Algunos estudios desarrollados mediante el uso de MEGAN incluyen el realizado en París en 2014, que generó un inventario de emisiones de COV disponible mensualmente para el período de 1980-2010, este conjunto de datos estimó la emisión media anual total de COV en 760 Tg (C) / año consistente en isopreno (70 %), monoterpenos (11 %), metanol (6 %), acetona (3 %), sesquiterpenos (2,5 %) y otros (Sindelarova et al., 2014). En el año 2013, se realizó un inventario de emisiones para China a una resolución espacial de $36 \times 36 \text{ km}$, evidenciando que las emisiones anuales totales de COV en el país asiático eran de $42,5 \text{ Tg}$, incluyendo isopreno $23,4 \text{ Tg}$ ($20,7 \text{ Tg C}$), monoterpenos $5,6 \text{ Tg}$ ($4,9 \text{ Tg C}$) y sesquiterpeno $1,0 \text{ Tg}$ ($0,9 \text{ Tg C}$). De acuerdo con el estudio, los árboles de hoja ancha fueron los que mayores contribuyentes a las emisiones de isopreno con 72,9 % (Wang et al., 2007; Li et al., 2013).

Una segunda técnica extensamente empleada es la cromatografía de gases (CG). Este es un método físico de separación en el cual los componentes una vez separados se distribuyen en dos fases, una

estacionaria y otra móvil, que se desplaza en una dirección definida por medio de puertos de inyección con el fin de determinar la composición cualitativa de mezclas complejas de compuestos orgánicos (Olguín y Rodríguez, 2004). La CG es una metodología de alto coste, pero los resultados pueden ser muy exactos. Utilizando CG en Japón en el año 2011, se evidenció que las emisiones de isopreno y monoterpenos eran más altas en horas del día donde la radiación solar era mayor (Jones et al., 2011). Por su parte, en India, se realizó un estudio de 49 especies de plantas donde se encontró que el alfa-pineno era el monoterpeno dominante en ciertas zonas del país, debido a su comportamiento temporal y teniendo efectos muy significativos en la calidad del aire (Gaffar et al., 2018).

Otra metodología extensamente utilizada en la determinación de las emisiones COV involucra el uso de imágenes satelitales. Como ejemplos de su utilización se tiene en el año 2011 en Estados Unidos con la creación de una base de datos de cobertura terrestre de la región de Tucson, Arizona, basándose en información de imágenes Landsat TM de 1993. Los flujos promedio de isopreno y monoterpenos en toda la región encontrados para un día típico de verano fueron $1,4$ y $3,7 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente (Diem y Comrie, 2011). Por su parte en Portugal, se utilizó el satélite DEIMOS-1, el cual evidenció que el modelo de emisiones es altamente sensible a la resolución espacial de los datos derivados de satélites, lo que resultó en una diferencia de aproximadamente el 30% en las emisiones totales de isopreno para el área estudiada (Silveira y Tchepel, 2014).

A escala nacional para Colombia, se evidencian en la literatura tres estudios en el departamento del Magdalena en esta temática. En el primero realizado en el año 2010 empleó la teledetección por imágenes satelitales y la aplicación de modelos matemáticos para determinar los aportes de COV. Se incluyeron variables climáticas, atmosféricas y de composición química que permitieron obtener una contribución en la dinámica atmosférica y los posibles efectos de estos compuestos en los ecosistemas y el medio ambiente (Caicedo et al., 2010). En un segundo estudio de 2015, desarrollado en el Parque Tayrona, se determinó que las emisiones biogénicas de monoterpenos eran de $3,54 \times 10^4 \text{ kg d}^{-1}$, siendo

generadas en un 60 % por la familia *Leguminosae*, 37,4 % por la familia *Euphorbiaceae*, 2,4 % la familia *Anacardiaceae* y menos de 0,1 % a las familias *Rubiaceae* y *Polygonaceae* (Bolaño et al., 2015). Por último, un estudio realizado en la región de Caldas con diferentes tipos de vegetación demostró que los bosques son los mayores emisores de COV alcanzando 16.000 t año⁻¹, mientras que pastos y cultivos tenían las emisiones más bajas entre 1.924 y 1.359 t año⁻¹ y los páramos con el 0,4 t año⁻¹. Se determinó que las variables que más influyen en las emisiones de isopreno y monoterpenos son la altitud y el tipo de cobertura (Li-Ramírez et al., 2017).

Evidenciando la relevancia que estos compuestos químicos de origen biogénicos para la calidad del aire y la escasa información referente en el contexto nacional, y en particular para la ciudad de Bogotá, surgió el interés de explorar las técnicas de cuantificación disponibles y evaluar las emisiones biogénicas urbanas de COV usando como caso de estudio una de las especies vegetales invasoras más abundantes en el casco urbano, la especie *E. globulus*, y que de acuerdo a la información científica consultada presenta importantes tasas de emisión de COV. Sumado a esto, en el contexto del cambio climático que se experimenta actualmente, las variaciones de temperatura, radiación solar y estrés por falta de agua pueden significativamente aumentar las emisiones desde los eucaliptos. Kanagendran et al. (2018) discuten en su investigación que más allá de las alteraciones metabólicas regulares causadas por los procesos fotosintéticos y de crecimiento celular, otros eventos que pueden promover el aumento en las emisiones de compuestos orgánicos volátiles como lluvias severas o sequías y picos en las concentraciones de ozono troposférico. Los autores evaluaron para el caso puntual del *E. globulus* como variaban las emisiones de COV de esta especie bajo diferentes tipos de estrés inducidos, tales como aumento en la exposición de O₃, encontrando significativos aumentos en las emisiones de isopreno, así como otros compuestos co-emitidos, concluyendo la importancia de la modificación de emisiones bajo escenarios futuros de estrés inducido por factores externos. Así mismo Manea et al. (2021) evaluaron como dos factores ambientales, a saber, disponibilidad del agua en suelos y aumento en las

concentraciones de CO₂, afectarían las emisiones de COV y la producción de biomasa en los eucaliptos. La investigación concluyó que la ausencia de agua no alteró la producción de metabolitos secundarios, sin embargo, el aumento de CO₂ si generó un aumento significativo de la emisión de compuestos volátiles desde las hojas. Así, de acuerdo con los autores, los individuos arbóreos bajo estrés prefieren disminuir sus tasas de crecimiento en biomasa, pero mantener o aumentar sus tasas de emisiones de compuestos químicos como medidas de protección. Es así como bajo los escenarios de estrés actual y futuro para las plantas por el cambio climático global (Adams et al., 2010; Anderegg et al., 2015) es importante iniciar la cuantificación de las emisiones desde estas especies.

Este documento fue desarrollado en dos fases, la primera siendo una recopilación de la información de la especie seleccionada y estudios relacionados a nivel mundial. Posteriormente, en una segunda fase, se procedió bajo una cuantificación teórica, a la estimación de las emisiones en la ciudad de Bogotá. El presente proyecto busca ser línea base para estudios futuros que se realicen para otras especies y locaciones de Colombia. Siendo desde nuestro conocimiento actual el primer aporte en el levantamiento de un inventario distrital de emisiones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles.

Materiales y métodos

La metodología abordada empleó dos fases. En un momento inicial se realizó la recopilación de información de cobertura arbórea en la ciudad de Bogotá. El Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis tiene a su cuidado el listado de especies de árboles en la ciudad, en este caso se contó con el inventario para el año 2019. Posteriormente, se realizó la especialización y zonificación de la vegetación existente con la utilización de la plataforma SIGAU (Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano), que es el sistema único con la información arbórea dentro del perímetro urbano (JJB, 2019).

La segunda fase consistió en la estimación de las emisiones de COV (isopreno y monoterpenos) para la especie vegetal seleccionada en la ciudad. El cálculo de las emisiones se realizó mediante la

metodología propuesta por la guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas de Gaitán y Cárdenas (2017). En esta, es necesario contar con la información de factores ambientales, cobertura de la especie y características morfológicas de esta como su altura, diámetro del tronco a la altura de pecho (DAP), densidad de biomasa foliar, temperatura de la hoja, entre otras. Para hallar el área de los árboles se tuvo en cuenta la extensión de la ciudad para establecer la relación del área ocupada por estos siguiendo la Ecuación (1), planteada por Velasco y Bernabé (2004):

$$\text{Área de los árboles} = (\# \text{ árboles}) (\text{Diámetro follaje}) (\text{Área región}) \quad (1)$$

El diámetro del follaje es determinado mediante la Ecuación (2) propuesta por Minckler y Gingrich (1970):

$$\text{Diámetro follaje caducifolias} = 1,13 + 0,205 \text{ DAP} \quad (2)$$

En la densidad foliar se utiliza el modelo de biomasa ajustado mediante la Ecuación (3) propuesta por Álvarez et al. (2005)

$$W = 0,1427 * d^{3,1049} * G^{(-1,4055)} \quad (3)$$

donde, W representa el peso seco del componente arbóreo correspondiente en (kg), d el diámetro normal (cm), y G el área basimétrica (m^2/ha).

El área basimétrica está en función del DAP mediante la Ecuación (4):

$$G = \frac{\pi(0,63 \text{ m})^2}{4} = 0,311 \frac{m^2}{ha} \quad (4)$$

Para la estimación de emisiones de isopreno se requiere conocer la radiación fotosintéticamente activa (PAR), determinada mediante la Ecuación (5) por el modelo de dosel propuesta por Lamb et al. (1993), corregida por Geron et al. (1995) y adaptada-citada por Velasco y Bernabé (2004)

$$PAR(z) = PAR(b) e^{(-K \cdot LAI \cdot (\frac{z}{b}))} \quad (5)$$

donde, $PAR(b)$ es la parte superior del árbol ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), K es el coeficiente de extinción de la PAR (0,60), LAI es el índice del área foliar y i es el número de capa.

Para el índice del área foliar LAI , $PAR(b)$ y número de capa se emplearon los valores publicados para *E. globulus* en Velasco y Bernabé (2004).

La estimación de isopreno se realizó bajo la metodología de factores de emisión de la Ecuación (6):

$$E = FEIJ * \rho * (CL * CT) \quad (6)$$

Para el factor de actividad de emisión del isopreno, se emplean los algoritmos de temperatura y luz descritos por Guenther et al. (1993).

El factor CL de ajuste por luz se realizó mediante la Ecuación (7)

$$CL = \frac{\infty CL_1 PAR}{\sqrt{(1 + \infty^2 PAR^2)}} \quad (7)$$

donde, $\infty = 0,0027$ y $CL_1 = 1,066$ son constantes empíricas.

El factor CT de ajuste por temperatura se calcula mediante la Ecuación 8

$$CT = \frac{e^{\left[\frac{CT_1 (T - T_s)}{R * T_s * T} \right]}}{1 + e^{\left[\frac{CT_2 (T - T_m)}{R * T_s * T} \right]}} \quad (8)$$

donde, CT_1 es equivalente a 95.000 J/mol, T es la temperatura de la hoja (K), T_s es la temperatura de la hoja a condiciones estándar (303 K), R es la constante de los gases ideales (8,314 J/mol*K), y CT_2 equivale a 230.000 J/mol a $T_m = 314$ K.

La estimación de emisión de monoterpenos, también por factores de emisión, se presenta en la Ecuación 9:

$$E = FEIJ * \rho * e^{[\beta(T-TS)]} \quad (9)$$

donde, $FEIJ$ es el factor de emisión de monoterpenos ($\mu\text{gC}/\text{m}^2 \text{ h}$), ρ es la densidad foliar (kg de material seco/ m^2), β es el coeficiente empírico que establece la dependencia de la emisión con la temperatura de $0,09 \text{ K}^{-1}$ y finalmente, T es la temperatura de la hoja (K).

La corrección de los estimados de emisiones bajo condiciones de temperatura y radiación reales en la ciudad se basó en los reportes meteorológicos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). Los radiómetros ultravioleta GUV-511 implementados en la Red permitieron conocer el comportamiento horario, anual y mensual de la radiación solar. Adicionalmente se utilizó información

del informe anual de calidad del aire de Bogotá para el año 2018 sobre condiciones meteorológicas promedio, asumiendo que no hubo variación significativa en las mismas para el año 2019 (SDA, 2019).

Área de estudio

Bogotá tiene una extensión de 163.635 hectáreas (ha), suelo urbano 23,2 %, suelo rural 75 % y suelo de expansión 1,8 % (SDP, s.f.). Limita con los municipios de Chía, la Calera, Choachí, Cota, Funza, Mosquera, Soacha, entre otros. Está subdividida en 20 localidades entre ellas Sumapaz, localidad con mayor extensión (78.096 ha) y la única completamente rural. El área de análisis para la especie vegetal seleccionada fue todo el territorio capital, en la Figura 1 se puede observar la ubicación del área de estudio.

En la Figura 2 y Figura 3 se puede observar que la especie *E. globulus* predomina en las localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe y San Cristóbal.

Descripción de *E. globulus*

Eucalyptus globulus es una especie arbórea de la familia *Myrtaceae*, originaria de Australia. Tiene una altura aproximadamente de 30 a 60 m, su tronco es liso y su color varía de blanco a gris, sus hojas pueden alcanzar los 25 cm de largo (Lobstein et al., 2018). Actualmente, en Bogotá existen 34.965 árboles de esta especie y es catalogada como invasora (JJB, 2019). La madera de eucalipto se utiliza en la industria, la fabricación de estibas y embalajes, la floricultura y construcción. El uso preferencial tiene que ver con su alto contenido de celulosa y su relación con la lignina que lo convierte en una especie valiosa para el desarrollo de diferentes actividades (Sánchez, 2013). De acuerdo con la información asequible del inventario presentado en el SIGAU, y a la estimación de emisiones en investigaciones científicas internacionales de los últimos 20 años se consideró que esta especie puede presentar una alta emisión de COV en la ciudad a diferencia de otras especies nativas. El cuantificar las emisiones de esta especie permitiría estimar la reducción de emisiones que un plan de sustitución forestal distrital pueda tener en busca del uso de especies nativas.



Figura 1. Espacialización del área de estudio.
Fuente: IGAC (2021)

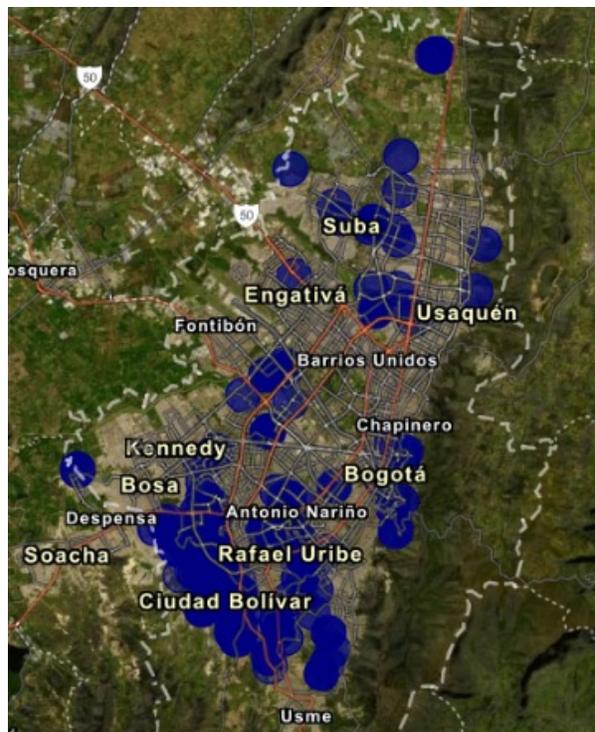


Figura 2. Espacialización de *E. globulus* en la ciudad de Bogotá. Los puntos azules representan la ubicación de cada individuo. Fuente: Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano de Bogotá DC - JJB (2019)

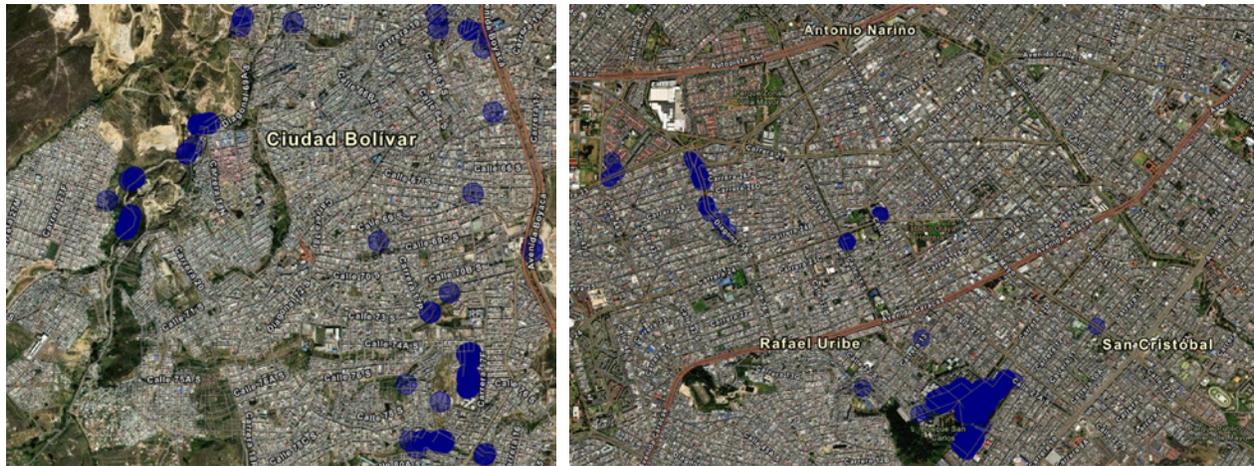


Figura 3. Espacialización de la especie *E. globulus* en las localidades con mayor abundancia. A: localidad ciudad Bolívar. B: localidades de Rafael Uribe-San Cristóbal. Fuente: JBB (2019)

Factores de emisión isopreno-monoterpenos

Las emisiones biogénicas presentan gran variabilidad dependiendo de factores ambientales, las características del terreno y la especie. La Tabla 1 evidencia los tiempos de vida de cada uno de los compuestos seleccionados para el estudio. El isopreno presenta un menor tiempo de vida (1,8 h) en comparación con los monoterpenos que alcanzan aproximadamente un tiempo de vida de 2,45 h.

Tabla 1. Tiempo de vida media de los principales compuestos orgánicos volátiles emitidos por la vegetación

Clase de compuesto	Especie química	Tiempo de vida media (h)*
Isopreno	Isopreno	1,8
	Limoneno	1,1
	Canifero	3,5
Monoterpenos	α-pineno	3,4
	β-pineno	2,3
	2-careno	2,3
	3-careno	2,1
	n-Alcanos	n-hexano
	C10-C17	7-31
Alienos	1- deceno	4
Aromáticos	p-cimeno	24
Aldehídos	n-hexanal	74
Cetonas	2-heptaxona	>24

* Tiempo de vida media basado en la reacción con el radical hidroxilo.

Fuente: Seinfeld y Pandis (1998); Velasco y Bernabé (2004)

Los factores de emisión de isopreno y monoterpenos de la especie *E. globulus*, usados para las estimaciones de este estudio son tomados de Guenther et al. (1993); y aplicadas por Velasco y Bernabé (2004) en su estudio de emisiones biogénicas para el Valle de México.

Tabla 2. Factores de emisión de COV estandarizados a 30°C y PAR de 1000 μmol m⁻² s⁻¹

Especie	Isopreno	Monoterpeno (μg g ⁻¹ h ⁻¹)	Otros COV
Vegetación zonas áridas	0,433	0,630	0,378
Cultivos (maíz)	0,000	0,472	1,889
Cipreses o cedros blancos (<i>cupressus</i>)	0,100	1,60	1,50
Oyameles (<i>Abies</i>)	0,1133	3,40	1,85
Pinos (<i>Pinus</i>)	0,1132	3,40	1,85
Encinos (<i>Quercus</i>)	79,3	0,227	1,848
Ailes (<i>Alnus</i>)	0,1123	0,1133	1,85
Pastizales	0,1120	0,28	0,168
Vegetación en tierras húmedas por temporal	0,1120	0,28	0,168
Eucaliptos (<i>Eucaliptus</i>)	79,3	3,40	1,85

Fuente: Guenther et al. (1993)

Resultados

Estimación de emisiones de COV para *E. globulus*

Se procedió a realizar la estimación de emisiones de isopreno y monoterpenos para la población existente de *E. globulus* en Bogotá teniendo en cuenta las características mencionadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Características morfológicas y cobertura de la especie en la ciudad

Parámetro	Valor
DAP	63 cm
Altura promedio	23,9 m
Número de árboles	34,965
Área región	379.720.000 m ²
Número de árboles por m ²	9,2 10 ⁻⁵ arboles/m ²
Área de árboles	44.026,17975 m
Relación	1,16 10 ⁻³ m
Diámetro follaje caducifolias	1,26 m
Densidad foliar	28,45 kg m ⁻²

Fuente: elaboración propia

Según Velasco y Bernabé (2004), la relación entre los árboles y el área de la región pueden tener valores mayores o menores a uno (Tabla 4). El valor obtenido por medio de la Ecuación 1 es menor a uno indicando que los árboles no están juntos si no dispersos en la ciudad, como es evidenciable en la espacialización presentada en las Figuras 2 y 3. Esto es congruente con la baja cobertura arbórea con la que cuenta la ciudad (Rubiano, 2019).

Tabla 4. Factores de actividad de emisión del isopreno

Parámetro	Valor
Radiación fotosintéticamente activa	105,4 μmol m ⁻² s ⁻¹
Coefficiente de luz - CL	0,29
Coefficiente de temperatura - CT	0,19

Fuente: elaboración propia

Según Velasco y Bernabé (2004), ante una diferencia entre la temperatura de la hoja y la temperatura ambiental es ($\pm 1^\circ\text{C}$) y se consideran iguales, por tanto, la temperatura de la hoja utilizada fue de 17°C . Los resultados para emisiones unitarias y

totales estimadas de isopreno y monoterpenos para el *E. globulus* se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5. Emisiones unitarias y totales para isopreno y monoterpenos

Parámetro	Valor, t año ⁻¹
Emisión unitaria isopreno	1,08 10 ⁻⁶
Emisión total isopreno	0,038
Emisión unitaria monoterpenos	2,66 10 ⁻⁷
Emisión total monoterpenos	9,32 10 ⁻³

Fuente: elaboración propia

Distribución temporal de las emisiones

Hasta este punto, las estimaciones fueron realizadas a condiciones estándar de 30°C de temperatura y $1.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR, por lo que se consideró la necesidad de establecer los flujos de emisión de estos compuestos a condiciones meteorológicas reales de temperatura y radiación, ajustados a las condiciones propias de la ciudad. En este caso se realizó su corrección para las condiciones evidenciadas para el año 2019 en la ciudad de Bogotá.

Las mayores emisiones de isopreno se presentaron en el mes de diciembre y menores en el mes de abril. En los meses de julio a septiembre, el comportamiento no varía ya al no tener la PAR una variación significativa. Noviembre, con respecto a los meses anteriores, presenta un mínimo local en la emisión de este compuesto dando paso a un aumento importante para el último mes del año. En diciembre, Bogotá disminuye su nubosidad aumentando la radiación solar recibida y por ende la temperatura en varias horas del día. Se puede inferir que la PAR a comparación de otros meses en diciembre es mayor, promoviendo que la emisión de este compuesto alcance su máximo. Por otro lado, en el mes de abril se presenta la menor emisión de isopreno, este mes se caracteriza por tener una nubosidad alta, ocasionando que tanto la radiación como la temperatura disminuya, afectando significativamente las emisiones biogénicas.

En cuanto a la evolución mensual de las emisiones de monoterpenos, se observa una ligera disminución para el mes de agosto, especialmente porque es el mes donde predominan los vientos en la ciudad

y producen variaciones en la temperatura, lo cual influye en los procesos de emisión (Inzunza, 2019). En cuanto a los meses de febrero y noviembre se presenta un leve incremento en las tasas de emisión principalmente porque son los meses que registran los más altos niveles de temperatura. Sin embargo, la Figura 4 deja ver un comportamiento relativamente estable a lo largo de todo el año y de menor cantidad que para el isopreno.

De acuerdo con los cálculos realizados es posible visualizar la variación de emisiones de estos dos COV a lo largo del día en la Figura 5. Las emisiones de isopreno mantienen su rango más bajo durante las primeras horas del día, desde las 0:00 hasta las 7:00, luego aumentan de forma pronunciada desde las 8:00 hasta las 12:00 horas aproximadamente (pico máximo), para luego mostrar un decrecimiento hasta las 18:00. Para los monoterpenos los menores flujos de emisión se presentan durante las primeras

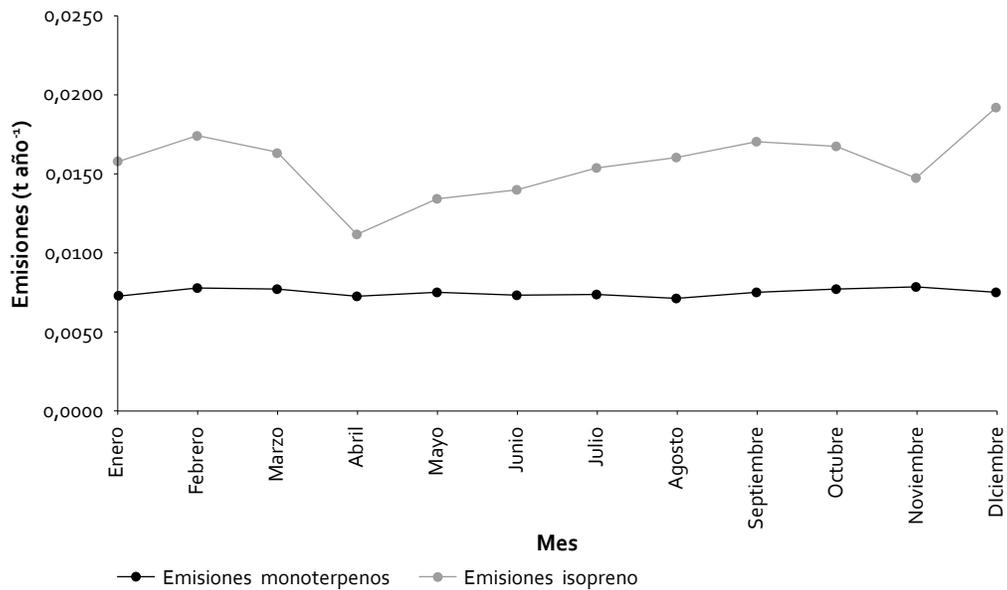


Figura 4. Emisiones de isopreno y monoterpenos mensual para el año 2019. Fuente: elaboración propia

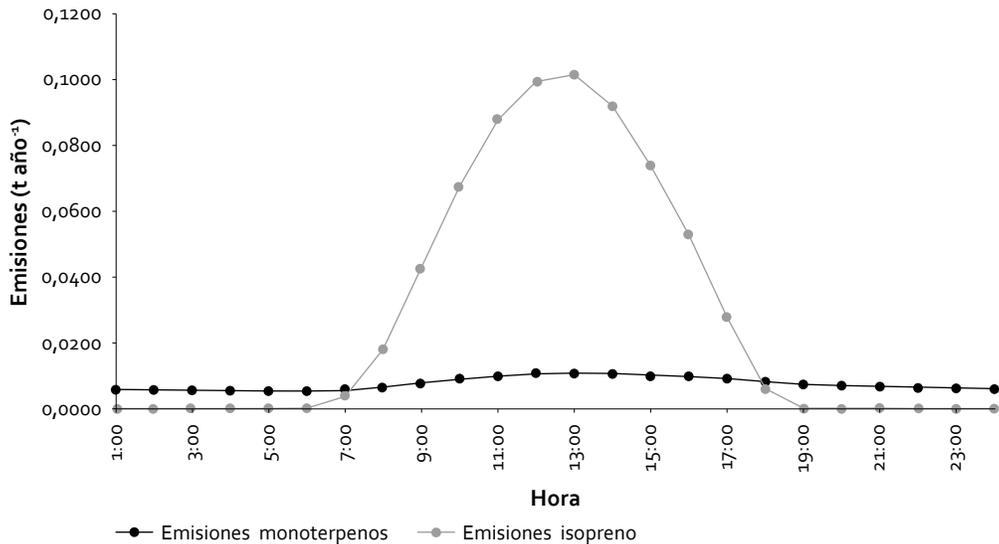


Figura 5. Emisiones de isopreno y monoterpenos por hora para el año 2019. Fuente: elaboración propia

horas del día desde las 00:00 hasta las 6:00 cuando la temperatura suele ser baja y la tasa de emisión más alta se presenta durante las 12:00 y 15:00 horas, debido a que no hay nubosidad presentando una mayor incidencia de temperatura, durante la noche sus tasas de emisión descienden nuevamente.

Para determinar la influencia de las variables meteorológicas (PAR y temperatura) en la emisión de COV se construyeron gráficas comparativas, la Figura 6 y Figura 7 representan la influencia de estas variables con la emisión de isopreno y monoterpenos.

Las curvas de emisión de isopreno con respecto a la PAR son similares teniendo en cuenta que a medida que aumenta la PAR, las emisiones son mayores alcanzando el pico máximo a las 12:00, momento en el cual la actividad metabólica de la vegetación (fotosíntesis y respiración) se encuentra en su mayor periodo de funcionamiento. Es por esto, que el isopreno solamente se produce en el día, teniendo en cuenta que la radiación es nula después del atardecer, es decir que sin presencia de luz no habrá emisiones de isopreno, en cuanto a las emisiones de monoterpenos esta se puede evidenciar

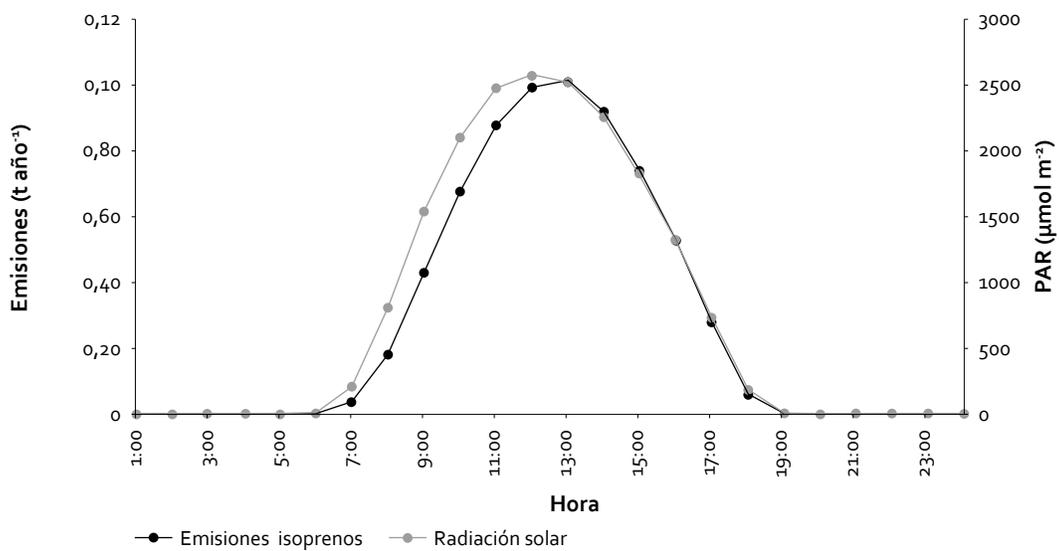


Figura 6. Emisiones de isopreno: influencia de la PAR. Fuente: elaboración propia

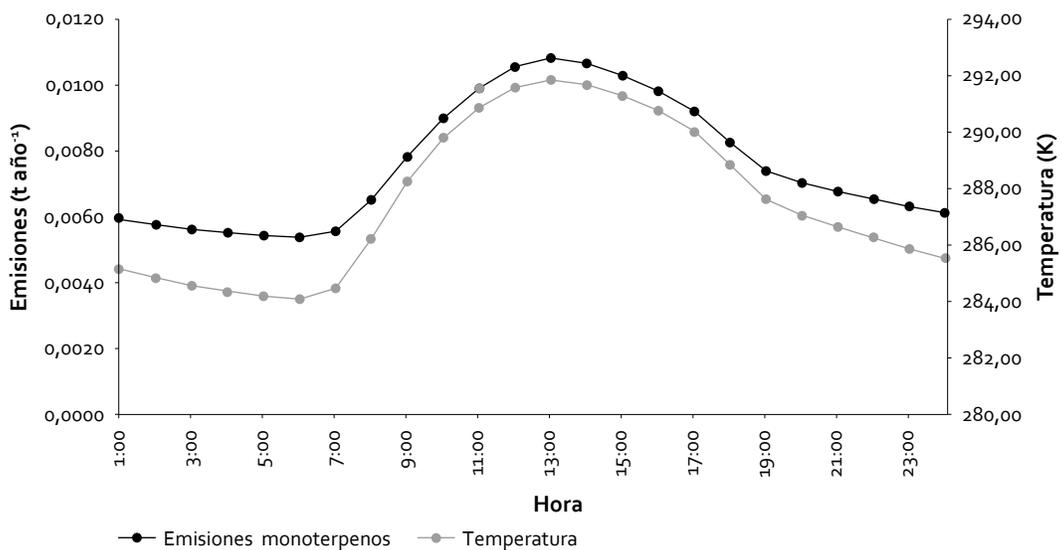


Figura 7. Emisiones de monoterpenos: influencia de la temperatura. Fuente: elaboración propia

que se presenta durante las 24 horas del día, pero en cantidades significativamente menores.

Según los cálculos presentados, en Bogotá las emisiones de isopreno y monoterpenos generadas por *E. globulus* son relativamente bajas convirtiéndolos en compuestos no predominantes en el ambiente urbano, considerando que la temperatura del medio es 17°C. Según estudios realizados por Velasco y Bernabé (2004), el proceso asociado a la producción de isopreno en las plantas es ocasionado por una posible protección térmica, proceso que se lleva a cabo por los cloroplastos, los cuales juegan un papel de acción enzimática, como respuesta a incrementos de temperatura. Es por esto, que el valor más alto de emisiones en Bogotá se presenta durante el día.

Las emisiones de monoterpenos bajo estimados teóricos y datos empíricos secundarios utilizados como el coeficiente empírico, que establece la dependencia de la emisión con la temperatura (β) y la temperatura de la hoja a condiciones estándar (T_s), permitió conocer que la cantidad que cada árbol emite 30,33 $\mu\text{g h}^{-1}$ de dicho compuesto, de tal manera, que la totalidad de las emisiones en la ciudad de Bogotá fue de 0,0092 t año⁻¹ para 2019.

Discusión

Las cantidades de COV estimadas en este estudio para la especie *E. globulus* no parecen ser significativas para las dimensiones del área estudiada, la baja densidad arbórea de la ciudad, una falencia urbana extensamente criticada puede ser la principal causa. Se requiere del levantamiento de la información para la totalidad de las especies presentes en el territorio capital en aras de alcanzar cifras más relevantes de emisión. El número de individuos de *E. Globulus* representa solo el 2,51% de la población arbórea de la ciudad, por lo que las emisiones de COV en la ciudad pueden ser significativamente mayores y requiere de la extensión de la metodología presentada a todas las especies presentes. Adicionalmente, y como se describió previamente, las emisiones de estos compuestos son proporcionales a la temperatura y radiación solar recibida, por lo que fenómenos como los causados por el calentamiento global podrán promover un aumento en la generación de

estos compuestos a futuro y es razonable contar con una línea base de análisis.

Conclusiones

Se identificaron diferentes metodologías, modelos y técnicas empleadas para la estimación de las emisiones asociadas a diferentes especies vegetales, donde las herramientas satelitales son dominantes en el estudio a escala global. La revisión de estudios científicos sobre los COV evidenció la carencia de información en cuantificación de emisiones para Latinoamérica y particularmente para Colombia.

Bajo el estudio de caso de *E. globulus* en Bogotá, se determinó que el isopreno es el compuesto emitido predominante en la ciudad, por encima de los monoterpenos. A condiciones estándar de 30°C de temperatura y 1.000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR el isopreno tiene una tasa de emisión de 0,038 t año⁻¹, muy por encima de los monoterpenos con 0,00932 t año⁻¹. La cuantificación bajo condiciones reales de temperatura y radiación promedio del 2019 en diferentes horas del día y meses del año, incrementó las tasas de emisión a 0,1868 y 0,088, con una variación del 78 y 89,4 %, respectivamente.

Finalmente, este trabajo permite tener un primer aporte en la cuantificación teórica de las emisiones de COV emitidas por la especie invasora *E. globulus* para la ciudad de Bogotá que puede ser considerada como línea base para estudios futuros que se realicen en otras partes de Colombia o para otras especies de la capital.

Referencias

- Acton, W., Schallhart, S., Langford, B., Valach, A., Rantala, P., Fares, S., Carriero, G., Tillmann, R., Tomlinson, S., Dragosits, U., Gianelle, D., Hewitt, C., Nemitz, E., 2016. Canopy-scale flux measurements and bottom-up emission estimates of volatile organic compounds from a mixed oak and hornbeam forest in northern Italy. *Atmos. Chem. Phys.* 16(11), 7149-7170. DOI: 10.5194/acp-16-7149-2016
- Adams, H., Macalady, A., Breshears, D., Allen, C., Stephenson, N., Saleska, S., Huxman, T., McDowell, N., 2010. Climate-induced tree mortality: Earth system consequences. *Eos, Trans. AGU* 91(17), 153-154. DOI: 10.1029/2010EO170003
- Álvarez-González, J., Balboa Murias M., Merino, A., Rodríguez-Soalleiro, R., 2005. Estimación de la

- biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais* 1, 21-30.
- Anderegg, W., Hicke, J., Fisher, R., Allen, C., Aukema, J., Bentz, B., Hood, S., Lichstein, J., Macalady, A., McDowell, N., Pan, Y., Raffa, K., Sala, A., Shaw, J., Stephenson, N., Tague, C., Zeppel, M., 2015. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytol.* 208(3), 674-683. DOI: 10.1111/nph.13477
- Aydin, Y., Yaman, B., Koca, H., Dasdemir, O., Kara, M., Altiok, H., Dumanoglu, Y., Bayram, A., Tolunay, D., Odabasi, M., Elbir, T., 2014. Biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from forested areas in Turkey: Determination of specific emission rates for thirty-one tree species. *Sci. Total Environ.* 490, 239-253. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.132
- Bauwens, M., Stavrou, T., Müller, J.-F. Van Schaeybroeck, B., De Cruz, L., De Troch, R., Giot, O., Hamdi, R., Termonia, P., Laffineur, Q., Amelynck, C., Schoon, N., Heinesch, B., Holst, T., Arneth, A., Ceulemans, R., Sanchez-Lorenzo, A., Guenther, A., 2018. Recent past (1979-2014) and future (2070-2099) isoprene fluxes over Europe simulated with the MEGAN-MOHYCAN model. *Biogeosciences* 15, 3673-3690. DOI: 10.5194/bg-15-3673-2018
- Boix, Y., Torres, J., Chávez, E., Luna, L., Quinones-Galvez, J., Dubois, A., Alemán, E., Cuypers, A., 2016. Evaluación cualitativa de monoterpenos en *Rosmarinus officinalis* cultivados con agua tratada magnéticamente. *Cult. Trop.* 37(Supl. 1), 136-141.
- Bolaño Ortiz, T., Camargo Caicedo, Y., Vélez-Pereira, A., 2015. Emisiones biogénicas de monoterpenos en el Parque Nacional Natural Tayrona, Santa Marta (Colombia). *Luna Azul* 40, 102-116.
- Bourtsoukidis, E., Williams, J., Kesselmeier, J., Jacobi, S., Bonn, B., 2014. From emissions to ambient mixing ratios: Online seasonal field measurements of volatile organic compounds over a Norway spruce-dominated forest in central Germany. *Atmos. Chem. Phys.* 14(13), 6495-6510. DOI: 10.5194/acp-14-6495-2014
- Caicedo Camargo, Y., Bolaño Ortiz, T., Álvarez Mancilla, A., 2010. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico y su contribución a la dinámica atmosférica. *Intropica* 5, 77-86.
- Derley Ramón, J., Navazo, M., Durana, N., Gómez, M., Uria, I., Ramón, J., Valencia, F., 2014. Estudio de compuestos orgánicos volátiles biogénicos en un área de fondo rural. *El Hombre y la Máquina* (44), 103-116.
- Diem, J., Comrie, A., 2011. Integrating remote sensing and local vegetation information for a high-resolution biogenic emissions inventory—application to an urbanized, semiarid region. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 50(11), 1968-1979. DOI: 10.1080/10473289.2000.10464223
- Dimitropoulou, E., Assimakopoulos, V., Fameli, K., Florcas, H., Kosmopoulos, P., Kazadzis, S., Lagouvardos, K., Bossioli, E., 2018. Estimating the biogenic non-methane hydrocarbon emissions over Greece. *Atmosphere* 9(1), 14. DOI: 10.3390/atmos9010014
- Faiola, C., Wen, M., VanReken, T., 2015. Chemical characterization of biogenic secondary organic aerosol generated from plant emissions under baseline and stressed conditions: Inter- and intra-species variability for six coniferous species. *Atmos. Chem. Phys.* 15(7), 3629-3646. DOI: 10.5194/acp-15-3629-2015
- Gaffar Malik, T., Gajbhiye, T., Kumar Pandey, S., 2018. Seasonality in emission patterns of isoprene from two dominant tree species of Central India: Implications on terrestrial carbon emission and climate change. *Proc. Int. Acad. Ecol. Environ. Sci.* 8(4), 204-212.
- Gaitán Varón, M., Cárdenas Ruíz, P., 2017. Guía para la elaboración de Inventarios de emisiones atmosféricas. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, DC.
- Gastelum, S., Mejía-Velázquez, G., Lozano-García, D., 2016. Remote sensing estimation of isoprene and monoterpene emissions generated by natural vegetation in Monterrey, Mexico. *Environ. Monit. Assess.* 188, 321. DOI: 10.1007/s10661-016-5324-1
- Ghirardo, A., Xie, J., Zheng, X., Wang, Y., Grote, R., Block, K., Wildt, J., Mentel, T., Kiendler-Scharr, A., Hallquist, M., Butterbach-Bahl, K., Schnitzler, J.-P., 2016. Urban stress-induced biogenic VOC emissions and SOA-forming potentials in Beijing. *Atmos. Chem. Phys.* 16(5), 2901-2920. DOI: 10.5194/acp-16-2901-2016
- 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. *Geosci. Model Dev.* 5, 1471-1492. DOI: 10.5194/gmd-5-1471-2012
- Guenther, A., Zimmerman, P., Harley, P., Monson, R., Fall, R., 1993. Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses. *J. Geophys. Res. Atmos.* 98(D7), 12609-12617. DOI: 10.1029/93JD00527
- Guidolotti, G., Pallozzi, E., Gavrichkova, O., Scartazza, A., Mattioni, M., Loreto, F., Calfapietra, C., 2019. Emission of constitutive isoprene, induced monoterpenes, and other volatiles under high temperatures in *Eucalyptus camaldulensis*: A ¹³C labelling study. *Plant Cell Environ.* 42(6), 1929-1938. DOI: 10.1111/pce.13521
- He, K., Shen, Z., Sun, J., Lei, Y., Zhang, Y., Wang, X., 2020. Spatial distribution, source apportionment, ozone formation potential, and health risks of volatile organic compounds over a typical central plain city in China. *Atmosphere* 11(12), 1365. DOI: 10.3390/atmos11121365
- Im, U., Poupkou, A., Incecik, S., Markakis, K., Kindap, T., Unal, A., Melas, D., Yenigun, O., Topcu, S.,

- Odman, M., Tayanc, M., Guler, M., 2011. The impact of anthropogenic and biogenic emissions on surface ozone concentrations in Istanbul. *Sci. Total Environ.* 409(7), 1255-1265. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.12.026
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2021. Geovisor Colombia. Disponible en: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/consulta-catastral>; consultado: septiembre 2021.
- Inzunza, J., 2019. Presión atmosférica y vientos. En: *Meteorología descriptiva*. Universitaria, Santiago. pp. 191-223.
- Jardín Botánico de Bogotá (JBB), 2019. Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano - SIGAU. Disponible en: <http://www.jbb.gov.co/index.php/productos-y-servicios/sigau>; consultado: mayo de 2020.
- Jing, X., Lun, X., Fan, C., Ma, W., 2020. Emission patterns of biogenic volatile organic compounds from dominant forest species in Beijing, China. *J. Environ. Sci.* 95, 73-81. DOI: 10.1016/j.jes.2020.03.049
- Jones, C., Hopkins, J., Lewis, A., 2011. In situ measurements of isoprene and monoterpenes within a southeast Asian tropical rainforest. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 6971-6984. DOI: 10.5194/acp-11-6971-2011
- Kanagendran, A., Pazouki, L., Niinemets, Ü., 2018. Differential regulation of volatile emission from *Eucalyptus globulus* leaves upon single and combined ozone and wounding treatments through recovery and relationships with ozone uptake. *Environ. Exp. Bot.* 145, 21-38. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2017.10.012
- Khan, M., Schlich, B.-L., Jenkin, M., Shallcross, B., Moseley, K., Walker, C., Morris, W., Derwent, R., Percival, C., Shallcross, D., 2018. A two-decade anthropogenic and biogenic isoprene emissions study in a London urban background and a London urban traffic site. *Atmosphere* 9(10), 387. DOI: 10.3390/atmos9100387
- Laothawornkitkul, J., Paul, N., Vickers, C., Possell, M., Taylor, J., Mullineaux, P., Hewitt C., 2008. Isoprene emissions influence herbivore feeding decisions. *Plant Cell Environ.* 31(10), 1410-1415. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2008.01849.x
- Leung, D., Tsui, J., Chen, F., Wing-Kin, Y., Vrijmoed, L., Chun-Ho, L., 2011. Effects of urban vegetation on urban air quality. *Landsc. Res.* 36(2), 173-188. DOI: 10.1080/01426397.2010.547570
- Leung, D., Wong, P., Cheung, B., Guenther, A., 2010. Improved land cover and emission factors for modeling biogenic volatile organic compounds emissions from Hong Kong. *Atm. Environ.* 44(11), 1456-1468. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.01.012
- Li, L., Chen, Y., Xie, S., 2013. Spatio-temporal variation of biogenic volatile organic compounds emissions in China. *Environ. Pollut.* 182, 157-168. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.06.042
- Li-Ramírez, J., Zambrano-Nájera, J., Aristizábal-Zuluaga, B., 2017. Inventory of biogenic volatile organic compounds for an Andean region. En: *Mem. VI Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública. Gestión de la calidad del aire, retos y alternativas*. Cali, Colombia. pp. 271-275.
- Lobstein, A., Couic-Marinier, F., Koziol, N., 2018. Huile essentielle d'*Eucalyptus globulus*. *Actual. Pharm.* 57(573), 59-61. DOI: 10.1016/j.actpha.2017.11.033
- Manea, A., Tabassum, S., Leishman, M., 2021. *Eucalyptus* species maintain secondary metabolite production under water stress conditions at the expense of growth. *Austral Ecol.* 46(7), 1030-1038. DOI: 10.1111/aec.13035
- Mendoza, B., Cruz, M., Carrera, L., Jimenez, M., Caicedo, J., Osorio, M., Santillán, L., Arias, F., 2019. Biogenetic study of the emissions of species: *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* Labill and *Alnus acuminata* in Riobamba canton, Ecuador. *F1000Research* 8, 1012. DOI: 10.12688/f1000research.19255.1
- Mendoza-Domínguez, A., León-Romero, M., Cballero-Mata, P., 2010. Emisiones de compuestos orgánicos volátiles durante arranques en frío de automóviles ligeros. *Ing. Inves. Tecnol.* 11(3), 333-347. DOI: 10.22201/ft.25940732e.2010.11n3.029
- Minckler, L., Gingrich, S., 1970. Relation of crown width to tree diameter in some upland hardwood stands of southern Illinois. *Res. Note NC-99, 4*, Forest Serv., Dep. Agric., North Central Forest Exp. Stn., St. Paul, MN.
- Mochizuki, T., Miyazaki, Y., Ono, K., Wada, R., Takahashi, Y., Saigusa, N., Kawamura, K., Tani, A., 2015. Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent formation of secondary organic aerosols in a *Larix kaempferi* forest. *Atm. Chem. Phys.* 15(20), 12029-12041. DOI: 10.5194/acp-15-12029-2015
- Mohd Hanif, N., Limi Hawari, N., Othman, M., Abd Hamid, H., Ahamad, F., Uning, R., Ooi, M., Wahab, M., Sahani, M., Latif, M., 2021. Ambient volatile organic compounds in tropical environments: Potential sources, composition and impacts –A review. *Chemosphere* 285, 131355. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131355
- Morfopoulos, C., Prentice, I., Keenan, T., Friedlingstein, P., Medlyn, B., Peñuelas, J., Possell, M., 2013. A unifying conceptual model for the environmental responses of isoprene emissions from plants. *Ann. Bot.* 112(7), 1223-1238. DOI: 10.1093/aob/mct206
- Olguín, L., Magadán, H., Rodríguez, M., 2004. *Metodos en biotecnología: cromatografía de gases*. Instituto de Biotecnología-Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.
- Pratt, K., Mielke, L., Shepson, P., Bryan, A., Steiner, A., Ortega, J., Daly, R., Helmig, D., Vogel, C., Griffith,

- S., Dusanter, S., Stevens, P., Alaghmand, M., 2012. Contributions of individual reactive biogenic volatile organic compounds to organic nitrates above a mixed forest. *Atm. Chem. Phys.* 12(21), 10125-10143. DOI: 10.5194/acp-12-10125-2012
- Rovelli, S., Cattaneo, A., Fazio, A., Spinazzè, A., Borghi, F., Campagnolo, D., Dossi, C., Cavallo, D., 2019. VOCs measurements in residential buildings: Quantification via thermal desorption and assessment of indoor concentrations in a case-study. *Atmosphere* 10(2), 57. DOI: 10.3390/atmos10020057
- Rubiano Calderón, K., 2019. Distribución de la infraestructura verde y su capacidad de regulación térmica en Bogotá, Colombia. *Colomb. For.* 22(2), 83-100. DOI: 10.14483/2256201X.14304
- Sakulyanontvittaya, T., Cho, S., Aklilu, Y.-A., Morris, R., Nopmongkol, U., 2016. An assessment of enhanced biogenic emissions influence on ozone formation in central Alberta, Canada. *Air Qual. Atmos. Health* 9, 117-127. DOI: 10.1007/s11869-015-0324-9
- Sánchez Buitrago, J., 2013. Estudio de la diversidad genética en *Eucalyptus globulus* (Labill.) empleando marcadores moleculares tipo microsatélite (SSR). Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, DC.
- Sawers, B., 2019. Controlling biogenic volatile organic compounds for air quality. *Ind. Law J.* 94(5), 79-90.
- Secretaría Distrital de Planeación Bogotá (SDP), s.f. POT. Alcaldía Mayor de Bogotá, DC, disponible en: <http://www.sdp.gov.co/micrositios/pot/que-es>; consultado: abril de 2020.
- Secretaría Distrital de Ambiente Bogotá (SDA), 2019. Informe anual de calidad de aire en Bogotá: red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá 2018. Alcaldía Mayor de Bogotá, DC, disponible en: <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/IAInformeAnual-2018RMCAB.pdf>; consultado: mayo de 2020.
- Seinfeld, J., Pandis, S., 1998. Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change: problem solution manual. John Wiley & Sons, Nueva York, NY.
- Silveira, C., Tchepel, O., 2014. Influence of the spatial resolution of satellite-derived vegetation parameters on the biogenic Volatile Organic Compounds (VOC) emission modeling. *Cent. Eur. J. Geosci.* 6(1), 104-111. DOI: 10.2478/s13533-012-0166-z
- Sindelarova, K., Granier, C., Bouarar, I., Guenther, A., Tilmes, S., Stavrou, T., Müller, J.-F., Kuhn, U., Stefani, P., Knorr, W., 2014. Global data set of biogenic VOC emissions calculated by the MEGAN model over the last 30 years. *Atmos. Chem. Phys.* 14(17), 9317-9341. DOI: 10.5194/acp-14-9317-2014
- Situ, S., Guenther, A., Wang, X., Jiang, X., Turnipseed, A., Wu, Z., Bai, J., Wang, X., 2013. Impacts of seasonal and regional variability in biogenic VOC emissions on surface ozone in the Pearl river delta region, China. *Atmos. Chem. Phys.* 13(23), 11803-11817. DOI: 10.5194/acp-13-11803-2013
- Velasco, E., Bernabé, R., 2004. Emisiones biogénicas. *Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos (SEMARNAT)*, México, DF.
- Wang, Q., Han, Z., Wang, T., Higan, Y., 2007. An estimate of biogenic emissions of volatile organic compounds during summertime in China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 14, 69-75. DOI: 10.1065/espr2007.02.376
- Wang, Y., Hu, M., Guo, S., Wang, Y., Zheng, J., Yang, Y., Zhu, W., Tang, R., Li, X., Liu, Y., Breton, M., Du, Z., Shang, D., Wu, Y., Wu, Z., Song, Y., Lou, S., Hallquist, M., Yu, J., 2018. The secondary formation of organosulfates under the interactions between biogenic emissions and anthropogenic pollutants in summer in Beijing. *Atmos. Chem. Phys.* 18(14), 10693-10713. DOI: 10.5194/acp-18-10693-2018
- Wu, K., Yang, X., Chen, D., Gu, S., Lu, Y., Jiang, Q., Wang, K., Ou, Y., Qian, Y., Shao, P., Lu, S., 2020. Estimation of biogenic VOC emissions and their corresponding impact on ozone and secondary organic aerosol formation in China. *Atmos. Res.* 231, 104656. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104656
- Wyche, K., Ryan, A., Hewitt, C., Alfarra, M., McFiggans, G., Carr, T., Monks, P., Smallbone, K., Capes, G., Hamilton, J., Pugh, T., MacKenzie, A., 2014. Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent photochemical production of secondary organic aerosol in mesocosm studies of temperate and tropical plant species. *Atmos. Chem. Phys.* 14(23), 12781-12801. DOI: 10.5194/acp-14-12781-2014
- Yáñez-Serrano, A., Bourtsoukidis, E., Alves, E., Bauwens, M., Stavrou, T., Llusà, J., Filella, I., Guenther, A., Williams, J., Artaxo, P., Sindelarova, K., Doubalova, J., Kesselmeier, J., Peñuelas, J., 2020. Amazonian biogenic volatile organic compounds under global change. *Glob. Change Biol.* 26(9), 4722-4751. DOI: 10.1111/gcb.15185