



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE BIOLOGÍA

Cámaras experimentales y su aporte al estudio del efecto de la contaminación del aire en la fisiología de árboles urbanos; un estado del arte

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

P R E S E N T A :

BRAULIO MANUEL GÓMEZ DÍAZ

JURADO DE EXAMEN

DIRECTOR: M. C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ

ASESORA: DRA. ALBERTA LOURDES CASTILLO GRANADA

ASESORA: DRA. PATRICIA RIVERA GARCÍA

SINODAL: M. EN C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL

SINODAL: BIOL. MARICELA ARTEAGA MEJÍA



CIUDAD DE MÉXICO

OCTUBRE 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

NULLIUS IN VERBA

AGRADECIMIENTOS

A mi universidad, la Universidad Nacional Autónoma de México. Desde el día uno, aquel cinco de agosto de 2013, me has nutrido en todo aspecto de mi vida. En ti he encontrado conocimiento, felicidad, amor y verdaderas amistades. Donde sea que ponga el pie, siempre lo haré con la frente en alto, orgulloso de mi *alma mater*, ¡orgulloso de ser zaragzano!

A mis padres. Desearía ser capaz de plasmar el sentimiento que se apodera de mi al escribirles esto, lamentablemente no soy un escritor tan agudo como para lograr ese cometido. Solo me queda agradecerles infinitamente por todos los días que me han regalado, pues desde que tengo memoria, siempre han estado para mí. Ustedes son gran parte de mi inspiración en todo lo que hago, los amaré toda mi vida.

A Yeyo. Hermanito, muchas ocasiones he llegado a creer que yo aprendo mucho más de ti de lo que yo he podido enseñarte. Te agradezco enormemente toda la paciencia y el amor que me tienes, soy muy afortunado al tener a un hermano que siempre está. Te aseguro que nunca te hará falta apoyo y amor de tu hermano mayor.

A mi abuelo Norberto. Fuiste mi inspiración para estudiar esta carrera, y lo seguirás siendo para ejercerla honradamente, donde sea que te encuentres, tu científico te ama y vive orgulloso de haber sido tu nieto.

A mis abuelas. Aun cuando siempre hemos estado a la distancia, sepan que ni la ausencia ni el tiempo son nada cuando se ama. Luisa, muchas gracias por las carcajadas, los buenos momentos y las pláticas tan interesantes que me has obsequiado. Teresa, muchas gracias por haber cuidado de mí como una madre cuando fui pequeño, jamás olvido los momentos en que me tomaste de la mano, en los que me serviste tus deliciosas comidas y en los que nos mecíamos juntos en la hamaca, te amo.

A Citlali. Mujer, te conocí en un momento en el que nuestro tiempo era destinado completamente al estudio, te agradezco las pláticas y las boberías que compartimos para amenizar el trabajo de laboratorio, siempre sentí que en ti podía contar con una verdadera amiga. Ahora que hemos llevado más allá esa amistad para convertirla en algo muy hermoso, te tocó soportar mis berrinches por no terminar la tesis, y mira, aquí está. Gracias por motivarme todos los días, eres una persona extraordinaria.

A mi director. He encontrado en usted enseñanzas académicas y de vida, no me queda más que agradecer por el espacio, el tiempo y la oportunidad de desarrollarme profesionalmente bajo su tutela, no olvide que ahora también soy hijo del laboratorio de contaminación atmosférica.

No existen palabras suficientes para expresar el profundo agradecimiento que siento en este momento de mi vida, de ser posible, intentaría reflejar este sentimiento a cada uno quienes estuvieron a mi lado y los que siguen estando, muchas gracias, sin todos ustedes yo no sería lo que me he llegado a convertir, humildemente ofrezco estas breves palabras, deseando que donde sea que se encuentren, la vida siempre les ofrezca éxito, salud y buena compañía.

Con dedicatoria a mis padres; Sergio y Hayde
a mi hermano Ariel
y a Citlali

Los amo

ÍNDICE GENERAL

I INTRODUCCIÓN	9
II MARCO REFERENCIAL	10
2.1 CONTAMINACIÓN DEL AIRE.....	10
2.1.1 <i>Registros y Normatividad de la contaminación del aire en la Ciudad de México</i>	15
2.1.2 <i>Efectos de contaminantes del aire en árboles urbanos</i>	16
2.2 CEXP: TECNOLOGÍA PARA ESTUDIAR LA FISIOLOGÍA DEL ÁRBOL	20
2.2.1 <i>Tipos de cámaras experimentales</i>	21
Cámara de ambiente controlado	22
Cámaras abiertas.....	23
Cámaras cerradas de intercambio de gases	23
Cámara de fumigación	24
Cámara de deposición	24
Cámara de combustión	25
Cámara de hoja	25
Cámara de árbol completo.....	26
2.3 EL ESTADO DEL ARTE EN LA INVESTIGACIÓN BIOLÓGICA.....	27
2.3.1 <i>El análisis bibliométrico</i>	31
III ANTECEDENTES.....	34
IV PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	38
VI OBJETIVOS.....	39
6.1 OBJETIVO GENERAL.....	39
6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	39
VII HIPÓTESIS.....	40
VIII MÉTODO.....	40
8.1 BÚSQUEDA DOCUMENTAL.....	40
8.2 TRANSFORMACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	46
8.2.1 <i>Matriz bibliográfica</i>	46
8.2.2 <i>Análisis bibliométrico</i>	46
8.3 ANÁLISIS DOCUMENTAL.....	47
8.3.1 <i>Delimitación de análisis</i>	47
8.3.2 <i>Matriz de análisis documental</i>	47
IX RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
9.1 BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DOCUMENTAL	48
9.2 INDICADORES BIBLIOMÉTRICOS	55
9.2.1 <i>Productividad, uso y frecuencia de uso de las cámaras experimentales</i>	55
9.2.2 <i>Autores e instituciones</i>	63
9.2.3 <i>Títulos, revistas científicas, palabras clave, enfoques y tipos de estudio</i>	66
9.2.4 <i>Tendencias de estudio</i>	70
XI CONCLUSIONES.....	77
REFERENCIAS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

figura 1	Composición química de la atmósfera	10
figura 2	Algunas ecuaciones químicas de la génesis de lluvia ácida.....	12
figura 3	Dinámica de contaminantes primarios y secundarios en la atmósfera.....	13
figura 4	Síntesis de ozono troposférico	14
figura 5	Algunos efectos visibles de contaminantes criterio en árboles	18
figura 6	Mecanismo de interacción de contaminantes del aire en plantas.....	19
figura 7	Dos propuestas de cámara de ambiente controlado	22
figura 8	Dos propuestas de cámaras abiertas	23
figura 9	Dos propuestas de cámaras de intercambio de gases	23
figura 10	Dos propuestas de cámaras de fumigación.	24
figura 11	Cámara de deposición de Cho et al., (2021)	24
figura 12	Cámara de combustión.....	25
figura 13	Cámaras de hoja de pinza y cerradas	25
figura 14	Cámaras de árbol completo.....	26
figura 15	Tipos de documentos y fuentes de información.....	29
figura 16	Ejemplo de una matriz bibliográfica.....	30
figura 17	Ejemplo de una matriz analítica de contenido	30
figura 18	Comparación de revistas científicas incluidas en Scopus y WoS	41
figura 19	Resultados de búsqueda condicionados	48
figura 20	Gráfica de comparación de especies nativas y exóticas comunes de la Ciudad de México.....	49
figura 21	Porcentajes de árboles comunes de la Ciudad de México estudiados con CExp internacionalmente.....	50
figura 22	Número de estudios realizados sobre las especies de mayor interés internacional	52
figura 23	Productividad científica anual relacionada al uso de cámaras experimentales (1972-2020)	55
figura 24	Frecuencia relativa (82%) del total de tipo de CExp citadas en muestra documental	60
figura 25	Frecuencia relativa (18%) del total de tipo de CExp citadas en muestra documental	61
figura 26	Países más productivos	61
figura 27	Productividad científica por país.....	62
figura 28	Mapa de colaboración internacional	62
figura 29	Autores con cinco o más publicaciones respecto al tema	63
figura 30	Colaboración interinstitucional en la productividad científica	64
figura 31	Diagrama de colaboración internacional por autores.....	65
figura 32	Ocurrencia de términos empleados en títulos	66
figura 33	Revistas de mayor relevancia Por número de documentos incluidos n=90.....	67
figura 34	Ocurrencia de términos empleados como palabras clave	68

figura 35 Ocurrencia de estudios según sus enfoques. n=190.....	69
figura 36 Ocurrencia de tipo de estudios. n=190.....	70
figura 37 Tendencia de los tópicos de estudio.....	71
figura 38 Red Bibliométrica del uso de Cámara Experimentales en estudios de efectos de contaminación del aire en árboles urbanos plantados en la Ciudad de México	76

ÍNDICE DE CUADROS

cuadro 1 Registros de contaminación de la Ciudad de México para el año 2018.....	16
cuadro 2 Efectos generales de algunos contaminantes criterio en árboles.....	17
cuadro 3 Criterios de selección de documentos para la obtención de muestra	45
cuadro 4 Porcentajes de especies apropiadas y no apropiadas estudiadas internacionalmente con el uso de CExp.....	51
cuadro 5 Primera y última sección de la matriz de análisis documental.....	53
cuadro 6 Mínimos y máximos de exposiciones de contaminación a especies nativas de la Ciudad de México, empleados en cámaras experimentales	73

RESUMEN

La contaminación del aire de la Ciudad de México, la cual se estudia desde 1970 a la fecha, afecta la valiosa contribución de los árboles urbanos a los servicios ecosistémicos, a saber: captura de carbono, de agua y de contaminantes. Para determinar el conocimiento biológico derivado del uso de cámaras experimentales (CExp) en la evaluación de efectos de contaminantes del aire en especies arbóreas plantadas en la Ciudad de México, se elaboró un análisis bibliométrico que permitió la construcción del estado del arte/técnica sobre el tema.

El análisis bibliométrico se desarrolló con una muestra documental obtenida de la base de datos Scopus, los criterios de selección de documentos fueron el idioma (español e inglés), la fecha (1970-2021) y el diseño experimental (CExp-especie arbórea-contaminantes). La muestra obtenida se organizó en una matriz bibliográfica para su análisis en Bibliometrix ver. 3.1 y VOSviewer ver. 1.16.17, softwares con los que se obtuvieron indicadores bibliométricos de productividad, coautoría, terminología y tendencias de investigación. Los estudios de árboles nativos fueron sometidos a lectura crítica y sintetizados en una matriz de análisis documental para reconocer vacíos investigativos acerca del uso de cámaras CExp.

Se identificaron 210 especies de árboles comúnmente plantados en la Ciudad de México, 111 son exóticas y 99 nativas, tan solo el 25% han sido investigadas con el uso de cámaras experimentales. *Populus tremuloides* y *Populus deltoides* son las más estudiadas. Las CExp se clasificaron en 8 tipos distintos, estas son empleadas principalmente para evaluar respuestas y efectos de las especies arbóreas en su fotosíntesis, crecimiento y conductancia estomática frente a una exposición de ozono y dióxido de carbono en concentraciones elevadas. Las cámaras abiertas son las más usadas con una frecuencia relativa del 53%, seguidas por las de intercambio de gases (16%) y las de ambiente controlado (13%).

Se concluye que no hay criterio para la selección de una cámara o especie arbórea en específico, sin embargo, se propone emplear las cámaras abiertas para estudios in situ. Las de intercambio de gases para la selección de plantas benéficas para remoción de COVs. Las de ambiente controlado para situaciones en las que las condiciones de campo o del investigador no permitan el uso de cámaras abiertas. Las de hoja para brindar un panorama más acertado en la interpretación de resultados obtenidos con otro tipo de CExp, y las de árbol completo para evaluar el crecimiento de árboles de grandes dimensiones en bosques y parques urbanos.

También se concluye que el análisis bibliométrico es una herramienta útil en la construcción del estado del arte, pues este permitió identificar hasta donde se ha avanzado en el tema.

I INTRODUCCIÓN

Las Cámaras Experimentales (CExp) se pueden concebir como recintos de diversas dimensiones construidos con materiales inertes, que se utilizan para simular o generar condiciones ambientales específicas con el objetivo de probar argumentos teóricos sobre los efectos de la contaminación atmosférica y el cambio climático en la fisiología y ecología de especies tolerantes o sensibles al estrés ambiental.

Desarrolladas en los Estados Unidos a principios del siglo XX, las CExp fueron empleadas inicialmente para exponer especies hortícolas a estrés ambiental y concentraciones elevadas de contaminantes atmosféricos, con la finalidad de seleccionar linajes aptos para reducir pérdidas económicas y aumentar la productividad de los cultivos.

La economía posterior a la segunda guerra mundial promovió un consumo elevado de compuestos derivados del petróleo, propiciando contaminación atmosférica y, por ende, impactos negativos en la vegetación de zonas urbanas, debido a esto, se reconoció internacionalmente la necesidad de generar conocimiento fisiológico, bioquímico y ecológico del fenómeno, por lo que las CExp adquirieron mayor relevancia en estudios de diagnóstico, extendiéndose a escala de bosques y bosques urbanos.

Hoy en día, a pesar de su utilidad en la investigación internacional, las CExp son poco utilizadas en México, y por esto, previo a estudios experimentales, es necesario indagar documentalmente. Un análisis bibliométrico acerca del uso de cámaras experimentales para evaluar los efectos de contaminantes del aire en árboles permitirá establecer el estado del arte del tema, es decir, expondrá lo que se ha hecho y lo que se hace actualmente, así como dónde y cuándo se ha hecho y qué puede ser adoptado para estudios experimentales locales.

II MARCO REFERENCIAL

2.1 Contaminación del aire

La atmósfera, el sistema gaseoso que envuelve a la tierra en el cual ocurren múltiples procesos químicos, es un reservorio de elementos que circulan en la biosfera en los ciclos biogeoquímicos (Alario y Franco, 2000; SEMARNAT, 2019). Posee cinco capas de distinta constitución física y química, puntualizadas en orden descendente (*figura 1*) y son; Exósfera, termósfera, mesósfera, estratósfera y tropósfera, siendo la última la más cercana a la superficie terrestre y la que posee más del 90% de la masa atmosférica (Sánchez-Salinas et al., 2014).

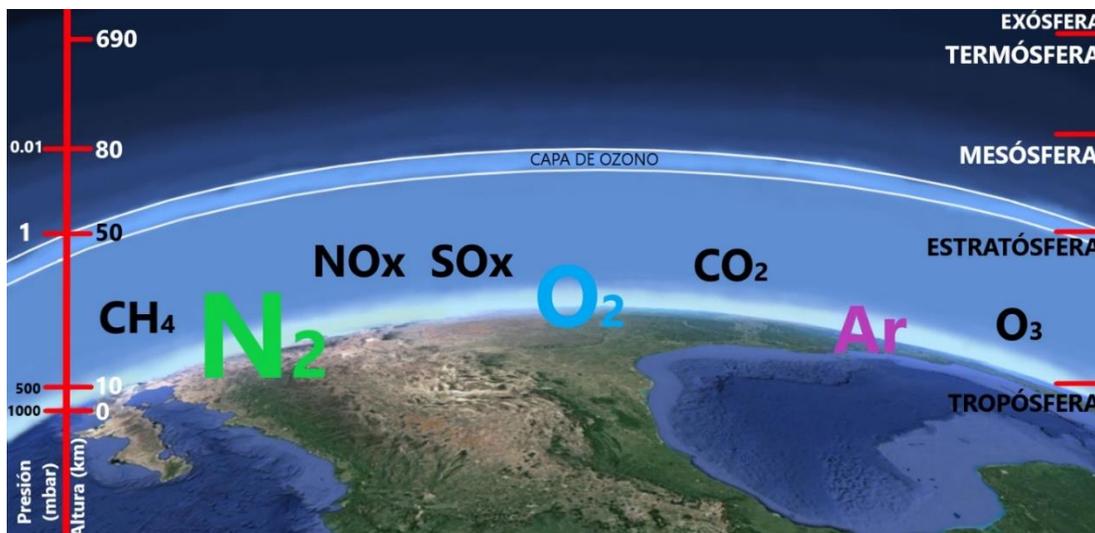


figura 1 Composición química de la atmósfera. La capa de ozono se localiza en la estratósfera, entre los 10 a 50 km de altura de la superficie, sin embargo, para fines ilustrativos, en esta figura se expone sobre el límite estratosférico. Elaboración propia con base en (Cedrón et al., 2011).

La composición mayoritaria de la tropósfera se constituye en un 78% de Nitrógeno molecular (N₂), en un 21% de Oxígeno molecular (O₂) y un 1% de Argón (Ar), empero,

compuestos ajenos a esta composición tales como el agua ($\text{H}_2\text{O};\text{OH}^-;\text{H}^+$), Metano (CH_4), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Óxidos de Azufre (SO_x), Dióxido de Carbono (CO_2) y el Ozono (O_3), entre otros, cambian en gran medida la dinámica del aire, es decir, de la tropósfera y su fotoquímica a pesar de su relativa baja concentración (Sánchez-Salinas et al., 2014).

A raíz del avance tecnológico desde la revolución industrial en los últimos años del siglo XIX, seguido de la primera y la segunda guerra mundial en 1914 y 1939 respectivamente (Chávez, 2006), se ha incrementado la emisión de contaminantes atmosféricos. En consecuencia, la calidad del aire ha disminuido, generando efectos negativos en los ecosistemas terrestres como la muerte masiva de árboles en Europa, debido a las elevadas emisiones de monóxido de carbono (CO), SO_x , material particulado y CO_2 (Mosley, 2014).

No fue hasta fines de los años 80s que este tipo de gases, junto al vapor de agua, metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y el O_3 (entre otros) se reconocieron como gases de efecto invernadero, los cuales aceleran el calentamiento global (Maslin, 2008). Por otra parte, contaminantes atmosféricos menos visibles como los SO_x y los NO_x , cobraron relevancia alrededor de 1950 en atención al declive de áreas forestales y de fauna acuática (peces) en Noruega ocasionados por la lluvia ácida (*figura 2*), fenómeno también observado en Norteamérica en la década de 1960 (Jacob, 1999; Sivaramanan, 2015).

El deterioro en la calidad de aire, agua, suelo y la disminución en la calidad de vida de los seres humanos, se relaciona estrechamente con el aumento en la concentración de contaminantes del aire (Sánchez-Salinas et al., 2014). Granados et al., (2010) reportan que los contaminantes viajan a través de la circulación elemental entre los componentes del ecosistema y se incorporan nuevamente vía deposición seca y húmeda (lluvia) (*figura 2*).

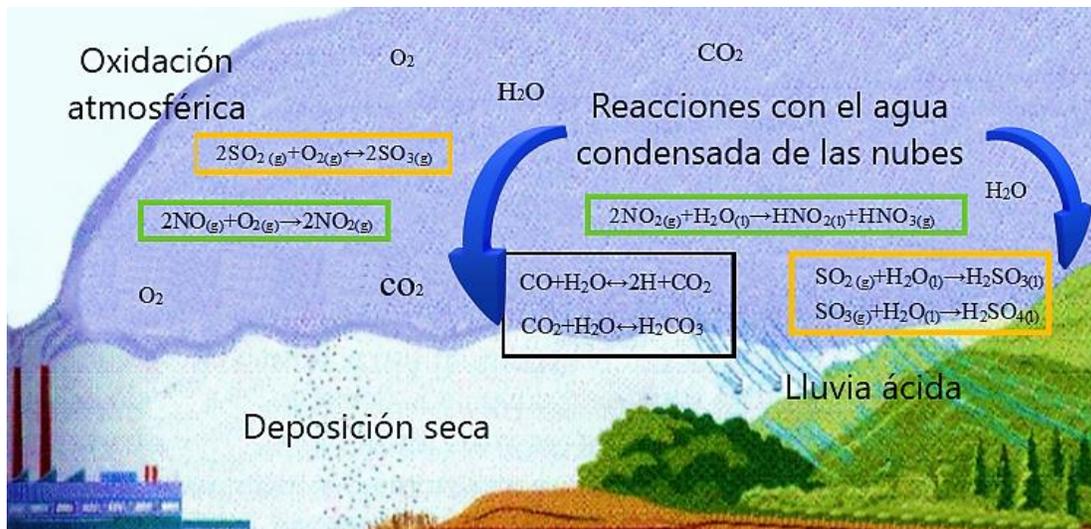


figura 2 Algunas ecuaciones químicas de la génesis de lluvia ácida. Naturalmente ácidos como el carbónico (H_2CO_3), el sulfúrico (H_2SO_4) y el nítrico (HNO_3) están presentes en la atmósfera debido a la oxidación de **COx**, **SOx** y **NOx**. Las emisiones antrópicas de estos precursores aceleran la formación de compuestos que disminuyen el pH de la lluvia a ≤ 5 . Nota: Según Muñoz (2008), el SO_2 representa el 60% del total de emisiones a la atmósfera por el sector industrial hasta la actualidad. Obtenido y modificado de Cedrón et al., (2011) con base en Granados et al., (2010).

Dependiendo de su origen y naturaleza, los contaminantes del aire se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios, son aquellos que son vertidos directamente a la atmósfera por fuentes fijas y móviles. Los secundarios, son originados en el aire mediante una reacción química entre los contaminantes primarios con la luz solar (fotoquímicos) y/o con los gases propios de la atmósfera (**figura 3**), siendo el ozono el contaminante de mayor riesgo de esta categoría (Herrejón G., 2018).

Si bien en la estratósfera el ozono es una molécula naturalmente presente, la cual protege la vida en la tierra al absorber un gran porcentaje de la radiación ultravioleta (PNUMA, 2022), en la tropósfera el ozono representa un riesgo a la salud del ser humano y a la supervivencia de especies vegetales en los bosques urbanos (Karnosky et al., 2007; Rivera et al., 2016), por consiguiente, en este trabajo al referirse al ozono se debe entender como ozono troposférico.

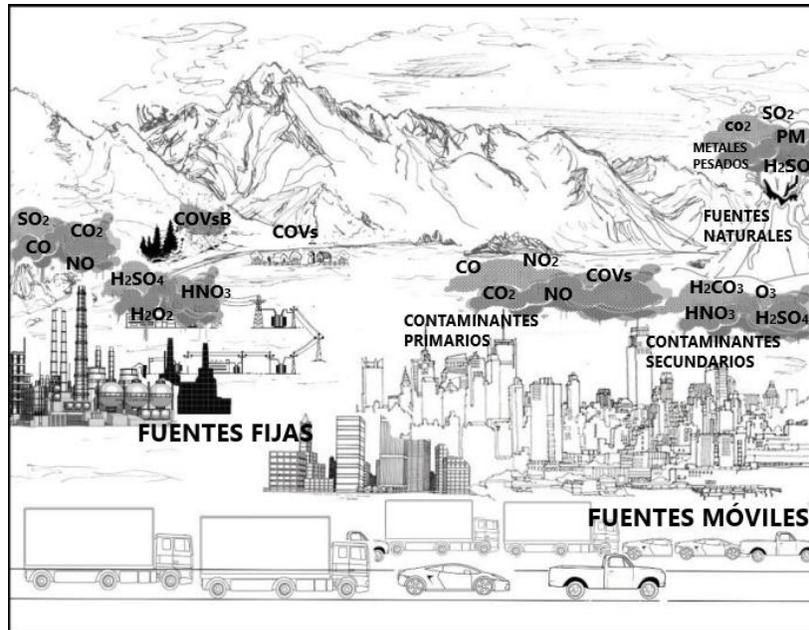


figura 3 Dinámica de contaminantes primarios y secundarios en la atmósfera. El monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles, sean de origen biológico o no (VOVsB y COVs), SO_x y NO_x se les considera contaminantes primarios al ser estas especies químicas liberadas directamente a la atmósfera, sin tener que sufrir una previa transformación. Obtenido y modificado de Sánchez-Salinas et al., (2014).

El ozono se forma a partir de reacciones fotoquímicas con gases como NO_x , CH_4 , CO y compuestos orgánicos volátiles (COVs) excitados por cuantos lumínicos solares. Los COVs son compuestos orgánicos que se evaporan fácilmente a temperatura ambiente y dependiendo de sus grupos funcionales y su estructura molecular (usualmente contiene H, O, F, Cl, Br, S o N), se clasifican en hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos aromáticos, alcoholes, éteres, ésteres y aldehídos (Anand et al., 2014; Anand y Mehendale, 2005).

La fuente emisora de COVs a la tropósfera puede ser natural o antropogénica. Las fuentes naturales incluyen la vegetación que emite compuestos aromáticos, incendios forestales y procesos bióticos anaerobios. Los COVs antropogénicos se liberan del uso de solventes o sustancias domésticas, el uso de vehículos y la ejecución de procesos industriales como los textiles, metalúrgicos, agrícolas, farmacéuticos, entre otros (Pandey y Yadav, 2018).

A mediados de la década de los 50s se descubrió que la formación de ozono en la tropósfera se relaciona con los COVs y los óxidos de nitrógeno (Anand et al., 2014). A rasgos generales, la radiación cercana al espectro ultravioleta de la luz solar disocia estas moléculas para formar radicales libres, los cuales conducen a la formación de ozono como un subproducto de las reacciones químicas (*figura 4*).

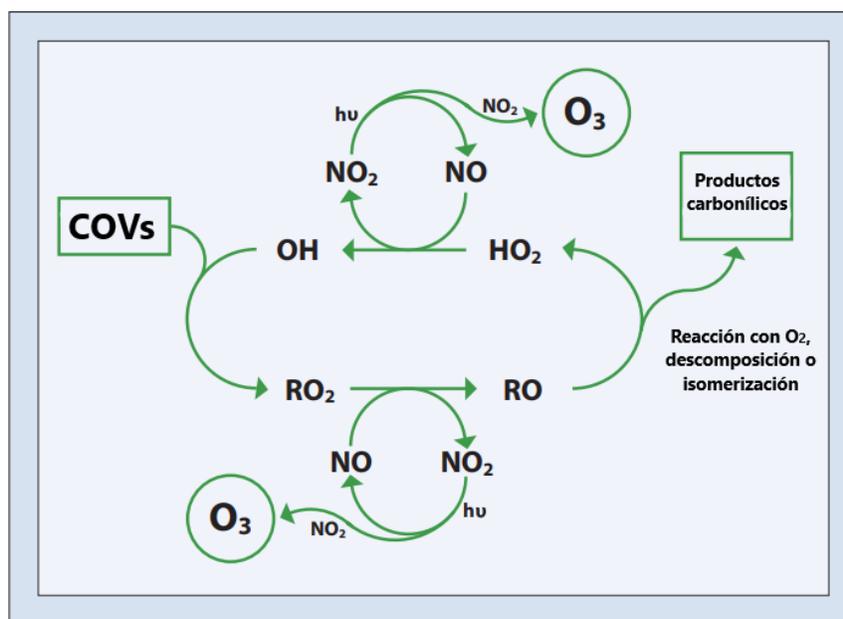


figura 4 Síntesis de ozono troposférico. De forma natural, los radicales hidroxilos (OH) y peróxido de hidroxilo (HO_2) de la atmósfera, los cuales son producto de la reacción fotoquímica ($h\nu$) del agua, actúan como un “detergente natural” que combustiona a los contaminantes primarios (NO y COVs). Sin embargo, las emisiones antropogénicas de COVs alteran dicho proceso incrementando alarmantemente la concentración de ozono. Obtenido de Forsberg et al., (2008).

La radiación solar ($h\nu$) propicia la liberación de un átomo de oxígeno del NO_2 , el cual a su vez promueve la formación de ozono en la tropósfera al unirse el O liberado con el O_2 ambiental, estas reacciones corresponden al ciclo natural de los NO_x y son reversibles, sin embargo, la “combustión” o “lavado” de los COVs a través los radicales hidroxilo libera radicales orgánicos que, en breves palabras, anulan la reversibilidad de estas reacciones al

retener u oxidar los NO, lo cual incrementa indirectamente la concentración de ozono (Sánchez-Salinas et al., 2014).

El CO_x, NO₂, SO₂, O₃ y sus transformaciones son algunos de los contaminantes que más afectan la salud humana y los ecosistemas, por lo que son denominados contaminantes criterio (Herrejón, 2018). Cabe mencionar la relevancia del material particulado (PM) como un contaminante nocivo para la salud, se clasifican de acuerdo con su tamaño en partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros, “PM10” y “PM2.5” respectivamente y al igual que los anteriores, producen efectos negativos en la vegetación.

2.1.1 Registros y Normatividad de la contaminación del aire en la Ciudad de México

La ciudad de México cuenta con un Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) compuesto por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) y la Red de Depósito Atmosférico (REDDA). Para el año 2018 se registraron los siguientes valores por contaminante.

En síntesis, el *cuadro 1* expone al SO₂, NO₂, O₃ y PM_{2.5} como contaminantes fuera de los límites permitidos tanto por las NOM como por la EPA, las PM₁₀ rebasan a la NOM, pero no a la EPA. El CO se encuentra dentro de los niveles permitidos por ambas regulaciones.

cuadro 1 Registros de contaminación de la Ciudad de México para el año 2018 y comparación con límites máximos permisibles de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y la Organización Mundial de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Datos obtenidos de Jaimes et al., 2020; SEDEMA, 2022b)

Contaminante	Registros (2018)	(1) Límite NOM	(2) Límite E.U. EPA
Dióxido de azufre (SO ₂)	(1)0.042 ppm máximo 24 horas. (2)0.109 ppm promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales como promedio horario	<u>NOM-022-SSA1-2019</u> 0.040 ppm máximo 24 horas 0.075 ppm promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales como promedio horario	0.075 ppm promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales como promedio horario
Monóxido de carbono (CO)	2.3 ppm máximo 8 horas	<u>NOM-021-SSA1-2021</u> 9 ppm máximo 8 horas	9 ppm máximo 8 horas
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	(1)0.195 ppm máximo 1 hora (2)0.106 ppm promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales como promedio horario	<u>NOM-023-SSA1-2021</u> 0.106 máximo 1 hora	0.100 ppm promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales como promedio horario
Ozono (O ₃)	(1)0.120 ppm máximo 8 horas (2)0.119 ppm máximo 8 horas evaluado en 3 años	<u>NOM-020-SSA1-2021</u> 0.065 ppm máximo 8 horas	0.075 ppm máximo 8 horas evaluado en 3 años
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	(1)103 µg/m ³ máximo 24 horas (2)91 µg/m ³ promedio trianual de máximo 24 horas	<u>NOM-025-SSA1-2021</u> 70 µg/m ³ máximo 24 horas	150 µg/m ³ promedio trianual de máximo 24 horas
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	58 µg/m ³ máximo 24 horas 44 µg/m ³ promedio trianual de máximo 24 horas	<u>NOM-025-SSA1-2021</u> 41 µg/m ³ máximo 24 horas	35 µg/m ³ promedio trianual de máximo 24 horas

2.1.2 Efectos de contaminantes del aire en árboles urbanos

A pesar de que en Europa y Norteamérica se ha documentado extensivamente los efectos adversos de la contaminación del aire en bosques naturales y urbanos, poco se sabe acerca de las condiciones de la Ciudad de México (Emberson et al., 2001). El daño a los árboles se clasifica en no visible; cambio de productividad, crecimiento o parámetros fisiológicos, y visible; cambios de pigmentación y coloración típica de muerte celular (*figura 5, pág. 19*).

El daño visible puede ser crónico o agudo, siendo el primero consecuencia de exposición de la planta a concentraciones bajas en periodos continuos, por lo que las células del individuo no mueren en su totalidad, mientras que el daño agudo acelera gravemente la muerte celular debido a una exposición a elevadas concentraciones en periodos cortos tiempo (Bell et al., 2011).

cuadro 2 Efectos generales de algunos contaminantes criterio en árboles. En la columna de “contaminante” se expone el efecto directo de contaminantes en atmósfera y principales precursores. Con base en Bell et al., (2011) y Saxena et al., (2017).

Contaminante	Efecto visible	Efecto no visible
Dióxido de azufre (SO₂) -Precursor de lluvia ácida	DC: Clorosis intervenal; disminución de tamaño y grosor de hoja DA: Tejido muerto en orillas o zonas intercostales; senescencia prematura	Fitotoxicidad relacionada a formación de SO ₃ en tejido mesófilo
Ozono (O₃) -Incremento en la concentración por NOx y COVs	DA: Necrosis; moteo de hoja; senescencia prematura (intensificado a fines de primavera-inicio verano)	Daño al ADN, proteínas y lípidos debido a la reactividad con sustancias oxigenadas; disminución de fijación de carbono, fotosíntesis y crecimiento debido al elevado consumo energético de los sistemas de defensa antioxidantes; disminución en la concentración de iones (cambios osmóticos en citoplasma)
Material particulado (PM₁₀ y PM 2.5) -Incluido el plomo, sustancias ácidas, polvo, etc	DC: Obstrucción de estomas DA: Muerte de tejidos; senescencia prematura	Reducción de actividad fotosintética; cambios químicos sobre partes aéreas de la planta; reducción en tasa de transpiración y de enfriamiento por evaporación

DA: Daño agudo; DC: Daño crónico

Al respecto, cabe mencionar las investigaciones de Baumgardner et al. (2012); de Bauer y Hernández-Tejeda (2007); Fenn et al. (1999); García et al. (2019); Tejeda y de Pascual Pola, (1996) y Zambrano et al. (1999), en las cuales se ha estudiado el efecto de la contaminación del aire en la Ciudad de México, principalmente de ozono sobre *Abies*

religiosa, *Pinus maximartinezii*, *P. hartwegii*, *P. leuiphylla* y *P. montezumae*, árboles en los que se ha observado defoliación prematura, moteado, clorosis y pérdida progresiva de vigor.



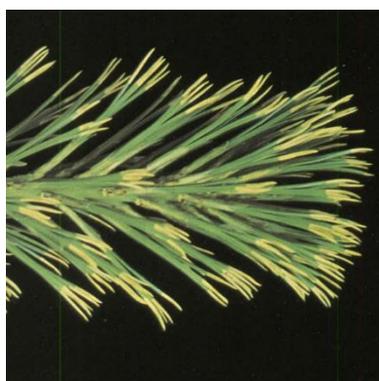
Daño por O₃-Pigmentación oscura
Liquidambar styraciflua



Daño por O₃-Clorosis y punteado
oscuro
Prunus serotina



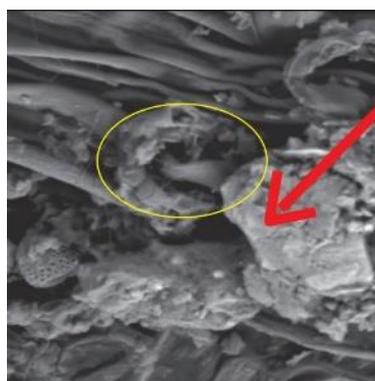
Daño por O₃-Quemadura de
puntas de hojas
Pinus sp.



Daño por SO₂-Necrosis en agujas
inmaduras
Pinus sp.



Daño por SO₂-Necrosis intervenal
bifacial
Fraxinus americana



Obstrucción estomática por PM-
Flecha roja=material particulado;
círculo amarillo=estoma

figura 5 Algunos efectos visibles de contaminantes criterio en árboles. Emberson et al., (2001) mencionan que las respuestas fisiológicas no varían en la misma especie bajo condiciones similares, sin embargo, bajo condiciones ambientales distintas, las especies pueden modificar su respuesta. Imágenes de hojas obtenidas de Skelly et al., (1987), imagen microscópica electrónica de barrido obtenida de Olowoyo y Lion (2016).

Los efectos del monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno se relacionan principalmente con la formación de ozono, no obstante, se ha estudiado que, en ausencia de nutrientes en suelo, el NO₂ produce daño oxidativo al árbol, no así en plantas con suelos ricos en nitrógeno,

donde el efecto del NO₂ aumenta la absorción de nutrientes (Sheng y Zhu, 2019; Takahashi y Morikawa, 2014). Por otra parte, la lluvia ácida incrementa la acidez en los suelos, modificando su la disponibilidad de nutrientes, así mismo, provoca daños en los tejidos de los árboles haciéndolos más vulnerables a la invasión de plagas (SEDEMA, 2022a).

La visibilidad de los efectos depende de la interacción que tengan las sustancias con el árbol, principalmente con sus hojas. De manera general, las reacciones químicas pueden desencadenarse a través de la adsorción (introducción pasiva) y la absorción (introducción activa; hay gasto energético) de los contaminantes (*figura 6*).

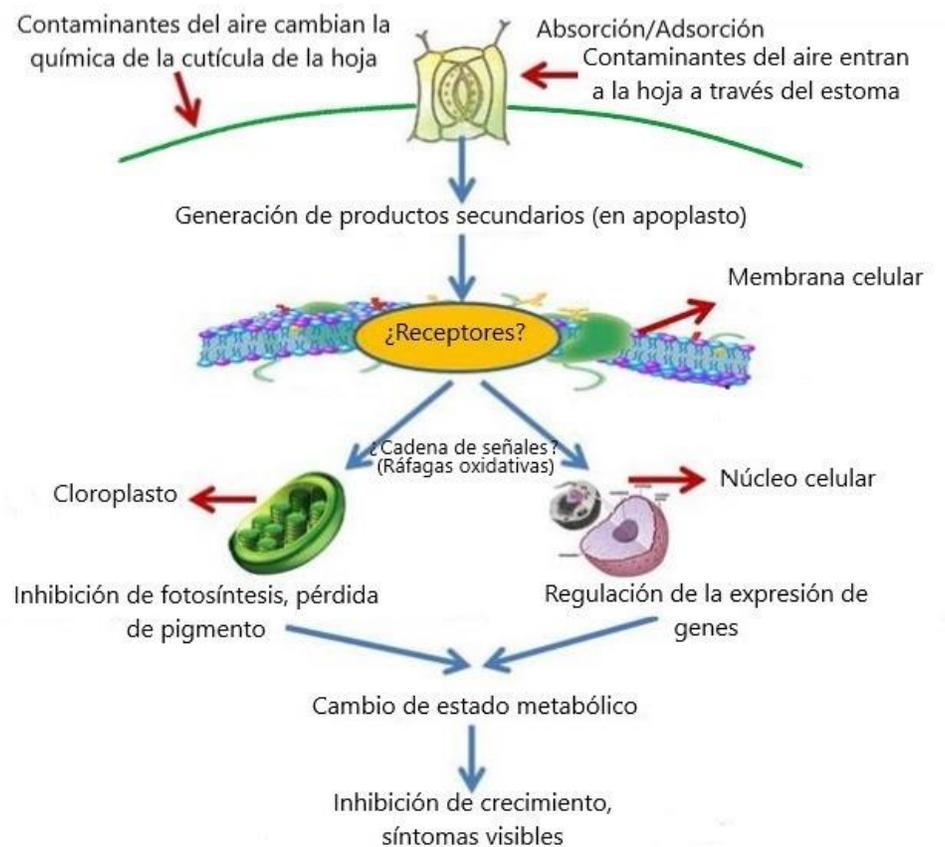


figura 6 Mecanismo de interacción de contaminantes del aire en plantas. A rasgos generales esta es la ruta de acción en el cambio de estado metabólico, nótese las incógnitas “¿receptores?” y “¿cadena de señales?” las cuales representan los alcances de la productividad actividad científica en esta línea de investigación. Obtenido y modificado de Saxena et al., (2017).

De acuerdo con Saxena et al., (2017), hay algunas cuestiones no resueltas de algunos mecanismos implicados en la relación de los contaminantes del aire con la salud de los árboles, principalmente relacionadas a aspectos específicos del metabolismo, como cambios en concentración de enzimas, antioxidantes, lípidos, carbono estructural, entre otros.

Al respecto, para comprender plenamente el alcance de los daños causados por la contaminación atmosférica en cuanto a la especie afectada y la magnitud de los impactos, es necesario desarrollar herramientas y tecnología que relacionen la exposición a los contaminantes con la respuesta del arbolado.

2.2 CExp: Tecnología para estudiar la fisiología del árbol

Explícitamente una definición de cámaras experimentales no se tiene en referencia, dado que hay una continua modificación tecnológica a nivel mundial. No obstante, en el presente trabajo se propone definir, con base en sus similitudes, a las cámaras como recintos de diversas dimensiones construidos con materiales inertes, que se utilizan para simular o generar condiciones ambientales específicas con el objetivo de probar argumentos teóricos sobre los efectos de la contaminación atmosférica y el cambio climático en la fisiología y ecología de especies tolerantes o sensibles al estrés ambiental.

Debido a la basta diversidad de usos y enfoques de esta herramienta, Las CExp destacan entre otras tecnologías por su elevada flexibilidad metodológica. En ese sentido, la herramienta ha sido empleada desde hace más de un siglo en estudios de ecología y fisiología de plantas bajo diversos enfoques técnicos como la evaluación de parámetros genéticos, micro ambientales, morfológicos, fisiológicos y fenológicos.

Cabe mencionar que, en esta investigación, el concepto de “cámara experimental” se fundamenta en el origen lingüístico de la tecnología (inglés) *chambers*, siendo el adjetivo “experimentales” atribuido dada la naturaleza del instrumento. Al respecto, las cámaras son complementarias a los métodos analíticos que evalúan la absorción, adsorción, emisión o daño en plantas, pues las cámaras *per se* no permiten identificar los efectos en la fisiología vegetal más allá de los síntomas visibles, por lo que su uso debe considerar las técnicas analíticas apropiadas para la investigación.

De acuerdo con González (1994), la tecnología apropiada vinculada a estudios ambientales debe ser innovadora, viable económicamente, de solidez técnica y adaptable al medio local, social o cultural. Las CExp se pueden considerar una tecnología apropiada para evaluar efectos de contaminantes del aire en especies arbóreas debido a su aprobación internacional, flexibilidad metodológica, costos ajustables y versatilidad en cuanto a los enfoques del investigador.

2.2.1 Tipos de cámaras experimentales

Todas las CExp poseen instrumentos de medición ambiental, fuentes de luz, ya sea natural o artificial, filtros de aire y marcos generalmente de aluminio, acero inoxidable o líneas de teflón sosteniendo paredes de vidrio, acrílico, PVC, polietileno o polimetilmetacrilato; pues estos materiales son inertes ante múltiples condiciones atmosféricas y permiten el paso de luz para los procesos fotosintéticos de las plantas.

A pesar de las similitudes, son más las diferencias entre los distintos tipos de CExp, sin embargo, no existe un listado de clasificación de estas. En este trabajo se propone clasificarlas de la siguiente forma.

Cámara de ambiente controlado-*Environmental chamber; Climate chamber; Controlled environmental chamber, exposition chamber.*

Diseñada para experimentos en laboratorio de simulación de ambiente. De paredes selladas para aislar atmósfera simulada. Equipada con fuentes y sensores de energía lumínica (simulación de luz solar) y contaminantes, así como con equipo de control de temperatura, de humedad y en algunos casos, de la presión interna. Puede o no generar corrientes de aire y poseer estructuras con orificios para regular su flujo.

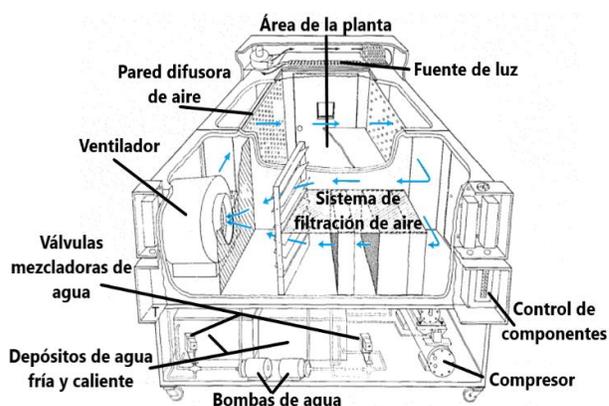


figura 7 *Dos propuestas de cámara de ambiente controlado. Izquierda- Cámara ambiental de Hill (1967), las flechas azules representan el flujo de aire dentro de la CExp, los contaminantes son inducidos mediante válvulas conectadas a la pared difusora de aire. Derecha-Cámara de ambiente semi controlado del laboratorio de contaminación atmosférica de la FES Zaragoza Campus II, la cual es programable a través de circuitos integrados como Arduino para generar procesos automatizados (Chávez, 2022; Solís, 2021).*

Cámaras abiertas-Open Top Chambers (OTC).

Diseñadas para experimentos *in situ* de techo abierto para el estudio directo de la atmósfera y la lluvia. Puede, o no, inducir contaminantes y generar corrientes de aire. Generalmente equipada con sensores de contaminantes.

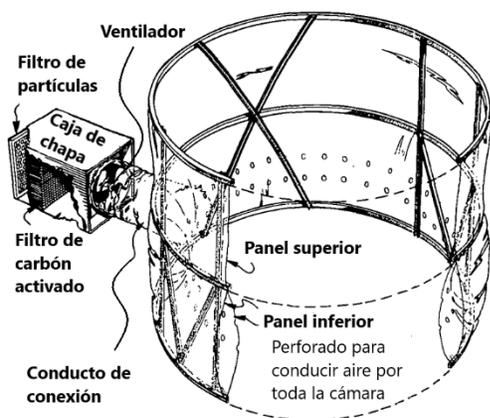


figura 8 Dos propuestas de cámaras abiertas. I-Cámara abierta de Heagle et al., (1973) con sistema de ventilación y filtración de aire. D-OTC “pasiva” de Welshofer et al., (2018), la cual actúa como un invernadero en miniatura para monitorear humedad y temperatura sin generar corrientes de aire ni simulación de contaminantes (Marion et al., 1997).

Cámaras cerradas de intercambio de gases-Closed chamber; Gas exchange chamber.

Diseñadas para experimentos en laboratorio de intercambio de gases de la planta, carecen de sensores de contaminantes, sin embargo, cuentan con un sistema de muestreo de gas.

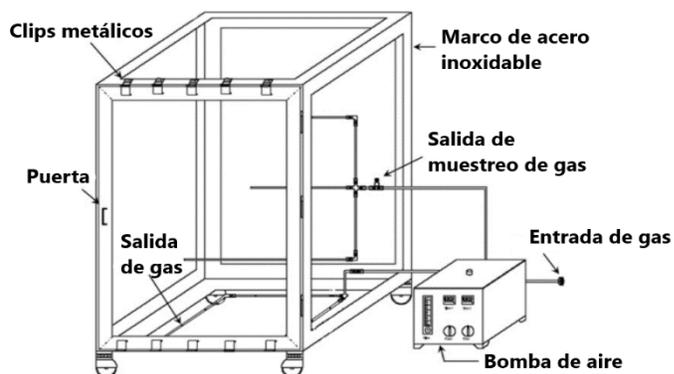


figura 9 Dos propuestas de cámaras de intercambio de gases. I-Cámara de Kim et al., (2010), D- Cámara de Lee et al., (2015). El principio de esta CExp es el cierre de la corriente de aire entre la planta y los instrumentos analíticos, lo cual hace posible el registro cuantitativo exacto del intercambio de gases de la planta, pero requiere el cierre de las partes fotosintéticamente activas de las plantas durante la medición.

Cámara de fumigación-*Fumigation chamber; Mist chamber*

Diseñadas para experimentos *in situ* o en laboratorio de “inyección” de contaminantes en un espacio cerrado para incentivar daño agudo en plantas. Puede, o no, ser equipada con sensores de contaminantes. No busca simular ambientes, solo generar daño en plantas.

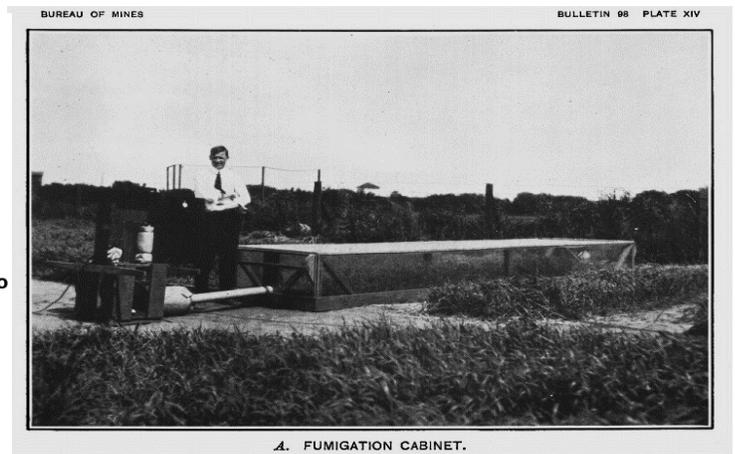
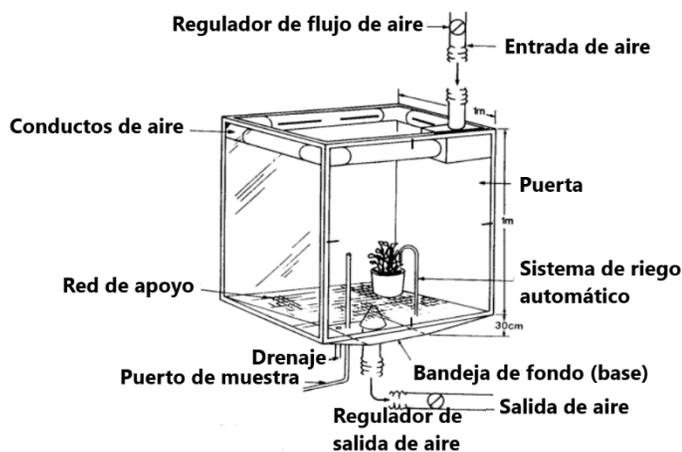


figura 10 Dos propuestas de cámaras de fumigación. I-Cámara de Stokes et al., (1993). La estructura de este tipo de cámaras permite un flujo directo y constante de concentraciones elevadas de contaminantes. D-Cámara de Wells (1915) Registro más antiguo recuperado de cámaras experimentales.

Cámara de deposición-*deposition chamber*

Diseñadas para experimentos *in situ* o en laboratorio de contacto entre material particulado y superficie foliar. Equipada con fuente artificial o natural de material particulado. Simula corrientes de aire, no obstante, carece de componentes de simulación ambiental.

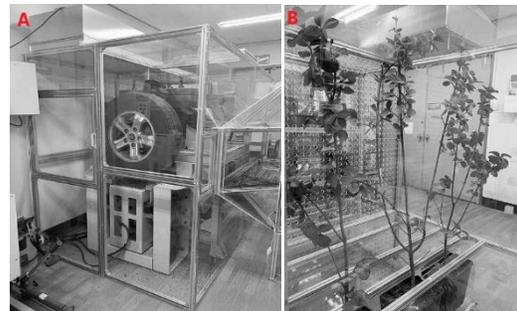
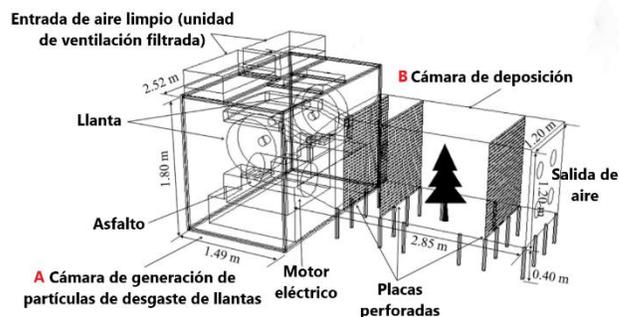


figura 11 Cámara de deposición de Cho et al., (2021). En esta propuesta se analizan las características de deposición de las partículas de desgaste de las llantas en función de la especie de árbol. No obstante, el espacio A representa la fuente de PM, la cual puede variar desde procesos de combustión hasta un colector de partículas *in situ*. La cámara de deposición B posee placas perforadas para distribuir el aire y las partículas uniformemente en el espacio de la planta.

Cámara de combustión-Combustion chamber

Para experimentos en laboratorio que no buscan simular condiciones ambientales ni inducir daño en árboles; Esto la convierte en la cámara con menos similitudes respecto a sus homólogas, pues la cámara, completamente de acero, dicho sea de paso, es un horno conectado un sistema de muestreo de gases para la identificación de emisiones de la planta.

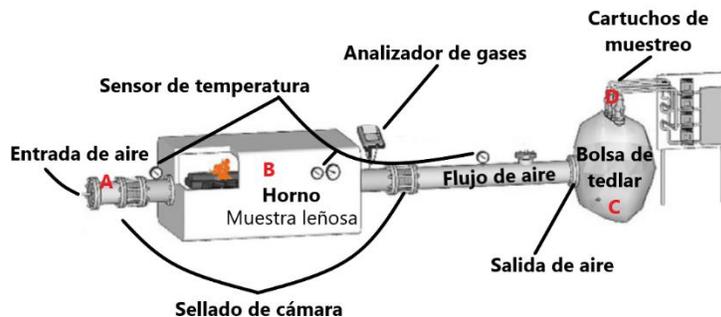


figura 12 Cámara de combustión empleada por Cereceda-Balic et al., (2017) y Guerrero et al., (2019). Es un sistema aislado térmicamente y diseñado para analizar los parámetros fisicoquímicos de la combustión, junto con la caracterización de las emisiones de gases y partículas. Consta de cuatro unidades funcionales de alta resistencia mecánica y térmica: precámara (A), cámara de combustión (B) zona de refrigeración (C) y sistema de recogida de emisiones (D).

Cámara de hoja-Leaf chamber

Diseñadas para experimentos *in situ* o en laboratorio que consideren datos de respiración de las hojas. Las hay de dos tipos, en pinza y cerradas, ambas equipadas con sensores al gas objetivo, generalmente CO_2 y H_2O . Son ventiladas y de entorno no controlado, por lo que las condiciones del interior siguen los cambios naturales diarios.

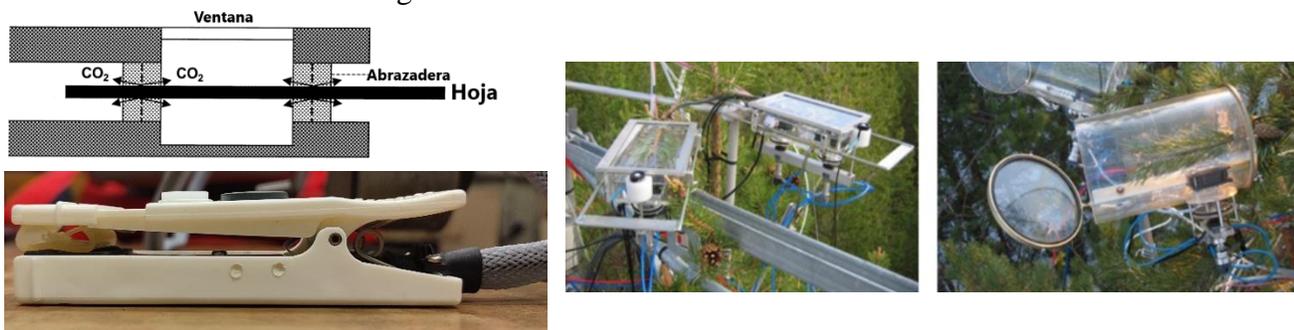


figura 13 Cámaras de hoja de pinza y cerradas. I superior-Esquema de Pons y Welschen, (2002). I inferior-Pinza de hoja del laboratorio de contaminación atmosférica de la FES Zaragoza. D-Cámaras de Kulmala (2018), las cuales se abren y cierran automáticamente. Cuando se cierran, se sigue el cambio de la concentración de gases y se hace el cálculo de tasa de intercambio de estos.

Cámara de árbol completo-Whole tree chamber (WTC)

Diseñadas para experimentos *in situ*, proporcionan entornos totalmente cerrados y controlados para árboles de hasta nueve metros de altura. Es posible manipular y monitorear la temperatura del aire, la humedad del suelo, el riego, los niveles de CO₂ y la humedad.



figura 14 Cámaras de árbol completo. I-Esquema de Barton et al., (2010). D- Las cámaras encierran completamente los árboles en condiciones de suelo de campo junto con una plantación exterior de árboles que crecen al mismo ritmo para crear condiciones de "bosque" de sombra y luz solar, imagen obtenida de: University of Western Sídney, (2016).

Como se mencionó previamente, las cámaras son complementarias a las técnicas químico-analíticas, pues la evaluación de daño generalmente se realiza a través de métodos posteriores a la exposición en cámara. Por mencionar algunos ejemplos; la cromatografía y espectrofotometría de gases, la determinación de concentración de clorofila y ácido ascórbico, la determinación de secuestro de carbono mediante peso seco, la identificación de cambios metabólicos, entre otros.

Hasta este punto se han expuesto las generalidades de los conceptos "Contaminación del aire", "efectos de contaminantes del aire en plantas" y "cámaras experimentales". Para relacionar estos tópicos, en el presente trabajo se optó por emplear la bibliometría como una herramienta para construir el estado del arte del tema, por lo que en el siguiente apartado se busca contextualizar al respecto, ya que el estado del arte y la bibliometría no son métodos usualmente reconocidos en las ciencias biológicas.

2.3 El estado del arte en la investigación biológica

El objeto de esta sección es mostrar las bondades del estado del arte como instrumento útil para gestionar una investigación. La discusión epistemológica de estado del arte o del análisis bibliométrico no es relevante para los fines del presente trabajo.

Al estado del arte, Urbina y Morel (2017) lo definen como el proceso de construcción y/o disertación del conocimiento científico, para que sistemáticamente se realice la gestión de la investigación, accediendo a reducir su costo y con la preferencia de construir un conocimiento científico sólido y menos accidentado por la metodología elegida o por el diseño experimental.

Otra definición publicada en la Asociación Americana de Psicología (APA, 2003, citado en Londoño P. et al., 2016) es, a la letra:

“...las evaluaciones y sistematizaciones críticas de toda literatura científica que ha sido publicada sobre una temática o problema específico.... La organización, integración y evaluación del material previamente publicado tiene en cuenta: el progreso de la investigación en la clasificación del problema o temática; resume las investigaciones previas; identifica relaciones, contradicciones, lagunas e inconsistencias en la literatura; y sugiere las siguientes etapas en la posible solución del problema o comprensión de la temática revisada”.

No obstante, estas definiciones están vinculadas a las ciencias sociales, y, al menos en este trabajo, no se encontró una definición del estado del arte desde las ciencias biológicas, por lo que considerando la similitud de criterios teóricos sobre la definición del estado del

arte/ (Carrasquero C. et al., 2016; Huergo-Tobar, 2015; Morel y Buitrago, 2018; Pérez, 2011) una definición adaptada a la investigación biológica podría ser la siguiente:

“Investigación de tipo documental que busca recuperar y reflexionar el conocimiento existente de un tema, permite determinar cómo este ha sido abordado y cuáles son las tendencias de estudio según diferentes autores, identificando las fronteras del conocimiento en un tiempo y espacio determinado, dejando en claro los límites de hasta donde se ha avanzado en el tema o problema en cuestión y evitando la repetición, asegurando la originalidad en el aporte técnico y práctico de futuras investigaciones.”

En ese sentido, construir el estado del arte de un tema permite generar investigaciones de mayor riqueza para las ciencias biológicas, pues desarrollando el tema, la experimentación es construida considerando los “errores y consejos” de la comunidad científica internacional. Acerca de la validez del estado del arte, el investigador es evaluado tanto por sus resultados como por sus procesos metodológicos, por lo tanto, y, primeramente, en una investigación donde existe una gran cantidad de textos, encontrar la manera ordenada de extraer la información inicialmente dispersa para su posterior análisis, es esencial.

Atendiendo a estas consideraciones, para construir el estado del arte de un tema, es necesario consultar fuentes primarias, secundarias y terciarias, las cuales se encuentran en bibliotecas, hemerotecas, bases de datos y buscadores de internet cuyos sistemas de búsqueda se basan en palabras clave para facilitar la extracción de documentos (Carrasquero et al., 2016), las fuentes disponibles en estos sistemas varían en cantidad y contenido.

Entiéndase como fuente primaria aquella información intacta, sin interpretaciones ni abreviaciones, cabe mencionar que estos son de mayor interés en la construcción del estado

del arte. Las fuentes secundarias son generalmente aquellas abreviadas, que funcionan como soporte al investigador para brindar conocimientos de fuentes primarias. Por último, las fuentes terciarias, compilan fuentes primarias y secundarias (Rivera y Riquelme, 2009). Los documentos pertenecientes a cada categoría se exponen en la *figura 15*.

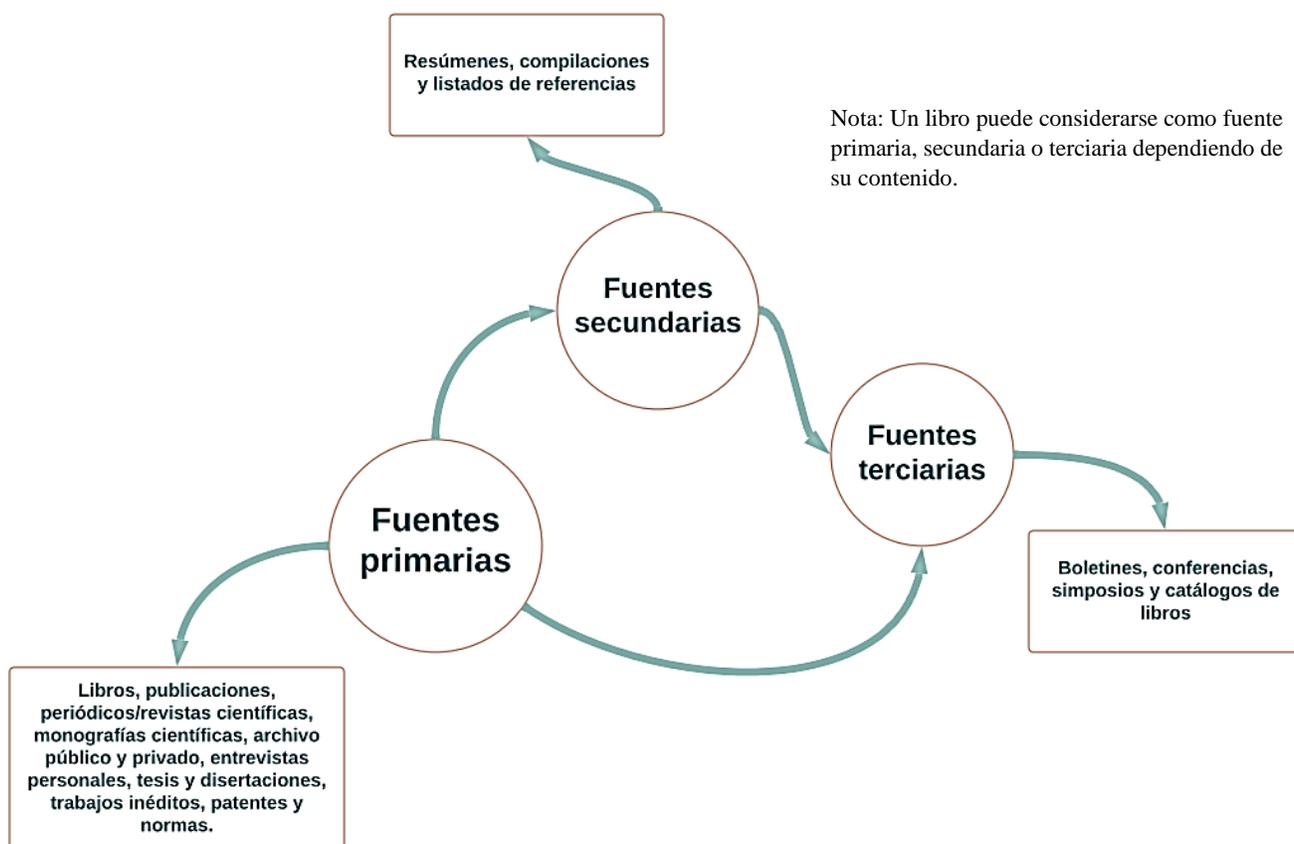


figura 15 Tipos de documentos y fuentes de información. Se observa la clasificación de cada tipo de documento de acuerdo con su contenido, nótese el alcance de las fuentes primarias en las fuentes secundarias y terciarias. Elaboración propia con base en Rivera y Riquelme, (2009).

Uno de los principales problemas al recopilar una gran cantidad de textos es tener la capacidad de recopilarlos y analizarlos, Gómez et al., (2015) y Londoño et al., (2016) sugieren a la matriz bibliográfica como una herramienta útil en el inventario de las fuentes

obtenidas, el instrumento es un formato sobre el cual se ejercen filtros de selección basados en datos bibliográficos tales como; título, autor, fecha, tipo de documento, descripción, entre otros (*figura 16*). La matriz funge como herramienta de selección de textos que se someterán a análisis.

Matriz bibliográfica

Número	Categoría de búsqueda	Título	Autor	Año	Descriptor	Tipo de material	Centro de documentación	Ubicación
1								
2								
3								
4								
5								

figura 16 Ejemplo de una matriz bibliográfica. Los filtros de selección de documentos varían dependiendo de las necesidades del autor, sin embargo, los datos bibliográficos de los documentos generalmente se incluyen. Obtenido de: Gómez et al., (2015).

Respecto al análisis, este comienza con la lectura de los documentos, pues en este paso suelen identificarse párrafos o frases de interés para el investigador. Una técnica útil para no perder este conocimiento relevante recuperado sería ordenar estas ideas para poder considerar los argumentos posteriormente, los mismos autores sugieren a la matriz analítica de contenido para cumplir con estos fines (*figura 17*).

Matriz analítica de contenido

N°	Documento	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Observaciones
#	XXXXX				
#	YYYYY				
#	ZZZZZ				

figura 17 Ejemplo de una matriz analítica de contenido. Las distintas categorías facilitan organizar la información relevante para el investigador contenida en cada documento. Obtenido de: Gómez et al., (2015).

Por su parte, Huergo-Tobar (2015) menciona al título, autores, país, universidad, tesis principal, objetivos, metodología y hallazgos importantes como componentes indispensables por identificar en la construcción del estado del arte, por lo que estas categorías pueden ordenarse dentro de ambas matrices, sin embargo, en función de las necesidades del investigador, las categorías de análisis de contenido pueden variar.

Lo anteriormente expuesto da pie a la comparación de las categorías incluidas en la matriz analítica de contenido, pues al analizar las tendencias de investigación y todo tipo de información que sea útil para la investigación entre un documento y otro, se identifican las relaciones, contradicciones, lagunas e inconsistencias en la literatura, las cuales pueden complementarse ampliamente con un análisis bibliométrico.

2.3.1 El análisis bibliométrico

La bibliometría parte de la cienciometría, es una disciplina que emplea indicadores de productividad a la literatura, con la finalidad de analizar y monitorear la actividad científica sobre un tema, su ejecución permite detectar cambios en el paradigma y pensamiento de los campos de estudio. (Aria y Cuccurullo, 2017; Dervis, 2019; Mahecha, 2019). Cuenta con un método estandarizado de cinco pasos, los cuales son el diseño de estudio, la colecta de datos, el análisis de datos, la visualización de datos y la interpretación (Aria y Cuccurullo, 2017; Zupic y Čater, 2015).

Los primeros dos pasos conforman la fase de búsqueda de información, en la cual se obtiene la muestra documental y se seleccionan las preguntas de investigación. La información

obtenida se convierte al formato compatible con el software bibliométrico seleccionado, entre los más comunes según Aria y Cuccurullo (2017) se encuentran los siguientes:

- a) **CitNetExplorer** y **VOSviewer**(van Eck y Waltman, 2010, 2014): Aplicaciones gratuitas basadas en Java, diseñadas para analizar y visualizar redes de citas y co-ocurrencias de términos en colecciones científicas.
- b) **SciMAT** (Cobo et al., 2012): Software de acceso abierto diseñado para analizar los documentos a través de la gestión del conocimiento y sus entidades, análisis de mapeo científico y visualización de resultados.
- c) **BiBExcel** (Åström et al., 2009): Genera datos que pueden importarse cualquier programa que acepte registros tabulados para su posterior procesamiento.
- d) **Science of Science (Sci2)** (Sci2, 2009): Software gratuito que permite el análisis y la visualización temporal, geoespacial, temática y en red de la bibliografía.
- e) **Citespace** (Chen, 2006): Aplicación gratuita basada en Java, se centra en la identificación de los puntos críticos del desarrollo de un campo o de un tema, especialmente los puntos de inflexión intelectual y los puntos cruciales.
- f) **VantagePoint**(VantagePoint, 2022): Software comercial, su principal fortaleza es su capacidad de leer cualquier contenido de texto estructurado, admite más de 90 filtros de importación y posee un visualizador de mapas bibliométricos.
- g) **Biblioshiny-Bibliometrix** (Aria y Cuccurullo, 2017): Aplicación gratuita y de código abierto basado en R (RStudio), provee algoritmos estadísticos sustanciales y eficaces, así como el acceso a herramientas integradas de visualización de datos, debido a esto, es quizá el software preferible sobre otros lenguajes de cálculo científico.

En general, la mayoría de las herramientas de análisis bibliométrico ofrecen un alcance analítico de colaboración institucional y de contenido a través del tiempo y en algunos casos, también del espacio. Su objetivo es conocer tendencias de investigación, detectar a los académicos e instituciones más prolíficas y presentar el panorama general de las investigaciones más importantes (Aria y Cuccurullo, 2017), por lo que su aplicación en la ciencia biológica puede considerarse previo a cualquier diseño experimental.

Cabe mencionar tres obras que han empleado a la bibliometría en estudios biológicos en México:

- Fernández F., D. (2013) *“TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN SOBRE ESTUDIOS DE ARTRÓPODOS TERRESTRES EN LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO”*.
- Fernández G., C. C. (2001). *“LA ENFERMEDAD DE CHAGAS EN MÉXICO: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE 1928 A 2000”*.
- Miranda P., F. (2014). *“ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA SOBRE LA BIODIVERSIDAD ACUÁTICA DEL ESTADO DE GUERRERO MÉXICO”*.

III ANTECEDENTES

La investigación científica sobre los efectos de contaminantes del aire en especies vegetales tuvo su origen desde la segunda revolución industrial del siglo XIX y posteriormente, la primera y segunda guerra mundial en 1914 y 1939 respectivamente (Chávez, 2006). Los fenómenos principalmente estudiados, que deterioran todo tipo de vegetación, han sido principalmente la lluvia ácida, el depósito de material particulado, el ozono troposférico, los gases de efecto invernadero y el cambio climático.

Los primeros métodos empleados para evaluar los efectos de contaminantes del aire en plantas fueron visuales, identificando patrones de daño en hojas y su escalado a cambios en la estructura vegetal de las especies; determinando su sensibilidad en medio natural (Bakke, 1913). Ya desde 1915 Wells marcó el primer antecedente de uso de cámaras experimentales de fumigación para inducir un daño acelerado por SO₂ en especies hortícolas (importancia económica), Hughes (1934) replicó el método, no obstante, las cámaras experimentales se emplearon como espacios simuladores de condiciones ambientales años más tarde.

Si bien, las investigaciones de Setterstrom y Zimmerman, (1939) y Zimmerman y Crocker, (1931) evaluaron los efectos de SO₂ sobre la vegetación en los Estados Unidos, enfatizando el impacto ambiental proveniente de la industria y los medios de transporte, fue hasta 1967 que Hill propuso a las “cámaras ambientales” como una herramienta para los estudios de contaminación atmosférica, que a diferencia de las cámaras de fumigación, contemplaban la velocidad y circulación del aire, la teoría de adsorción y absorción de gases,

además del control de la humedad y temperatura, lo cual, años más tarde lo llevó a desarrollar modelos matemáticos de absorción de contaminantes en hojas (Bennett et al., 1973).

Cabe destacar la teoría desarrollada en estas investigaciones sobre el flujo de intercambio de gases (ley de Fick) efectuada en ambas superficies de la hoja dependiendo de la concentración y de la resistencia eléctrica de cada gas o partícula. A partir de la segunda mitad de la década de 1970 los estudios de contaminación atmosférica incrementaron, particularmente, en los estudios con cámaras experimentales surgió una diversificación de objetivos, material y método para evaluar los efectos de contaminación del aire en plantas, procurando siempre simular las condiciones naturales de interés para el investigador (Ram et al., 2015).

Retomando lo anterior, a comienzos de la década de 1970 las cámaras abiertas propuestas por Heagle et al., (1973) aparecieron para estudiar grupos de árboles *in situ*, permitiendo análisis multifactoriales con base en datos obtenidos por sensores específicos para gases y partículas. Este tipo de cámaras hasta el día de hoy son ampliamente utilizadas debido a su capacidad de registrar valores precisos en un entorno natural, no obstante, recientemente se ha puesto en tela de juicio la efectividad de estas cámaras experimentales, tema que hoy en día no ha llegado a una conclusión cierta.

A partir de 1970 las cámaras experimentales han sufrido modificaciones dependiendo de los objetivos de estudio, lo cual ha generado una diversificación sobre el uso de esta tecnología, no así en la Ciudad de México, donde tan solo la investigación científica de la contaminación atmosférica se remonta a la década de los 60's del siglo pasado; al respecto, el registro de investigación más antiguo se atribuye al Dr. Humberto Bravo, quien evaluó la variación de partículas recogidas por sedimentación, el material suspendido en el aire

recogido por filtración y su contenido de materia orgánica, la concentración de humo y los niveles de algunos contaminantes gaseosos (INECC-PNUD, 2018; Soto-Coloballes, 2010).

Por otra parte, a nivel nacional algunas investigaciones han empleado las CExp para estudiar especies locales, ninguna de interés para el arbolado de la Ciudad de México. Dichas investigaciones se enlistan a continuación:

1. Cerón-Bretón y colaboradores emplearon cámaras abiertas para evaluar el efecto de ozono en arboles maderables y mangle, así como en su absorción de nutrientes del suelo (Cerón et al., 2009; Cerón et al., 2010, 2012).
2. Santiago-De la Rosa et al., (2017) quemaron pajas derivadas de cultivos mexicanos (maíz, arroz, caña de azúcar y sorgo), empleando cámaras de combustión chilenas para determinar emisiones a la atmósfera. En 2018 estimaron las emisiones a nivel nacional en conjunto con Mugica y colaboradores (Mugica-Álvarez et al., 2018; Santiago-De La Rosa et al., 2018).
3. Pérez-Ruiz, et al. (2018), determinaron alteraciones consecuentes al cambio climático en un ecosistema forestal de San Luis Potosí empleando cámaras abiertas.
4. Pérez-Noyola et al., (2020), estudiaron los efectos del aumento de temperatura sobre la supervivencia y el crecimiento de las plántulas de *Tillandsia recurvata* en San Luis Potosí, introduciendo un nuevo diseño de cámaras para simular el aumento de temperatura.
5. Martínez-Adriano et al., (2021), mediante cámaras abiertas, evaluaron el efecto de las temperaturas elevadas en plántulas del matorral espinoso tamaulipeco.

6. Aragón-Gastélum et al., (2021), identificaron las variaciones ecofisiológicas estacionales por cambio climático de *Echinocactus platyacanthus*, una especie de cactus protegida en San Luis Potosí, con el uso de cámaras abiertas.

En la Ciudad de México las CExp son una tecnología poco utilizada. A este respecto, se identificaron dos investigaciones; Solís (2021) clasificó a *Pinus greggii* como una especie sensible al ozono al observar una disminución del 32% de su contenido de clorofila total, así como moteado clorótico y necrosis foliar bajo una exposición igual o mayor que 0.078.40 ppm de O₃ durante seis días dentro de la CExp, y Chávez (2022) recomendó condiciones óptimas de operación para cámaras de ambiente controlado en laboratorio al simular daño por ozono y dióxido de azufre en *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh y *Pinus greggii* Englem.

Considerando lo expuesto, las CExp son una tecnología útil para determinar efectos de la contaminación del aire sobre árboles urbanos, sin embargo, estas deben ser conocidas en sus limitaciones y alcance a nivel local, con la finalidad de evadir procesos de adaptación costosos e inoperantes. González (1994).

Finalmente, cabe mencionar que, si bien no se encontraron (y posiblemente no existan) estudios documentales respecto al uso de cámaras experimentales en especies de interés para la Ciudad de México, existen dos estados del arte con relación a la contaminación atmosférica a nivel nacional, el “Diagnóstico del estado del arte de la química atmosférica en México con relación a los gases de efecto invernadero y los contaminantes climáticos”, y el “Análisis del estado del arte sobre el depósito atmosférico en México y su relación con el cambio climático” (INECC-PNUD, 2018; INECC-SEMARNAT, 2017).

IV PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El arbolado urbano brinda servicios ecosistémicos que mejoran la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México al regular el clima y mejorar la calidad del aire (SEMARNAT, 2021). Por ello, los árboles se deben gestionar con base en un conocimiento científico para promover óptimas tasas de crecimiento, biomasa foliar, sobrevivencia y longevidad con la finalidad de disminuir los costos de plantación y mantenimiento.

Sin embargo, *“hasta el momento no existen estudios que monitoreen o determinen el estado de conservación de los ambientes naturales de la Ciudad de México”* (Rivera Hernández, 2016). En este sentido, tampoco existe una revisión documental sobre los efectos de la contaminación del aire en árboles nativos y la tecnología apropiada para evaluarlos.

De lo anterior se derivan las siguientes preguntas de investigación:

¿El conocimiento generado a escala internacional, mediante el uso de cámaras experimentales, sobre el efecto de los contaminantes del aire en la vegetación es útil para identificar y describir el daño de árboles exóticos y nativos de la Ciudad de México?

¿Es el análisis bibliométrico una forma de obtener el conocimiento generado a escala nacional e internacional, acerca de la aplicación de Cámaras Experimentales para identificar los daños anatómicos y fisiológicos de la contaminación del aire en árboles urbanos de la Ciudad de México?

V OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Desarrollar un análisis bibliométrico que contribuya a la construcción del estado del arte sobre el uso de cámaras experimentales, para determinar el conocimiento biológico que deriva de esa aplicación tecnológica, así como las tendencias de estudio, en la evaluación de efectos de contaminantes del aire en especies arbóreas a escala nacional e internacional, y con esto, generar una propuesta experimental que coadyuve a la gestión del arbolado urbano.

5.2 Objetivos específicos

1. Crear una matriz bibliográfica de la muestra documental y con base en esta, integrar el análisis bibliométrico para identificar las tendencias de estudio desarrolladas con el uso de cámaras experimentales en árboles plantados en la Ciudad de México.
2. Sintetizar el conocimiento desarrollado a escala internacional en una matriz de análisis documental, con objeto de reconocer los vacíos investigativos acerca del uso de cámaras experimentales, y con esto, establecer criterios teóricos para el desarrollo experimental del tema.
3. Determinar los contrastes, excesos o inexistencias de información respecto al tema, mediante la lectura de los documentos recuperados, a fin de distinguir el estado actual del desarrollo de esta línea de investigación local e internacionalmente.

VI HIPÓTESIS

La bibliometría es una herramienta que permite analizar la actividad científica, identificar tendencias de investigación y proveer un alcance analítico espacial y temporal. Debido a esto, la utilización de esta técnica permitirá recuperar conocimiento teórico fehaciente útil para la construcción del estado del arte de cámaras experimentales y su aporte al estudio del efecto de la contaminación del aire en la fisiología de árboles urbanos.

VII MÉTODO

De acuerdo con Guevara (2016), no existe un método único para llevar a cabo la construcción del estado actual del desarrollo de un tópico. En ese sentido, fueron adaptadas y desarrolladas tres fases de investigación considerando lo propuesto por Aria y Cuccurullo (2017), Dervis (2019) y Gómez Vargas et al. (2015).

7.1 Búsqueda documental

Se seleccionó la base de datos que incluyera la mayor cantidad de información disponible, esto se determinó mediante una búsqueda usando la palabra *chambers* en bases de datos académicas pertenecientes a diversos proveedores o instituciones tales como: ProQuest, EBSCO Cambridge University Press, Chemical Abstracts Service (CAS), Clarivate Analytics, Elsevier, Oxford University Press y Springer Publishing. Se observó que los

resultados eran distintos en cada base de datos exceptuando a Web of Science de Clarivate Analytics (WoS) y Scopus de Elsevier, las cuales incluyeron los resultados que las demás bases de datos proporcionaban individualmente.

Estas dos bases de datos, es decir, Web of Science y Scopus, fueron comparadas con base en los resultados obtenidos empleando el término *open-top chambers* como palabras de búsqueda, partiendo de la premisa de que las cámaras abiertas son las más empleadas internacionalmente. Scopus representó una dimensión de análisis del 79.7% respecto al total de revistas científicas incluidas en ambas bases de datos, mientras que el uso de WoS representa el 67.46%, razón por la que se decidió emplear a Scopus para la obtención de la muestra documental.

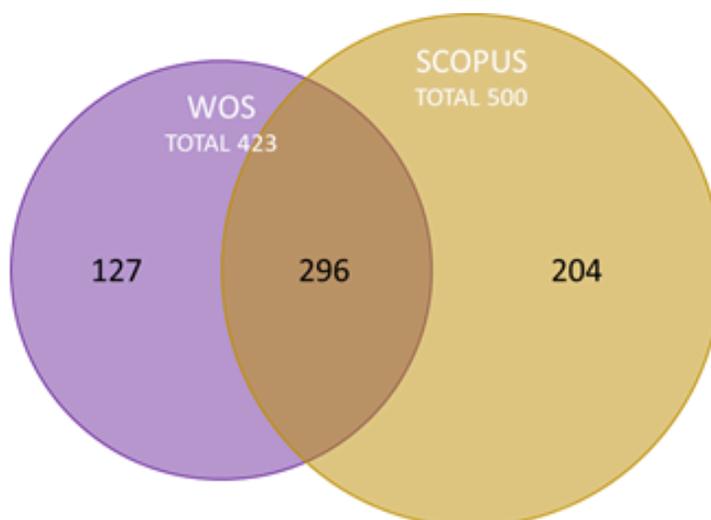


figura 18 Comparación de revistas científicas incluidas en Scopus y WoS. De las 923 revistas científicas obtenidas por la búsqueda de ambas bases de datos, 296 están indexadas tanto en Scopus como en WoS, 127 se encuentran exclusivamente en WoS y 204 en Scopus. Elaboración propia.

Habiendo seleccionado a Scopus como la base de datos de la cual se extraería la muestra documental, el siguiente paso fue delimitar las dimensiones de búsqueda y asegurar que los

resultados obtenidos realmente representen todo el conocimiento publicado, al menos en esta base de datos, acerca del uso de CExp en el estudio del efecto de la contaminación del aire en la fisiología de árboles urbanos. Para lograr este cometido, fue necesario evitar una inadecuada selección de las palabras de búsqueda dado que los resultados de las bases de datos académicas dependen directamente de estas (Codina, 2017; Granda Orive et al., 2003, 2005)

Retomando lo anterior, se observó que al realizar la consulta documental en Scopus, las palabras de búsqueda referentes a tipo de CExp y contaminante generaban un sesgo de información al excluir los textos referentes a la teoría desconocida por el investigador, dicho de otra forma, no era posible saber qué tipos de cámaras experimentales existen y en qué son empleadas sin haber recuperado la teoría que brinda este conocimiento, pero ¿cómo recuperar esta teoría si se desconocen las palabras clave del tema? Y más allá de esto ¿cómo recuperar el conocimiento de interés para la investigación local?

La respuesta a la primera pregunta se encontró eliminando adjetivos del término “cámara/chamber”, es decir, no se emplearon las palabras “abierta/open top”, “cerrada/closed”, “de intercambio de gases/gas exchange”, entre otras, con la finalidad de que los resultados incluyeran todo tipo de CExp, tanto aquellas conocidas previo al desarrollo de este trabajo como aquellas desconocidas.

Para recuperar el conocimiento de interés local se emplearon las diferentes especies de árboles comúnmente plantadas en la Ciudad de México como palabras de búsqueda, concretamente, fueron empleadas 210 especies de árboles con esta finalidad, las cuales se eligieron con base en la NADF-006-RNAT-2016 (Gobierno de la Ciudad de México, 2018), la guía de árboles y arbustos de la zona metropolitana de la Ciudad de México (Rodríguez

Sánchez y Cohen Fernández, 2003) y la guía de campo de árboles comunes de la Ciudad de México (CONABIO, 2012a).

El operador booleano construido bajo los criterios anteriormente mencionados y empleado en la base de datos Scopus se muestra a continuación:

TITLE-ABS-

KEY (chambers AND ((abies AND religiosa) OR (acacia AND farnesiana) OR (acacia AND melanoxylon) OR (acacia AND baileyana) OR (acacia AND longifolia) OR (acacia AND melanoxylon) OR (acacia AND retinodes) OR (acacia AND schaffneri AND schaffneri) OR (acer AND negundo) OR (acer AND pseudoplatanus) OR (adonidia AND merrillii) OR (aesculus AND hippocastanum) OR (alnus AND acuminata) OR (alnus AND jorullensis) OR (alnus AND jorullensis) OR (annona AND cherimola) OR (araucaria AND heterophylla) OR (arbutus AND glandulosa) OR (arbutus AND xalapensis) OR (bauhinia AND monandra) OR (bauhinia AND purpurea) OR (bauhinia AND variegata) OR (beaucarnea AND recurvata) OR (berberis AND moranensis) OR (bocconia AND arborea) OR (buddleja AND cordata) OR (bursera AND cuneata) OR (bursera AND fagaroides) OR (calliandra AND houstoniana) OR (callistemon AND citrinus) OR (carpinus AND coraliniana) OR (carya AND illinoensis) OR (casimiroa AND edulis) OR (casuarina AND cunninghamiana) OR (casuarina AND equisetifolia) OR (cedrus AND deodara) OR (ceiba AND pentandra) OR (celtis AND australis) OR (ceratonia AND siliqua) OR (chamaecyparis AND lawsoniana) OR (chiranthodendron AND pentadactylon) OR (citrus AND aurantifolia) OR (citrus AND aurantium) OR (citrus AND limon) OR (citrus AND reticulata) OR (citrus AND sinensis) OR (cordia AND sebestena) OR (crataegus AND mexicana) OR (crataegus AND pubescens) OR (cryptomeria AND japonica) OR (cupressus AND arizonica) OR (cupressus AND guadalupensis) OR (cupressus AND lusitana) OR (cupressus AND macrocarpa) OR (cupressus AND sempervirens) OR (cydonia AND oblonga) OR (delonix AND regia) OR (diospyros AND nigra) OR (dombeya AND cayeuxii) OR (dombeya AND wallichii) OR (durante AND erecta) OR (dyspisis AND lutescens) OR (ehretia AND tinifolia) OR (elaeis AND guineensis) OR (elaeocarpus AND reticulatus) OR (ensete AND ventricosum) OR (eriobotrya AND japonica) OR (erythrina AND americana) OR (erythrina AND coralloides) OR (erythrina AND standleyana) OR (eucalyptus AND camaldulensis) OR (eucalyptus AND cinerea) OR (eucalyptus A

ND *globulus*) OR (*eysenhardtia* AND *polystachya*) OR (*ficus* AND *benjamina*) OR (*ficus* AND *carica*) OR (*ficus* AND *elastica*) OR (*ficus* AND *lyrata*) OR (*ficus* AND *retusa*) OR (*fraxinus* AND *americana*) OR (*fraxinus* AND *uhdei*) OR (*ginkgo* AND *biloba*) OR (*grevillea* AND *robusta*) OR (*handroanthus* AND *chrysanthus*) OR (*hyophorbe* AND *lagenicaulis*) OR (*ipomoea* AND *murucoides*) OR (*jacaranda* AND *mimosifolia*) OR (*juglans* AND *cinerea*) OR (*juglans* AND *nigra*) OR (*juniperus* AND *chinensis*) OR (*juniperus* AND *communis*) OR (*juniperus* AND *depeana*) OR (*juniperus* AND *flaccida*) OR (*juniperus* AND *horizontalis*) OR (*lagerstroemia* AND *indica*) OR (*leucaena* AND *esculenta*) OR (*ligustrum* AND *japonicum*) OR (*ligustrum* AND *lucidum*) OR (*liquidambar* AND *styraciflua*) OR (*magnolia* AND *figo*) OR (*magnolia* AND *grandiflora*) OR (*malus* AND *pumila*) OR (*malvaviscus* AND *arboreus*) OR (*melia* AND *azedarach*) OR (*metasequoia* AND *glyptostrobooides*) OR (*morus* AND *alba*) OR (*morus* AND *celtidifolia*) OR (*morus* AND *nigra*) OR (*muntingia* AND *calabura*) OR (*murraya* AND *paniculata*) OR (*nerium* AND *oleander*) OR (*nicotiana* AND *glauca*) OR (*olea* AND *europaea*) OR (*oreopanax* AND *xalapensis*) OR (*parkinsonia* AND *aculeata*) OR (*persea* AND *americana*) OR (*phoenix* AND *canariensis*) OR (*phoenix* AND *dactylifera*) OR (*phoenix* AND *roebelenii*) OR (*phytolacca* AND *dioica*) OR (*phytolacca* AND *icosandra*) OR (*pinus* AND *ayacahuite*) OR (*pinus* AND *cembroides*) OR (*pinus* AND *devoniana*) OR (*pinus* AND *greggi*) OR (*pinus* AND *hartwegii*) OR (*pinus* AND *leiophylla*) OR (*pinus* AND *lumloltzii*) OR (*pinus* AND *maximartinezii*) OR (*pinus* AND *montezumae*) OR (*pinus* AND *patula*) OR (*pinus* AND *pseudostrobis*) OR (*pinus* AND *radiata*) OR (*pinus* AND *strobiformis*) OR (*pinus* AND *strobis*) OR (*pinus* AND *teocote*) OR (*pithecellobium* AND *dulce*) OR (*pittosporum* AND *tobira*) OR (*pittosporum* AND *undulatum*) OR (*platanus* AND *mexicana*) OR (*platanus* AND *occidentalis*) OR (*platanus* AND *hybrida*) OR (*platycladus* AND *orientalis*) OR (*plumeria* AND *rubra*) OR (*podocarpus* AND *macrophyllus*) OR (*populus* AND *alba*) OR (*populus* AND *deltoides*) OR (*populus* AND *tremuloides*) OR (*prosopis* AND *laevigata*) OR (*prunus* AND *avium*) OR (*prunus* AND *cerasifera*) OR (*prunus* AND *domestica*) OR (*prunus* AND *persica*) OR (*prunus* AND *salicina*) OR (*prunus* AND *serotina* AND *capuli*) OR (*pseudobombax* AND *ellipticum*) OR (*pseudophoenix* AND *sargentii*) OR (*psidium* AND *guajava*) OR (*punica* AND *granatum*) OR (*pyrus* AND *calleryana*) OR (*pyrus* AND *communis*) OR (*quercus* AND *candicans*) OR (*quercus* AND *castanea*) OR (*quercus* AND *crassifolia*) OR (*quercus* AND *crassipes*) OR (*quercus* AND *deserticola*) OR (*quercus* AND *dysophylla*) OR (*quercus* AND *frutex*) OR (*quercus* AND *laeta*) OR (*quercus* AND *laurina*) OR (*quercus* AND *mexicana*) OR (*quercus* AND *obtusata*) OR (*quercus* AND *rugosa*) OR (*quercus* AND *virginiana*)

OR (ricinus AND communis) OR (robinia AND pseudoacacia) OR (roystonea AND regia) OR (sabal AND mexicana) OR (salix AND alba) OR (salix AND babylonica) OR (salix AND bonplandiana) OR (salix AND humboldtiana) OR (sambucus AND cerulea) OR (sambucus AND nigra) OR (schefflera AND actinophylla) OR (schinus AND molle) OR (schinus AND terebinthifolius) OR (senna AND didymobotrya) OR (senna AND multiglandulosa) OR (senna AND racemosa) OR (sequoia AND sempervirens) OR (sicyos AND deppei) OR (spathodea AND campanulata) OR (spondias AND purpurea) OR (styphnolobium AND japonicum) OR (syagrus AND romanzoffiana) OR (tabebuia AND rosea) OR (taxodium AND mucronatum) OR (tecoma AND stans) OR (thevetia AND thevetioides) OR (trachycarpus AND fortunei) OR (ulmus AND parvifolia) OR (washingtonia AND filifera) OR (washingtonia AND robusta) OR (wigandia AND urens) OR (yucca AND aloifolia) OR (yucca AND elephantipes) OR (yucca AND gigantea)))

Una vez obtenidos, los resultados de búsqueda fueron depurados con los criterios de selección expuestos en el **cuadro 3**, respecto al criterio de diseño experimental y resultados, se leyó el título, resumen y las palabras clave de cada documento, si la pregunta mostrada en la columna de descripción era respondida positivamente, entonces el texto se incluía dentro de la muestra documental.

cuadro 3 Criterios de selección de documentos para la obtención de muestra

Criterio	Descripción
Idioma	Textos en español e inglés
Fecha	Desde 1970 hasta 2021
Diseño experimental y resultados	¿El estudio relaciona CExp con contaminantes del aire y su efecto en especies comúnmente plantadas en la Ciudad de México?

7.2 Transformación de la información

7.2.1 Matriz bibliográfica

Se descargó la información bibliográfica de la muestra documental desde Scopus en formato de valores separados por comas (CSV) y se organizó en una matriz bibliográfica en Excel (Office 365) que contiene datos de revista, tipo de documento, año, número, volumen, páginas, título, autor, resumen, palabras clave, contacto con el autor, base de datos, número de serie, DOI, URL de Scopus, idioma y número de veces citado internacionalmente.

Adicionalmente, para cada documento se agregaron datos de la especie arbórea estudiada, las sustancias/contaminantes involucrados en el estudio, el tipo de cámara experimental y un URL en Dropbox para facilitar la recuperación de la información para usuarios sin acceso a Scopus.

7.2.2 Análisis bibliométrico

Se descargó la muestra documental en formato BIBTEX (BIB) desde Scopus para procesar la información mediante el software de análisis bibliométrico “Bibliometrix” en su versión 3.1, específicamente se empleó la herramienta “Biblioshiny” la cual está basada en el lenguaje de programación estadística R para el procesamiento de datos. Para la generación de mapas conceptuales y diagramas también fue utilizado VOSviewer en su versión 1.6.17, el cual, al igual que Bibliometrix, es un software de acceso libre.

Se obtuvieron resultados gráficos de la muestra documental sobre la relación de conceptos e ideas en la utilización de CExp, productividad científica por autor, productividad científica por país, coautoría y colaboración internacional, tendencias históricas de investigación, así como índices de relevancia por autor y revista científica.

7.3 Análisis documental

7.3.1 Delimitación de análisis

Con ayuda el uso de la matriz bibliográfica generada y el análisis bibliométrico, de la muestra documental se seleccionaron aquellos artículos que incluyeran especies de interés para la Ciudad de México, considerando exclusivamente aquellas especies consideradas como “Preferentes” por la NADF-006-RNAT-2016.

7.3.2 Matriz de análisis documental

Con la finalidad de identificar contrastes, excesos o inexistencias de conocimiento, se generó una matriz de análisis documental, con la que se comparó de forma sintetizada el contenido más relevante de cada documento seleccionado en el paso anterior, la información incluida en dicha matriz se describe a continuación.

- a) Ficha bibliográfica en formato APA séptima edición: Autores, año de publicación, título original, revista, número, volumen, páginas y DOI.
- b) Título traducido: Mediante traducción directa para mantener una interpretación apegada al texto original.
- c) Contenido técnico sintetizado: El país de origen del artículo, la especie estudiada, el tipo de cámara experimental, el (los) contaminante (s), el enfoque de estudio y el tipo de investigación.
- d) Método: Se describen los aspectos metodológicos de mayor relevancia de cada trabajo.
- e) Análisis de resultados: Síntesis de este apartado.

- f) Conclusiones: Del autor, las más destacables.
- g) Vacíos investigativos: Se enlistan los contrastes, excesos o inexistencias de conocimiento que se identifiquen en el documento a manera de comentario, afirmación, negación, hipótesis o preguntas de investigación. Este proceso es resultado de la lectura crítica de la información.

VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Búsqueda y análisis documental

Se obtuvo un resultado de búsqueda inicial de 18,950 documentos, al depurar los resultados mediante los operadores de búsqueda avanzada, los resultados se condicionaron a todos aquellos documentos que incluyeran obligatoriamente las palabras de búsqueda en el título/*TITLE*, el resumen/*ABSTRACT/ABS* o las palabras clave/*KEYWORDS/KEY*, lo cual disminuyó el resultado de búsqueda a 1,325 documentos (*figura 19*)

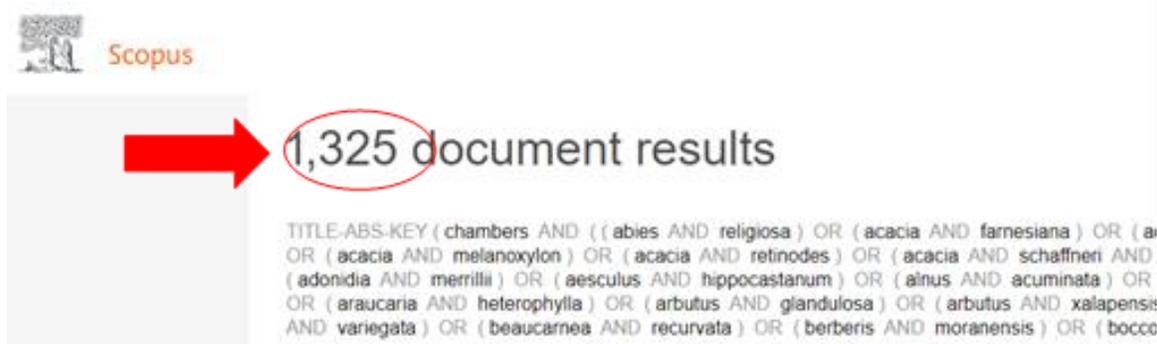


figura 19 Resultados de búsqueda condicionados. Nótese en rojo el uso de los operadores condicionantes de Scopus *TITLE-ABS-KEY*. Todos y cada uno de los 1,325 ítems fueron revisados para la obtención de la muestra.

Al depurar estos 1325 textos con los criterios de selección descritos en el apartado 8.1, se obtuvo una muestra documental de 190 documentos, de los cuales 176 son artículos de revistas científicas (fuente primaria), 10 son reportes de conferencias y cuatro son revisiones del conocimiento generado (fuentes secundarias). La información bibliográfica de esta muestra documental se encuentra en la matriz bibliográfica generada en esta investigación, la cual puede ser consultada comunicándose a los correos labcont@unam.mx o pirospatha@gmail.com.

Previo a la exposición de indicadores bibliométricos, y, derivado de la información añadida a la matriz bibliográfica (punto 8.2.1), a continuación, se presentan los datos sobre las especies arbóreas que han sido estudiadas internacionalmente en este campo de investigación.

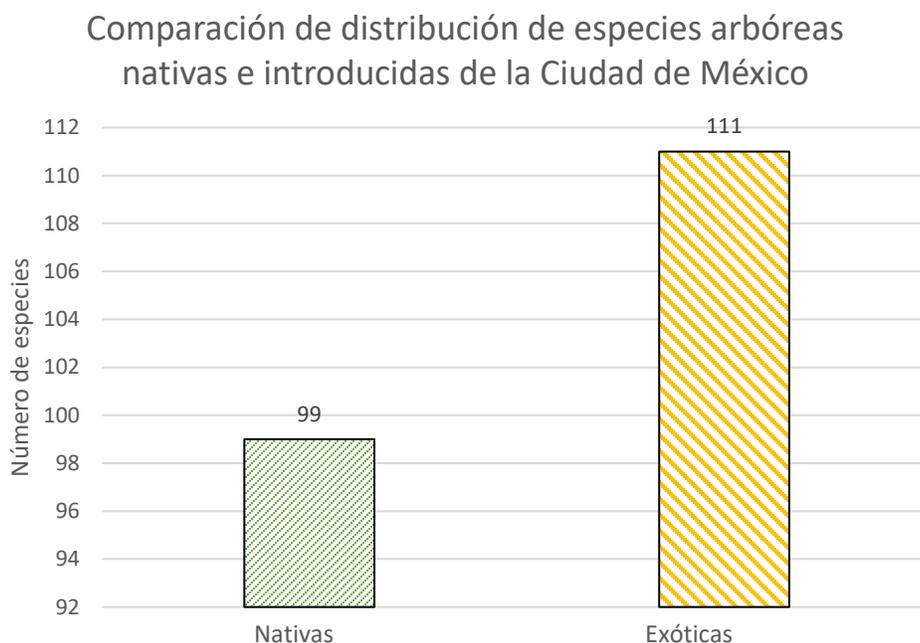


figura 20 Gráfica de comparación de especies nativas y exóticas comunes de la Ciudad de México. Se observa que del total de especies más de la mitad son exóticas. Elaboración propia con base en la información de CONABIO (2021).

De las 210 especies que en este estudio se consideran comunes en el arbolado urbano de la Ciudad de México, tan solo 99 son nativas (*figura 20*) (CONABIO, 2012b, 2021), es decir, el 52.8% son introducidas. Aunado a esto, de todas las especies, tan solo el 25% han sido estudiadas con el uso de cámaras experimentales (*figura 21*), de las cuales, solo siete se consideran preferentes para la Ciudad de México según la NADF-006-RNAT-2016: *Acacia farnesiana*, *Carya illinoensis*, *Liquidambar styraciflua*, *Pithecellobium dulce*, *Populus deltoides*, *Populus tremuloides* y *Psidium guajava*.

Dicho de otra forma, **tan solo el 3% de las especies comúnmente distribuidas en el arbolado urbano han sido estudiadas con CExp a la par de ser apropiadas según la normatividad de la Ciudad de México.** Un 22% si bien han sido estudiadas, no son consideradas dentro de la NADF-006-RNAT-2016 como especies apropiadas.

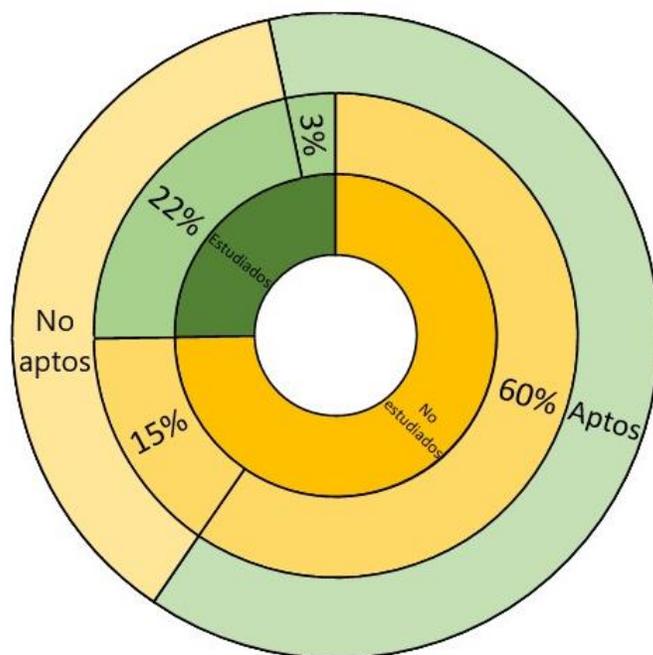


figura 21 Porcentajes de árboles comunes de la Ciudad de México estudiados con CExp internacionalmente. Gráfico dividido en tres niveles, el primero (dentro hacia afuera), se dividen dos grupos; árboles estudiados y no estudiados internacionalmente. El segundo nivel muestra los porcentajes del total de especies con relación al primer nivel y a su clasificación en la NADF-006-RNAT-2016 (tercer nivel). Elaboración propia.

Considerando que la productividad científica empleando CExp es más prolifera en especies introducidas que en las nativas (**cuadro 4**), cabría preguntarse si históricamente, la mayor disponibilidad de información sobre especies extranjeras tuvo influencia en la gestión de arbolado urbano de administraciones gubernamentales pasadas, las cuales propiciaron la actual distribución de especies invasoras en las áreas verdes de la capital, sin embargo, ahondar en el tema rebasa los objetivos de este trabajo.

Los géneros *Eucalyptus* y *Populus* son mayormente estudiados alrededor del mundo, y en menor medida, pero igualmente destacando entre otras especies, *Acer pseudoplatanus*, *Cryptomeria japónica*, *Ficus benjamina*, *Ginkgo biloba*, *Liquidambar styraciflua* y *Pinus radiata*, así como algunas especies frutales; Cítricos (*Citrus spp.*), moreras (*Morus spp.*), olivar (*Olea europaea*), cerezo (*Prunus avium*), durazno (*P. persica*), capulín (*P. serótina*) y guayaba (*Psidium guajava*).

cuadro 4 Porcentajes de especies apropiadas y no apropiadas estudiadas internacionalmente con el uso de CExp. Datos obtenidos de la norma ambiental NADF-006-RNAT-2016.

<i>CONDICIÓN</i>	<i>NÚMERO DE ESPECIES</i>	<i>PORCENTAJE</i>	<i>NADF-006</i>
Estudiadas	7	3%	Apropiadas
Estudiadas	46	22%	No apropiadas
No estudiadas	125	60%	Apropiadas
No estudiadas	32	15%	No apropiadas
total	210	100%	-

En la **figura 22**, se muestra el número de estudios a escala mundial que se han realizado en las especies previamente mencionadas alrededor del mundo, datos obtenidos directamente de la muestra documenta

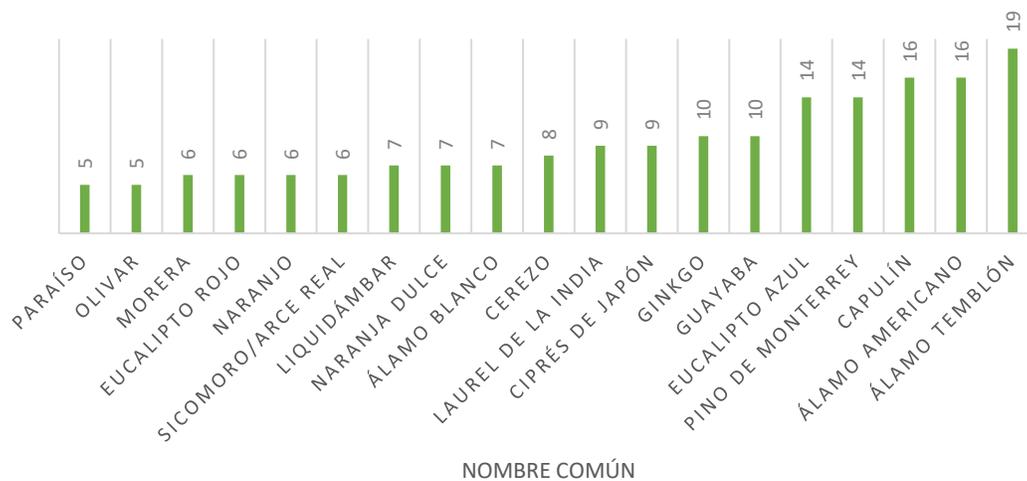


figura 22 Número de estudios realizados sobre las especies de mayor interés internacional. Nótese la clara tendencia a investigar especies del género *Populus* y aquellas de importancia económica. Elaboración propia.

Las especies elegidas en las investigaciones responden fundamentalmente a las condiciones regionales de estudio; de ahí surge la teoría para el conocimiento biológico. En ese sentido, **no es recomendable elegir o proponer determinada especie siendo evaluada con una sola cámara experimental**, pues dependiendo de la necesidad del investigador, el experimento es diseñado. No obstante, es posible identificar las tendencias de investigación sobre especies de importancia económica o sobre la necesidad de resolver un problema ambiental local.

Con relación a lo anterior, uno de los principales problemas que afrontan los árboles urbanos en su desarrollo es la competencia con las especies introducidas (Sheppard y Stanley, 2014), en ese sentido, un eje de investigación empleando las CExp podría desarrollarse en el conocimiento de los árboles nativos aptos para sobrevivir al cambio climático frente a especies introducidas y otro eje en el conocimiento de las respuestas de árboles introducidos en la atmósfera local, el conocimiento derivado de ambos ejes brindaría bases sólidas para gestionar el arbolado urbano de la Ciudad de México a largo plazo

Respecto a los estudios recuperados en este trabajo, la relación de los conceptos “*tipo de CExp*”, “*especies arbóreas*” y “*contaminantes*”, permitió un número elevado de combinaciones que pueden observarse en la **figura 38 (pág. 76)** y junto con la ejecución bibliométrica y el análisis documental, fue construido el conocimiento presentado a partir de esta sección del trabajo. El primer y último texto procesado con la matriz de análisis documental se muestra a continuación.

cuadro 5 Primera y última sección de la matriz de análisis documental.

Dochinger, L. S., Townsend, A. M., Seegrist, D. W., y Bender, F. W. (1972). Responses of hybrid poplar trees to sulfur dioxide fumigation. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 22(5), 369–371. <https://doi.org/10.1080/00022470.1972.10469649>

Título traducido: Respuestas de los álamos híbridos a la fumigación con dióxido de azufre

País: Estados Unidos

Tipo de CE: Cámara de ambiente controlado

Especie: *Populus deltoides*; Álamo americano (plántula)

Contaminante (s): Dióxido de azufre (SO₂)

Enfoque de estudio: Respuesta de crecimiento/daño foliar

Tipo de investigación: Comparativo de clones

Método.

Esquejes de tallo enraizados de cuatro clones de álamo híbrido fueron expuestos a 5 ppm de dióxido de azufre durante 3, 6, 9 o 12 horas en cámaras de ambiente controlado con una humedad relativa al 50% y una temperatura de 30°C. Se realizaron análisis multivarianza a partir de las mediciones del crecimiento de los brotes registradas durante cuatro semanas antes y después de la fumigación, así como sobre los datos de las lesiones foliares inducidas por el dióxido de azufre.

Análisis de resultados.

Las curvas de crecimiento indicaron que todos los clones crecían más rápido antes de la fumigación, pues todos los clones, excepto uno, mostraron un hábito de crecimiento continuamente decreciente después de la fumigación a largo plazo. Respecto al clon con mejor respuesta al SO₂ el genotipo puede haber condicionado el patrón de crecimiento.

La especie demostró una rápida absorción del SO₂ desarrollando manchones tempranos de aspecto apagado y húmedo, los cuales tornaron un color verde grisáceo con el paso del tiempo y pasadas 24 horas, de un color marrón/rojizo. El patrón final de la lesión aguda se manifestó en el completo colapso, decoloración y pérdida prematura del follaje. Las hojas más jóvenes eran más tolerantes al SO₂ que las de mediana edad/viejas en todos los clones y en todos los periodos de fumigación.

Conclusiones.

Se mostró que la fumigación con SO₂ dio lugar a respuestas que fueron significativamente diferentes entre clones del mismo álamo híbrido. La variación se manifestó no sólo para la severidad de la necrosis foliar sino también para la depresión del crecimiento de los brotes unas semanas después de la exposición.

Vacios investigativos.

1. El examen de las diferencias análogas entre clones o lotes de semillas en las especies frondosas ha sido un campo descuidado, requiere mayor protagonismo en la investigación científica biológica.
2. No existen estandarizaciones de disminución de crecimiento de especies por contaminantes atmosféricos; mencionar una pérdida de crecimiento sin poder catalogar este en algún índice, carece de objetividad.

Batke, S. P., Yiotis, C., Elliott-Kingston, C., Holohan, A., y McElwain, J. (2020). Plant responses to decadal scale increments in atmospheric CO₂ concentration: comparing two stomatal conductance sampling methods. *Planta*, 251(2). <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03343-z>

Título traducido: Respuestas de las plantas a incrementos de escala decenal en la concentración atmosférica de CO₂: comparación de dos métodos de muestreo de conductancia estomática

País: Reino Unido

Tipo de CE: Cámara de ambiente controlado

Especie: *Populus tremuloides*; Álamo temblón

Contaminante (s): Dióxido de carbono (CO₂)

Enfoque de estudio: Aumento de biomasa por enriquecimiento de CO₂

Tipo de investigación: Comparativo de especies

Método.

Se desarrollaron 18 plántulas de álamo a la par de otras especies bajo condiciones controladas, todas distribuidas en macetas dentro de ocho Cexp programadas para funcionar con ciclos diurnos y nocturnos (22° C; 70%HR y 15° C; 60%HR respectivamente). Las plantas fueron aclimatadas dentro de las cámaras 14 días previos a la fumigación, posteriormente se sometieron a cuatro tratamientos duplicados de CO₂; 350, 420, 490 y 560 ppm, representando las concentraciones de este gas de efecto invernadero en los años de 1987, 2025, 2051 y 2070 respectivamente.

Se determinó la conductancia estomática de las plantas empleando dos tecnologías distintas; porómetro y analizadores de gas por infrarrojos. Se comprobó la normalidad y la igualdad de varianza de los datos. La diferencia de conductancia estomática entre los tratamientos se comprobó por separado para cada especie utilizando la comparación ANOVA. Para identificar cómo se desplazó la conductancia estomática diurna máxima entre los tratamientos, se realizó una regresión no paramétrica ponderada. Todos los análisis se realizaron con el paquete estadístico R ver. 3.4.

Análisis de resultados.

Se identificó una respuesta predictiva no lineal de la conductancia estomática ante el aumento del CO₂, lo cual solo puede observarse en estudios que contemplen concentraciones de dióxido de carbono previstas a largo plazo, contrario a los comportamientos lineales que se han identificado con anterioridad. Los datos de conductancia estomática se ajustaron al emplear dos técnicas analíticas distintas, por lo que se recomienda mantener más de una técnica para la obtención de datos duros.

Conclusiones.

Las Cexp tienen ventajas comparadas con otros sistemas experimentales como FACE, pues al poder controlar el ambiente, la exploración del comportamiento no lineal descrito en el presente se facilitaría en futuros experimentos para afinar las predicciones de las respuestas de plantas ante el aumento de CO₂ global en todo tipo de ecosistemas.

Vacíos investigativos.

1. **Los estudios a futuro deben considerar los tres medios ambientales de un árbol: suelo, aire y agua.**
2. **Los cambios atmosféricos no son abruptos, por lo que los estudios deben considerar cambios en la concentración de CO₂ en pequeños lapsos de tiempo concatenados a largo plazo.**
3. **Los resultados obtenidos por experimento podrían afinarse si se emplea más de una técnica analítica dependiendo del parámetro de interés (selección futura de la técnica adecuada).**
4. **Entender y demostrar el comportamiento no lineal podría contribuir a afinar las predicciones de respuestas de ecosistemas y bosques urbanos a largo plazo.**

Es posible acceder a los datos completos incluidos en la matriz de análisis documental contactando a los correos labcont@unam.mx y pirospatha@gmail.com. La matriz sintetiza de forma similar cada uno de los 41 documentos seleccionados con base en los criterios expuestos en el apartado 8.3.1 y 8.3.

8.2 Indicadores bibliométricos

8.2.1 Productividad, uso y frecuencia de uso de las cámaras experimentales.

La producción científica del tema ha variado desde el año 1972 hasta el 2021, con un promedio de cinco artículos publicados por año y con una tendencia al aumento. En la **figura 23** se observa un aumento de publicaciones de la línea de investigación, hallando una mayor productividad en el año 2001 y 2017, con una publicación de 10 artículos en ambos periodos de tiempo. Los resultados pueden extrapolarse al uso de las CExp considerando los 18,950 documentos obtenidos de la primera búsqueda, en consecuencia, se considera que las CExp son una tecnología vigente en la línea de investigación de fisiología arbórea para evaluar daño por contaminantes del aire.

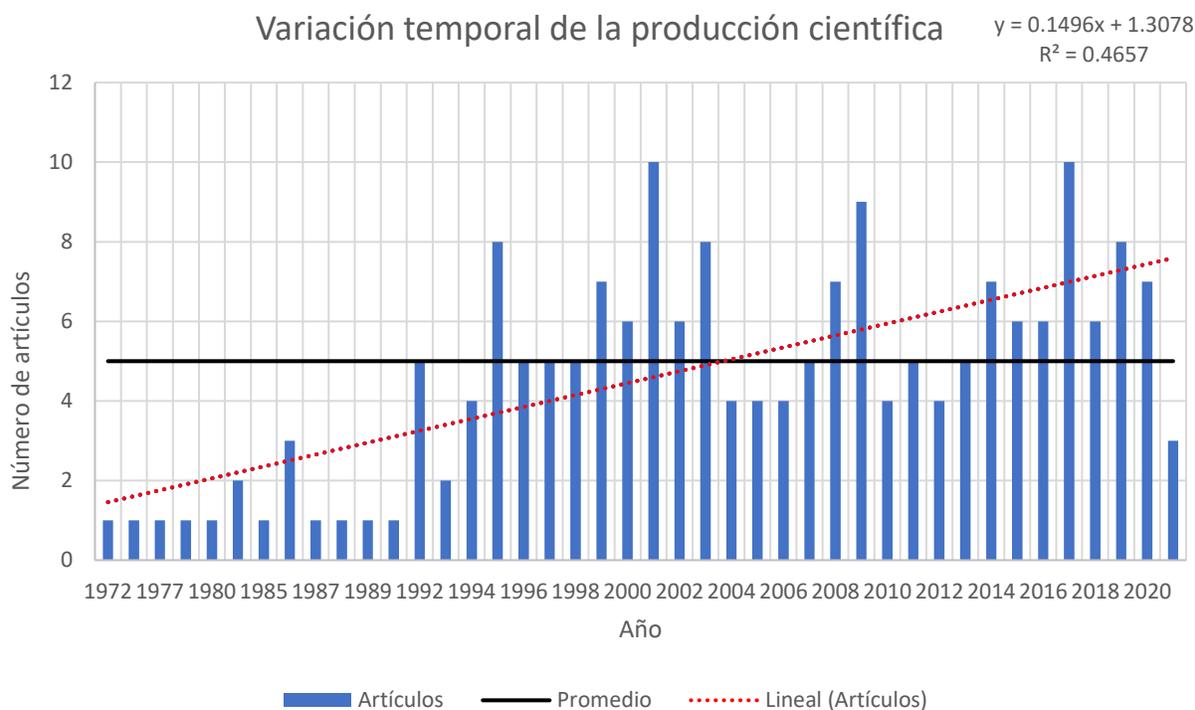


figura 23 Productividad científica anual relacionada al uso de cámaras experimentales (1972-2020). El incremento en la productividad de literatura se hace más notorio a partir del año de 1992 (5 publicaciones), pues previo a este, el promedio de artículos publicados anualmente era de 1 documento. Elaboración propia.

El primer estudio en el que se empleó una CExp para estudiar especies de interés para la Ciudad de México data de 1972, este evaluó el daño en *Populus deltoides* por SO₂ mediante una cámara de ambiente controlado (Dochinger et al., 1972), no obstante, este tipo de CExp fueron mayormente usadas a partir de 1985, siendo vigentes hasta la actualidad, por lo que se retomará la discusión de este tipo de cámaras más adelante.

Desde 1976, las cámaras de fumigación fueron utilizadas principalmente para evaluar efectos de ozono y dióxido de azufre en el crecimiento de especies como *Acer pseudoplatanus*, *Cryptomeria japonica*, *Ficus benjamina*, *Ginkgo biloba*, *Pinus radiata*, *Populus alba* y *P. tremuloides* (**figura 38, pág. 76**), no obstante, no se identifican más reportes a partir de 2014, probablemente debido a que las necesidades actuales de simulación de ambiente rebasaron las capacidades de estas cámaras experimentales (Chung et al., 2014; Karnosky, 1976).

En 1983 son utilizadas por primera vez (de nuevo, en especies de interés para este trabajo), las cámaras abiertas (Rogers et al., 1983a; Rogers et al., 1983b), las cuales, en un contexto internacional, son las CExp más empleadas, seguidas de las cámaras cerradas de intercambio de gases, de las cuales se hablará más adelante, y las cámaras de ambiente controlado, siendo la primera y la última usadas para evaluar efectos ocasionados por elevadas concentraciones de ozono y en menor frecuencia dióxido de azufre, principalmente en especies del género *Populus* y *Prunus*: *P. tremuloides*, *P. deltoides*, *P. avium*, *P. pérsica* y *P. serotina*.

Con un enfoque dirigido a la productividad de alimentos, las cámaras abiertas y de ambiente controlado también han sido empleadas para estudiar el efecto de concentraciones elevadas de CO₂ en especies frutales, principalmente *Citrus sp*, *Morus sp*, *Prunus sp* y

Psidium guajava. Como puede observarse en la **figura 38, (pág. 76)**, las dos CExp siguen tendencias de investigación muy similares, razón por la que ambos clústeres son tan cercanos, en ese sentido, ambas cámaras mantienen su vigencia debido a que el investigador, dependiendo de sus limitaciones, puede optar por alguna de ambas cámaras para conseguir resultados similares.

Poco más se puede decir acerca de la experimentación con cámaras abiertas y de ambiente controlado. Karnosky, et al. (1976, 1992b, 1992a, 1996, 2007) quien, fue el mayor exponente en el uso de cámaras abiertas junto a Skelly (Chappelka et al., 1999; Davis y Skelly, 1992; Ghosh et al., 1998; Kolb et al., 1997; Simini et al., 1992) (**figura 29 pág. 63**), después de casi 40 años de investigación concluyeron tres aspectos: 1) las cámaras experimentales limitan las condiciones ambientales de los árboles. 2) Los contaminantes tienden a comportarse de formas más variables que una fumigación programada. 3) Se necesita estudiar los efectos del ozono en árboles de tallas mayores, pues los efectos en individuos de menor tamaño no son suficientes para determinar los efectos en bosques.

Con respecto a dichas conclusiones, cabe mencionar lo siguiente: si bien las CExp limitan en menor grado el crecimiento de los árboles, los estudios generalmente se conducen en lapsos de seis meses a tres años, por lo que, dependiendo de la especie, se puede optar por usar una cámara de árbol completo en lugar de una abierta, lo cual brinda también una posible solución a la tercera conclusión. Además, las cámaras pueden equiparse con componentes que generen corrientes de aire para simular la dinámica atmosférica de los contaminantes.

Aunado a esto, las conclusiones expuestas no son compatibles con las condiciones de composición química atmosférica, en tipos de contaminantes y concentración, la Ciudad de

México, pues Karnosky y Skelly consideran únicamente las condiciones ambientales y ecológicas de los Estados Unidos.

Respecto a las cámaras de hoja, estas han sido usadas en tres estudios de interés para esta investigación, utilizadas por primera vez en 1977 por Bravdo (1977) para evaluar intercambio de CO₂ en hojas de *Citrus sinensis*, posteriormente, en *Araucaria heterophylla* y *Nerium oleander* por Long et al., (1993) y en *Ficus benjamina* por Pons y Welschen, (2002). Su uso es muy concreto, monitorean el intercambio gaseoso de hoja, principalmente de CO₂ la **figura 38, (pág. 76)**, para determinar cambios en las tasas de evapotranspiración de los árboles.

A pesar de ser un tipo de CExp poco usadas, las cámaras de hoja permiten determinar el intercambio gaseoso de las hojas, debido a esto, estas cámaras enriquecen los resultados experimentales obtenidos a través de otro tipo de CExp, de hecho, experimentos como el de Ceulemans et al. (1995), Moraes et al. (2004), y Tschaplinski et al., (1995) evaluaron cambios fisiológicos por niveles elevados de CO₂ en *Liquidambar styraciflua*, *Platanus occidentalis* y *Populus deltoides*, así como las respuestas fotosintéticas de *Psidium guajava* a exposiciones de corto plazo de O₃, a través de la conjunción de cámaras abiertas y de hoja.

En 1980 las cámaras cerradas de intercambio de gases son usadas por primera vez en la generación de conocimiento referente a árboles plantados en la Ciudad de México, hasta la actualidad, son el sistema con el que se estudia la emisión de COVsB y la absorción de COVs, fluoruros y CO₂ principalmente en *Acacia farnesiana*, *A. longifolia*, *Casuarina equisetifolia*, *Cryptomeria japónica*, *Eucalyptus camalgulensis*, *E. globulus*, *Ficus benjamina*, *Populus deltoides* y *P. tremuloides* (**figura 38, pág. 76**).

Wilkinson et al. (2009) menciona que, considerando la constante emisión de gases de efecto invernadero que inducen el aumento en la temperatura, es necesario identificar la emisión de COVsB de los árboles urbanos, los cuales pueden tomar un papel fundamental en el cambio climático, en este sentido, las cámaras de hoja son una herramienta de gran potencial para complementar los experimentos de cámara de intercambio de gases, pues un error en la modelación de emisiones de COVsB es no incluir el intercambio de CO₂ de hojas, el cual impacta directamente en el metabolismo de los árboles (Wilkinson et al., 2009).

Cámaras menormente usadas como las de árbol completo en Australia, útiles para monitorear crecimiento de *Eucalyptus globulus* (Sharwood et al., 2017), o las empleadas en la universidad de Lancaster en Reino Unido para el estudio de emisiones de COVsB en *Ficus benjamina* (Wyche et al., 2014), tuvieron su aparición en años más recientes, no obstante, este tipo de CExp están siendo desplazadas por sistemas de monitoreo de gases al aire libre, de los cuales no se profundizará en esta discusión, razón por la que no sean cámaras utilizadas en otros países.

Las cámaras de combustión son usadas desde el 2003 para caracterizar las emisiones y determinar los factores de emisión de material particulado de *Pinus radiata*, *Eucalyptus camaldulensis* y *E. globulus*, surgen de la necesidad de estudiar las emisiones domésticas por quema de leña en Australia (Zou et al., 2003) y años más tarde, este tipo de cámaras fueron adoptadas por investigadores chilenos como Cereceda et al., (2017) y Guerrero et al. (2019), autores con los que investigadores mexicanos han colaborado para determinar las emisiones derivadas por combustión de cultivos (Santiago-De la Rosa et al., 2017).

Como se puede observar en la **figura 38 (pág. 76)**, las cámaras de deposición se relacionan a las cámaras de combustión, esto se debe a que ambas CExp derivan de la misma

problemática, pero con enfoques distintos, mientras las de combustión buscan identificar las emisiones de leñas, las cámaras de deposición identifican el daño producido por estas emisiones (entre otras) en los árboles. Estas cámaras son usadas en Chile, Irán y Corea del sur en *Ficus benjamina*, *Juniperus chinensis*, *Melia azedarach*, *Metasequoia glyptostroboides*, *Morus alba*, *Pittosporum tobira* y *Prunus persica* (J. Chen et al., 2017; Cho et al., 2021; Javanmard et al., 2020; Kwon et al., 2020; Stapleton y Ruiz, 2018).

Con respecto al uso de los distintos tipos de CExp (**figura 24**), se determinó que las cámaras abiertas (53%) son las más usadas, la frecuencia de uso de estas cámaras es mucho mayor a las demás, probablemente debido a su desempeño en el estudio de parámetros ambientales reales. Le siguen con un rango de 16 y 13% las cámaras de intercambio de gases y las de ambiente controlado respectivamente. Otro tipo de CExp se muestran en la **figura 25**, cabe señalar que en la frecuencia relativa del 18% se incluyen seis tipos diferentes.

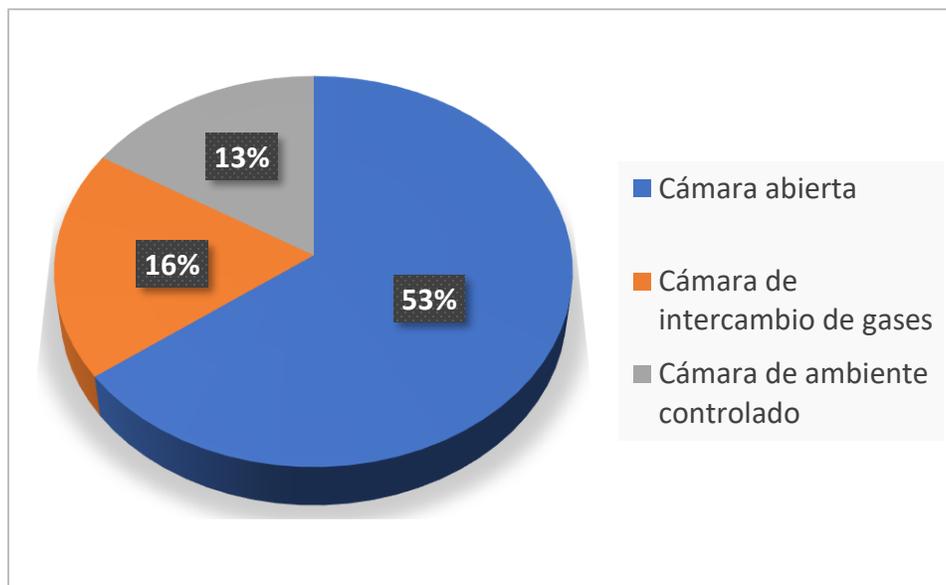


figura 24 Frecuencia relativa (82%) del total de tipo de CExp citadas en muestra documental. Nótese una diferencia significativa entre las cámaras abiertas y el resto de las cámaras experimentales. Elaboración propia.

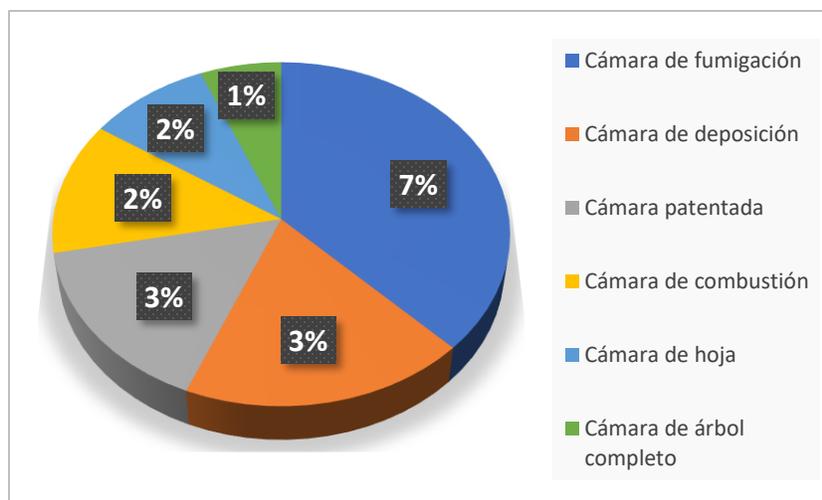


figura 25 Frecuencia relativa (18%) del total de tipo de CExp citadas en muestra documental. Nótese que la mayoría de las cámaras experimentales son empleadas con una frecuencia significativamente baja. Elaboración propia.

Internacionalmente, en América y en Asia existe una mayor productividad científica, por lo que se observa una centralización de la investigación (**figuras 26 y 28**). Posiblemente debido a la capacidad económica de adquirir tecnología, en América la investigación se ha generado mayormente en Estados Unidos con 138 de 176 publicaciones, lo cual representa un 78.4% del total de literatura publicada en la región, y, en Asia, China publicó 79 de las 145 publicaciones, lo que representa un 54.5% de la productividad (**figura 27**).

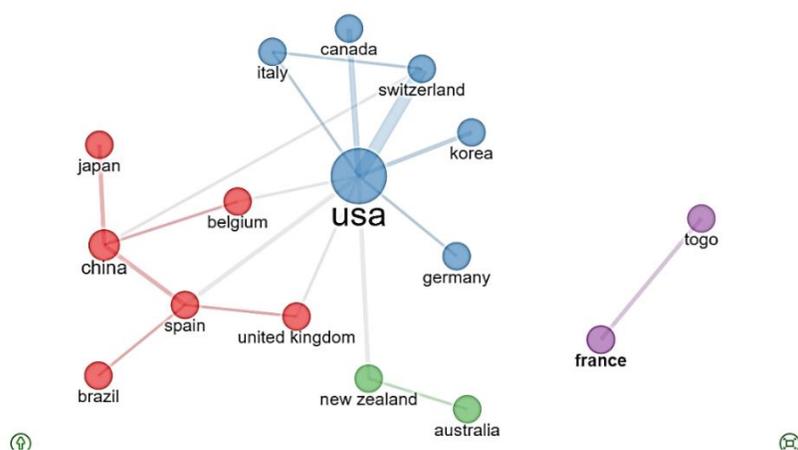


figura 26 Países más productivos. Con creces, Estados Unidos y China son los países de mayor productividad en esta línea de investigación con 178 y 79 trabajos publicados respectivamente, seguidos por España (28), Japón (27) y Nueva Zelanda (21). Elaboración propia con ayuda de Bibliometrix ver. 3.1.

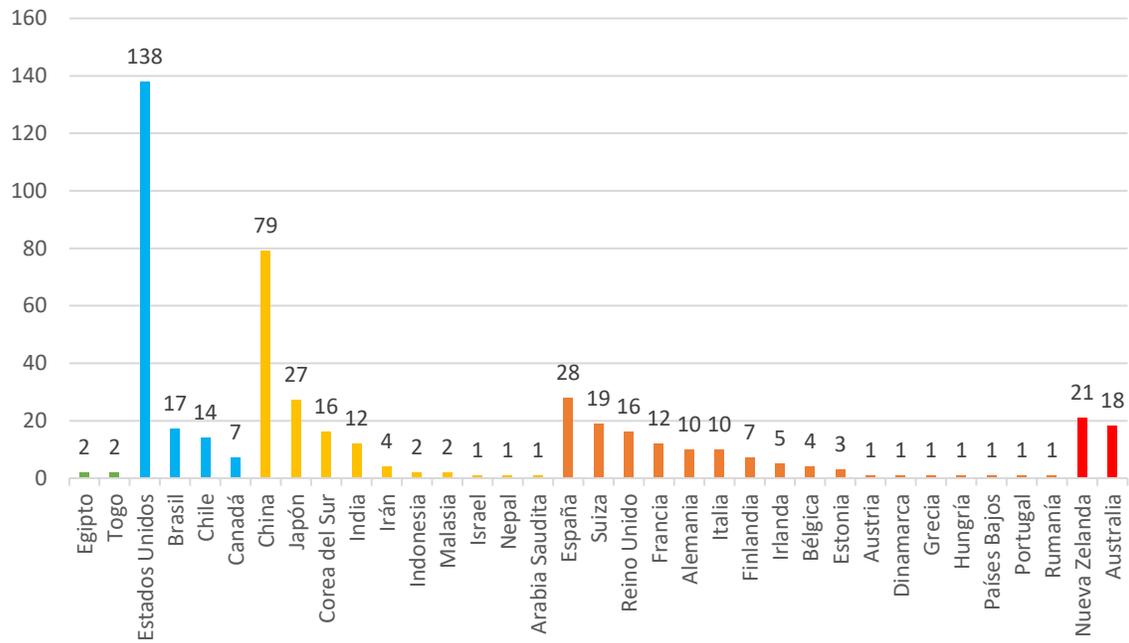


figura 27 Productividad científica por país. Los países se separan por continentes. Verde: África, azul: América, amarillo: Asia, Naranja: Europa, rojo: Oceanía. Se observa una menor centralización de la productividad científica en Europa respecto a los demás continentes. Elaboración propia

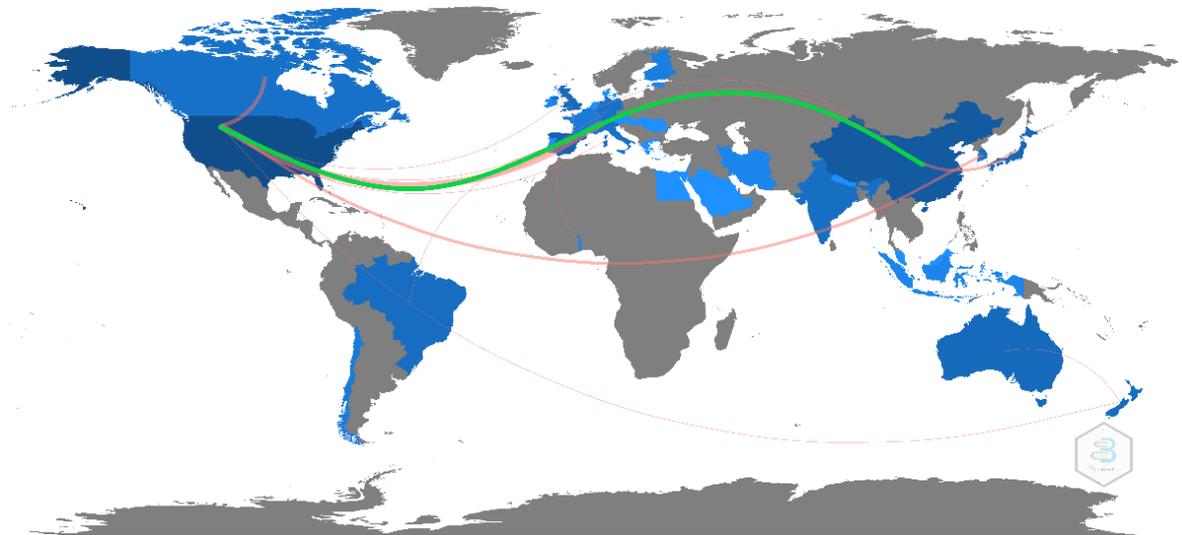


figura 28 Mapa de colaboración internacional. La línea verde representa la centralización de la investigación científica en América, Europa y Asia. Elaboración propia con ayuda de Biblimetrix ver. 3.1.

En caso de requerir más detalle de lo descrito, es posible acceder a una tabla y un mapa detallado de la productividad científica contactando a los correos labcont@unam.mx y pirospatha@gmail.com.

8.2.2 Autores e instituciones

Las CExp han sido utilizadas por 676 autores a escala mundial, de los cuales nueve han trabajado independientemente y 667 de forma colaborativa. El 82.4% de los autores han publicado solo un documento, mientras que el 2.5% han publicado cinco o más (29). El autor con un mayor número de publicaciones fue el Dr. John M. Skelly (1940-2019) (Centre Daily Times, 2019) con 12 documentos, seguido del Dr. David F. Karnosky (1949-2008) (King et al., 2010) con 11 y el Dr. Chen Wei del *Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, CAS*, en Shenyang, China con nueve (*figura 29*).

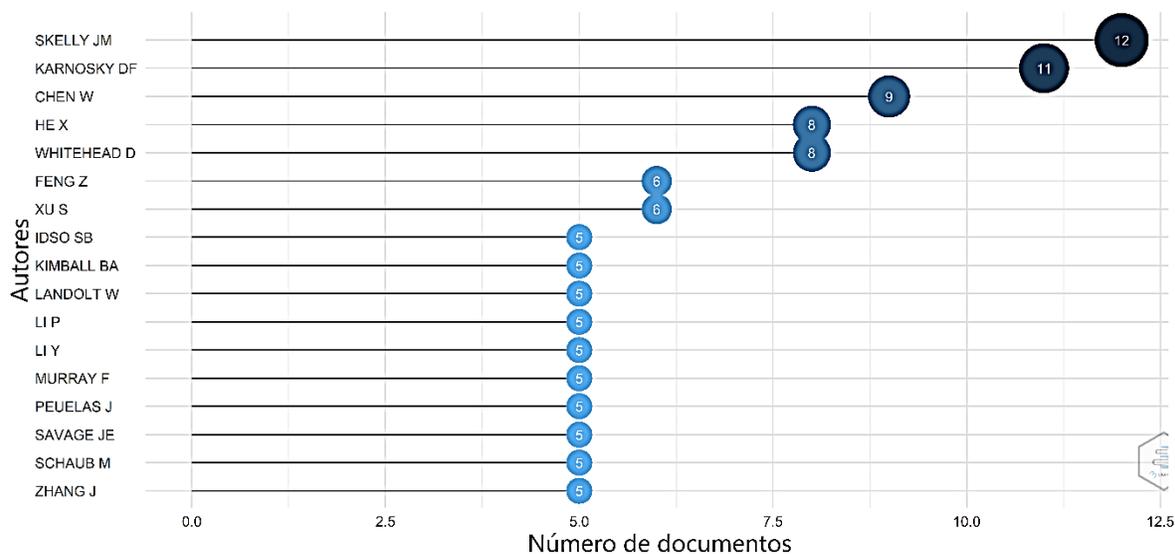


figura 29 Autores con cinco o más publicaciones respecto al tema. Se observa una mayor presencia de investigadores estadounidenses y chinos. Elaboración propia con ayuda de Bibliometrix ver. 3.1.

Los autores previamente mencionados no solo son aquellos con mayor productividad, también se podrían considerar núcleos de investigación internacional, pues junto a sus colaboradores han logrado establecer grupos de trabajo que sobrepasan las limitaciones geográficas. David Karnosky de la *School of Forest Resources and Environmental Science*,

de la *Michigan Technological University* junto a John Skelly del *Department of Plant Pathology*, de la *Pennsylvania State University* establecieron los principales vínculos para que sus colaboradores produjeran el conocimiento principalmente del continente europeo y el americano (*figura 30*)

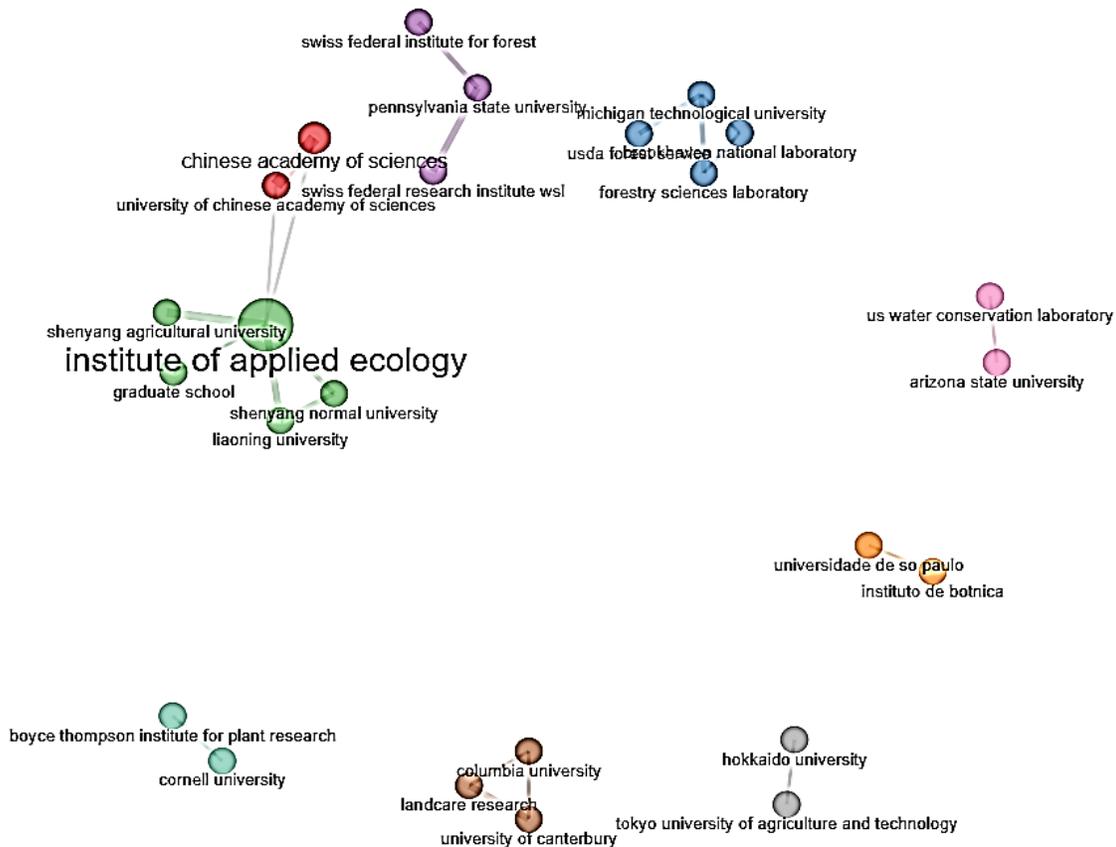


figura 30 Colaboración interinstitucional en la productividad científica. Difícilmente la colaboración interinstitucional supera las barreras geográficas, en ese sentido, nótese que los institutos y universidades relacionados pertenecen al mismo país o región. Elaboración propia con ayuda de Bibliometrix ver. 3.1.

En Asia, fue el Dr. Chen Wei del *Institute of Applied Ecology de Shenyang*, China, junto al Dr. Marcus Schaub, colaborador de Skelly, de la *Pennsylvania State University* quienes principalmente vincularon con los países asiáticos en esta línea de investigación (*figuras 30 y 31*).

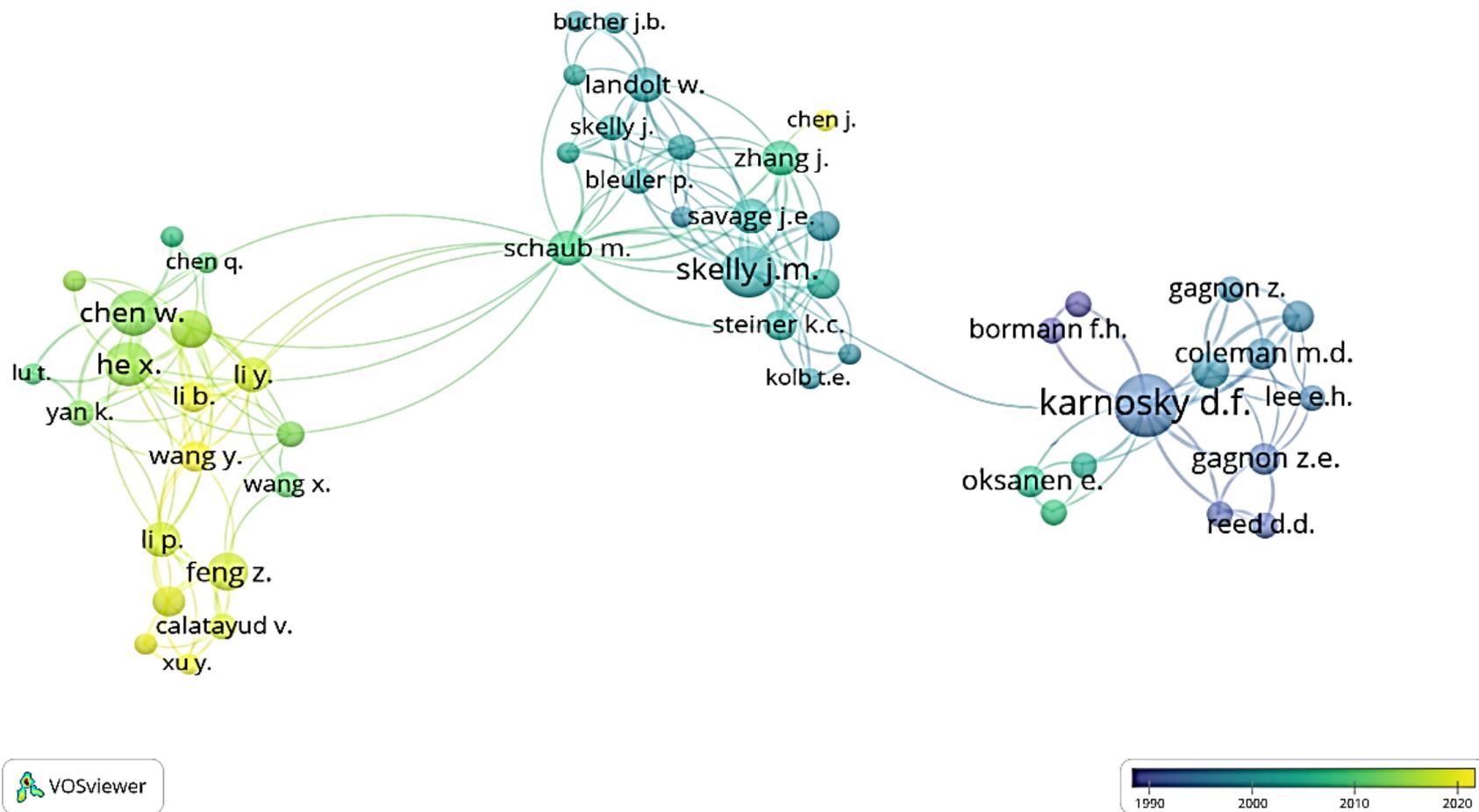


figura 31 Diagrama de colaboración internacional por autores. Se muestra la colaboración y liderazgo científico en orden temporal, en tonos azules las primeras investigaciones, en amarillos las más actuales. Nótese la tendencia de investigación china, emergente en la última década (color amarillo-verde). Elaboración propia con ayuda de VOSviewer ver. 1.6.17.

8.2.3 Títulos, revistas científicas, palabras clave, enfoques y tipos de estudio

Los 190 documentos recuperados se distribuyen en 90 revistas científicas, 62 de estas solo incluyen una publicación, lo que significa que solo el 39.05% de las revistas incluyen más de una publicación, destacando Environmental Pollution con 20 publicaciones, Global Change Biology con 9, Canadian Journal of Forest Research, New Phytologist y Tree physiology, ambas con ocho publicaciones, Water Air and Soil Pollution con 7, Atmospheric environment y Science of the total environment ambas con 6. Otras revistas importantes por su contenido se muestran en la *figura 33*.

Los términos más empleados en los títulos de los documentos (muestra documental) fueron “ozono” con 64 ocurrencias, seguido de “elevado” con 52 y “especies” con 45. En la *figura 32* se observa aquellos términos con una ocurrencia mayor a 20, entre los que cabe destacar “crecimiento” (37) y “efectos” (27). Estos resultados pueden variar si se considera la ocurrencia de términos cuando son empleados como palabras clave.

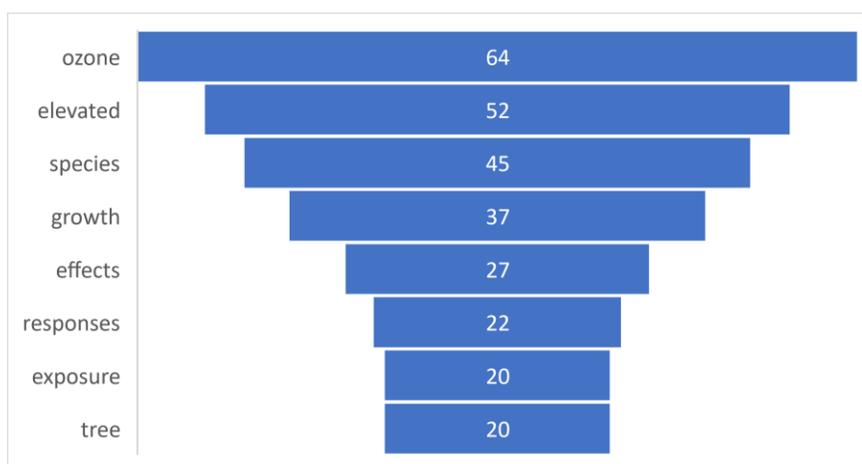


figura 32 Ocurrencia de términos empleados en títulos. Nótese que los términos mayormente empleados para titular investigaciones refieren a las respuestas en árboles provocadas por una elevada concentración de ozono troposférico. Elaboración propia con ayuda de Biblimetrix ver. 3.1.

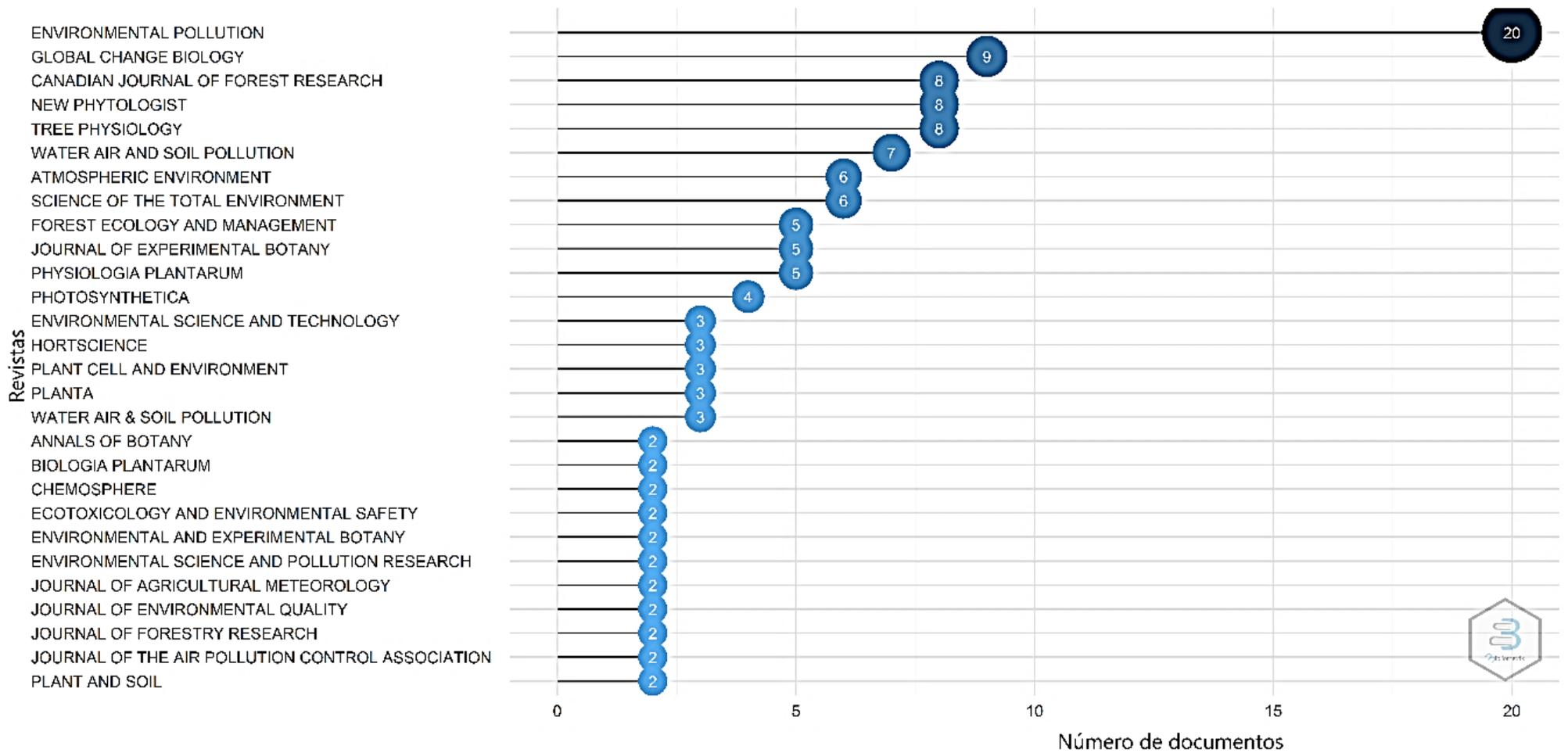


figura 33 Revistas de mayor relevancia Por número de documentos incluidos n=90. Se observa un claro liderazgo vanguardista en el journal Environmental Pollution. Elaboración propia con ayuda de Bibliometrix ver. 3.1.

Las palabras clave mayormente empleadas fueron “ozono” con 24 ocurrencias, “fotosíntesis” con 18 y “conductancia estomática” con 13, cabe destacar a “open-top chamber” como una de las palabras clave con una ocurrencia mayor a cinco (*figura 34*), lo cual refuerza lo expuesto en la *figura 24*, siendo las cámaras abiertas tan ampliamente utilizadas tal que son empleadas como palabras clave de la disciplina.

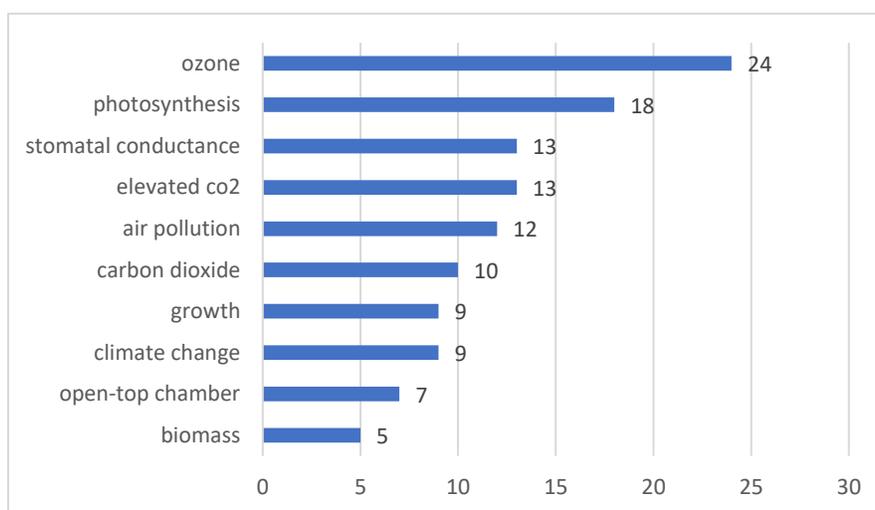


figura 34 Ocurrencia de términos empleados como palabras clave. Las palabras clave son aquellas designadas por el autor, nótese que algunas de las más comunes hacen referencia al cambio climático y la contaminación del aire. Elaboración propia con ayuda de Biblimetrix ver. 3.1.

Se identificaron 10 enfoques bajo los que esta disciplina se ha desarrollado a lo largo del tiempo, el 34% de los estudios identificaron respuestas de crecimiento o daño foliar en diversas especies a causa de contaminantes del aire, el 19% evaluó la emisión o el intercambio de gases (H_2O , COV y CO_2 principalmente), el 16% analizó cambios metabólicos específicos como el cambio de la concentración de clorofila u hormonas vegetales y el 13% trabajó con aumentos de biomasa por enriquecimiento de CO_2 , estos

últimos principalmente relacionados al sector económico. En la **figura 35** se puede observar la ocurrencia de todos los estudios según su enfoque.

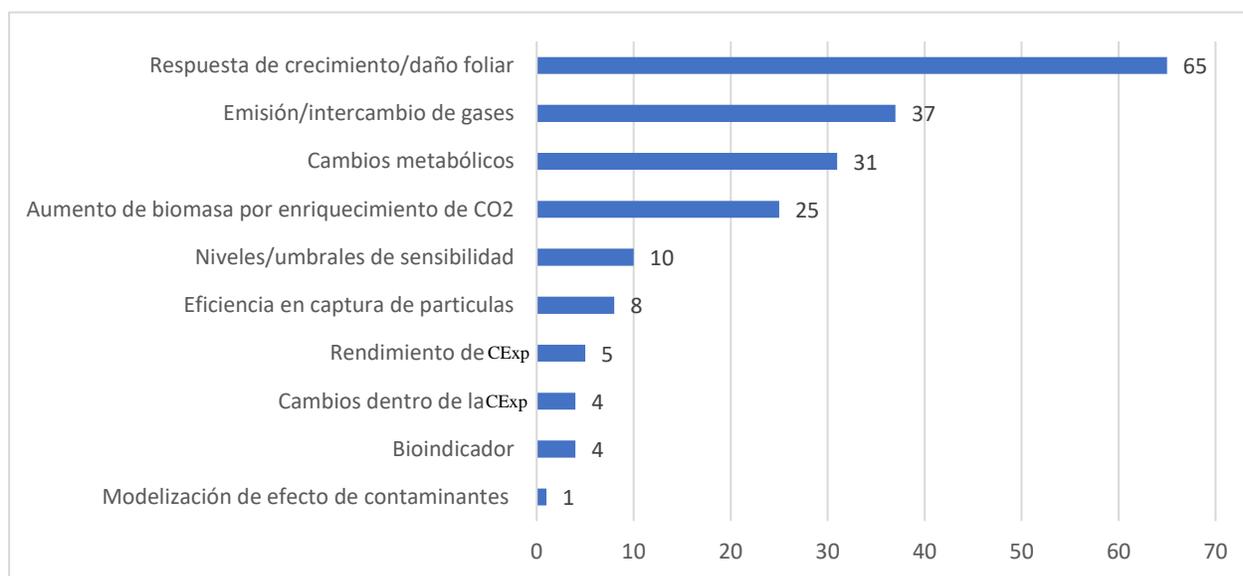


figura 35 Ocurrencia de estudios según sus enfoques. n=190. Nótese que la investigación científica es deficiente en materia de rendimiento de las cámaras experimentales. Elaboración propia.

La muestra documental también fue categorizada en seis tipos de estudios según la clasificación de Vásquez (2016), de los cuales, la mayoría comparan datos entre distintas especies (49%), seguido de los que describen cambios y efectos en una sola especie (37%) y los que comparan datos entre clones de una misma especie (7%). Cabe mencionar que nueve documentos enfocan los objetivos directamente sobre las cámaras experimentales (**figura 34**) de los cuales ocho son directamente evaluativos de esta tecnología y uno es de tipo exploratorio (**figura 35**).

La mayoría de las investigaciones son de carácter descriptivo y comparativo, al igual que en la **figura 36**, se puede observar una escasa producción científica en materia de evaluación de las cámaras experimentales.

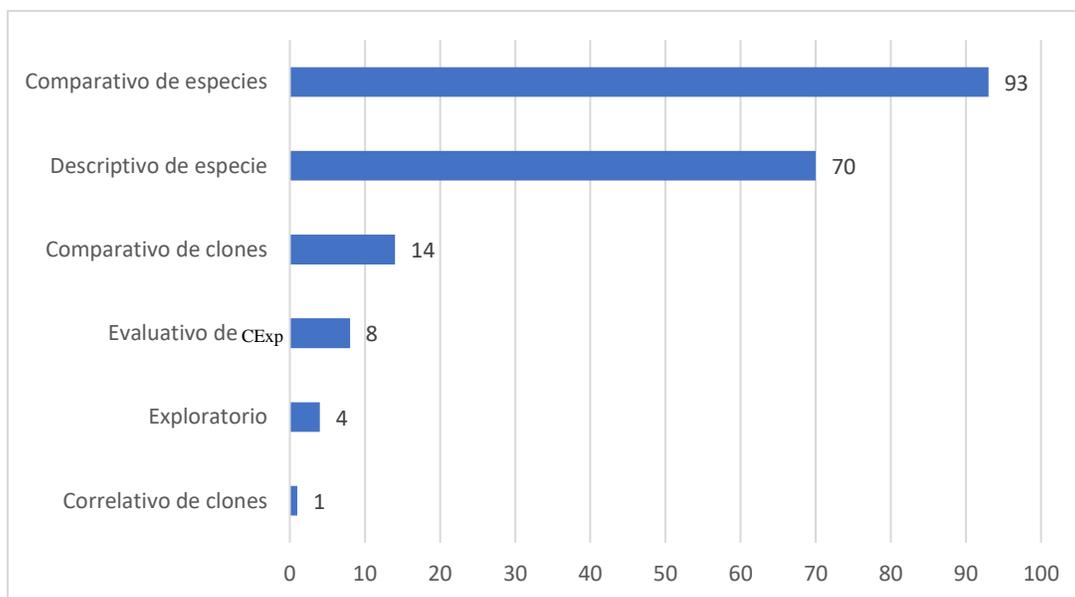


figura 36 Ocurrencia de tipo de estudios. n=190. Curiosamente, tan solo existe un registro de estudio de tipo correlativo en el que se modeló matemáticamente el efecto de los contaminantes en una especie (*Populus deltoides*) (Chen et al., 1997). Elaboración propia.

8.2.4 Tendencias de estudio

Con el paso del tiempo los temas en tendencia dentro de la investigación han variado, en la **figura 37** puede observarse que durante 20 años se ha investigado la relación árbol-efecto de la contaminación-crecimiento-hojas-biomasa, principalmente respecto a la bioquímica de especies arbóreas, el ácido abscísico, carbono, dióxido de carbono y la fotosíntesis de especies como *Acer rubrum*, *Ginkgo biloba*, *Liquidambar styraciflua*, *Liriodendron tulipifera*, *Nothofagus fusca*, *Pinus taeda*, *Populus tremuloides*, y *Prunus serotina*.

De investigaciones publicadas a partir del 2010 (**figura 37**, ver conductancia estomática) derivan técnicas de estudio relevantes para el desarrollo de ecuaciones sobre el flujo de aire contaminado, generadas mediante el análisis de la presión parcial de la hoja y difusión de los gases a través del tejido mesófilo en experimentos de intercambio de CO₂/H₂O+contaminantes.

Trend Topics

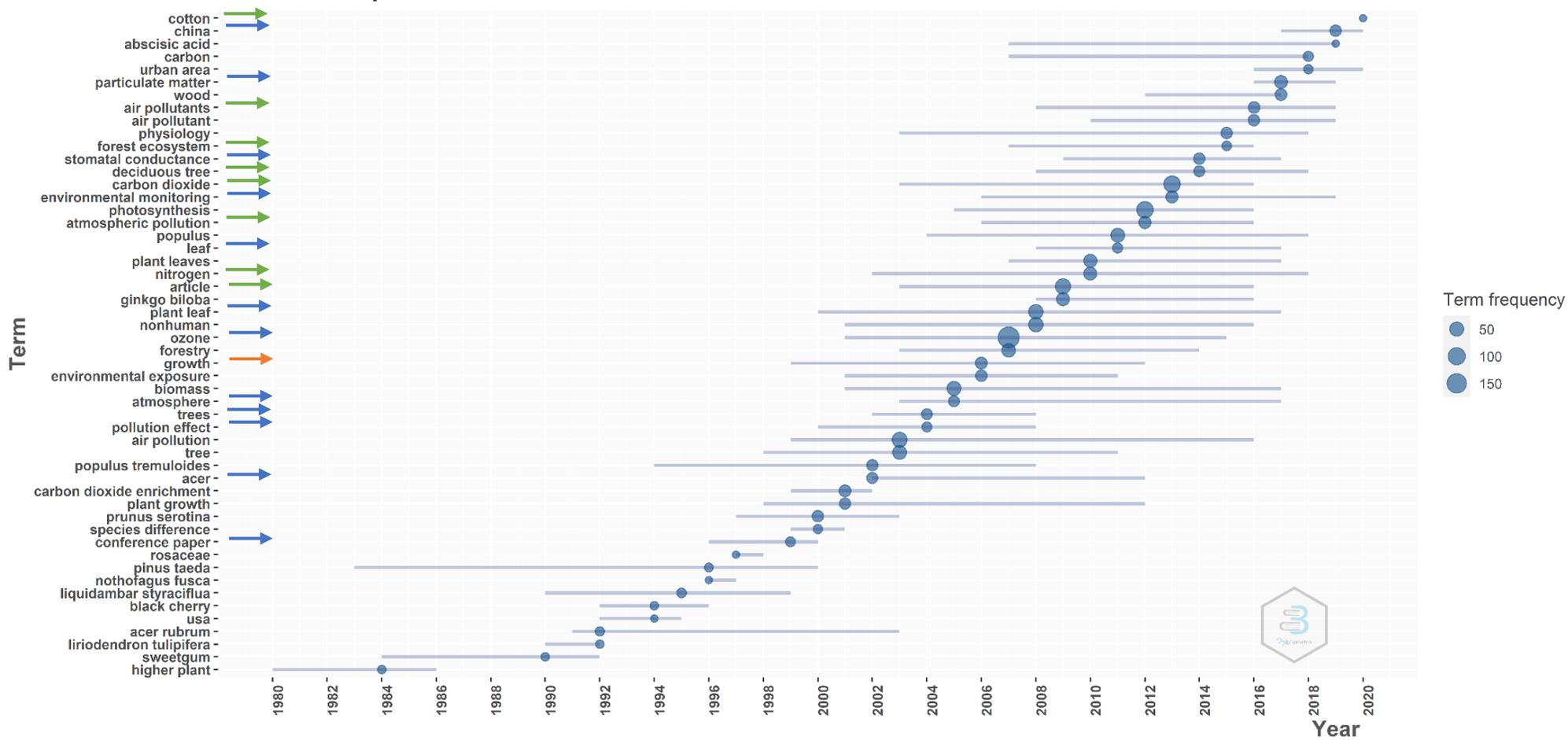


figura 37 Tendencia de los tópicos de estudio. Las tendencias de estudio surgieron a partir de 1980 a pesar de que los estudios comenzaron en 1972, lo anterior debido a la ausencia de publicaciones en los primeros años de desarrollo. Elaboración propia con ayuda de Bibliometrix ver. 3.1.

Lo más significativo del conocimiento teórico se sintetiza en los datos de las **figuras 35 y 36** (pág. 69 y 70). Con base en esas gráficas las tendencias de investigación para el uso de CExp se engloban en “*El estudio de las respuestas y los efectos de las especies arbóreas en su fotosíntesis, crecimiento y conductancia estomática frente a una exposición de ozono y dióxido de carbono en concentraciones elevadas, producido por el cambio climático*”. En ese sentido, se determinaron seis tendencias de investigación en materia de los vacíos de información identificados.

1) Daño estructural y cambios de crecimiento del árbol: Estudios enfocados a evaluar las respuestas bioquímicas y fisiológicas de los fotosistemas de los árboles, al ser sometidos a contaminantes preponderantes, concentraciones y tiempo de exposición. De lo anterior se interpretaron cuatro ejes teóricos:

- i) Respuestas de plantas modelo al estrés atmosférico, incluyendo contaminantes como O₃, SO_x y NO_x.
- ii) Búsqueda de genes que se expresan en el árbol expuesto a contaminantes.
- iii) Modelos de absorción de contaminantes a través de hojas (Captura de COVs y CO₂)
- iv) Rutas metabólicas de detoxificación (contaminación por SO₂).

Al respecto, los estudios realizados a especies nativas de la Ciudad de México han empleado las siguientes concentraciones y horarios de exposición a CO₂, SO₂ y O₃ (**cuadro 6**):

cuadro 6 *Mínimos y máximos de exposiciones de contaminación a especies nativas de la Ciudad de México, empleados en cámaras experimentales.* Generalmente, los experimentos con CExp exponen a los árboles a una concentración baja y un alta de contaminantes en un horario determinado, esta tabla condensa esta información extraída de las investigaciones en árboles nativos de la capital.

Mínimo de concentración baja (ppm)	Máximo de concentración baja (ppm)	Mínimo de concentración alta (ppm)	Máximo de concentración alta (ppm)	Horario
CO₂				
150	600	150	1200	24 HORAS
SO₂				
0.02	5	0.02	5	3-12 HORAS
O₃				
0.01	0.075	0.01	0.125	3-12 HORAS

Considerando los datos del **cuadro 2 (pág X)**, las mínimas de concentración alta y baja de dióxido de azufre se registran cercanas a la concentración ambiental máxima 24 horas, por otra parte, el máximo de concentración alta y baja sobrepasa aproximadamente 10 veces los registros reales de la capital y los máximos permisibles, por lo que respecto a las concentraciones de dióxido de azufre en cámara se recomienda una concentración baja de 0.01 ppm y una alta de <0.045 ppm, de ser posible, durante 24 horas.

De forma opuesta, las concentraciones altas y bajas de ozono coinciden tanto con la normatividad (NOM-020-SSA1-2021), como con las recomendaciones internacionales de límites permitidos, por lo que los estudios de ozono recopilados en este trabajo son replicables para la experimentación en la Ciudad de México, así mismo, los resultados de estas investigaciones pueden considerarse útiles en el análisis de resultados experimentales.

Hablando de las concentraciones de dióxido de carbono, dependiendo de los objetivos del investigador, pueden simularse condiciones al doble (800 ppm) o triple (1200 ppm) de concentración ambiental de CO₂ (aprox. 400 ppm) para estudiar cambios en transpiración, crecimiento, emisión de gases, entre otros. Esto considerando el cambio climático, el cual

implica una concentración de CO₂ atmosférico y una temperatura cada vez más elevada (Yadav et al., 2020). Con base en lo anterior, carece de sentido recomendar una concentración específica.

Respecto a la normatividad que establece los límites máximos permisibles de contaminantes del aire (cuadro 2, pág XX) Cabe mencionar dos situaciones, primero, que no se han generado informes anuales de la calidad del aire en la Ciudad de México posteriores al 2018 y segundo, que tanto el índice Aire y Salud (NOM-172-SEMARNAT-2019) como el índice de calidad del aire de la Ciudad de México (NADF-009-AIRE-2017) no consideran las actualizaciones de los valores límite en las NOM de salud ambiental, realizadas entre 2019 y 2021 (SEDEMA, 2022b).

Los motivos por los que ambos índices continúan empleando las normas sin actualización, siendo que estas permiten niveles de contaminación elevados en comparación con las regulaciones de la EPA y la Organización Mundial de la Salud (OMS) son desconocidos, cabría preguntarse el trasfondo de esto, no obstante, profundizar en el tema excede los objetivos de esta investigación.

2) Monitoreo de emisión e intercambio de gases: Principalmente estudios relacionados con CO₂ como la respiración oscura, balance de carbono, exudado, raíces y emisiones de COVsB.

3) Búsqueda de especies bioindicadores: Con base en la descripción y comparación de especies respecto su respuesta de crecimiento y/o daño foliar obtenidos de los ensayos en cámaras experimentales, relacionado principalmente al monitoreo de la contaminación del aire en ciudades muy pobladas.

Cabe mencionar que investigaciones recientes han demostrado que *Psidium guajava* es un árbol con potencial para ser empleado como bioindicador de niveles fitotóxicos de O₃ debido a sus síntomas visibles (Furlan et al., 2007; Nakazato et al., 2016).

4) Cambios en las respuestas fisiológicas con relación a la variación genotípica:

Discutido anteriormente con las investigaciones de *Populus sp.*, valdría la pena tener un control genético con los árboles plantados en áreas verdes de la ciudad.

5) Eficiencia en remoción de partículas del aire: Nada se ha investigado en especies nativas, el conocimiento existente se relaciona a especies distribuidas principalmente en Australia y Chile. De aquí podrían derivarse estudios para entender el flujo de partículas por combustión doméstica, urbana e incendios de las áreas verdes urbanas de la ciudad.

6) Evaluación de las cámaras experimentales: Los estudios de rendimiento y cambios de CExp prácticamente son nulos en la ciudad, la presente investigación es única en su tipo dentro de la línea investigativa, la evaluación **experimental** de las CExp como tecnología apropiada para el desarrollo de las cinco tendencias anteriores implicaría asegurar la calidad de investigación a nivel local o incluso nacional.

Años de investigación culminan en la necesidad de estudiar la productividad de especies y clones, analizar los riesgos y adecuar sistemas de protección de bosques y arbolado urbano, así como monitorear remotamente los niveles de contaminación y considerar los factores de interacción en la fase de experimentación. En este sentido, lo que se ha estudiado se enfoca a las condiciones locales de los investigadores, para la Ciudad de México, los vacíos investigativos identificados en el presente trabajo pueden contribuir a la fase experimental de futuras investigaciones. Estos vacíos se exponen en el siguiente apartado.

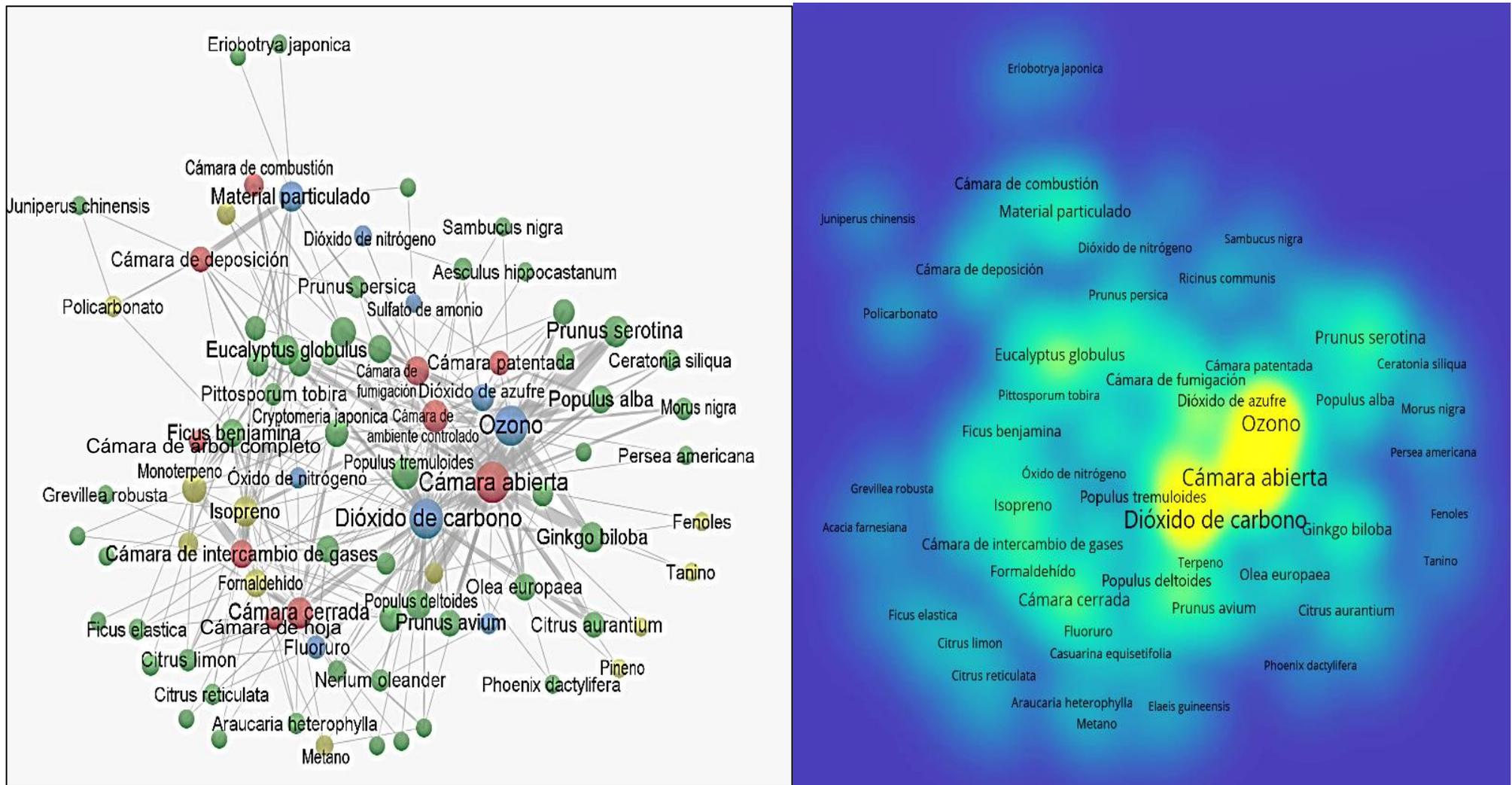


figura 38 Red Bibliométrica del uso de Cámara Experimentales en estudios de efectos de contaminación del aire en árboles urbanos plantados en la Ciudad de México. Elaboración propia con ayuda de VOSviewer 1.6.17. A la izquierda las anidaciones o cúmulos están vinculados con líneas color gris, representando la interacción de los elementos; *tipo de cámara-árbol-contaminante*. **Verde:** Especies arbóreas, **Azul:** Contaminantes del aire, **Rojo:** Cámaras experimentales, **Amarillo:** COVB. A la derecha, la red se vuelve de un tono más intenso proporcionalmente a la cantidad de estudios enfocados a los conceptos (densidad de estudios).

Nota: debido a que el programa no cuenta con fuente cursiva no es posible citar los nombres científicos de las especies correctamente.

IX CONCLUSIONES

I Cada sistema responde a la necesidad a priori del investigador, por lo que no hay criterio para la selección de una cámara o especie arbórea en específico, sin embargo, considerando las condiciones de la Ciudad de México, se propone emplear algunas cámaras bajo las siguientes circunstancias.

- **Cámaras abiertas**, son las más usadas con una frecuencia relativa del 53%, serían una gran opción para entender el impacto *in situ* de la dinámica atmosférica en bosques urbanos y arbolado de parques y camellones
- **Cámara de intercambio de gases**, usadas con una frecuencia relativa del 16%, su uso puede destinarse a la selección de plantas benéficas para remoción de COVs, así como identificar especies no aptas para zonas urbanas de mayor temperatura.
- **Cámaras de ambiente controlado**, usadas con una frecuencia relativa del 13%. Pueden emplearse en situaciones en las que las condiciones de campo o del investigador no permitan el uso de cámaras abiertas.
- **Cámara de hoja**, usadas con una frecuencia relativa del 2%. Pueden brindar un panorama más acertado en la interpretación de resultados obtenidos con otro tipo de CExp.
- **Cámara de árbol completo**, son las menos usadas con una frecuencia relativa del 1%, Pueden emplearse evaluar el crecimiento de árboles de grandes dimensiones en bosques y parques urbanos

II En investigaciones relacionadas a la gestión de arbolado urbano de la Ciudad de México, no se recomienda el uso de cámaras de deposición, combustión y fumigación.

III Se identificaron seis tendencias de investigación con el uso de cámaras experimentales: Daño estructural y cambios de crecimiento en el individuo, monitoreo de emisión e intercambio de gases, especies bioindicadoras, cambios en las respuestas fisiológicas y genotípicas, eficiencia en remoción de partículas del aire y la evaluación de las cámaras experimentales en sí.

IV Las CExp son empleadas principalmente en el estudio de los efectos de las especies arbóreas en su fotosíntesis, crecimiento y conductancia estomática.

V La principal tendencia de investigación es evaluar el efecto de ozono y dióxido de carbono en árboles empleando cámaras abiertas y de ambiente controlado.

VI *Populus sp.*, al ser un género muy estudiado internacionalmente, puede emplearse como grupo de control en la experimentación con uso de CExp.

VII *Psidium guajava* es un árbol con potencial para ser empleado como bioindicador de niveles fitotóxicos de O₃.

VIII Los vacíos investigativos identificados más relevantes se agrupan en tres ejes.

Vacíos investigativos orientados a las especies estudiadas con cámaras experimentales.

- Las especies introducidas deben estudiarse en comparación con especies nativas, no dar por sentado que las primeras deben erradicarse.
- Las variables clones, variantes genéticas, edades y sexo en árboles requieren mayor protagonismo en la investigación.
- Deben desarrollarse investigaciones comparativas de distintas especies.

Vacíos investigativos orientados a la simulación de ambientes.

- La disponibilidad de nutrientes en el suelo dentro de la cámara experimental debe ser equivalente a la de la zona de estudio
- La simulación de desarrollo de árboles debe considerar las corrientes de aire, humedad, cambios de temperatura y cambios de exposición a la luz solar o artificial.
- Los materiales de elaboración de las cámaras y la forma en que estos son ensamblados deben apuntar a la mínima alteración del ambiente simulado.
- Los efectos de contaminantes del aire deben ser evaluados en condiciones de estrés hídrico si se considera al cambio climático dentro de las variables experimentales.

Vacíos investigativos orientados a la interpretación de efectos de contaminación del aire en plantas.

- Las cámaras experimentales y el daño visible deben ser complementados con técnicas químico-analíticas para interpretación de resultados a niveles fisiológicos.

- Considerar más de un parámetro conduce a una aproximación más realista del fenómeno estudiado. P. ej, extracción de clorofila y cuantificación de ácido ascórbico.
- Los efectos reportados deben ser estandarizados, P.ej índice de tolerancia a la contaminación atmosférica (APTI).

IX En la ciudad de México es inexistente la experimentación con CExp, los estudios publicados, si bien son de especies plantadas en la capital, son desarrollados en el extranjero.

X A nivel nacional, existen estudios que emplean a las CExp, no obstante, ninguno relacionado al arbolado de la Ciudad de México.

XI Existe una notoria centralización de la investigación con CExp, lo cual genera un sesgo en el desarrollo de la teoría, razón de la necesidad de impulsar estos experimentos localmente.

XII Debido a la centralización de la investigación por países desarrollados, se han investigado más a los árboles de clima templado que los tropicales, siendo estos últimos ampliamente distribuidos en la Ciudad de México.

XIII El análisis bibliométrico es una herramienta útil en la construcción del estado del arte, los indicadores obtenidos permiten una visualización sintetizada de la teoría, por lo que se recomienda ampliamente emplear esta herramienta en la investigación documental.

REFERENCIAS

- Alario y Franco, M. Á. (2000). FOTOQUÍMICA DE LA ATMÓSFERA: AGUJERO DE OZONO. *Real Academia de Ciencias*.
- Anand, S. S., & Mehendale, H. M. (2005). Volatile Organic Compounds (VOC). En *Encyclopedia of Toxicology* (pp. 450–455). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369400-0/01015-2>
- Anand, S. S., Philip, B. K., & Mehendale, H. M. (2014). Volatile Organic Compounds. En *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition* (pp. 967–970). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00358-4>
- Aragón-Gastélum, J. L., Yáñez-Espinosa, L., Ramírez-Albores, J. E., González-Salvatierra, C., & Flores, J. (2021). Seasonal ecophysiological variations of *Echinocactus platyacanthus*, a specially protected cactus species: Effect of induced climate warming. *Global Ecology and Conservation*, 32, e01919. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01919>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Åström, F., Danell, R., Larsen, B., Schneider, J. W., & Schlemmer, B. (2009). *Celebrating Scholarly Communication Studies: A Festschrift for Olle Persson at his 60th Birthday*. <http://www.issi-society.info/ollepersson60/>
- Bakke, A. L. (1913). The effect of smoke and gases on vegetation. *Proceedings of the Iowa Academy of Science*, 20, 169–188.
- Barton, C. V. M., Ellsworth, D. S., Medlyn, B. E., Duursma, R. A., Tissue, D. T., Adams, M. A., Eamus, D., Conroy, J. P., McMurtrie, R. E., Parsby, J., & Linder, S. (2010). Whole-tree chambers for elevated atmospheric CO₂ experimentation and tree scale flux measurements in south-eastern Australia: The Hawkesbury Forest Experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7–8), 941–951. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.03.001>
- Baumgardner, D., Varela, S., Escobedo, F. J., Chacalo, A., & Ochoa, C. (2012). The role of a peri-urban forest on air quality improvement in the Mexico City megalopolis. *Environmental Pollution*, 163, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.016>
- Bell, J. N. B., Power, S. A., Jarraud, N., Agrawal, M., & Davies, C. (2011). The effects of air pollution on urban ecosystems and agriculture. *International Journal of Sustainable*

- Development and World Ecology*, 18(3), 226–235.
<https://doi.org/10.1080/13504509.2011.570803>
- Bennett, J. H., Hill, A. C., & Gates, D. M. (1973). A model for gaseous pollutant sorption by leaves. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 23(11), 957–962.
<https://doi.org/10.1080/00022470.1973.10469865>
- BRAVDO, B. -A. (1977). Oscillatory Transpiration and CO₂ Exchange of Citrus Leaves at the CO₂ Compensation Concentration. *Physiologia Plantarum*, 41(1), 36–41.
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1977.tb01518.x>
- Carrasquero C., E. E., Martínez C., J. A., & Sánchez M., O. T. (2016). *EL ESTADO DEL ARTE O EL ESTADO DE LA CUESTIÓN: TRÁS LA HUELLA DE PROMETEO*.
<https://www.researchgate.net/publication/307601342>
- Cedrón, J., Landa V., & Robles J. (2011). 6.1. *La atmósfera de la tierra y la calidad del agua*. Química General. <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/61-la-atmosfera-de-la-tierra-y-la-calidad-del-agua.html>
- Centre Daily Times. (2019, marzo 26). *John Skelly Obituary (1940 - 2019) - Broadway, VA - Centre Daily Times*. <https://www.legacy.com/us/obituaries/centredaily/name/john-skelly-obituary?id=12676808>
- Cerededa-Balic, F., Toledo, M., Vidal, V., Guerrero, F., Diaz-Robles, L. A., Petit-Breuilh, X., & Lapuerta, M. (2017). Emission factors for PM_{2.5}, CO, CO₂, NO_x, SO₂ and particle size distributions from the combustion of wood species using a new controlled combustion chamber 3CE. *Science of the Total Environment*, 584–585, 901–910.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.136>
- Cerón, R. M., Cerón, J. G., Guerra, J. J., López, E., Endañu, E., Ramírez, M., García, M., Sánchez, R., & Mendoza, S. (2009). Effects of simulated acid rain on tropical trees of the coastal zone of Campeche, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 126, 259–270. <https://doi.org/10.2495/CP090231>
- Cerón-Bretón, J. G., Cerón-Bretón, R. M., Guerra-Santos, J. J., Aguilar-Ucán, C., Montalvo-Romero, C., Guzmán-Pacheco, J. J., Peña-Villarino, & Carballo-Pat, C. G. (2012). Changes on foliar nutrients, proteins and photosynthetic pigments due to controlled exposures to sulfur dioxide in *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* and *Conocarpus erectus* individuals. *INTERNATIONAL JOURNAL of ENERGY and ENVIRONMENT*, 6(5).
- Cerón-Bretón, J. G., Cerón-Bretón, R. M., Rangel-Marrón, M. M., Vargas Caliz, C. C., Aguilar-Bencomo, L. G., & Muriel-García, M. (2010). Effects of simulated tropospheric ozone on foliar nutrients levels (Ca²⁺, Mn²⁺, Mg²⁺ and K⁺) of three woody species of high commercial value typical from campeche, México. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 6(11), 731–743.

- Ceulemans, R., Jiang, X. N., & Shao, B. Y. (1995). Growth and physiology of one-year old poplar (*Populus*) under elevated atmospheric CO₂ levels. *Annals of Botany*, 75(6), 609–617. <https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1066>
- Chappelka, A., Skelly, J., Somers, G., Renfro, J., & Hildebrand, E. (1999). Mature black cherry used as a bioindicator of ozone injury. *Water, Air, and Soil Pollution*, 116(1–2), 261–266. <https://doi.org/10.1023/A:1005260422738>
- Chávez H., B. (2022). *Simulación de daño por ozono y dióxido de azufre en Fraxinus uhdei (Wenz.) Lingelsh y Pinus greggii Englem.* Universidad Nacional Autónoma de México | Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
- Chávez, H. D. (2006). *Historia Universal, Moderna y Contemporánea II Unidad I: Surgimiento del imperialismo capitalista y su expansión en el mundo (1873-1914).* <https://portalacademico.cch.unam.mx/repositorio-de-sitios/historico-social/historia-universal-2/HUMCII/HUI-Segunda.htm>
- Chen, C. (2006). CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 57(3), 359–377. <https://doi.org/10.1002/asi.20317>
- Chen, J., Yu, X., Bi, H., & Fu, Y. (2017). Indoor simulations reveal differences among plant species in capturing particulate matter. *PLoS ONE*, 12(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177539>
- Chen, S. G., Impens, I., & Ceulemans, R. (1997). Modelling the effects of elevated atmospheric CO₂ on crown development, light interception and photosynthesis of poplar in open top chambers. *Global Change Biology*, 3(2), 97–106. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1997.00052.x>
- Cho, M.-C., Jo, Y.-G., Son, J. A., Kim, I., Oh, C., & Yook, S.-J. (2021). Deposition characteristics of soot and tire-wear particles on urban tree leaves. *Journal of Aerosol Science*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105768>
- Chung, C.-Y., Chung, P.-L., Liao, S.-W., & Lai, W.-L. (2014). Study on the tolerance of common tree species to nitrogen dioxide. *Applied Mechanics and Materials*, 448–453, 960–963. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.448-453.960>
- Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2012). SciMAT: A new science mapping analysis software tool. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 63(8), 1609–1630. <https://doi.org/10.1002/asi.22688>
- Codina, L. (2017). *INVESTIGACIÓN CON BASES DE DATOS Estructura y Funciones de las Bases de Datos Académicas Análisis de Componentes y Estudio de Caso.* Universitat Pompeu Fabra. https://repositori.upf.edu/bitstream/handle/10230/28135/Codina_2017_estrucbd.pdf

- CONABIO. (2012a). *Guía de campo; Árboles comunes de la Ciudad de México*. https://www.biodiversidad.gob.mx/Difusion/cienciaCiudadana/urbanos/pdf/GuiaArboles_v3.pdf
- CONABIO. (2012b). *Malezas de México*. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/home-malezas-mexico.htm>
- CONABIO. (2021). *Una comunidad para naturalistas*. *Naturalista*. <https://www.naturalista.mx/>
- Davis, D. D., & Skelly, J. M. (1992). Foliar sensitivity of eight eastern hardwood tree species to ozone. *Water, Air, & Soil Pollution*, 62(3–4), 269–277. <https://doi.org/10.1007/BF00480261>
- de Bauer, M. de L., & Hernández-Tejeda, T. (2007). A review of ozone-induced effects on the forests of central Mexico. *Environmental Pollution*, 147(3), 446–453. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.12.020>
- Dervis, H. (2019). Bibliometric analysis using bibliometrix an R package. *Journal of Scientometric Research*, 8(3), 156–160. <https://doi.org/10.5530/JSCIRES.8.3.32>
- Dochinger, L. S., Townsend, A. M., Seegrift, D. W., & Bender, F. W. (1972). Responses of hybrid poplar trees to sulfur dioxide fumigation. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 22(5), 369–371. <https://doi.org/10.1080/00022470.1972.10469649>
- Emberson, L. D., Ashmore, M. R., Murray, F., Kuylenstierna, J. C. I., Percy, K. E., Izuta, T., Zheng, Y., Shimizu, H., Sheu, B. H., Lius, C. P., Agrawal, M., Wahid, A., Abdel-Latif, N. M., Tienhoven, M. van., Bauer, L. I., & Domingos, M. (2001). Impacts of air pollution on vegetation in developing countries. *Water, Air, and Soil Pollution*, 130, 107–118. <https://doi.org/10.1023/A:1012251503358>
- Fenn, M. E., de Bauer, L. I., Quevedo-Nolasco, A., & Rodríguez-Frausto, C. (1999). Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the Valley of Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 113(1/4), 155–174. <https://doi.org/10.1023/A:1005033008277>
- Forsberg, B., Hänninen, O., & Krzyzanowski, M. (2008). *Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution The 2nd International Electronic Conference on Environmental Health Sciences View project Pathways towards the National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) in India View project*. www.euro.who.int
- Furlan, C. M., Moraes, R. M., Bulbovas, P., Domingos, M., Salatino, A., & Sanz, M. J. (2007). Psidium guajava “Paluma” (the guava plant) as a new bio-indicator of ozone in the tropics. *Environmental Pollution*, 147(3), 691–695. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.09.014>
- García-Sánchez, I. E., Barradas, V. L., Ponce de León Hill, C. A., Esperón-Rodríguez, M., Rosas Pérez, I., & Ballinas, M. (2019). Effect of heavy metals and environmental variables on the assimilation of CO₂ and stomatal conductance of *Ligustrum lucidum*,

- an urban tree from Mexico City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 42, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.05.002>
- Ghosh, S., Skelly, J. M., Innes, J. L., & Skelly, L. (1998). Temporal development of visual ozone injury on the foliage of *Prunus serotina* - A statistical evaluation. *Environmental Pollution*, 102(2–3), 287–300. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(98\)00057-8](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(98)00057-8)
- Gobierno de la Ciudad de México. (2018). *NADF-006-RNAT-2016*.
- Gómez Vargas, M., Galeano Higueta, C., & Jaramillo Muñoz, A. (2015). EL ESTADO DEL ARTE: UNA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN THE STATE OF THE ART: A RESEARCH METHODOLOGY. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, 6(2), 423–442.
- González, S. N. (1994). *Tecnologías apropiadas: su vinculación con el medio ambiente y una estrategia de desarrollo* [Universidad Nacional Autónoma de México]. https://doi.org/http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TES01000202704
- Granados Sánchez, D., López Ríos, G. F., & Hernández García, M. Á. (2010). LA LLUVIA ÁCIDA Y LOS ECOSISTEMAS FORESTALES. *REVISTA CHAPINGO SERIE CIENCIAS FORESTALES Y DEL AMBIENTE*, XVI (2), 187–206. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.022>
- Granda Orive, J. I. de, García Río, F., & Callol Sánchez, L. (2003). Importancia de las palabras clave en las búsquedas bibliográficas. *Revista Española de Salud Pública*, 77(6), 765–767. <https://doi.org/10.1590/s1135-57272003000600010>
- Granda Orive, J. I., García Río, F., Roig Vázquez, F., Escobar Sacristán, J., Gutiérrez Jiménez, T., & Callol Sánchez, L. (2005). Las palabras clave como herramientas imprescindibles en las búsquedas bibliográficas. Análisis de las áreas del sistema respiratorio a través de Archivos de Bronconeumología. *Archivos de Bronconeumología*, 41(2), 78–83. <https://doi.org/10.1157/13070803>
- Guerrero, F., Yáñez, K., Vidal, V., & Cereceda-Balic, F. (2019). Effects of wood moisture on emission factors for PM2.5, particle numbers and particulate-phase PAHs from *Eucalyptus globulus* combustion using a controlled combustion chamber for emissions. *Science of the Total Environment*, 648, 737–744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.057>
- Guevara Patiño, R. (2016). El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? *Folios*, 1(44), 165–179. <https://doi.org/10.17227/01234870.44folios165.179>
- Heagle, A. S., Body, D. E., & Heck, W. W. (1973). An Open-Top Field Chamber to Assess the Impact of Air Pollution on Plants. *Journal of Environmental Quality*, 2(3), 365–368. <https://doi.org/10.2134/jeq1973.00472425000200030014x>

- Herrejón G., M. de los Á. (2018). *Registro de remoción de contaminantes atmosféricos a partir de las especies arbóreas en bosques urbanos de Chapultepec, San Juan de Aragón y Tlalpan* [Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/JP74BXXBJPI9VXGRS36YSF2PI58AJE5QJILETFKAFHCB5I8VQNT-00564?func=full-set-set&set_number=183966&set_entry=000001&format=999
- Hill, A. C. (1967). A special purpose plant environmental chamber for air pollution studies. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 17(11), 743–748. <https://doi.org/10.1080/00022470.1967.10469066>
- Huergo-Tobar, P. L. (2015). *Importancia y pasos para la elaboración del estado del arte en un anteproyecto o proyecto de investigación (CW)*. <https://doi.org/10.16925/greylit.1073>
- Hughes, N. L. (1934). Some effects of sulphur dioxide on coniferous trees. En *The University of British Columbia*. <https://doi.org/10.1017/S0024282975000163>
- INECC-PNUD. (2018). *Diagnóstico del estado del arte de la química atmosférica en México con relación a los gases de efecto invernadero y los contaminantes climáticos*.
- INECC-SEMARNAT. (2017). *Análisis del estado del arte sobre el depósito atmosférico en México y su relación con el cambio climático: Vol. INECC/RPAI*.
- Jacob, D. J. (1999). CHAPTER 13. ACID RAIN. En *INTRODUCTION TO ATMOSPHERIC CHEMISTRY* (pp. 247–255). Princeton University Press.
- Jaimes P., M., Rivera H., O., Reséndiz M., C., Retama, A., Amador, O., & Gaona D., R. (2020). *INFORME ANUAL CALIDAD DEL AIRE 2018 CIUDAD DE MÉXICO*. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2018.pdf>
- Javanmard, Z., Kouchaksaraei, M. T., Hosseini, S. M., & Pandey, A. K. (2020). Assessment of anticipated performance index of some deciduous plant species under dust air pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(31), 38987–38994. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09957-w>
- Karnosky, D. F. (1976). Threshold levels for foliar injury to *Populus tremuloides* by sulfur dioxide and ozone. *Canadian Journal of Forest Research*, 6(2), 166–169. <https://doi.org/10.1139/x76-021>
- Karnosky, D. F., Gagnon, Z. E., Dickson, R. E., Coleman, M. D., Lee, E. H., & Isebrands, J. G. (1996). Changes in growth, leaf abscission, and biomass associated with seasonal tropospheric ozone exposures of *Populus tremuloides* clones and seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(1), 23–37. <https://doi.org/10.1139/x26-003>

- Karnosky, D. F., Gagnon, Z. E., Reed, D. D., & Witter, J. A. (1992a). Effects of genotype on the response of *Populus tremuloides* michx. To ozone and nitrogen deposition. *Water, Air, & Soil Pollution*, 62(3–4), 189–199. <https://doi.org/10.1007/BF00480254>
- Karnosky, D. F., Gagnon, Z. E., Reed, D. D., & Witter, J. A. (1992b). Growth and biomass allocation of symptomatic and asymptomatic *Populus tremuloides* clones in response to seasonal ozone exposures. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(11), 1785–1788. <https://doi.org/10.1139/x92-233>
- Karnosky, D. F., Skelly, J. M., Percy, K. E., & Chappelka, A. H. (2007). Perspectives regarding 50 years of research on effects of tropospheric ozone air pollution on US forests. *Environmental Pollution*, 147(3), 489–506. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.08.043>
- Kim, K. J., Jeong, M. I., Lee, D. W., Song, J. S., Kim, H. D., Yoo, E. H., Jeong, S. J., Han, S. W., Kays, S. J., Lim, Y.-W., & Kim, H.-H. (2010). Variation in formaldehyde removal efficiency among indoor plant species. *HortScience*, 45(10), 1489–1495. <https://doi.org/10.21273/hortsci.45.10.1489>
- King, J. S., Percy, K. E., & Matyssek, R. (2010). Dedication to Dr. David F. Karnosky. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 158(4), 953–954. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.11.018>
- Kolb, T. E., Fredericksen, T. S., Steiner, K. C., & Skelly, J. M. (1997). Issues in scaling tree size and age responses to ozone: A review. *Environmental Pollution*, 98(2), 195–208. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00132-2](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00132-2)
- Kulmala, L. (2018). *How to measure photosynthesis? | Carbon Tree*. Universidad de Helsinki | Departamento de Ciencias Forestales. <http://hiilipuu.fi/articles/how-measure-photosynthesis>
- Kwon, K.-J., Urrintuya, O., Kim, S.-Y., Yang, J.-C., Sung, J.-W., & Park, B.-J. (2020). Removal potential of particulate matter of 12 woody plant species for landscape planting. *Journal of People, Plants, and Environment*, 23(6), 647–654. <https://doi.org/10.11628/ksppe.2020.23.6.647>
- Lee, J., Kang, H., Sin, H., Yoon, J., & Choi, S. (2015). Effect of removing indoor HCHO by several Korean foliage plants. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(26). <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i26/80458>
- Londoño P., O. L., Maldonado G., L. F., & Calderón V. Liccy C. (2016). *GUÍA PARA CONSTRUIR ESTADOS DEL ARTE* (1a ed.). International Corporation of Network of Knowledge, ICONK.
- Long, S. P., Postl, W. F., & Bolhár-Nordenkampf, H. R. (1993). Quantum yields for uptake of carbon dioxide in C3 vascular plants of contrasting habitats and taxonomic groupings. *Planta*, 189(2), 226–234. <https://doi.org/10.1007/BF00195081>

- Mahecha M., M. T. (2019). *Análisis bibliométrico R: Bibliometrix*.
- Marion, G., Henry, G., Freckman, D., Johnstone, J., Jones, G., Jones, M., Lévesque, E., Molau, U., Molgaard, P., Parsons, A., Svoboda, J., & Virginia, R. (1997). Open-top designs for manipulating field temperature in high-latitude ecosystems. *Global Change Biology*, 3, 20–32. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1997>
- Martínez-Adriano, C. A., Jurado, E., Flores, J., Estrada-Castillón, E., & González-Rodríguez, H. (2021). Effect of induced warming on seedling emergence of Tamaulipan thornscrub at northeastern Mexico. *Flora*, 285, 151965. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151965>
- Maslin, M. (2008). *Global Warming: A Very Short Introduction* (2a ed., Vol. 1). Oxford.
- Moraes, R. M., Furlan, C. M., Bulbovas, P., Domingos, M., Meirelles, S. T., Salatino, A., Delitti, W. B. C., & Sanz, M. J. (2004). Photosynthetic responses of tropical trees to short-term exposure to ozone. *Photosynthetica*, 42(2), 291–293. <https://doi.org/10.1023/B:PHOT.0000040602.20847.c6>
- Morel, M., & Buitrago, L. (2018). El estado del arte / estado de la técnica y la investigación científica y tecnológica. *Portal de La Ciencia*, 11–16. <https://doi.org/10.5377/pc.v13i0.5917>
- Mosley, S. (2014). Environmental History of Air Pollution and Protection. En M. Agnoletti & S. Neri (Eds.), *The Basic Environmental History* (Vol. 4, pp. 143–169). Springer. <http://www.springer.com/series/10168>
- Mugica-Álvarez, V., Hernández-Rosas, F., Magaña-Reyes, M., Herrera-Murillo, J., Santiago-De La Rosa, N., Gutiérrez-Arzaluz, M., de Jesús Figueroa-Lara, J., & González-Cardoso, G. (2018). Sugarcane burning emissions: Characterization and emission factors. *Atmospheric Environment*, 193, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.013>
- Muñoz, V. (2008). *Efecto de las emisiones de gases al medioambiente*. Revista Electro Industria. [http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=876#:~:text=El%2520contaminante%2520m%25C3%25A1s%2520representativo%2520de%2520las%2520emisiones%2520de,las%2520part%25C3%25ADculas%2520suspendidas%2520totales%2520\(7%25\).%2520Contaminaci%25C3%25B3n%2520](http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=876#:~:text=El%2520contaminante%2520m%25C3%25A1s%2520representativo%2520de%2520las%2520emisiones%2520de,las%2520part%25C3%25ADculas%2520suspendidas%2520totales%2520(7%25).%2520Contaminaci%25C3%25B3n%2520)
- Nakazato, R. K., Rinaldi, M. C. S., & Domingos, M. (2016). Tropical trees: Are they good alternatives for biomonitoring the atmospheric level of potential toxic elements near to the Brazilian Atlantic Rainforest? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 134, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.08.013>

- Olowoyo, J. O., & Lion, G. N. (2016). Urban farming as a possible source of trace metals in human diets. En *South African Journal of Science* (Vol. 112, Issues 1–2). Academy of Science of South Africa. <https://doi.org/10.17159/sajs.2016/20140444>
- Pandey, P., & Yadav, R. (2018). A Review on Volatile Organic Compounds (VOCs) as Environmental Pollutants: Fate and Distribution. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PLANT AND ENVIRONMENT*, 4(02), 14–26. <https://doi.org/10.18811/ijpen.v4i02.2>
- Pérez, F. J. (2011). *Estado del arte o estado de la cuestión: Del proyecto a la tesis* (1a ed.). Universidad de La Guajira.
- Pérez-Noyola, F. J., Flores, J., Yáñez-Espinosa, L., Bautista-Redonda, F. E., & Badano, E. I. (2020). Effect of induced warming on survival and growth of *Tillandsia recurvata* seedlings: A two-year experiment. *Journal of Arid Environments*, 179, 104177. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104177>
- Pérez-Ruiz, C. L., Badano, E. I., Rodas-Ortiz, J. P., Delgado-Sánchez, P., Flores, J., Douterlungne, D., & Flores-Cano, J. A. (2018). Climate change in forest ecosystems: A field experiment addressing the effects of raising temperature and reduced rainfall on early life cycle stages of oaks. *Acta Oecologica*, 92, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2018.08.006>
- PNUMA. (2022). *Control aduanero de sustancias que agotan la capa de ozono la capa de ozono y las sustancias que agotan la capa de ozono*. <http://www.pnuma.org/ozono/curso/pdf/m1.pdf>
- Pons, T. L., & Welschen, R. A. M. (2002). Overestimation of respiration rates in commercially available clamp-on leaf chambers. Complications with measurement of net photosynthesis. *Plant, Cell and Environment*, 25(10), 1367–1372. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00911.x>
- Ram, S. S., Majumder, S., Chaudhuri, P., Chanda, S., Santra, S. C., Chakraborty, A., & Sudarshan, M. (2015). A review on air pollution monitoring and management using plants with special reference to foliar dust adsorption and physiological stress responses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(23), 2489–2522. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1046775>
- Rivera, C., Sánchez, F., & Andrade, M. (2016). *Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana del Valle de México y sus efectos en la salud*. 160. <http://dccc.cua.uam.mx/archivos/Madic/terminal/ContaminacionAtmosfericaZMVM.pdf>
- Rivera G., P., & Riquelme A., G. M. L. (2009). *Plantear y desarrollar proyectos de investigación. Una propuesta metodológica* (1a ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.

- Rivera Hernández, J. E. (2016). *La biodiversidad en la Ciudad de México*. https://www.academia.edu/31066492/Flora_y_Vegetaci%C3%B3n_en_la_Ciudad_de_M%C3%A9xico_Conabio?msclkid=1d8b1ed2b0b611ec98ee3d062ee47251
- Rodríguez Sánchez, L. M., & Cohen Fernández, E. J. (2003). *Guía de árboles y arbustos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México* (p. 383).
- Rogers, H. H., Bingham, G. E., & Cure, J. D. (1983). Responses of selected plant species to elevated carbon dioxide in the field. *Journal of Environmental Quality*, 12(4), 569–574. <https://doi.org/10.2134/jeq1983.00472425001200040028x>
- Rogers, H. H., Thomas, J. F., & Bingham, G. E. (1983). Response of agronomic and forest species to elevated atmospheric carbon dioxide. *Science*, 220(4595), 428–429. <https://doi.org/10.1126/science.220.4595.428>
- Sánchez-Salinas, E., Ortiz H., Ma. L., & Castrejón G., M. L. (2014). *CONTAMINACIÓN URBANA DEL AIRE Aspectos físicoquímicos, microbiológicos y sociales*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Santiago-De La Rosa, N., González-Cardoso, G., Figueroa-Lara, J. de J., Gutiérrez-Arzaluz, M., Octaviano-Villasana, C., Ramírez-Hernández, I. F., & Mugica-Álvarez, V. (2018). Emission factors of atmospheric and climatic pollutants from crop residues burning. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(8), 849–865. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1459326>
- Santiago-De la Rosa, N., Mugica-Álvarez, V., Cereceda-Balic, F., Guerrero, F., Yáñez, K., & Lapuerta, M. (2017). Emission factors from different burning stages of agriculture wastes in Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(31), 24297–24310. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0049-4>
- Saxena, P., Sonwani, S., & Kulshrestha, U. (2017). Impact of tropospheric ozone and particulate matter on plant health. En D. Pandey & Sarkar A (Eds.), *Sustaining Future Food Security* (1a ed., pp. 19–60). Nova Science Publisher Inc. <https://www.researchgate.net/publication/318584744>
- Sci2. (2009). *Sci2 Tool: A Tool for Science of Science Research and Practice*. <https://sci2.cns.iu.edu/user/index.php>
- SEDEMA. (2022a). *Lluvia ácida*. Dirección General de Monitoreo Atmosférico. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27Y6BhnmKkaA==%27>
- SEDEMA. (2022b). *Normatividad | Calidad del aire*. Dirección de Monitoreo Atmosférico. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27Yw==>
- SEMARNAT. (2019). *INFORME DE LA SITUACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE EN MÉXICO 2018*.

- SEMARNAT. (2021, marzo 11). *Servicios ambientales o ecosistémicos, esenciales para la vida* | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | gob.mx. <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/servicios-ambientales-o-ecosistemicos-esenciales-para-la-vida?idiom=es&mssckid=ebb574f4b0ae11ecb23abb9fb7cb63ce>
- Setterstrom, C., & Zimmerman, P. W. (1939). Factors influencing susceptibility of plants to sulfur dioxide injury. I. [*Fagopyrum esculentum* Moench]. *Contrib. Boyce Thompson Inst.; (United States)*, 10:2.
- Sharwood, R. E., Crous, K. Y., Whitney, S. M., Ellsworth, D. S., & Ghannoum, O. (2017). Linking photosynthesis and leaf N allocation under future elevated CO₂ and climate warming in *Eucalyptus globulus*. *Journal of Experimental Botany*, 68(5), 1157–1167. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw484>
- Sheng, Q., & Zhu, Z. (2019). Effects of nitrogen dioxide on biochemical responses in 41 garden plants. *Plants*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/plants8020045>
- Sheppard, C. S., & Stanley, M. C. (2014). Does elevated temperature and doubled CO₂ increase growth of three potentially invasive plants? *Invasive Plant Science and Management*, 7(2), 237–246. <https://doi.org/10.1614/IPSM-D-13-00038.1>
- Simini, M., Skelly, J. M., Davis, D. D., Savage, J. E., & Comrie, A. C. (1992). Sensitivity of four hardwood species to ambient ozone in north central Pennsylvania. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(11), 1789–1799. <https://doi.org/10.1139/x92-234>
- Sivaramanan, S. (2015). *ACID RAIN, CAUSES, EFFECTS AND CONTROL STRATEGIES*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1321.4240/1>
- Skelly, J. M., Davis, D. D., Merrill, W., Cameron, E. A., Brown, H. D., Drummond, D. B., Dochinger, L. S., Alexander, S. A., Bergdahl, D. R., Chevone, B. I., Gotlieb, A. R., Hain, F. P., Hedden, R. L., Hibben, C. R., Houston, D. R., Kress, L. W., Laurence, J. A., Lewis, R., Mistretta, P. A., ... Wargo, P. M. (1987). Diagnosing injury to eastern forest trees. En *Washington, DC: The Pennsylvania State University, for the USDA Forest Service*. 122 p.
- Solís A., S. (2021). *Daño en acículas de Pinus greggii Englem. por exposición a ozono en cámaras experimentales acopladas a sensores Arduino* [Universidad Nacional Autónoma de México | Facultad de Estudios Zaragoza | Instituto de Ecología]. https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/4S5QLD99L2GSALCUEM3NACRDITDFES7T84921XMXMSXGY8SH1K-55196?func=full-set-set&set_number=673970&set_entry=000001&format=999
- Soto Coloballes, N. V. (2010). *Medio siglo de monitoreo de la contaminación atmosférica en la ciudad de México 1960-2009. Aspectos científicos y sociales*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Stapleton, E., & Ruiz-Rudolph, P. (2018). The potential for indoor ultrafine particle reduction using vegetation under laboratory conditions. *Indoor and Built Environment*, 27(1), 70–83. <https://doi.org/10.1177/1420326X16668388>
- Stokes, N. J., Lucas, P. W., & Nicholas Hewitt, C. (1993). Controlled environment fumigation chambers for the study of reactive air pollutant effects on plants. *Atmospheric Environment Part A, General Topics*, 27(5), 679–683. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90186-3](https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90186-3)
- Takahashi, M., & Morikawa, H. (2014). Nitrogen dioxide is a positive regulator of plant growth. *Plant Signaling and Behavior*, 9(FEB). <https://doi.org/10.4161/psb.28033>
- Tejeda, T. H., & de Pascual Pola, C. N. (1996). Effects of oxidant air pollution on *Pinus maximartinezii* Rzedowski in the México City region. *Environmental Pollution*, 92(1), 79–83. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)00080-1](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)00080-1)
- TSCHAPLINSKI, T. J., STEWART, D. B., & NORBY, R. J. (1995). Interactions between drought and elevated CO₂ on osmotic adjustment and solute concentrations of tree seedlings. *New Phytologist*, 131(2), 169–177. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb05718.x>
- University of Western Sydney. (2016). *Whole Tree Chambers*.
- Urbina, A., & Morel, M. (2017). El estado del arte / estado de la técnica y la Investigación Científica y Tecnológica. *Portal de La Ciencia*, 13.
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2014). CitNetExplorer: A new software tool for analyzing and visualizing citation networks. *Journal of Informetrics*, 8(4), 802–823. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2014.07.006>
- VantagePoint. (2022). *Text Analytics Software from Search Technology - The VantagePoint*. <https://www.thevantagepoint.com/>
- Vásquez, isabel. (2016). Tipos de estudio y métodos de investigación. *Gestiopolis*, 1–12. <https://nodo.ugto.mx/wp-content/uploads/2016/05/Tipos-de-estudio-y-métodos-de-investigación.pdf>
- Wells, A. E. (1915). Fumigation experiments to determine the effect of highly diluted sulphur dioxide on a growing grain crop. *Report of the Selby Smelter Commission*, 1(1), 213–219.
- Welshofer, K. B., Zarnetske, P. L., Lany, N. K., & Thompson, L. A. E. (2018). Open-top chambers for temperature manipulation in taller-stature plant communities. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(2), 254–259. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12863>

- Wilkinson, M. J., Monson, R. K., Trahan, N., Lee, S., Brown, E., Jackson, R. B., Polley, H. W., Fay, P. A., & Fall, R. (2009). Leaf isoprene emission rate as a function of atmospheric CO₂ concentration. *Global Change Biology*, *15*(5), 1189–1200. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01803.x>
- Wyche, K. P., Ryan, A. C., Hewitt, C. N., Alfarrá, M. R., McFiggans, G., Carr, T., Monks, P. S., Smallbone, K. L., Capes, G., Hamilton, J. F., Pugh, T. A. M., & MacKenzie, A. R. (2014). Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent photochemical production of secondary organic aerosol in mesocosm studies of temperate and tropical plant species. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *14*(23), 12781–12801. <https://doi.org/10.5194/acp-14-12781-2014>
- Yadav, S. K., Singh, H., Nautiyal, R., Ginwal, H. S., Ansari, S. A., & Barthwal, S. (2020). Modulation of Morpho-Physiological Responses in *Populus deltoides* by Elevated Carbon Dioxide and Temperature. *Forest Science*, *66*(1), 105–118. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxz048>
- Zambrano, A., Nash, T. H., & Gries, C. (1999). Physiological Effects of the Mexico City Atmosphere on Lichen Transplants on Oaks. *Journal of Environmental Quality*, *28*(5), 1548–1555. <https://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800050020x>
- Zimmerman, P. W., & Crocker, W. (1931). Sulphur Dioxide Injury to Plants. *Proceedings of the American Society for Horticulture*.
- Zou, L. Y., Zhang, W., & Atkiston, S. (2003). The characterisation of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from burning of different firewood species in Australia. *Environmental Pollution*, *124*(2), 283–289. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00460-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00460-8)
- Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, *18*(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>