

**Evaluación de *Chlorophytum comosum*
como bioindicador y fitorremediador de la
contaminación atmosférica presente en los
espacios interiores de la Universidad de
Pamplona, en Pamplona Norte de
Santander, Colombia**

Pablo Fabián García Martínez

Universidad de Pamplona
Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología
Pamplona, Colombia
2017

**Evaluación de *Chlorophytum comosum*
como bioindicador y fitorremediador de la
contaminación atmosférica presente en los
espacios interiores de la Universidad de
Pamplona, en Pamplona Norte de
Santander, Colombia**

Pablo Fabián García Martínez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Biólogo

Director

Alfonso Quijano Parra, PhD

Codirector

Martha Griselda Flórez Rangel, PhD

Grupo de Investigación

Grupo de Investigación en Química

Universidad de Pamplona

Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología

Pamplona, Colombia

2017

A mi abuela Araceli Max viuda de Martínez

*“Educarse es la única manera de
cambiar tu vida”*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a mis profesores Alfonso Quijano Parra y Martha Griselda Flórez Rangel por brindarme su conocimientos y apoyo incondicional para la realización de mi investigación. También quiero agradecer al personal del laboratorio de control de calidad quienes contribuyeron en este trabajo, mi gratitud a Yolanda por enseñarme el uso del equipo de serie AA-7000 de Espectrofotómetros de Absorción Atómica.

Agradezco a Francisco Contreras por los comentarios a este documento y al profesor Stanislaw Gawronski por sus palabras acerca de la fitorremediación del aire como disciplina científica.

A Diana Balta por su apoyo y comprensión.

A la Universidad de Pamplona, especialmente a la Facultad de Ciencias Básicas por mi formación académica.

Por último, pero el más importante agradecimiento a mi madre Carmen Martínez, mi tía Mari luz Martínez y mi tío Joaquín Martínez quienes ha contribuido integralmente para que esto sea posible.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	19
LISTA DE FIGURAS	20
ABREVIATURAS	22
RESUMEN.....	23
ABSTRACT	24
INTRODUCCIÓN.....	13
1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
1.1 Planteamiento del problema y justificación.....	16
1.2 Hipótesis de Trabajo	18
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
2 MARCO TEÓRICO	19
2.1 La contaminación del aire en espacios interiores	19
2.2 Material Particulado.....	20
2.3 La Biorremediación	22
2.3.1 La Fitorremediación	22
2.3.2 Fitorremediación del aire.....	23
2.4 La planta	27
2.4.1 Fitorremediación por <i>Chlorophytum comosum</i>	29
3 METODOLOGÍA.....	30
3.1 La planta	30
3.2 Sitios de muestreo y colección de muestras.....	30
3.3 Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs).	31
3.4 Determinación de metales pesados	34
4 RESULTADOS	35

4.1	Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPS) en <i>Chlorophytum comosum</i> expuesta al aire de espacios interiores.....	35
4.2	Identificación de metales pesados en la lámina foliar de <i>Chlorophytum comosum</i> expuesta al aire de espacios interiores.....	53
5	DISCUSIÓN.....	54
5.1	Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en <i>Chlorophytum comosum</i> expuesta al aire de espacios interiores.....	54
5.2	Identificación de metales pesados en la lámina foliar de <i>Chlorophytum comosum</i> expuesta al aire de espacios interiores.....	56
6	CONCLUSIONES.....	59
7	Bibliografía.....	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes y tipo de contaminación en el interior.....	19
Tabla 2 Normas de calidad del aire de diversos contaminantes del aire establecidos por la OMS	21
Tabla 3. Parámetros utilizados para la determinación de metales pesados	34
Tabla 4. <i>Tiempo de retención y absorbancia del patrón de 16 hidrocarburos de Restek (catálogo # 31011 US EPA Method 610 PAH Mixture).</i>	36
Tabla 5. Comparación de presencia y ausencia de <i>Chlorophytum comosum</i> a diferentes condiciones.	37
Tabla 6. Hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados en la jardinera del edificio Jorge Gaitán Dura mediante el uso <i>Chlorophytum comosum</i>	41
Tabla 7 Hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados en la biblioteca mediante el uso <i>Chlorophytum comosum</i> en ubicada	44
Tabla 8. Hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados en el laboratorio de control de calidad, mediante el uso <i>Chlorophytum comosum</i>	47
Tabla 9. Hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados en la oficina de Facultad de Ciencias Básicas, el uso <i>Chlorophytum comosum</i>	50
Tabla 10. Concentración de los metales hallados en la lámina foliar de <i>Chlorophytum comosum</i> expuesta al aire de espacios interiores y exteriores.	53
Tabla 11. Comparación de metales pesados hallados en el PM _{2,5} de Cúcuta, pamplona y la lámina foliar de <i>Tilia cordata</i> .(X) presencia; (----) ausencia.....	54
Tabla 12. Comparación de metales pesados hallados en el PM _{2,5} de Cúcuta, pamplona y la lámina foliar de <i>Tilia cordata</i> .(X) presencia; (----) ausencia.....	57

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 A y B, micrografía con microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM) SEM de PM2.5 recolectado en vía vehicular. Se puede inferir que las partículas son esféricas, agrupadas y con formas de cadena.).....	21
Fig. 2. Resumen esquemático de la Fitorremediación de la contaminación atmosférica.....	23
Fig. 3. Imagen SEM de partículas de hollín de agregado interior (A) y al aire libre (B).....	24
Fig. 4. El tamaño y la morfología de PM en las superficies foliares de <i>Sophora japónica</i> , utilizadas para la prueba de composición elemental.. ..	25
Fig. 5. Lista de HAPs y metales pesado capturados por <i>Tilia cordata</i> Mill.	26
Fig. 6. Resultados de los biomonitoreo del PM en durante los años 2015- 2106 en cinco ciudades en Polonia	27
Fig. 7. Concentraciones de PAH en superficies adaxiales y abaxiales de especies de plantas seleccionadas).....	27
Fig. 8. Biología de <i>Chlorophytum comosum</i> (A) hojas. (B) Raíces. (C)Inflorescencia.	28
Fig. 9. Biofiltro de prueba experimental usado para exponer el filtro de aire botánico modular a un evento de pulso único de un material particulado.	29
Fig. 10. Sitios de muestreo.	31
Fig. 11. Muestra patrón de 16 hidrocarburos de Restek, catálogo # 31011 US EPA Method 610 PAH Mixture.	33
Fig. 12. Perfil cromatográfico de los 16 HAPs considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA).	36
Fig. 13. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta control. Solvente de extracción, mezcla 1:1 (diclorometano: hexano). A). Hoja. B). Raíz.	39
Fig. 14. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta control. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B). Raíz.	40
Fig. 15. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en la jardinera del edificio Jorge Gaitán, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, mezcla diclorometano- hexano (1-1). A). Hoja. B). Raíz.....	42
Fig. 16. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en la jardinera del edificio Jorge Gaitán, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B). Raíz.	43
Fig. 17. Perfil cromatográfico de los HAPs presenten en la planta ubicada en la biblioteca José Rafael Farías, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, mezcla diclorometano-hexano (1:1). A). Hoja. B). Raíz.	45
Fig. 18. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en la biblioteca José Rafael Farías, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B) Raíz.	46
Fig. 19. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en el laboratorio de control de calidad del edificio Francisco José De Caldas, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, la mezcla diclorometano-hexano (1:1). A). Hoja. B) Raíz.....	48

Fig. 20. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en el laboratorio de control de calidad del edificio Francisco José De Caldas, campus principal en la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B) Raíz.....	49
Fig. 21. Perfil cromatográfico de los HAPs de la planta ubicada en la oficina de facultad de Ciencias Básicas del edificio Francisco José De Caldas, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, mezcla diclorometano-hexano (1:1). A). Hoja. B) Raíz.....	51
Fig. 22. Perfil cromatográfico de los HAPs de la planta ubicada en la oficina de facultad de Ciencias Básicas del edificio Francisco José De Caldas, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B) Raíz.	52

ABREVIATURAS

Abreviaturas	Término
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
VOC	orgánicos volátiles
CI	inorgánicos gaseosos
PM	material particulado
HAPs	hidrocarburos aromáticos policíclicos
AAS	Cromatografía de Gases
GC	Microscopio electrónico de barrido
SEM	Detector de flama ionizada
FID	plomo
Pb	chromo
Cr	manganeso
Mn	Cobre
Cu	hierro
Fe	zinc
Zn	

más adelante

RESUMEN

El estado de la calidad del aire es un factor importante que influye en la salud y en el bienestar de las personas. Su deterioro se relaciona con los efectos de las emisiones de contaminantes a la atmósfera, provenientes de fuentes de diferentes clases y orígenes, las cuales son causadas por la actividad humana o natural. La calidad del aire se determina por su composición, donde encontramos una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión (material particulado), y los gases. Conocer el estado de la calidad del aire es fundamental para determinar las zonas en las cuales hay mayor potencial de afectación de la salud humana, que contaminantes, su distribución en el tiempo y en el espacio, y las fuentes de emisión asociadas a los mismos. Para medir y evaluar el impacto de la contaminación del aire en la población y en los recursos naturales es indispensable contar con los equipos, sistemas, redes y programas adecuados de medición, la cual representa altos costos.

Existen diversos métodos de remediación para estos contaminantes, entre los cuales se encuentran los físicos, químicos y biológicos. Un método biológico es la fitorremediación, que utiliza las plantas para eliminar, degradar o almacenar contaminantes inorgánicos y orgánicos del suelo, del aire y del agua. La planta *Chlorophytum comosum* es una especie ornamental, empleada mucho como planta interior, se adapta a diferentes condiciones de luz, temperatura, humedad y puede sobrevivir a condiciones extremas. En este estudio se evaluó a *Chlorophytum comosum* como bioindicador y fitoremediador de la contaminación del aire interior en tres espacios de la universidad de Pamplona. Se identificó tanto en la raíz como en la hoja la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y metales pesados. Inicialmente la materia orgánica presente en la raíz y hoja de la planta se obtuvo por ultrasonido, se concentró por rotaevaporación, el extracto global se utilizó para la determinación de los HAPs por cromatografía de gases (FID). Los HAPs encontrados fueron fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo (a) antraceno, criseno, benzo (b) fluoranteno, benzo (k) fluoranteno, benzo (a) pireno, indeno (1,2,3-cd) pireno, dibenzo (a, h) antraceno. Para la identificación de metales, las plantas fueron sometidas a desecación por 48 horas, y fueron digeridas con HCl. Los extractos se analizaron por medio de Espectrofotómetros de Absorción Atómica. Los metales pesados presentes fueron Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. Los (HAPs) y metales pesados encontrados en los extractos de las plantas analizados coinciden con los encontrados en filtros de equipos utilizados para monitoreo de la calidad del aire de ambientes exteriores de la Universidad de Pamplona en estudios anteriores. Por lo tanto, *Chlorophytum comosum* podría ser empleado como bioindicador y fitorremediador de los contaminantes presente en el aire de espacios interiores siendo una alternativa a bajo costo y sustentable.

Palabras clave: Fitorremediación de air interior, material particulado, HAPs, metales pesados, *Chlorophytum comosum*.

ABSTRACT

The state of air quality is an important factor that influences the health and well-being of people. Its deterioration is related to the effects of pollutant emissions into the atmosphere, from sources of different kinds and origins, which are caused by human or natural activity. The quality of the air is determined by its composition, where we find a mixture of liquid and solid particles, organic and inorganic substances, which are in suspension (particulate matter), and gases. Knowing the state of air quality is essential to determine the areas in which there is greater potential for affecting human health, than pollutants, their distribution over time and space, and the emission sources associated with them. To measure and evaluate the impact of air pollution on the population and on natural resources, it is essential to have the necessary equipment, systems, networks and measurement programs, which represent high costs.

There are various methods of remediation for these pollutants, among which are the physical, chemical and biological. A biological method is phytoremediation, which uses plants to remove, degrade or store inorganic and organic contaminants in soil, air and water. The plant *Chlorophytum comosum* is an ornamental species, widely used as an indoor plant, it adapts to different conditions of light, temperature, humidity and can survive extreme conditions. In this study, *Chlorophytum comosum* was evaluated as a bioindicator and phytoremediator of indoor air pollution in three spaces of the University of Pamplona. The presence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals was identified both in the root and in the leaf. Initially the organic matter present in the root and leaf of the plant was obtained by ultrasound, it was concentrated by rotaevaporation, the global extract was used for the determination of PAHs by gas chromatography (FID). The PAHs found were phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, benzo (a) anthracene, chrysene, benzo (b) fluoranthene, benzo (k) fluoranthene, benzo (a) pyrene, indene (1,2,3-cd) pyrene, dibenzo (a, h) anthracene. For the identification of metals, the plants were subjected to drying for 48 hours, and were digested with HCl. The extracts were analyzed by Atomic Absorption Spectrophotometers. The heavy metals present were Cr, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn. The (HAPs) and heavy metals found in the extracts of the analyzed plants coincide with those found in filters of equipment used to monitor the air quality of outdoor environments of the University of Pamplona in previous studies. Therefore, *Chlorophytum comosum* could be used as a bioindicator and phytoremediator of the pollutants present in the air of interior spaces, being an alternative at low cost and sustainable.

Key words: Phytoremediation of interior air, particulate material, PAHs, heavy metals, *Chlorophytum comosum*.

INTRODUCCIÓN

Las personas que viven en áreas urbanas pasan hasta 85-90% de su tiempo en el interior (Daisey , et al., 2003), a menudo sin darse cuenta de que pueden estar continuamente expuestas a la contaminación del aire. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la contaminación del aire interior ha sido clasificada entre los cinco principales riesgos para la salud pública (Soreanu et al., 2013) ya que tiene un impacto negativo en la salud y la propiedad de las personas en áreas urbanas de todo el mundo (Kleeberger , 2003) A veces, el nivel de contaminación del aire en el interior puede ser más de diez veces mayor que en el exterior, y en el caso de algunas sustancias dañinas, sus concentraciones pueden incluso exceder las normas permisibles hasta 100 veces (Wolverton 2008). Brody (2001) informó que las concentraciones de algunos productos químicos cancerosos en el interior son entre 5 e incluso hasta 70 veces más altas que en el exterior, aunque la concentración interna de contaminantes es aún menor que en fábricas industriales y centrales eléctricas de calefacción o cerca de carreteras concurridas (Wood, 2003).

La calidad del aire interior es un tema importante porque las personas inhalan 6-10 l de aire por minuto, lo que equivale a 15,000 l / día (Wood, et al., 2002), junto con los contaminantes presentes en el aire. La mala calidad del aire interfiere con el aprendizaje y la concentración en las escuelas y puede ser una causa de problemas de salud tanto para los alumnos como para los docentes (Daisey , et al., 2003). Todos los contaminantes mencionados contribuyen a varias enfermedades tales como las secreciones nasales, fiebre, tos, asma, picazón en la piel, ardor en los ojos, dolores de cabeza, náuseas, mareos, cánceres, e incluso la muerte (Daisey, et al., 2003, D'Amato , et al., 2002). El material particulado (PM) _{2.5} solo es responsable de más de 2 millones de muertes al año en todo el mundo. PM también causa daños a los sistemas circulatorio y respiratorio y también es la segunda causa de cáncer de y autismo (Volk, et al., 2013).

En general, los contaminantes del aire que se encuentran en el aire interior se clasifican en compuestos orgánicos volátiles (VOC), compuestos gaseosos inorgánicos (IC) y materia en partículas (PM) (Soreanu, et al., 2013). Recientemente se ha considerado que PM es uno de los contaminantes de salud más peligrosos para la vida humana (EEA, 2207). PM es una mezcla de fases sólidas y líquidas y difiere en tamaño, origen y composición química. El PM encontrado en el aire interior, además de entrar desde el exterior, también se genera en el interior mediante el uso de quemadores domésticos, calentadores, chimeneas y durante la fritura, el planchado y la limpieza.

Después de la emisión, el PM puede estar presente en el aire por un período que varía de varias horas a varias semanas y puede permanecer en el lugar de emisión y también transportarse a grandes distancias (Farmer, 2002). En función de su diámetro aerodinámico, hay varias clasificaciones de PM. Muy a menudo en la literatura, la clasificación con cuatro

tamaños de fracciones se cita: large-Ø 10-100 µm; áspero-Ø 2.5-10 µm (PM 10); fino-0.01-2.5 µm (PM 2,5) y súper (o ultra) fino-menos de Ø 0.01 µm.

Los metales pesados (Voutsas & Samara , 2002) , los compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (Kaupp , et al., 2002)y los radicales libres ambientalmente persistentes (EPFR) (Saravita, et al., 2013) pueden establecerse en el PM. Según Costa & James (1995), la toxicidad, la nocividad y el impacto negativo de la PM en la salud se deben al alto contenido de metales pesados y su biodisponibilidad y facilidad de acumulación en las células de organismos vivos. Saravia et al. (2013), entre otros, se centraron especialmente en los efectos nocivos de los EPFR en lactantes.

Junto a las técnicas convencionales para limpiar el aire interior, también se puede emplear la biotecnología ambiental, como la fitorremediación, en la cual las plantas en crecimiento con microorganismos asociados absorben contaminantes y los degradan o desintoxican. En comparación con los métodos técnicos, la tecnología de fitorremediación es más económica, respetuosa con el medio ambiente y puede utilizarse para una gama más amplia de impurezas tanto orgánicas como inorgánicas. Sin embargo, el tiempo de purificación es más largo (Schwitzguébel , 2000). En áreas urbanas al aire libre, el uso de cañones verdes ofrece la posibilidad de reducir el nivel de PM hasta en un 60%. Sin embargo, la efectividad de esto depende de las condiciones climáticas, como la velocidad del viento (Pough , et al., 2012). La eficacia de la fitorremediación en interiores depende del sistema elegido, que puede ser pasivo (solo plantando en macetas) o activo (plantas con filtros, carbón activo).

Los estudios han demostrado que las plantas ornamentales tienen la capacidad de absorber, distribuir y / o transportar contaminantes orgánicos a microorganismos asociados con plantas superiores que viven tanto en la rizosfera (Wolverton & Wolverton , 1993) como en filosferas (Sorkhoh , et al., 2001). El tamaño de la hoja, la estructura, la capa de ceras, la pubescencia y la rugosidad superficial generalmente corresponden a una mayor absorción de contaminantes del aire interior y exterior ((Dzierżanowski, et al., 2011).

Chlorophytum comosum L. (planta araña) se encuentra entre las 120 especies de plantas ensayadas para la fitorremediación de contaminantes del aire interior (Soreanu, et al., 2013). Tiene la capacidad de eliminar formaldehído, dióxido de nitrógeno, óxido de carbono, ozono, benceno, tolueno, humo de cigarrillo y amoníaco (Wolverton , 2008). Ha sido demostrado por Giese et al, (1994) que la planta de araña usa formaldehído como fuente de energía y carbono para la biosíntesis de nuevas moléculas. La literatura sobre la absorción de material particulado desde el aire por plantas de cultivo al aire libre es muy extensa, muy probablemente debido al creciente impacto negativo de este contaminante en todo el mundo sobre la salud humana y el medio ambiente. Sin embargo, hay una ausencia de datos sobre el papel de las plantas en la fitorremediación de PM del aire interior.

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema y justificación.

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), la inhalación y contacto directo de contaminantes del aire, ha sido clasificada entre las cinco principales causas de riesgos para la salud pública; a raíz de la presencia de compuestos como orgánicos volátiles (COV), inorgánicos gaseosos (CI) y material particulado (PM) (Soreanu, et al., 2013). El PM es recientemente considerado como uno de los contaminantes más peligrosos para la salud del hombre debido a su conformación de metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos(HAPs), siendo este último uno de los mayores problemas mundiales por ser el contaminante prioritario en el aire (Meléndez Gélvez, et al., 2012). Como resultado, el PM es responsable de más de 2 millones de muertes al año en todo el mundo (Silva, et al., 2013). Asimismo, de generar complicaciones en el sistema circulatorio, respiratorio, morbilidad, tumores, autismo y aparte ser la segunda causa de cáncer de pulmón (Volk, et al., 2013; Pandey, et al., 2015).

Con respecto a la calidad del aire urbano de Pamplona, Norte De Santander, sea determinado la presencia de compuestos tóxicos que representa un riesgo para la salud humana, debido a que puede inducir mutaciones y además llegar hasta el núcleo de linfocitos humanos y causarles daño genotóxico; se han detectado 12 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) presentes en el material particulado (PM), dentro, de los cuales, se destaca el benzo [a] pireno, considerado uno de los más potentes carcinógenos en humanos. Asimismo, en muestras del PM_{2,5} de la ciudad de Pamplona, se encontraron metales pesados como Cd, Cr, Fe, K, Mn, Ni, Pb, Zn, que aumentan las lesiones cardiopulmonares en los seres humanos (Quijano, et al., 2014; Quijano Parra, et al., 2010; Meléndez Gélvez, et al., 2012). En cuanto al origen de la contaminación del aire urbano de la ciudad, este se ha relacionado con alto flujo vehicular que atraviesa una vía nacional, particularmente de tráfico pesado que utiliza como combustible el Diésel, por lo que los compuestos mutagénicos presentes en el aire son originados por la combustión del diésel.

En cuanto se centra la atención en los problemas causados por la calidad del aire interior, se descubre un enorme problema de salud pública; puesto que los contaminantes atmosféricos presentes en espacios interiores representan un mayor riesgo de infecciones del tracto respiratorio, exacerbaciones de afecciones pulmonares inflamatorias, eventos cardíacos, accidente cerebrovascular, enfermedad ocular, tuberculosis, cáncer y admisiones hospitalarias con niveles de contaminación del aire (Fullerton, et al., 2008; Carazo Fernández, et al., 2013). También puede interferir con el aprendizaje y la concentración de los estudiantes, ocasionando problemas en la salud tanto para los alumnos y profesores (Daisey, et al., 2003). Dicho problema se presenta al ingreso del PM_{2.5} del aire exterior o urbano a los espacios interiores, permaneciendo ahí durante un periodo tiempo que varía de horas hasta varias semanas después de su emisión (Wood, et al., 2002). Ocasionando altos niveles de contaminación de hasta diez veces mayores, a los presentes en el aire exterior o

urbano y, en el caso de algunas sustancias dañinas aumentan hasta 100 veces su concentración permisible por la norma (Wood, et al., 2006). A pesar de lo mencionado anteriormente, en Pamplona no existe estudios al respecto de la calidad del aire interior, sin embargo, se presume que constituye un factor de riesgo para la población expuesta, debido a los contaminantes presentes en el aire urbano de Pamplona (Meléndez Gélvez, et al., 2012).

Por otro lado, los altos costos asociados con el monitoreo y remediación del aire interior han restado atención y prioridad a estudios acerca de la calidad del aire en los espacios interiores (Zampolli, et al., 2004). Como resultado, el uso de organismo biológicos para el biomonitoreo, pueden ofrecer una alternativa de bajo costo, especialmente en términos de alta espacial resolución y series de datos promediadas en el tiempo, para ser posible detectar eventos puntuales de toxicidad, los cuales a menudo no son detectados por las mediciones físico-químicas estándares (Lehndorff & Schwark, 2004). Sin embargo, para el biomonitoreo de contaminantes como el PM, en el espacio interior requiere de establecer índices y estándares que para implementar un control de calidad o un programa de vigilancia a través del tiempo (Popek, et al., 2017). En ese sentido, como primera media es necesario la evaluación de organismo vivos capaz de refleja las condiciones anteriores al momento del muestreo (Springer, 2010). Es necesario recalcar que hasta el momento se presenta estudio de organismo como bioindicadores de HAPs y metales pesados en el aire de espacios interiores.

También son altos los costos relacionados la purificación o limpieza de contaminantes del aire interior, puesto que implica la utilización de sistemas botánicos de biofiltración, biofiltros modular de carbón activo, filtros portátiles a partir de redes porosa de fibra de vidrio, sistemas de ventilación que aumentan el consumo de energía en los edificios (Irga, et al., 2017). Estos costos implicados en el monitoreo y la remediación de los contaminantes en el aire interior, implica una limitante para comprender mejor el estado actual de la calidad del aire interior, así como el estudio del impacto a largo plazo en la salud pública de la mala calidad del aire (Guieysse, et al., 2008). Los efectos adversos causados por esa deficiente calidad del aire en espacios cerrados afectan a muchas personas, ya que se ha demostrado que los habitantes de las ciudades pasan entre el 58 y el 78 % de su tiempo en un ambiente interior que se encuentra contaminado en mayor o menor grado, por lo cual es indudable que la calidad del aire en interiores es un problema de gran relevancia (Gil, et al., 1997)

Este trabajo se plantea la evaluación de la calidad del aire de espacios interiores a bajo costo, de manera sostenible y amigable con el medio ambiente, utilizando la capacidad de las plantas las cuales a través de la fotosíntesis y de su metabolismo, pueden absorber, acumular y depurar de manera rápida, efectiva componente del aire contaminado. *Chlorophytum comosum* por su actividad hiperacumuladora se ha descrito como fitorremediador del material particulado presente en el aire interior (Gawrońska & Bakera, 2015). Para ello se propone la Universidad de Pamplona como sitio de muestreo, donde se han elegido los espacios interiores de la institución como las oficinas de la facultad de ciencia básicas, laboratorio de control de calidad y biblioteca.

1.2 Hipótesis de Trabajo

Chlorophytum comosum es capaz de acumular en su hoja y raíz, partículas en suspensión, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados, dispersas en el aire de los espacios interiores de la Universidad de Pamplona

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar a la especie vegetal *Chlorophytum comosum* como posible bioindicador y fitorremediador de la contaminación atmosférica en espacios interiores de la universidad de pamplona.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar la presencia de los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) en la hoja y raíz de *Chlorophytum comosum* expuesta al aire de tres espacios interiores de la Universidad de Pamplona.
- Identificar en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum*, expuesta en espacios interiores de la Universidad de Pamplona, la presencia de metales pesados asociados a la contaminación del aire provenientes de fuentes móviles que utilizan el diésel y la gasolina como combustible.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 La contaminación del aire en espacios interiores

La contaminación del aire interior proviene de la combustión de combustibles fósiles, en general, los contaminantes del aire que se encuentran en el aire interior se clasifican en los compuestos orgánicos volátiles (COV), compuestos inorgánicos gaseosos (CI) y material particulado (PM) (Soreanu, et al., 2013; Shi, et al., 2017). Los niveles de contaminación del aire en interiores pueden contener más de diez veces superior a la del aire libre, y en el caso de algunas sustancias dañinas, su concentración puede incluso superar las normas permisibles hasta en 100 veces. Inclusive las concentraciones de algunas sustancias químicas cancerígenas en los espacios interiores pueden ser entre 5 e incluso hasta 70 veces más altos que en el exterior (Chithra & Narendra, 2013; Gawrońska & Bakera, 2015)

Las principales fuentes de contaminación del aire en interiores se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Fuentes y tipo de contaminación en el interior. Tomado de (Gawrońska & Bakera, 2015).

Fuente de contaminación	Tipos de contaminación
Aire exterior	PM, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono
Materiales, colas, pinturas, muebles de edificios	Alcoholes, benceno, formaldehído y tolueno
Artículos de uso casero: alfombras, papeles pintados	PM, bacterias, hongos, ácaros, polvo
Equipos electrónicos: ordenadores, televisores, monitores	Amoníaco, benceno, tolueno, tricloroetileno y PM
Actividades de las personas en los cuartos: freír carnes, uso de chimeneas, el planchado, tabaquismo, productos de limpieza	PM, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, benceno, formaldehído
Biológicos: hombre, animales, hongos y bacterias	El amoníaco, acetona, alcoholes, metano, óxidos de nitrógeno, compuestos de monóxido de carbono y de azufre, PM

La salud global y los costos asociados debido a la contaminación del aire se han estimado en US \$ 828 billones para los países desarrollados, mientras que los costos de la contaminación del aire en interiores para estos países son probablemente de poco menos de US \$ 90 billones. Los costos de salud asociados con la contaminación del aire en interiores

pueden llegar a los US \$ 9.400 millones solamente en los EE. UU. Lo que da lugar a hasta 150.000 muertes al año (Yan, et al., 2016; Torpy, et al., 2014)

Por otra parte, los contaminantes atmosféricos interiores son una fuente de enfermedades graves, incluyendo asma, cáncer, desórdenes neurológicos. Un Informe de la Organización Mundial de la Salud de 2002 atribuye más de 1,6 Millones de muertes al año, tres muertes por minuto a las complicaciones resultantes de la contaminación del aire en interiores. Asimismo, los efectos insidiosos de la contaminación del aire interior se han asociado con un 74% el aumento del asma entre 1980 y 1994 y niños menores de 5 años en los Estados Unidos y han experimentado un aumento del 160%. En Taiwán ha aumentado 5 veces en más de 20 años los pacientes asmáticos en Japón aumento 30 veces y en Australia, Nueva Zelanda y en las islas del Pacífico en 15% (Gawronski, et al., 2017). También la mala calidad del aire influye en el aprendizaje y la concentración; contribuyen a la fiebre, tos, picazón en la piel, ardor en los ojos, dolores de cabeza, náuseas, mareos, cánceres, e incluso la muerte (Gawrońska & Bakera, 2015). De hecho, Soreanu, et al., (2013), define estas enfermedades con el síndrome del edificio enfermo, que se manifiesta por los síntomas oculares, nasales, irritaciones cutáneas, alergias, disfunción respiratoria, cefalea y la fatiga.

2.2 Material Particulado.

El material particulado son partículas primarias originadas en fuentes de combustión, usualmente consisten en un núcleo carbonáceo con elementos químicos como sulfatos, metales e hidrocarburos aromáticos Policíclicos adsorbidos a su superficie. Además, se forman partículas secundarias producidas por reacción química de las partículas primarias en la atmósfera con gases fuertemente oxidantes como óxidos de nitrógeno, ozono y óxidos de azufre, llevando a la formación de nitratos y amoníaco (Gavidia, et al., 2009). Por lo tanto, el material particulado es una mezcla de fase solidad y liquida suspendida en el aire; difiere de tamaño, origen y composición química. De acuerdo con lo anterior, la caracterización del material particulado corresponde a una mezcla compleja de compuestos orgánicos, inorgánicos y biológicos, que va desde metales, sales, material carbonáceo, compuestos orgánicos volátiles (VOC), hidrocarburos aromáticos polinucleados (PAH), endotoxinas que pueden interactuar y potencialmente absorberse como un núcleo de condensación (Quijano Parra, et al., 2010); más concretamente la constitución fundamental del material particulado contiene disímiles elementos, unos livianos como el aluminio, silicio, potasio, calcio, y otros pesados como hierro, zinc, vanadio, titanio, cadmio, plomo, mercurio y antimonio conjuntamente con compuestos orgánicos de elevada toxicidad y potencial efecto cancerígeno y mutagénica (Chong, et al., 2002).

Por otra parte, a partir del diámetro aerodinámico PM, existen cuatro clasificaciones en su tamaño de fracciones, Ø 10-100 micras; Ø 2,5-10 micras (PM 10); 0,01-2,5 micras (PM 2,5) (Figura,1) y Ø 0,01 micras (Gawrońska & Bakera, 2015); sin embargo, en los valores guía recomendados por la OMS, se tiene en cuenta PM10 y PM2.5, como los

grupos principales debido, a los impactos en la salud y ambiental cuando se exceden sus estándares de calidad de aire (tabla 2).

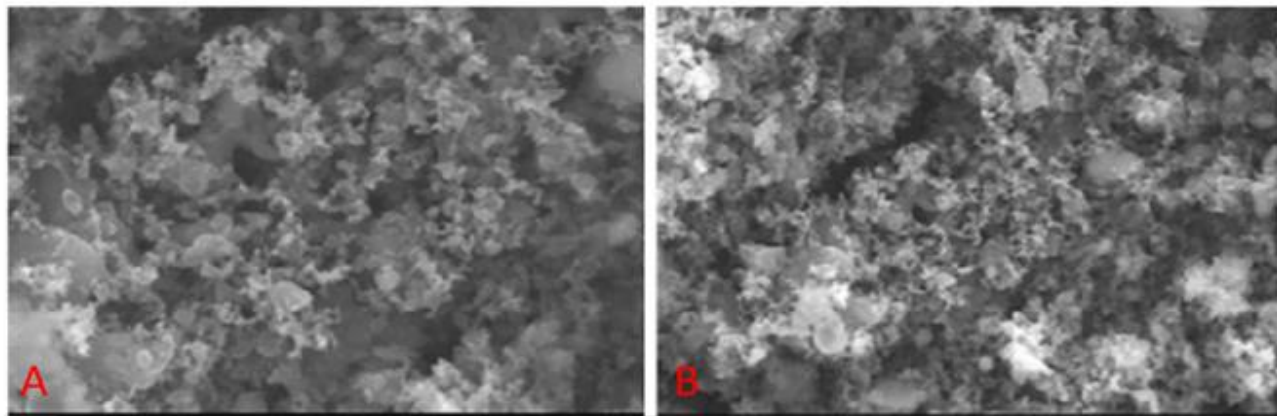


Fig. 1 A y B, micrografía con microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM) SEM de PM2.5 recolectado en vía vehicular. Se puede inferir que las partículas son esféricas, agrupadas y con formas de cadena. Tomado de Pineda Martínez, (2014).

Las partículas menores a 10 μm (PM10) son partículas sólidas o líquidas dispersas en la atmósfera, en su mayoría de pH básico, producto de la combustión no controlada. El segundo tamaño PM2.5, agrupa a partículas generalmente ácidas, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales, y corresponde a la fracción más pequeña. También el PM2,5 está asociado la presencia de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs) con compuestos químicos como Iones Potasio, Sodio, Ion amonio, metales como el hierro, aluminio, calcio, sodio, potasio, magnesio y plomo (Quijano Parra, et al., 2010).

Tabla 2 Normas de calidad del aire de diversos contaminantes del aire establecidos por la OMS

Aire contaminado	Criterio basado en	Normas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM10	Media anual	20
	Media de 24 horas	50
PM2,5	Media anual	10
	Media de 24 horas	25

El material particulado es un contaminante atmosférico originado por diferentes fuentes de origen natural o antropogénico como, polvo, polen, restos de ignición parcial, técnicas industriales, deforestación, incineradores de residuos tanto sólidos como hospitalarios y la combustión vehicular (Molina, 2004). Los elementos que hacen parte del material particulado atmosférico (MP) son sulfato, nitrato, amonio, ion hidrógeno, agua adherida a las partículas, carbono elemental, una gran variedad de compuestos orgánicos y elementos de la corteza terrestre (Quijano Parra, et al., 2010).

2.3 La Biorremediación

La biorremediación es el uso de organismos vivos, sobre todo microorganismos, para degradar los contaminantes ambientales en formas menos tóxicas. Utiliza bacterias de origen natural, hongos o plantas para degradar o detoxificar las sustancias peligrosas para la salud humana y / o el medio ambiente. Los desechos orgánicos se degradan biológicamente en condiciones controladas a un estado inocuo, o a niveles inferiores a los límites de concentración establecidos por las autoridades reguladoras (Vidali M., 2001). La biorremediación no es una estrategia viable cuando los sitios contaminados poseen altas concentraciones de productos químicos tóxicos para la mayoría de los microorganismos, que contienen metales tales como cadmio o plomo y sales de cloruro sódico. Dentro del campo de las tecnologías de biorremediación se encuentra entre otras la Fitorremediación.

2.3.1 La Fitorremediación

La Fitorremediación es el seudónimo entregado al uso de plantas (Figura 1) para reducir, remover, degradar o inmovilizar agentes contaminantes, empleando la capacidad que tiene éstas de tomar sus nutrientes a través de las raíces o gases desde las hojas; permitiendo así extraer sustancias tóxicas del suelo, agua o del aire (Quintana & Olivero Vebel, 2008). Se caracterizan por ser una práctica de limpieza pasiva y estéticamente agradable que aprovechan la capacidad de las plantas y la energía solar para el tratamiento de una gran variedad de contaminantes del medio ambiente (Arias Martínez, et al., 2010)

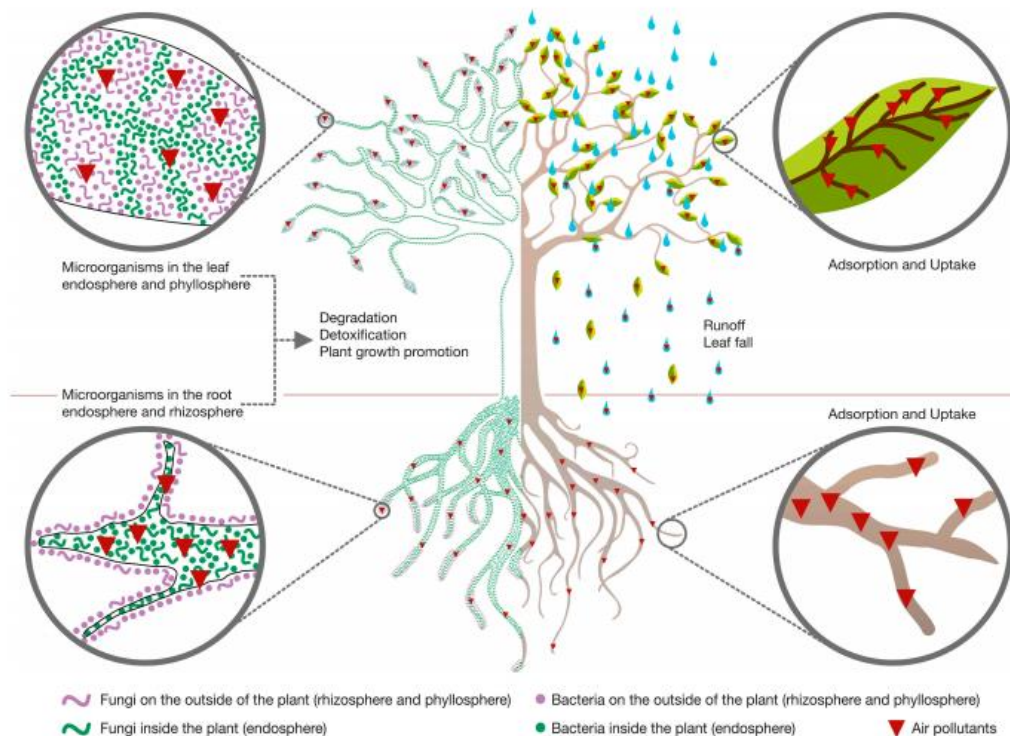


Fig. 2. Resumen esquemático de la Fitorremediación de la contaminación atmosférica. Tomado de Weyens, et al., (2015).

Sin embargo, también existen varios inconvenientes y limitaciones de la fitorremediación. A menudo se requiere un tiempo largo para la remediación; el tratamiento se limita generalmente a los suelos a un metro de la superficie, agua subterránea a pocos metros de la superficie y una gran cobertura vegetal para recintos cerrados. También las condiciones climáticas o hidrológicas pueden restringir la tasa de crecimiento de las plantas que pueden ser utilizadas. Otro gran inconveniente es que los contaminantes pueden entrar en la cadena alimenticia a través de animales e insectos que comen material vegetal que contiene contaminantes (Schwitzguébel, 2000)

2.3.2 Fitorremediación del aire.

El aire urbano a menudo contiene altos niveles de contaminantes, debido al hollín (Figura 3), son perjudiciales para la salud y el bienestar humano. La causa principal del aumento de los niveles de contaminación son la tasa de crecimiento exponencial de la población mundial, la urbanización y la industrialización, especial mente los países en vías de desarrollo como india (Pandey, et al., 2015). De ahí que, la contaminación del aire en las zonas urbanas se está convirtiendo reto (Pandey, et al., 2016).

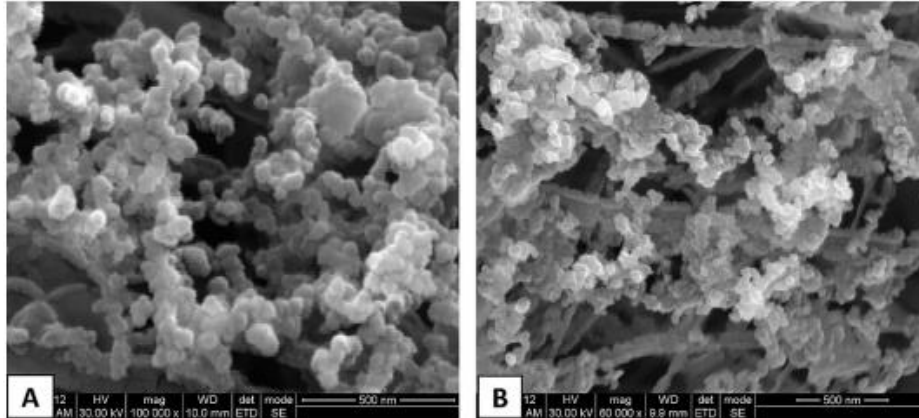


Fig. 3. Imagen SEM de partículas de hollín de agregado interior (A) y al aire libre (B). Tomado de Chithra & Narendra, (2013).

En la solución de este problema básicamente nuestros únicos socios son las plantas con su enorme superficie biológicamente activa. Las plantas mismas son también víctimas de la contaminación del aire, pero debido a que son sedentarias desarrollaron mecanismos de defensa muy eficientes, que también pueden ser explotados para mejorar la esfera humana. Para sus procesos de vida, las plantas requieren un intercambio intensivo de gases, durante el cual se acumulan contaminantes atmosféricos en las superficies de las hojas o se absorben en los tejidos. Algunos de los contaminantes son incluidos por las plantas en su propio metabolismo, mientras que otros son secuestrados (Gawronski, et al., 2017)

Por lo que se refiere al PM emitido a la atmósfera exterior la única opción posible para limpiar el aire es la biotecnología ambiental en forma de fitorremediación (Popek, et al., 2015). En Pekín capital de china, la influencia del bosque urbano, unos 2,4 millones de árboles en la parte central de la ciudad han removido 12621.4 toneladas de contaminantes del aire en 2002. El contaminante del aire que más se redujo fue PM10, la reducción ascendió a 772 toneladas. El dióxido de carbono almacenado en biomasa por el bosque urbano ascendió a unos 0,2 millones de toneladas (Yang, et al., 2005). El rol que juegan los bosques urbanos en la filtración del aire es debido a la estructura propia de la copa de los árboles, la cual conduce a movimientos turbulentos que aumentan el depósito de PM en las hojas (Figura, 4). Estructuras específicas de la hoja como tricomas y ceras epicuticulares mejoran los procesos de filtración del aire. Estas partículas almacenadas son lavadas después de la hoja por la lluvia y son depositadas en el suelo donde procesos naturales descomponen los componentes inorgánicos del PM, mientras que los componentes orgánicos se acumulan en el suelo (Dzierzanowski, et al., 2011).

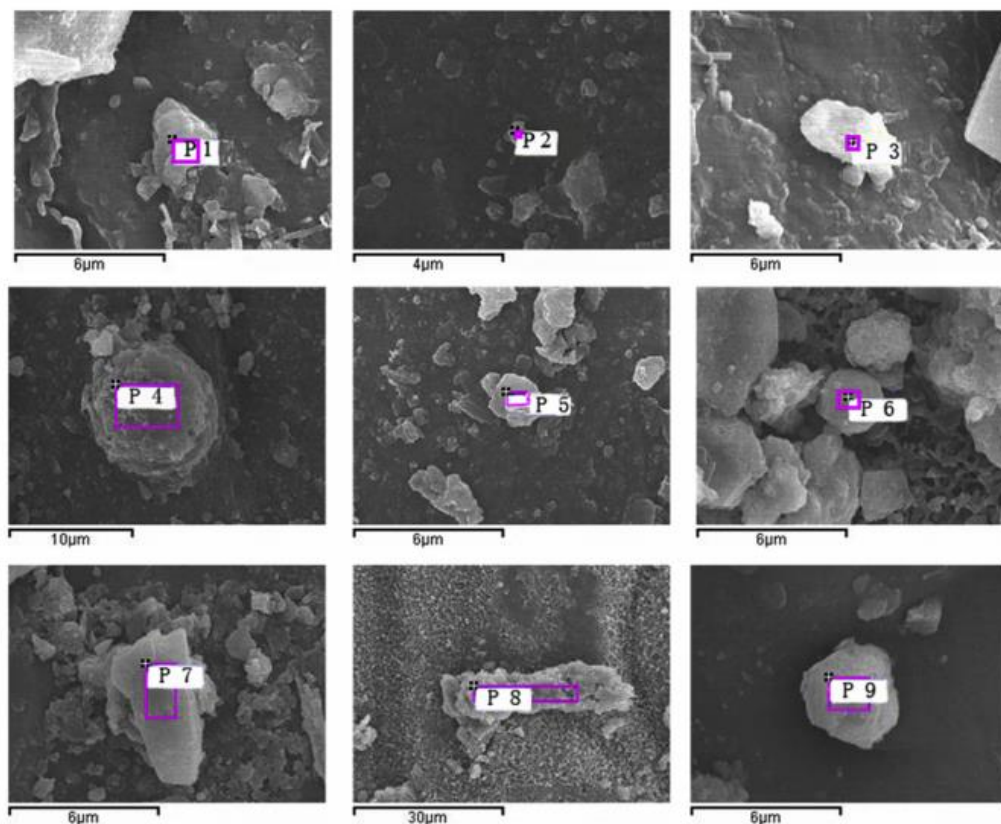


Fig. 4. El tamaño y la morfología de PM en las superficies foliares de *Sophora japonica*, utilizadas para la prueba de composición elemental. Tomado de Song, et al. (2015).

2.4 Bioindicadores.

Los Bioindicadores son organismos vivos utilizados para estudios de diagnóstico o evaluación rápida, que es puntual en el tiempo (una única fecha de muestreo) y usualmente se basa en la comparación entre sitios. No debe confundirse, el método de Bioindicadores con el biomonitoreo, puesto, que este último se basa en muestreos periódicos con la finalidad de implementar un control de calidad o un programa de vigilancia a través del tiempo que es usualmente abarca años. Los bioindicadores se utilizan a diferentes niveles, desde el nivel individual, a través de biomarcadores, hasta el de población, comunidad o ecosistema (Springer, 2010).

En cuanto al uso de organismo vivos como bioindicadores del PM, son varios los ejemplos. Entre ellos *Tilia cordata* Mill. El cual es usado como un bioindicador de la presencia de nueve de metales pesados presentes en el aire urbano Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr, Zn de igual forma, es usado como bioindicador de los 16 de hidrocarburos aromáticos policíclicos presente en el aire urbano (Kosiba , 2008). Como resultado, Popek et al. (2017) han implementado a *Tilia cordata* Mill como biomonitoreo del PM y bioindicador de HAPs y metales pesado en el aire urbano de cinco ciudades en Polonia (Figura 6).

A

PAHs	Amount of PAHs [ng/g D.W.] (mean ±SE)					P value
	Gdansk	Poznan	Warsaw	Wroclaw	Krakow	
Low Molecular Weight (LMW)						
Fluorene	0.18 ±0.05b	0.41 ±0.09b	0.19 ±0.03b	0.66 ±0.06b	2.28 ±0.54a	<0.0001
Medium Molecular Weight (MMW)						
Phenanthrene	0.32 ±0.08c	0.63 ±0.10c	0.46 ±0.07c	2.93 ±0.20b	5.39 ±1.18a	<0.0001
Anthracene	0.42 ±0.09b	0.51 ±0.06b	1.04 ±0.13b	0.69 ±0.09b	2.43 ±0.82a	0.0113
Fluoranthene	0.36 ±0.07c	0.74 ±0.08c	0.55 ±0.08c	3.26 ±0.46b	7.80 ±0.49a	<0.0001
Pyrene	0.16 ±0.03c	0.39 ±0.07c	0.09 ±0.02c	1.11 ±0.13b	3.38 ±0.29a	<0.0001
Benzo(a)anthracene	0.63 ±0.14c	1.98 ±0.41c	0.66 ±0.15c	5.58 ±0.34b	16.15 ±1.09a	<0.0001
Chrysene	0.61 ±0.10c	2.28 ±0.15c	2.03 ±0.33c	7.68 ±0.76b	18.55 ±0.32a	<0.0001
High Molecular Weight (HMW)						
Benzo(b)anthracene	0.45 ±0.14c	1.25 ±0.29c	0.85 ±0.29c	3.29 ±0.52b	9.82 ±1.13a	<0.0001
Benzo(k)anthracene	0.35 ±0.11b	1.04 ±0.22b	0.74 ±0.09b	2.59 ±0.39b	7.31 ±1.32a	<0.0001
Benzo(a)pyrene	0.11 ±0.05b	0.53 ±0.13b	0.21 ±0.06b	0.73 ±0.19b	3.92 ±1.25a	0.0012
Dibenz(a,h)anthracene	0.14 ±0.03b	0.44 ±0.10b	0.37 ±0.05b	1.14 ±0.16b	2.89 ±0.53a	<0.0001
Benzo(ghi)perylene	0.08 ±0.02b	0.31 ±0.04b	0.24 ±0.02b	0.64 ±0.16b	3.27 ±0.36a	<0.0001
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	0.33 ±0.05c	0.88 ±0.10c	0.53 ±0.04c	2.19 ±0.11b	7.91 ±0.54a	<0.0001

B

HM [mg/kg D.W.]	The contents of elements (mean ±SE)					P value
	Gdansk	Poznan	Warsaw	Wroclaw	Krakow	
Cd	2.45 ±0.03a	2.58 ±0.05a	2.45 ±0.05a	2.58 ±0.03a	2.52 ±0.02	0.0603
Cr	0.93 ±0.03b	0.95 ±0.03ab	0.90 ±0.00b	1.08 ±0.03ab	1.30 ±0.18a	0.0202
Cu	17.00 ±2.42a	13.75 ±0.48a	12.75 ±0.25a	14.25 ±0.25a	16.50 ±2.33a	0.2706
Fe	673.75 ±51.89c	881.25 ±35.51b	543.00 ±16.06c	918.75 ±29.33b	1365.00 ±59.08a	<0.0001
Mn	55.25 ±4.44b	70.75 ±8.42ab	71.00 ±4.02ab	95.25 ±8.35a	95.75 ±5.74a	0.0017
Ni	42.25 ±0.48b	43.75 ±0.48ab	42.00 ±0.71b	44.50 ±1.04a	45.25 ±0.25a	0.0116
Pb	6.25 ±0.48bc	8.75 ±0.85ab	5.50 ±0.50c	10.25 ±0.75ab	11.25 ±0.48a	<0.0001
Sr	91.50 ±11.05b	98.25 ±3.42b	103.75 ±2.75b	118.00 ±8.73ab	151.50 ±23.76a	0.0292
Zn	39.75 ±2.06c	63.75 ±4.03ab	52.50 ±7.44bc	46.25 ±3.09bc	78.00 ±3.29a	0.0001

Fig. 5. Lista de HAPs y metales pesado capturados por *Tilia cordata* Mill. Tomado de Popek et al., 2017

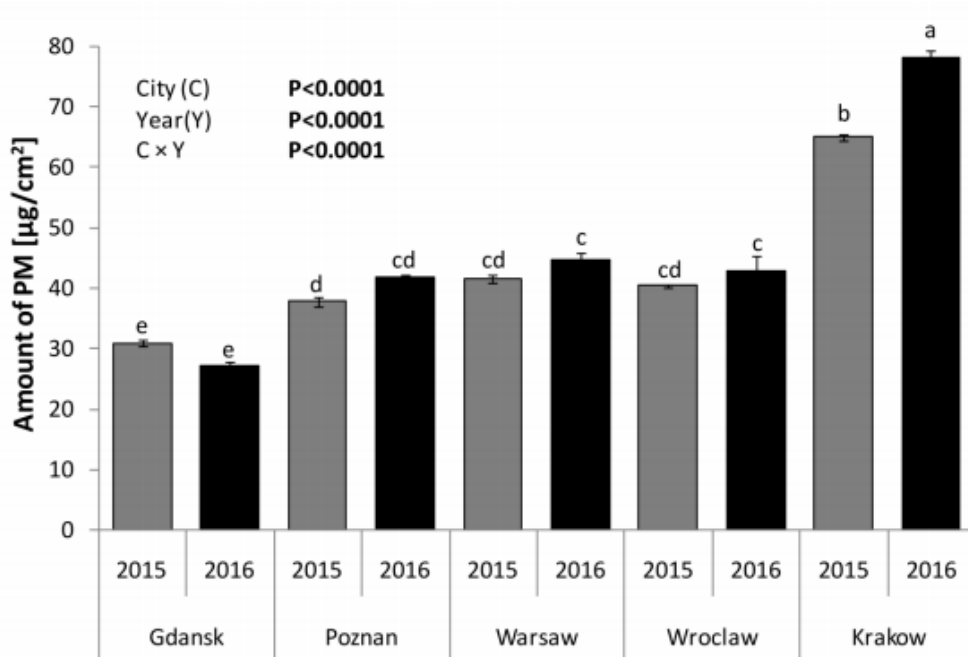


Fig. 6. Resultados de los biomonitoreo del PM en durante los años 2015- 2106 en cinco ciudades en Polonia

Otras especies vegetales usadas como bioindicadores de los HAPs en la provincia Zhejiang, en Hangzhpun en China son, *Photinia serratifolia*, *Mahonia fortunei* y *Pinus massoniana*. De los 16 HAPs prioritarios, se identificado la presencia de 11HAPs en la superficie adaxial y abaxial de las tres especies de plantas (Yan, et al., 2016).

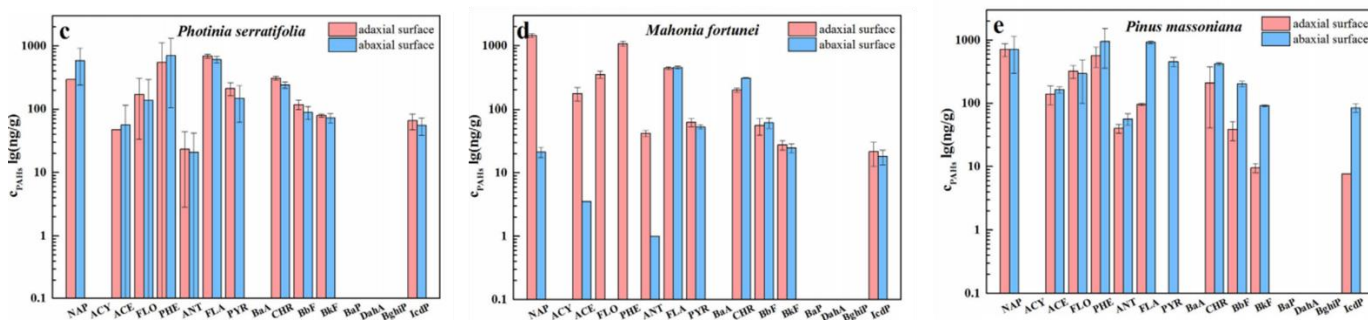


Fig. 7. Concentraciones de PAH en superficies adaxiales y abaxiales de especies de plantas seleccionadas (a), contenido relativo de PAH, clasificados por anillos en las superficies adaxial y abaxial (b), y las concentraciones de HAP individuales en las superficies adaxiales y abaxiales de las especies de hojas de *Photinia serratifolia* (c), *Mahonia fortunei* (d) y *Pinus massoniana* (e). Tomado de Yan et al,(2016)

2.5 La planta

Chlorophytum comosum fue formalmente descrita en 1794 por el naturalista sueco Carl Peter Thunberg como *Anthericum comosum* en su obra *Prodromus Plantarum Capensium*, sobre las plantas de Sudáfrica. *Chlorophytum comosum* pertenece al género *Liliaceae*, ampliamente distribuido en las regiones pantropicales, y está representado por más de 215

especies (Bercu, 2007). Algunos autores incluyen este género en la familia Agavaceae (Kaushik, 2005). *C. comosum* Tienen largas y estrechas hojas verdes y blancas de 20-40 cm de largo (Fig.5 A), 5-20 mm de ancho (Fig.5 A), que crecen a partir de una roseta central que crece de un rizoma grueso y carnoso. Algunas de las especies pueden formar micorrizas (Brundrett, 2002). También produce estolones ramificados con pequeñas flores blancas y plántulas de bebé. Periódicamente brota un tallo de flores blancas pequeñas que luego son reemplazadas por plántulas jóvenes, que pueden ser desprendidas y arraigadas (Philips, 1963). Las flores del interior son pequeñas, generalmente blancas, hermafroditas, actinomorfas, de ovario súpero formado por tres carpelos soldados con un solo estigma y seis estambres producidas en panículas escasas hasta 120 cm de largo (Fig. 5 B). La raíz de la *C. comosum* son carnosas (Fig. 5 C).



Fig. 8. Biología de *Chlorophytum comosum* (A) hojas. (B) Raíces. (C) Inflorescencia. Tomado de Stabinge (2004)

2.5.1 *Chlorophytum comosum*, bioindicador y fitorremediación del material particulado.

Chlorophytum comosum se encuentra entre las 120 especies de plantas ensayadas para la fitorremediación de contaminantes de aire interior (Soreanu et al., 2013). Tiene la capacidad para eliminar el formaldehído, dióxido de nitrógeno, óxido de carbono, ozono, benceno, tolueno, humo de cigarrillo y el amoníaco (Peart, 1992; Giese, et al., 1994; Costa & James, 1995; Cornejo, et al., 1999). Por otra parte, se ha demostrado por Giese, et al., (1994) que la *C. comosum* utiliza formaldehído como fuente de energía y carbono para la biosíntesis de nuevas moléculas.

De igual forma, sea evaluado su potencial para remover el PM, implementado un sistema de biofiltración(Fig.6), el cual removió eficientemente el 53.35 ± 9.73 % para el total de partículas suspendidas totales, 53.51 ± 15.99 % para PM10, y 48.21 ± 14.71 % para PM2.5 (Irga et al., 2017). Asimismo, se determinó que *C. comosum* acumula el PM en la cera epicuticulares de sus hojas, que van desde 13,62 hasta 19,79 g / cm² hasta 34,46 a 72,97 g / cm². El resultado de este estudio también demostró que la cantidad de PM acumulada en las hojas de las plantas no es simplemente por acción de las fuerzas de gravedad (Gawrońska & Bakera, 2015).



Fig. 9. Biofiltro de prueba experimental usado para exponer el filtro de aire botánico modular a un evento de pulso único de un material particulado. Tomado de Irga, et al. (2017)

3 METODOLOGÍA

3.1 La planta

Seis plantas de las especies *Chlorophytum comosum* fueron usadas en este estudio. Para la identificación de los HAPs y metales pesados todas las plantas seleccionadas crecen en macetas, son jóvenes y estaban en buenas condiciones, sin enfermedades o plagas. Sin embargo, en la determinación de los metales pesados pre

3.2 Sitios de muestreo y colección de muestras

El estudio se realizó en el Municipio de Pamplona, Norte de Santander, capital ubicada en la cordillera Oriental de Colombia, con coordenadas geográficas 72° 25' de longitud Oeste y 7° 20' de latitud Norte, a una altitud de 2100 msnm y una presión atmosférica de 542 mm Hg. La temperatura media es de 14.4°C y con una precipitación anual 921 mm.

Se seleccionó el campus principal de la Universidad de Pamplona, ubicado dentro del casco urbano de la ciudad, para la evaluación de la contaminación atmosférica urbana e interior por hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados. Las plantas se expusieron durante los meses de abril y mayo del 2017; se delimitó a dos meses el tiempo de evaluación de la calidad del aire, puesto que Gawrońska y Bakera (2015) establecen como el tiempo mínimo para que *Chlorophytum comosum* acumule la contaminación atmosférica en sus hojas y raíces. En la evaluación del contaminante en el espacio interior, se tomó tres sitios de muestreo, oficina de facultad de Ciencias Básicas (Figura 7A), biblioteca (Figura 7B) y laboratorio de control de calidad (Figura 7C); en cada sitio se ubicó una planta. Al mismo tiempo, se expuso al aire urbano una planta ubicada en la jardinera de edificio Jorge Gaitán Durán (Figura 7D) y en Parque Principal Águeda Gallardo (Figura 7E). Como control, se tomó una planta (Figura 7E)



Fig. 10. Sitios de muestreo. Se tomó tres sitios de muestro en la Universidad de Pamplona para la evaluación de la contaminación atmosférica interior; oficina de facultad de Ciencias Básicas (Figura 7A), laboratorio de control de calidad (Figura 7B) y biblioteca (Figura 7C). Para la evaluación de la contaminación atmosférica urbana se escogió un sitio de la universidad la jardinería de edificio Jorge Gaitán Durán (Figura 7D) y el parque principal Águeda Gallardo (Figura 7E). Como control, se tomó una planta joven sin enfermedades y que no fue expuesta al aire urbano ni interior (Figura 7F).

3.3 Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs).

La extracción de los HAPs de la cutícula y tejidos interno de la hoja y la raíz de la planta se llevó a cabo luego de los dos meses de exposiciones de las plantas al aire interior y exterior. Las muestras de las hojas y raíces se cortaron en pedazos y los extractos globales de HAPs de cada muestra se extrajeron por ultrasonido, en un baño ultrasónico con un Branson 1510, modelo 1510R-MT, por un tiempo de 45 minutos, en tres ciclos de 15 minutos por cada muestra (Li, et al., 2017). Como solventes de extracción se utilizan por separado una mezcla de diclorometano (100 ml) y hexano (100ml) y la acetona (200 ml) por muestra de hoja y raíz de cada planta. Una vez obtenido el extracto global (200 ml), se lo concentra en un evaporador rotatorio de vacío, marca Heidolph® modelo Laborota 400-1, a la temperatura de ebullición del solvente a 150 rpm; hasta aproximadamente 10 ml. Posteriormente el extracto se transfirió a un vial de 5ml. Las muestras de HAPs se secaron con Na₂SO₄, con el fin de eliminar el agua residual y preparar la muestra para el análisis cromatográfico. Se guardaron en frasco ámbar, manteniéndolas refrigeradas a 4 °C (Quijano Parra, et al., 2010).

Para identificar los HAPs presentes en la hoja y raíz de *Chlorophytum comosum* utilizó un equipo de cromatografía (GC) de gases marca Agilent Technologies® 6890A Plus Series II Hewlett-Packard® Plus con detector FID (Flame Ionization Detector). La columna empleada es Rtx®-5, 30 m de longitud, 0.32 mm de diámetro, 0.25 µm de diámetro interno. Para la identificación de los HAPs se utilizó el patrón de 16 hidrocarburos de Restek, catálogo # 31011 US EPA Method 610 PAH Mixture (Figura 8).

La identificación cualitativa de los HAPs presentes en el extracto global se realizó de acuerdo a las siguientes condiciones: detector FID a 320 °C Mezcla (mL/min): Aire 400 – H₂ 30 – N₂ 45. Se inyectó 1 µl, modo splitless a 320 °C. Temperatura inicial 45 °C por 0,8 min y se incrementa de la siguiente manera: 45 °C/min hasta 200 °C, 2,50 °C/min hasta 225 °C, 3 °C/min hasta 266 °C, 5 °C/min hasta 300 °C, 10 °C/min hasta 320 °C durante 4,50min. Tiempo de análisis por muestra 41,21 min. Gas de arrastre Helio, flujo 20 mL/min. Temperatura del inyector 250 °C.

Polynuclear Aromatic Hydrocarbons

US EPA Method 610

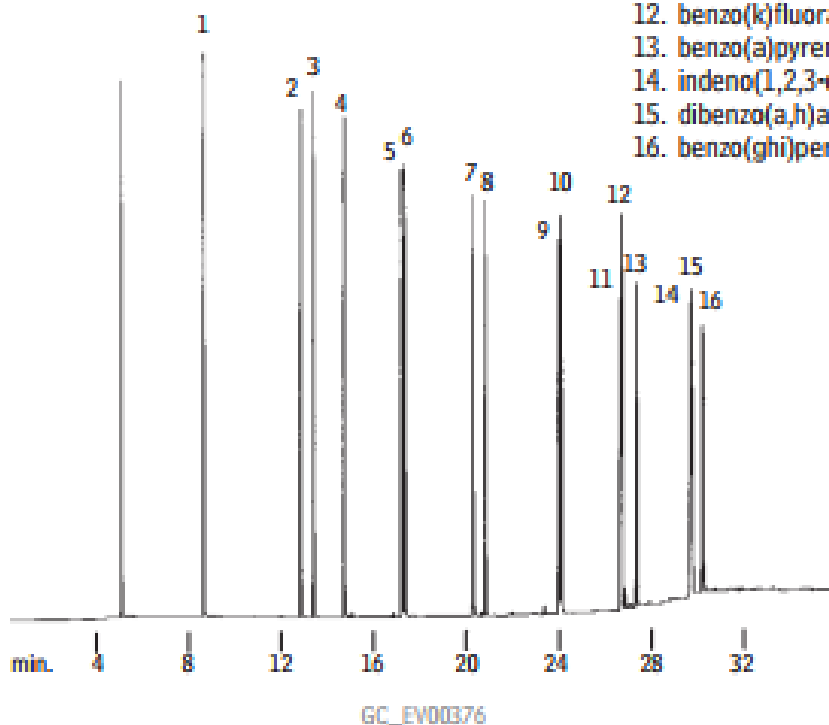
Rtx®-5

30m, 0.32mm ID, 0.25µm Rtx®-5 (cat.# 10224)
 0.5µL cold on-column injection of PAHs.
 Concentration approximately 10ng per component.

Oven temp.: 35°C (hold 4 min.) to 325°C
 @ 10°C/min. (hold)
 Det. temp.: 325°C
 Carrier gas: hydrogen
 Linear velocity: 40cm/sec.
 FID sensitivity: 8×10^{11} AFS

Reference Standard
 SV Calibration Mix #5 (cat.# 31011):

1. naphthalene
2. acenaphthylene
3. acenaphthene
4. fluorene
5. phenanthrene
6. anthracene
7. fluoranthene
8. pyrene
9. benzo(a)anthracene
10. chrysene
11. benzo(b)fluoranthene
12. benzo(k)fluoranthene
13. benzo(a)pyrene
14. indeno(1,2,3-cd)pyrene
15. dibenzo(a,h)anthracene
16. benzo(ghi)perylene



Restek Corporation 110 Benner Circle Bellefonte, PA 16823
 814-353-1300 • 800-356-1688 • Fax: 814-353-1309 • www.restek.com

Fig. 11. Muestra patrón de 16 hidrocarburos de Restek, catálogo # 31011 US EPA Method 610 PAH Mixture.

3.4 Determinación de metales pesados

Para la determinación de metales pesados se llevó a cabo en las plantas expuestas en la oficina, parque y laboratorio (Figura 7A, 7C, 7E). La extracción de las muestras de raíz y hojas se llevaron a deshidratación en un horno por 42 horas. Se cortó las muestras de raíz y hoja de cada planta en piezas pequeñas, se introdujeron en un Erlenmeyer de 250 mL y es digerido por 30 minutos en 100ml de HCl al 37%, a fuego lento hasta desecación. Se adicionaron 10mL de agua destilada, para extraer los sólidos presentes, se calentó durante 15 minutos, el procedimiento de extraer los sólidos se repitió 3 veces. Se transfirió los extractos a un matraz aforado de 50mL, posteriormente se adicionaron 10mL de ácido clorhídrico concentrado al 37% y 10 gotas de ácido nítrico y se transfirieron a un balón aforado de 25mL (Quijano Parra, et al., 2010). Se realizó este procedimiento todas las muestras.

En la detección de los metales pesados, para las muestras de raíz y hoja en cada planta se utilizó un equipo serie AA-7000 de Espectrofotómetros de Absorción Atómica(AAS); los metales analizados fueron plomo(Pb), cromo(Cr), manganeso(Mn), cobre(Cu), hierro(Fe) y zinc (Zn). Los parámetros de trabajo utilizados para cada elemento se describen en la Tabla3

Tabla 3. Parámetros utilizados para la determinación de metales pesados

<i>Metal</i>	<i>Longitud de onda(nm)</i>	<i>Slit (nm)</i>	<i>Concentración(ppm)</i>	<i>Abs</i>
<i>Pb</i>	283.3	0,7	0.5000	0.0049
			1.0000	0.0151
			2.0000	0.0313
			3.0000	0.0827
<i>Zinc</i>	213.9	0,7	0.1000	0.0163
			0.200	0.0669
			0.500	0.3129
<i>Hierro</i>	248.3	0,2	0.0500	0.0346
			1.0000	0.0716
			2.0000	0.1610
			3.0000	0.2343
<i>Cobre</i>	324.8	0,7	4.0000	0.4390
			0.1000	-0.0016
			0.5000	0.0494
			1.0000	0.1206
<i>Magnesio</i>	279.5	0,2	2.0000	0.2807
			0.0500	0.0063
			1.0000	0.1654
			1.5000	0.2318
<i>Cromo</i>	357.9	0,7	2.0000	0.3306
			0.2000	0.0053
			0.5000	0.0123
			1.0000	0.0224

			2.0000	0.0475
--	--	--	--------	--------

4 RESULTADOS

4.1 Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPS) en *Chlorophytum comosum* expuesta al aire de espacios interiores.

Para tener una referencia de los posibles HAPs presentes en la raíz y hoja de en *Chlorophytum comosum*, primero se inyectó un patrón que contiene 16 Hidrocarburos aromático policíclicos puros (Figura 9). Para la cuantificación de los hidrocarburos HAPS, se relación la concentración patrón de cada HAPs, 2000 µg /mL, con su respectivo pico de absorbancia, así como su tiempo de retención; puesto que la inyección de la muestra fue hecha anualmente hay un corrido en el tiempo (Tabla 4). En este estudio, en total por todas la hojas y raíz de las plantas expuestas al aire urbano e interior se logró identificar 11HAPs, no fue posible identificar 5HAPs; naftaleno, Acenaftileno, Acenafteno, fluoreno y benzo(ghi)perileno. Delos cuales, la plana expuesta al aire urbano por medio de un análisis apreciativo, se puedo identificar 11HAPs, en contra posición la plata expuesta al aire del espacio interior de la biblioteca, se puedo identificar el menor número, 3HAPs extraídos con la mezcla solvente 1:1 (diclorometano: hexano) en la hoja y raíz.

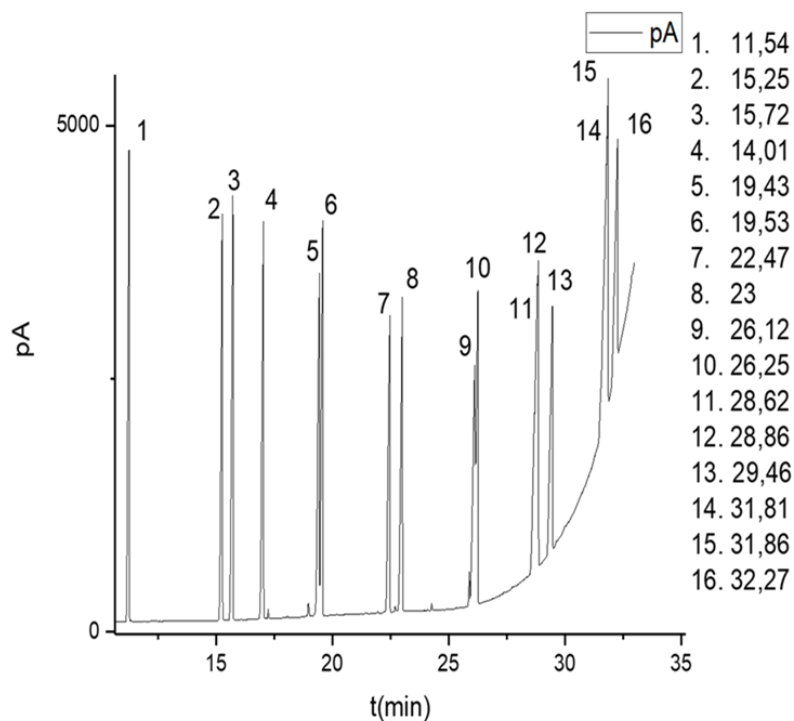


Fig. 12. Perfil cromatográfico de los 16 HAPs considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA).

Tabla 4. Tiempo de retención y absorbancia del patrón de 16 hidrocarburos de Restek (catálogo # 31011 US EPA Method 610 PAH Mixture).

HAPS	TIEMPO DE RENTENCIÓN DEL ANALITO	CONCENTRACIÓN DE MUESTRA PATRON ($\mu\text{g} / \text{mL}$)	pA
NAPHTHALENE	11,54	2000	4763
ACENAPHTHYLENE	15,25	2000	4113
ACENAPHTHENE	15,72	2000	4294
FLUORENE	14,01	2000	4046
PHENANTHRENE	19,43	2000	3533
ANTHRACENE	19,53	2000	4068
FLUORANTHENE	22,47	2000	3109
PYRENE	23	2000	3328
BENZO(A)ANTHRACENE	26,12	2000	2612
CHRYSENE	26,25	2000	3383

BENZO(B)FLUORANTHENE	28,62	2000	3519
BENZO(K)FLUORANTHENE	28,86	2000	3666
BENZO(A)PYRENE	29,46	2000	3216
INDENO(1,2,3-CD)PYRENE	31,81	2000	5043
DIBENZO(A,H)ANTHRACENE	31,86	2000	5461
BENZO(GHI)PERYLENE	32,27	2000	4867

En la tabla No 4 se presente los posibles HAPs presentes en *Chlorophytum comosum*, identificados en un análisis apreciativo, basados en los tiempos de retención de los picos reportados en los cromatogramas de la columna y los picos observados en los cromatogramas de cada fracción.

Tabla 5. Comparación de presencia y ausencia de *Chlorophytum comosum* a diferentes condiciones.

16 HAPs considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por (USEPA).	Control				Aire Exterior				Aire Interior											
					Jardinera				Biblioteca				Laboratorio				Oficina			
	Mezcla		Acetona		Mezcla		Acetona		Mezcla		Acetona		Mezcla		Acetona		Mezcla		Acetona	
	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz
<i>Naftaleno</i>								x												
<i>Acenaftileno</i>																				
<i>Acenafteno</i>																				
<i>Fluoreno</i>																				
<i>Fenantreno</i>								x												
<i>Antraceno</i>								x												
<i>Fluoranteno</i>							x	x				x		x	x	x	x	x	x	x

<i>Pireno</i>					x	x	x	x				x		x	x	x	x	x	x	x
<i>Benzo (A) Antraceno</i>					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
<i>Criseno</i>					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
<i>Benzo (B) Fluoranteno</i>					x	x	x	x					x	x	x	x	x		x	
<i>Benzo (K) Fluoranteno</i>					x	x		x					x	x	x	x	x		x	
<i>Benzo (A) Pireno</i>					x	x		x	x	x	x	x	x	x			x		x	x
<i>Indeno (1,2,3-Cd) Pireno</i>					x	x	x	x												
<i>Dibenzo (A, H) Antraceno</i>					x	x	x	x												
<i>Benzo (Ghi) Perileno</i>																				

En la raíz y hoja de la planta control no se ha identificado ningún de los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), extraídos con la mezcla solvente 1:1 (diclorometano: hexano) (Figura 10A, 10B) y la acetona (Figura 11A, 11B).

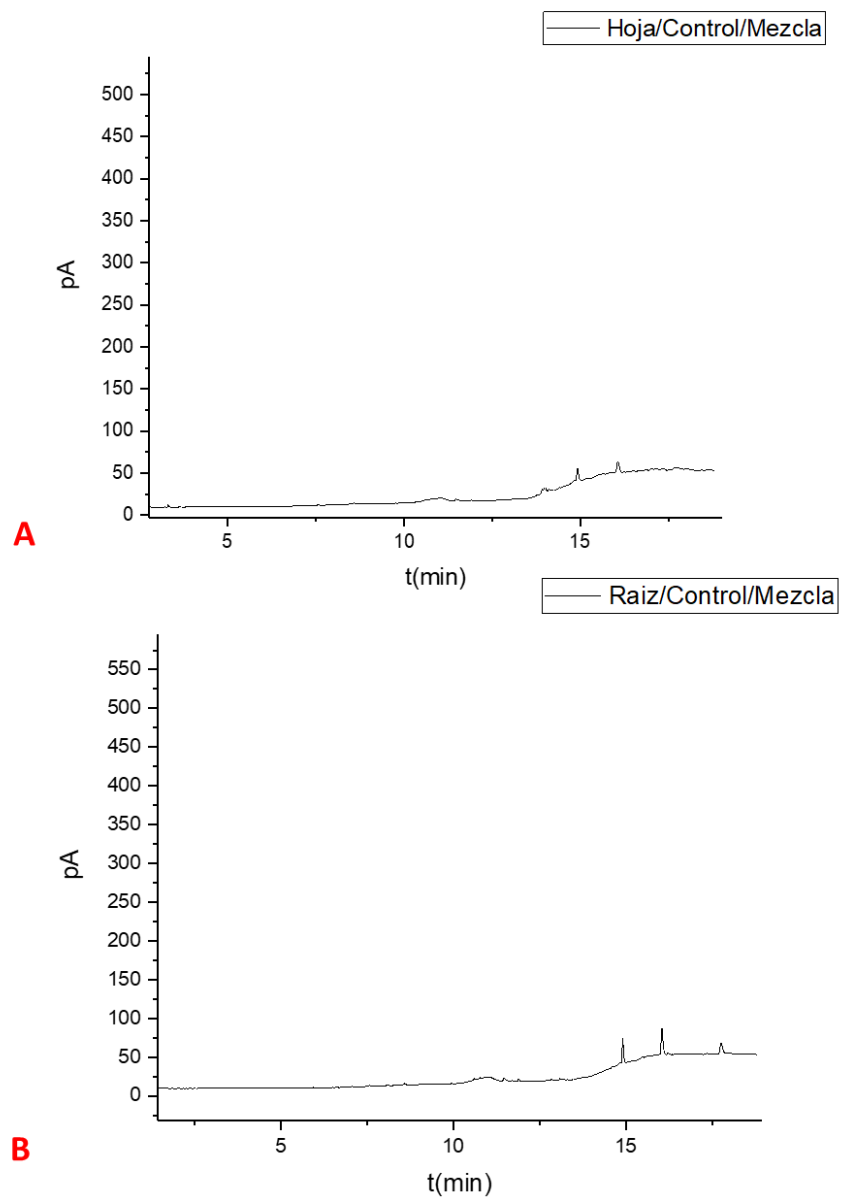


Fig. 13. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta control. Solvente de extracción, mezcla 1:1 (diclorometano: hexano). A). Hoja. B). Raíz.

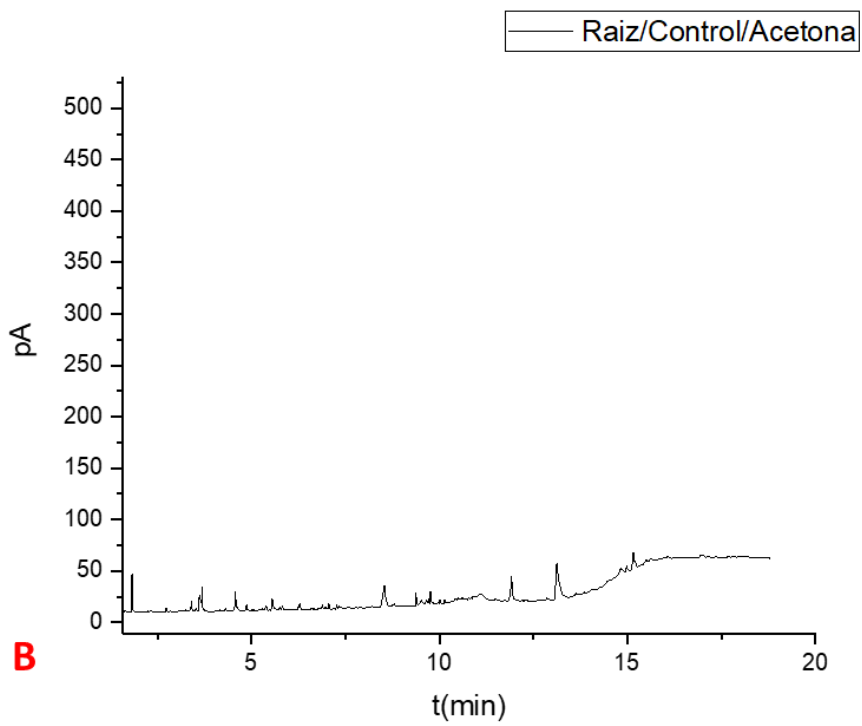
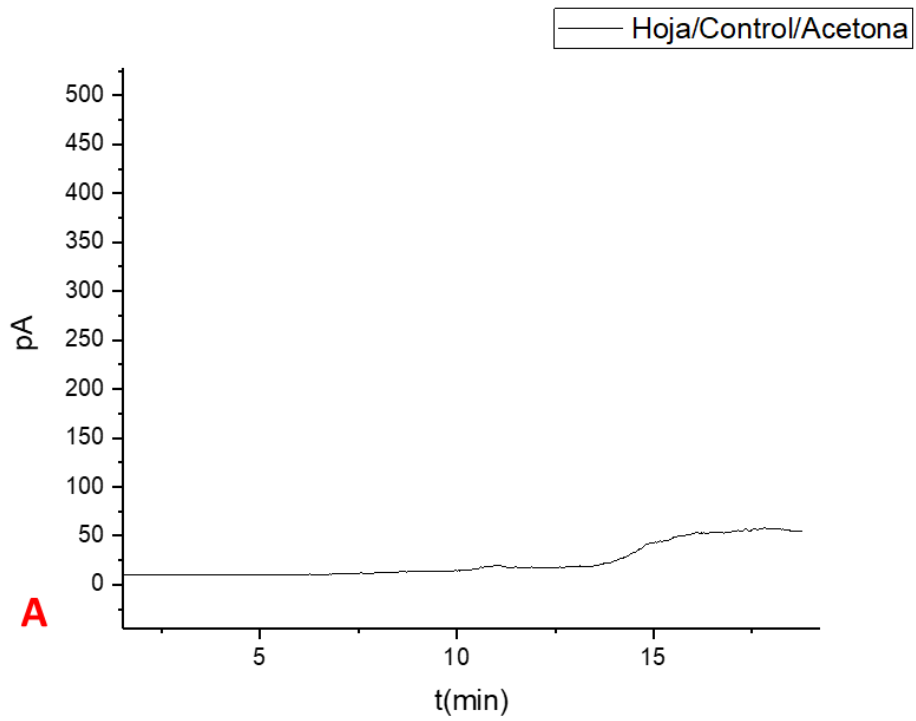


Fig. 14. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta control. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B). Raíz.

De los 16 HAPs considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por (USEPA) en la planta ubicada en la jardinera del edificio Jorge Gaitán Duran, se pudo detectar la mayor acumulación de HAPS de todas las plantas, en total 11HAPs se identificó en la raíz de la planta, asimismo 8 HAPs de en la hoja de la planta. Los HAPs, extraídos con la mezcla diclorometano-hexano son iguales tanto en la hoja como en la raíz de la planta (Tabla 6). Se identificó, pireno, la mezcla benzo (a) antraceno/ criseño, mezcla de benzo (b) fluoranteno/ benzo (k) fluoranteno, benzo (a) pireno y la mezcla de indeno (1,2,3-cd) pireno/dibenzo (a, h) antraceno (Figura 12A, 12B).

Los HAPs encontrados en la hoja planta ubicada en la jardinera del edificio Jorge Gaitán Duran (Tabla 6), extraídos con acetona son, pireno, mezcla de benzo(a)antraceno/criseño, mezcla de benzo (b) fluoranteno/ benzo(k)fluoranteno, benzo (a) pireno y la mezcla de indeno (1,2,3-cd) pireno/dibenzo(a, h)antraceno (Figura 13A). En la raíz se encontró los siguientes HAPs, Naftaleno, mezcla de fenantreno/antraceno, mezcla de fluoranteno/pireno, mezcla de benzo(a)antraceno/criseño, mezcla de benzo(b)fluoranteno/benzo (k) fluoranteno, benzo (a)pireno y la mezcla de indeno(1,2,3-cd)pireno/dibenzo (a, h) antraceno(Figura13B).

Tabla 6. Hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados en la jardinera del edificio Jorge Gaitán Dura mediante el uso *Chlorophytum comosum*.

HAPs	JARDINERA			
	Mezcla		Acetona	
	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz
	(µg / mL)			
NAFTALENO	-----	-----	-----	508
FENANTRENO, ANTRACENO	-----	-----	-----	213
PIRENO	192	191	215	825
BENZO (A) ANTRACENO, CRISEO	667	694	1060	362
BENZO (B) FLUORANTENO, BENZO (K) FLUORANTENO	219	212	565	206
BENZO (A) PIRENO,	315	316	455	203
INDENO (1,2,3-CD) PIRENO, DIBENZO (A, H) ANTRACENO	350	350	400	331

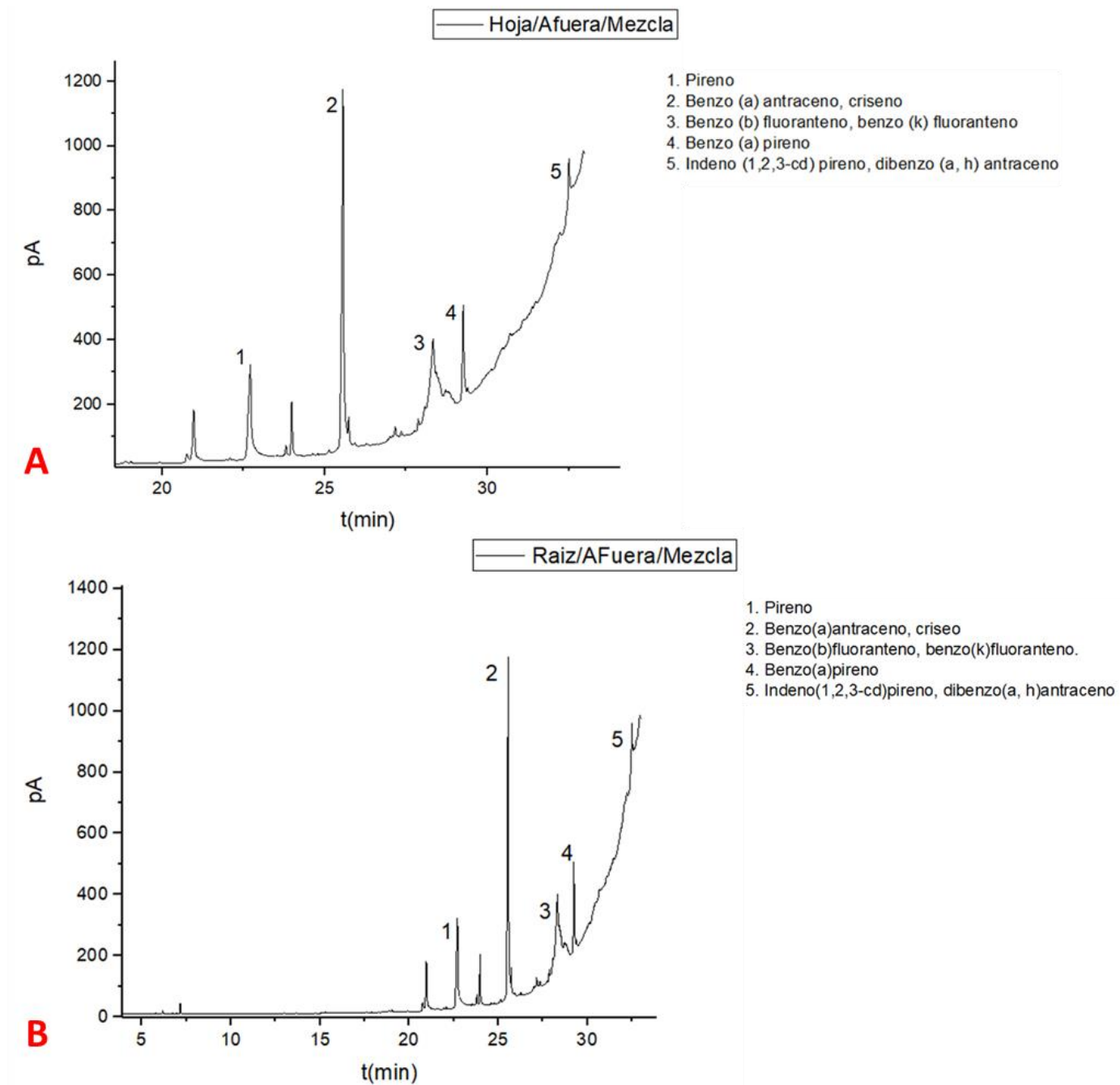


Fig. 15. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en la jardinera del edificio Jorge Gaitán, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, mezcla diclorometano-hexano (1-1). A). Hoja. B). Raíz.

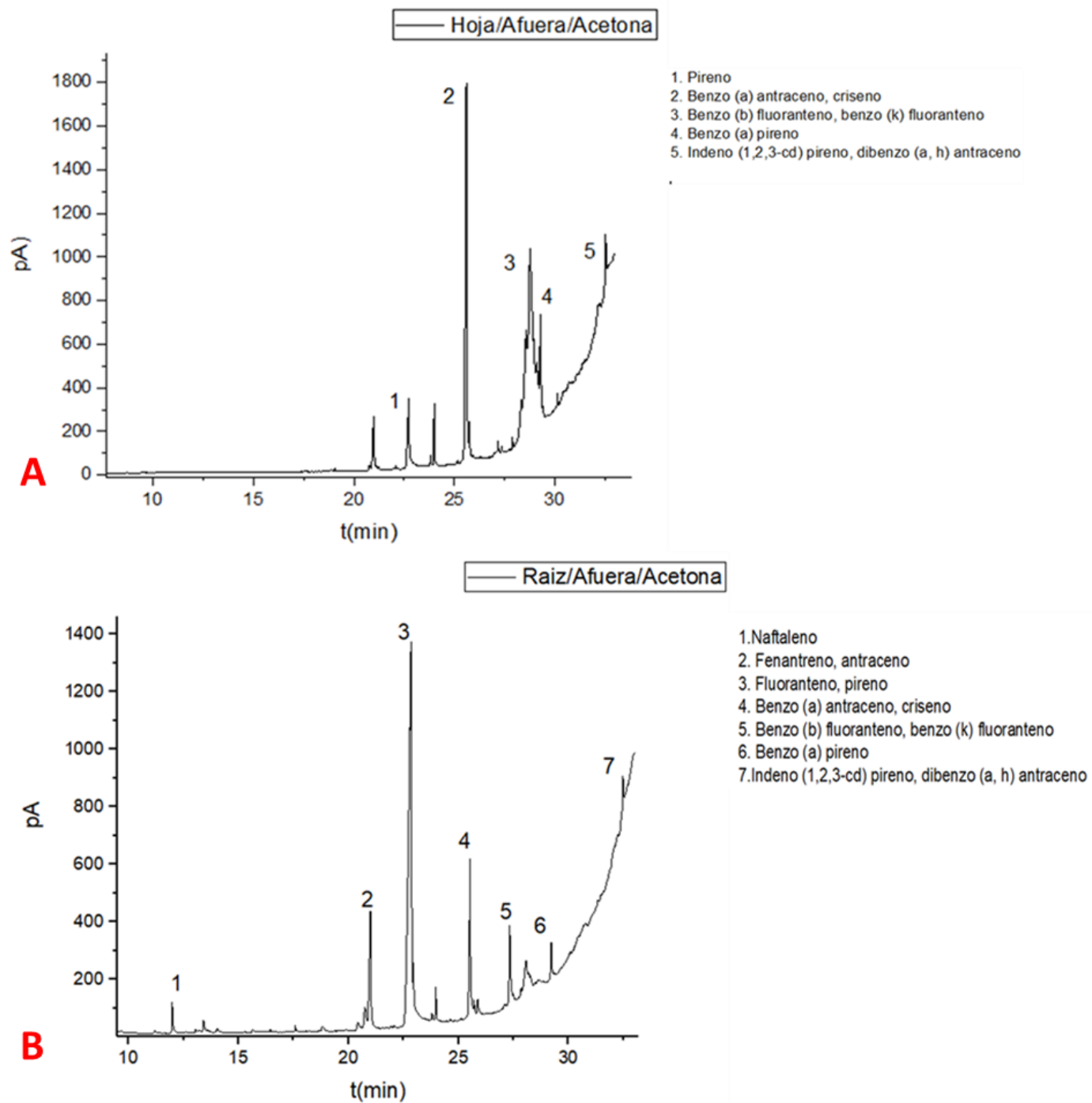


Fig. 16. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en la jardinera del edificio Jorge Gaitán, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B). Raíz.

De los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) en la planta ubicada biblioteca José Rafael Farías del campus principal de la Universidad de Pamplona, se identificó en la hoja y raíz 5HAPs (Tabla 7). Los siguientes hidrocarburos, extraídos con la mezcla diclorometano-hexano (1:1); mezcla de benzo(a)antraceno/criseno y benzo (a) pireno (Figura 14A, 14B). Los HAPs extraídos con acetona, para la hoja son encontrados la mezcla benzo(a)antraceno/criseno y benzo(a)pireno (Figura 14A). En la raíz se identificó la mezcla fluoranteno/pireno, mezcla benzo (a) antraceno/criseno y benzo(a)pireno (Figura 15B)

Tabla 7 Hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados en la biblioteca mediante el uso *Chlorophytum comosum* en ubicada

HAPs	BIBLIOTECA			
	Mezcla		Acetona	
	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz
	(µg / mL)			
BENZO (A) ANTRACENO, CRISEO	537	1112	621	1386
BENZO (A) PIRENO,	563	914	824	889

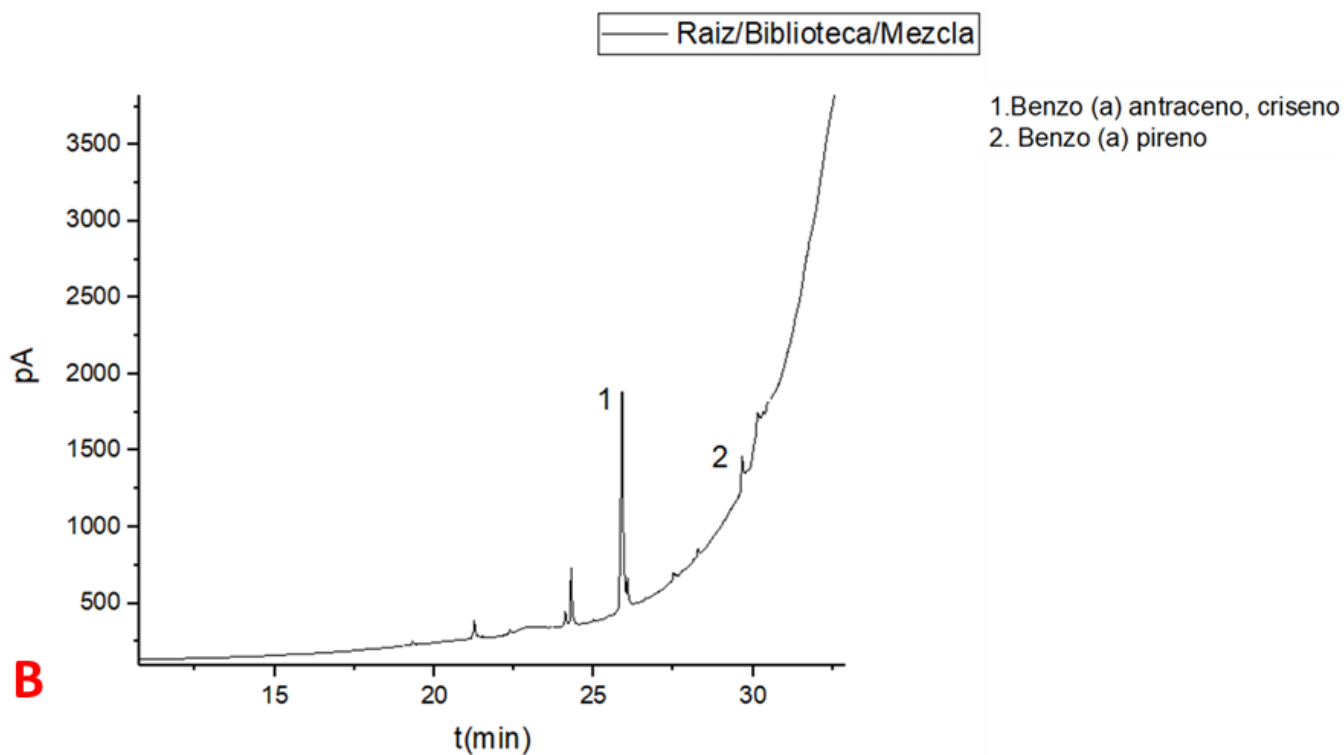
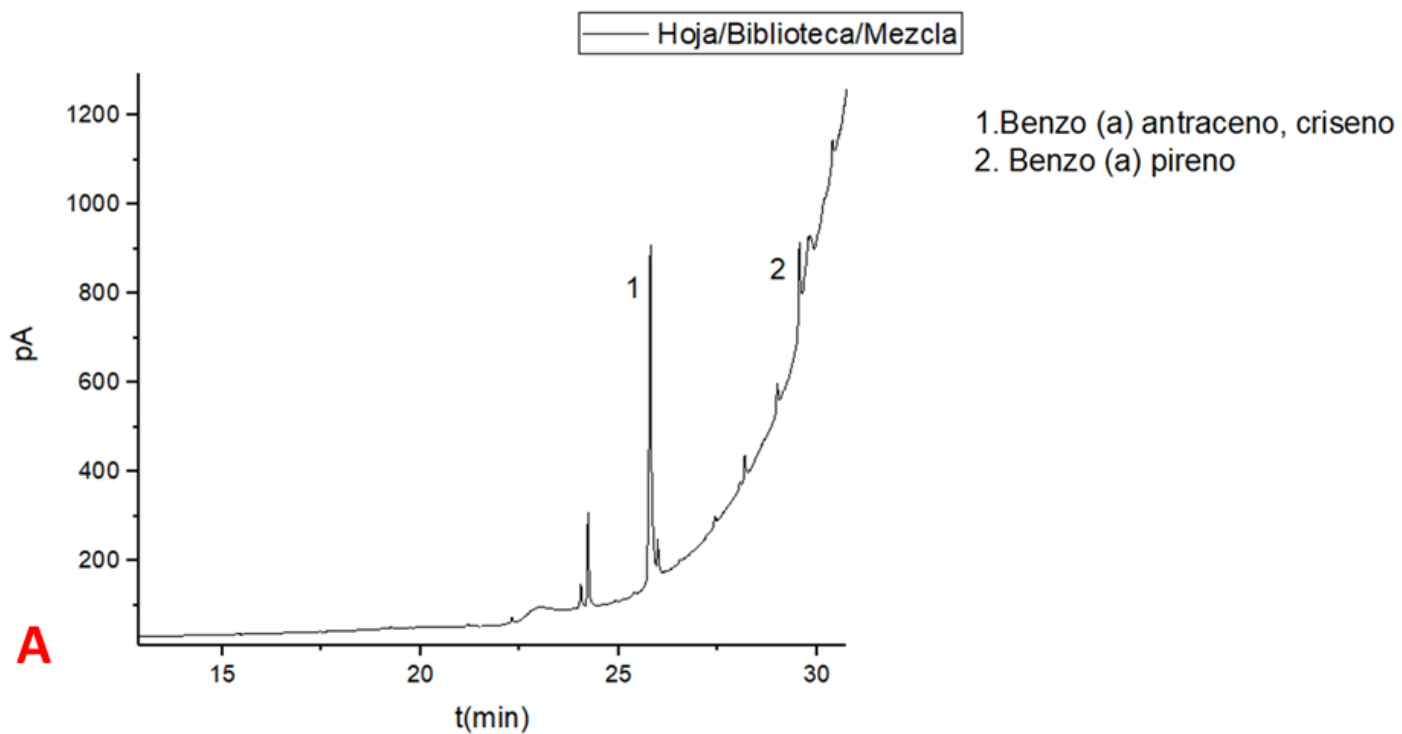


Fig. 17. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en la biblioteca José Rafael Farías, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, mezcla diclorometano-hexano (1:1). A). Hoja. B). Raíz.

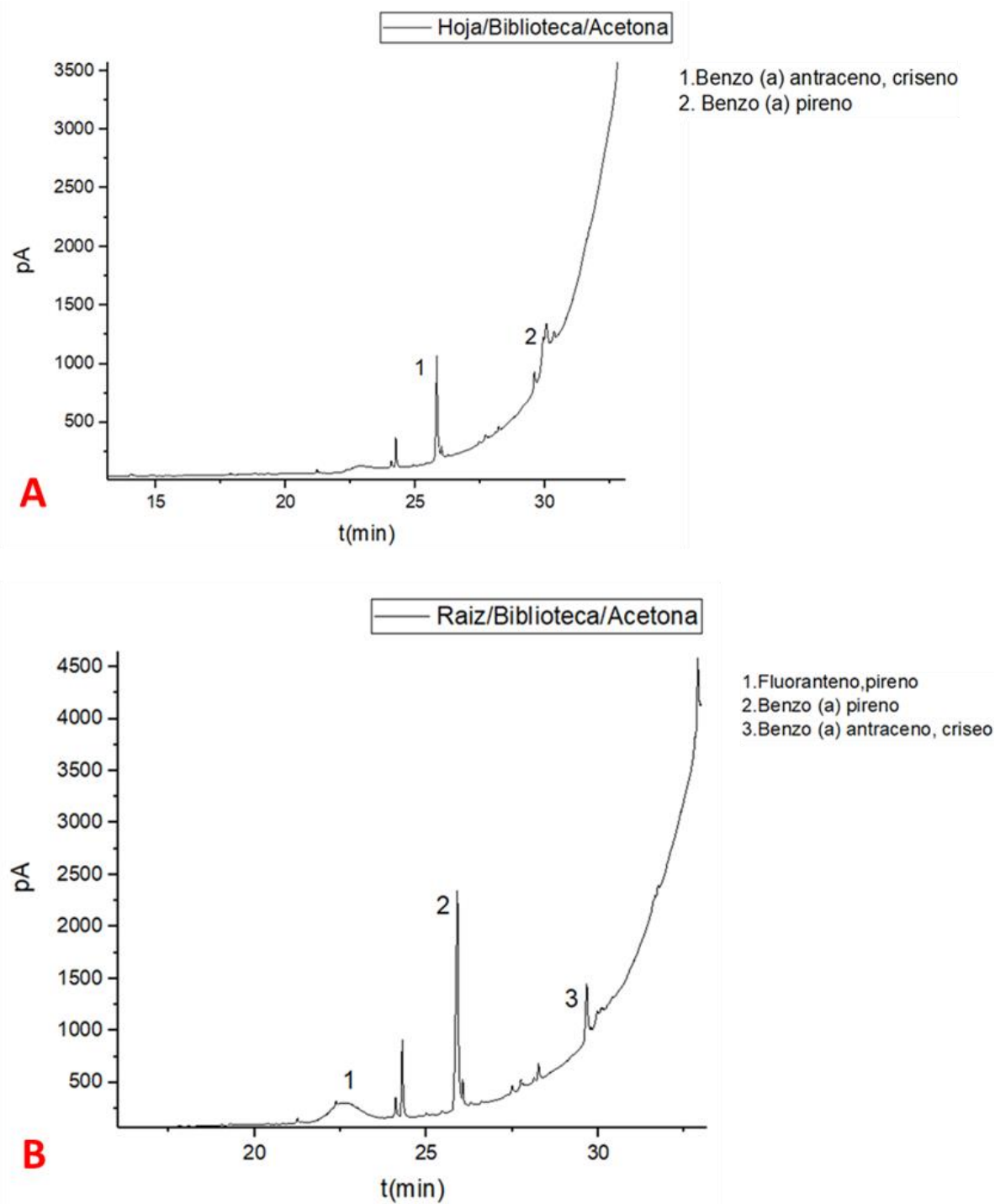


Fig. 18. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en la biblioteca José Rafael Farías, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B) Raíz.

De los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) en la planta colocada en el laboratorio de control de calidad del edificio Francisco José De Caldas del campus principal de la Universidad de Pamplona, se identificó con 7HAPs (Tabla 8). La extracción realizada con la mezcla diclorometano-hexano (1:1) son; mezcla de benzo(a)antraceno/criseno, mezcla de benzo(b)fluoranteno/benzo(k)fluoranteno y benzo(a)pireno (Figura16A). En la raíz se identificó fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo (b) fluoranteno, benzo (k) fluoranteno y benzo(a)pireno (Figura16B). Los HAPs extraídos con acetona, para la hoja y raíz son; fluoranteno, pireno, benzo (a) antraceno, criseno y benzo (a) pireno (Figura 17A, 17B).

Tabla 8. Hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados en el laboratorio de control de calidad, mediante el uso *Chlorophytum comosum*.

HAPs	Laboratorio			
	Mezcla		Acetona	
	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz
	(µg / mL)			
Fluoranteno, pireno	171	-----	-----	169
benzo (a) antraceno, criseno	526	533	802	581
benzo (b) fluoranteno, benzo (k) fluoranteno	326	249	1913	244
benzo (a) pireno,	570	573	1531	566

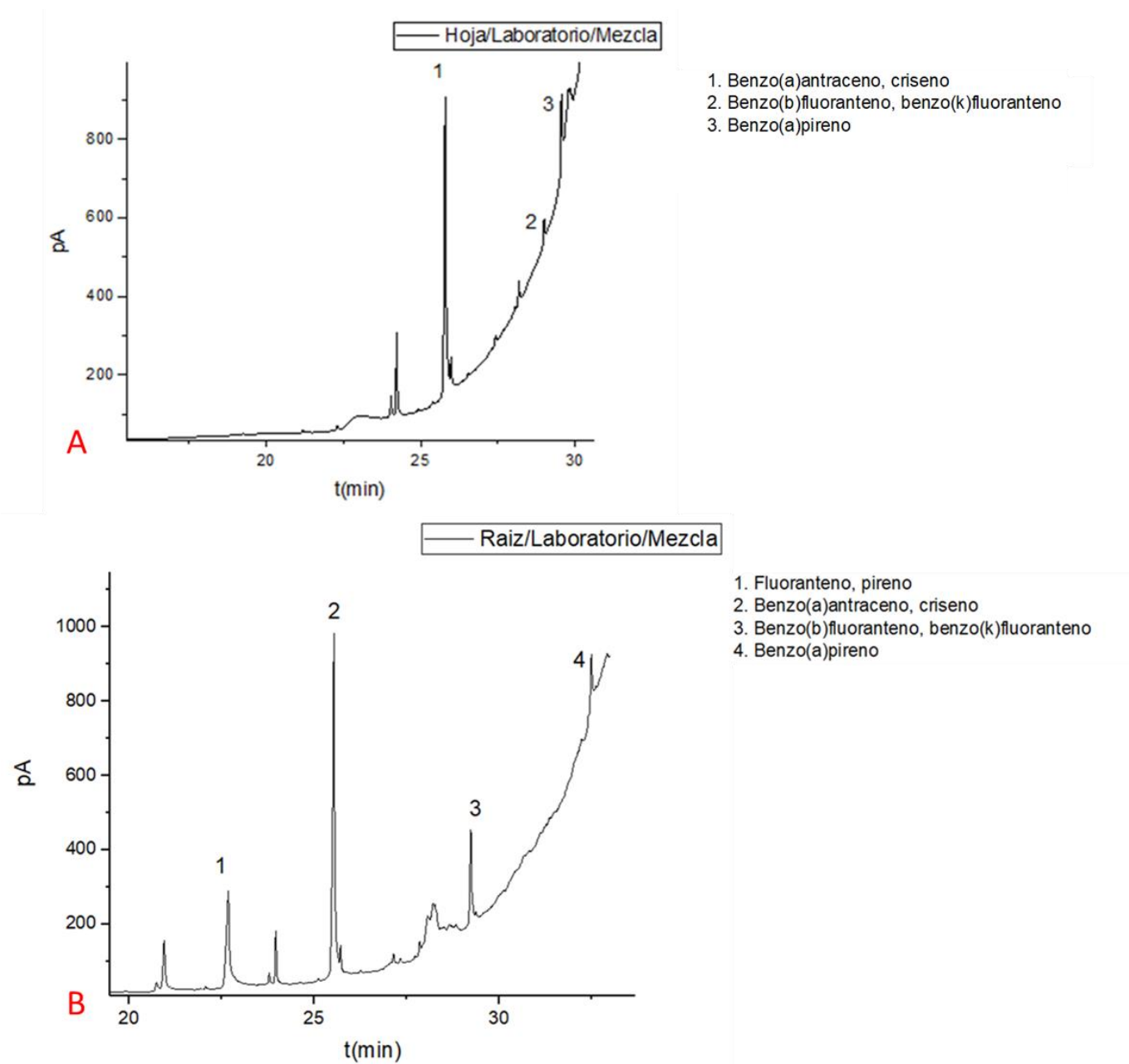


Fig. 19. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en el laboratorio de control de calidad del edificio Francisco José De Caldas, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, la mezcla diclorometano-hexano (1:1). A). Hoja. B) Raíz.

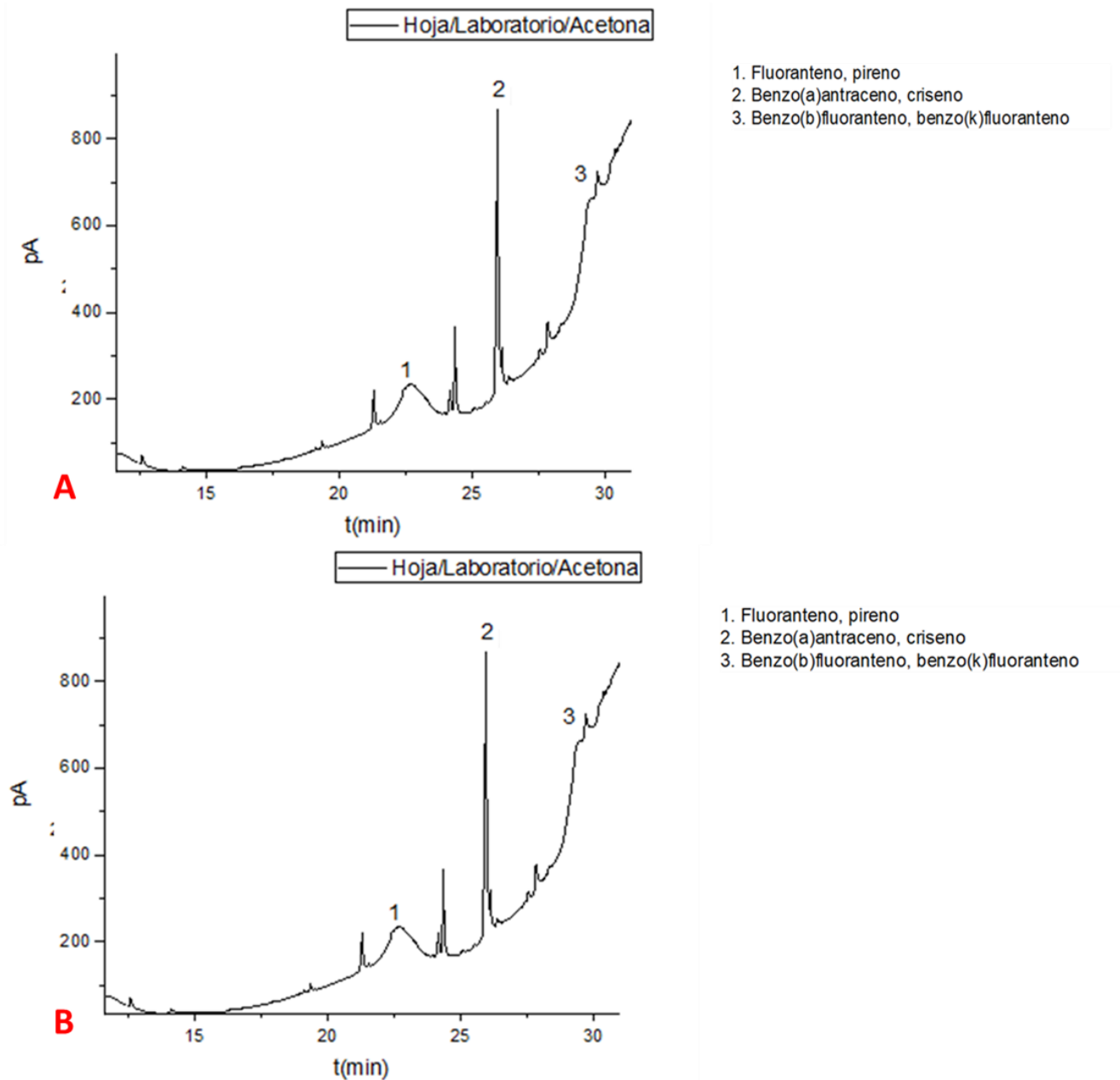


Fig. 20. Perfil cromatográfico de los HAPs presentes en la planta ubicada en el laboratorio de control de calidad del edificio Francisco José De Caldas, campus principal en la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B) Raíz.

De los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) en la planta colocada en la oficina de facultad de Ciencias Básicas en el edificio Francisco José De Caldas del campus principal de la Universidad de Pamplona, se identificó 7HAPs (Tabla 9). En la hoja se encontraron los siguientes hidrocarburos, extraídos la mezcla diclorometano-hexano (1:1) son, mezcla de fluoranteno/pireno, mezcla de benzo(a)antraceno/criseno, mezcla de benzo(b)fluoranteno/benzo(k)fluoranteno y benzo(a)pireno (Figura 18A). En la raíz se identificó la mezcla de fluoranteno/pireno. Con el solvente acetona, en la hoja se halló los siguientes HAPs, mezcla de fluoranteno/pireno, mezcla de benzo(a)antraceno/criseno, mezcla de benzo(b)fluoranteno/benzo (k) fluoranteno y benzo(a)pireno (Figura 19A). En la raíz se identificó los HAPs, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno (Figura 19B).

Tabla 9. Hidrocarburos aromáticos policíclicos identificados en la oficina de Facultad de Ciencias Básicas, el uso *Chlorophytum comosum*.

HAPs	Oficina			
	Mezcla		Acetona	
	Hoja	Raíz	Hoja	Raíz
	(µg / mL)			
Fluoranteno, pireno	350	432	434	182
benzo (a) antraceno, criseno	246	-----	109	291
benzo (b) fluoranteno, benzo (k) fluoranteno	139	-----	120	246
benzo (a) pireno,	279	-----	271	-----

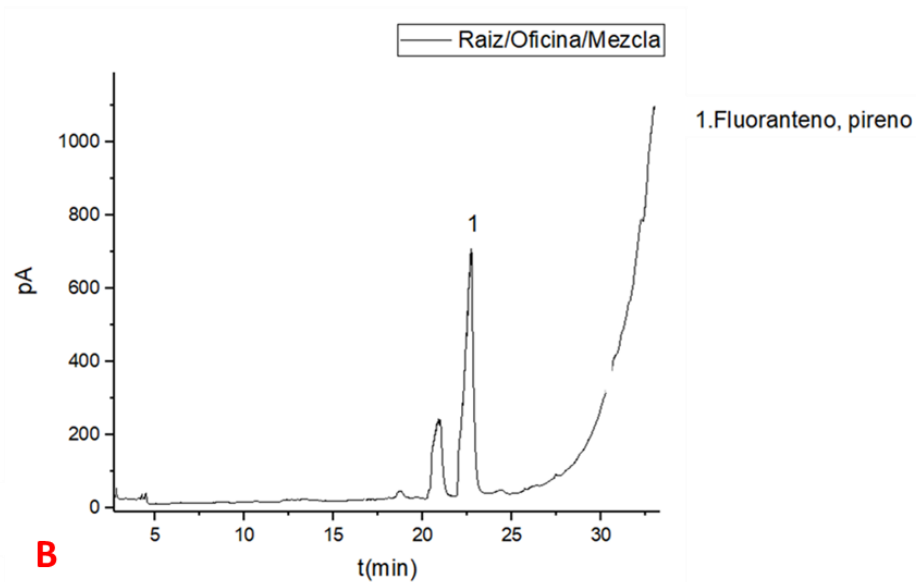
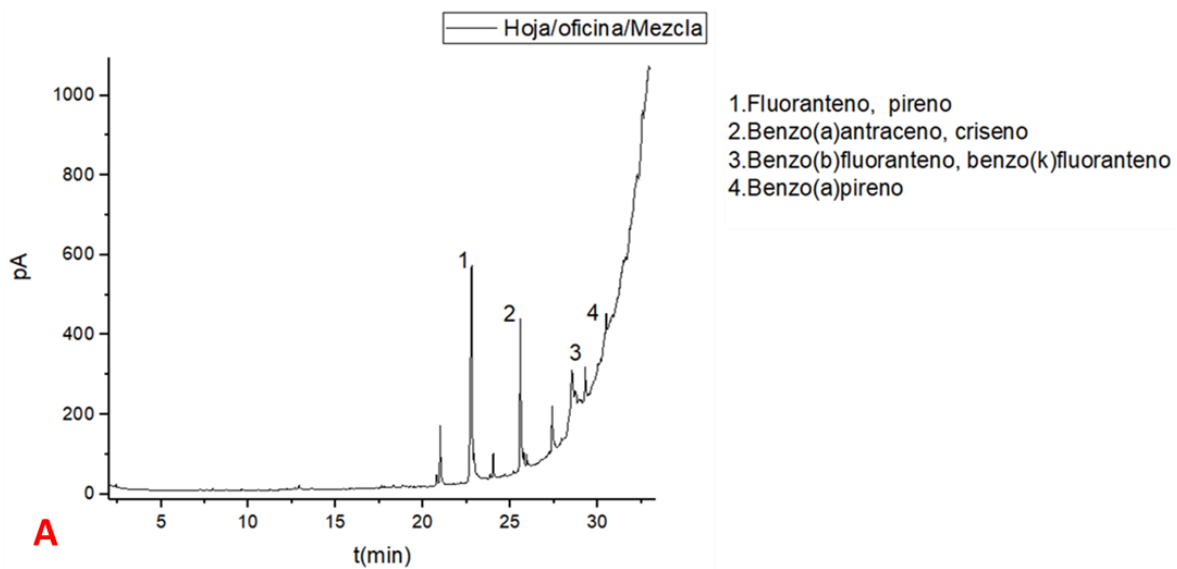


Fig. 21. Perfil cromatográfico de los HAPs de la planta ubicada en la oficina de facultad de Ciencias Básicas del edificio Francisco José De Caldas, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, mezcla diclorometano-hexano (1:1). A). Hoja. B) Raíz.

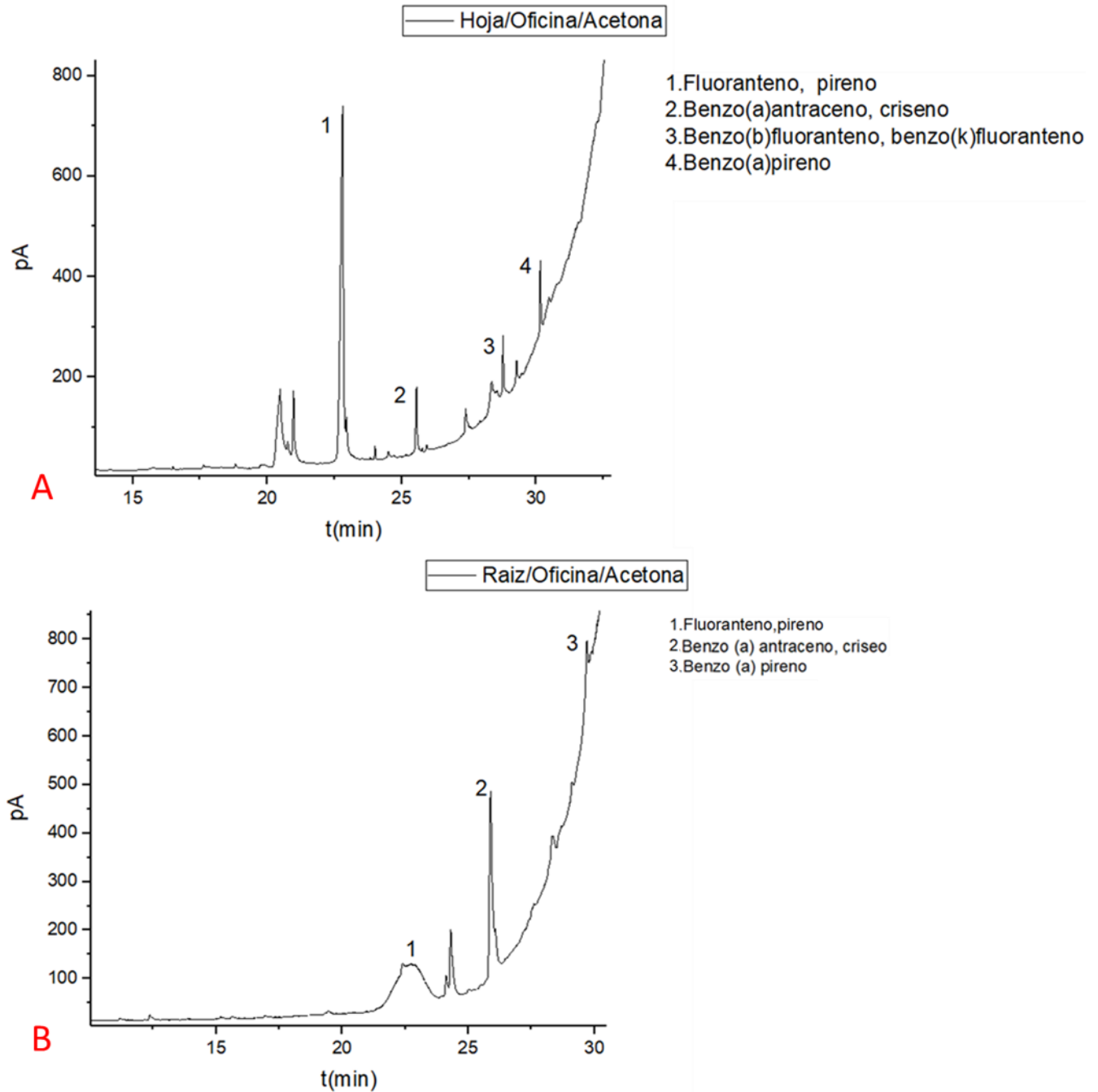


Fig. 22. Perfil cromatográfico de los HAPs de la planta ubicada en la oficina de facultad de Ciencias Básicas del edificio Francisco José De Caldas, campus principal de la Universidad de Pamplona. Solvente de extracción, acetona. A). Hoja. B) Raíz.

4.2 Identificación de metales pesados en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* expuesta al aire de espacios interiores.

Se realizó una curva de calibración de cada metal estudiado, para determinar la concentración de los metales en las muestras de la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* expuesta al aire de espacios interiores y aire urbano. Con la ecuación de la curva de la calibración de cada metal, se calculó el valor aceptable de Absorbancia para cada patrón, seguidamente se calculó el valor absoluto y el valor relativo de cada uno. De acuerdo con la absorbancia obtenida para cada concentración patrón del metal se determinó la concentración del blanco y la muestra presente en la planta. Se realizó la diferencia de estas dos concentraciones obtenidas, para determinar el valor real de la concentración del metal presente en cada muestra

En la tabla No 10 se muestra la concentración de los metales hallados en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* expuesta al aire de espacios interiores y exteriores se han hallado los siguientes metales pesados. Como se observa en la tabla 10, los metales presentes en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* expuesta al aire urbano del parque principal Águeda Gallardo (Figura 7E) son Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. Por otra parte, los metales hallados en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* expuesta al aire de espacios interiores de la oficina de facultad de Ciencias Básicas y laboratorio de control de calidad en la Universidad de Pamplona (Figura 7A, 7C) son Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. No se detectó Cr en la oficina

Tabla 10. Concentración de los metales hallados en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* expuesta al aire de espacios interiores y exteriores.

	<i>Aire urbano</i>	<i>Aire interior</i>	
	Parque	Oficina	Laboratorio
<i>Metal</i>	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
<i>Cr</i>	0,0666	-----	0,0666
<i>Cu</i>	0,1532	0,1813	0,3209
<i>Fe</i>	13,6308	5,5211	13,8252
<i>Mn</i>	2,5453	0,8597	1,1147
<i>Pb</i>	0,1239	0,0947	0,1006
<i>Zn</i>	1,4774	1,8036	1,7861

5 DISCUSIÓN

Este estudio permitió confirmar que los contaminantes del aire exterior en la ciudad de Pamplona, provenientes de la combustión vehicular están presentes en el aire de los espacios interiores, de la Universidad de Pamplona. Esta metodología determinó que la identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y metales pesados en *Chlorophytum comosum* provenientes de las actividades industriales y de las emisiones vehiculares

5.1 Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en *Chlorophytum comosum* expuesta al aire de espacios interiores.

Los 11 HAPs identificados (fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo (a) antraceno, criseno, benzo (b) fluoranteno, benzo (k) fluoranteno, benzo (a) pireno, indeno (1,2,3-cd) pireno, dibenzo(a, h) antraceno) en la hoja y raíz de *Chlorophytum comosum* fueron igualmente identificados por Quijano et al. (2014) dentro de 13 HPAs presentes en el PM_{2.5} del aire de Pamplona; hallaron benzo(c)fluoreno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(a)pireno, dibenzo(a,h)pireno, criseno, benzo(k)fluoranteno, 5 metil criseno, benzo(j)fluoranteno, indeno(1,2,3,cd)pireno, dibenzo(a,h)antraceno y benzo(g,h,i)perileno(Tabla 11).

Tabla 11. Comparación de metales pesados hallados en el PM_{2.5} de Cúcuta, pamplona y la lámina foliar de *Tilia cordata*.(X) presencia; (-----) ausencia.

HAPs	<i>Chlorophytum comosum</i>	PM _{2,5} Pamplona	PM _{2,5} Cúcuta	<i>Tilia cordata</i>
Naftaleno	X	X	X	-----
Acenaftileno	-----	-----	-----	-----
Acenaftileno	-----	-----	X	-----
Fluoreno	-----	X	X	X
Fenantreno	X	X	X	X
Antraceno	X	X	-----	X
Fluoranteno	X	X	-----	X
Pireno	X	X	-----	X
Benzo(A)Antraceno	X	X	X	X
Criseno	X	X	X	X
Benzo(B)Fluoranteno	X	X	X	X
Benzo(K)Fluoranteno	X	X	X	X
Benzo (A) Pireno	X	X	X	X
Indeno(1,2,3-Cd)pireno	X	X	X	X
Dibenzo(A, H)Antraceno	X	X	X	X
Benzo (Ghi) Perileno	X	X	X	X

De igual modo, en las áreas urbanas de Colombia se han reportados en el aire atmosférico urbano los mismos HAPs, en ese sentido, Pachón et al. (2008), identifico en el PM₁₀ del aire de la zona metropolitana de Bogotá, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(ghi) perileno e Indeno(1,2,3-cd) pireno. Según con Mastandrea et al. (2005) los HAPs que representan un mayor riesgo para la salud pública, se destaca el benzo(a)pireno, dibenzo (a, h) antraceno, benzo(b)fluoranteno por ser considerados como los más potentes carcinógenos en humanos

En cuanto a que no fue posible identificar HAPs en la muestra control, de acuerdo Dzierzanowski et al. (2011) este se debe al origen antropogénico del HAPs, la cual requiere que la planta sea sometida a una exposición directa y prolongada para su acumulación en las ceras epicuticulares, puesto que el contaminante se encuentran libres y suspendidas en el aire, a su vez Popek, et al. (2015) indican la necesidad de la planta por estar cerca a la fuente de emisión de contaminantes, en este caso de tráfico vehicular. Por lo cual, al ser la planta control, un espécimen joven y obtenido de un lugar alejado de fuentes de contaminación, se infiere que por ello no presento HAPs en sus hojas y raíces.

La planta que presento un mayor número de HAPs, fue la planta expuesta al aire exterior, esto es debido a que la acumulación del HAPs requiere de movimiento de aire turbulentos para su deposición en las hojas (Gawronski, et al., 2017). La lluvia también aumenta la acumulación de HAPs, puesto que estas son removidas del aire y son depositadas en ceras epicuticulares de la hoja (Gawrońska & Bakera, 2015). Por otro lado, Sun et al. (2014) establece el rol de la lluvia como un factor importante en la acumulación de HAPs en las raíces y la hoja, ya que las partículas grandes (10-100 µm de diámetro) que se encuentran en las superficies de las hojas son lavadas fácilmente durante la lluvia, migrando y acumulándose en la raíz; por ello, también la raíz de la planta expuesta al aire exterior presento el mayor número de HAPs identificados.

Las plantas expuestas al aire de espacios interiores presentaron el menor números de HAPs identificados, lo anterior no quiere decir que el aire en los espacios interiores presente menor contaminación que al aire urbano, de acuerdo con Wolverton (2008), es posibles que los niveles de contaminación del aire en el interior, estén diez veces más alto, a comparación del aire urbano y en el caso de algunas sustancias nocivas, sus concentraciones pueden incluso exceder las normas permitidas hasta cien veces. Brody (2001) informó que las concentraciones en interiores de algunos productos químicos cancerosos están entre 5 e incluso hasta 70 veces más alto que al aire libre. Sin embargo, para Gawronski et al. (2017) Dzierzanowski, et al. (2011) y Irga et al. (2017) la acumulación de HAPs en las ceras epicuticulares de la hoja y en la raíz de *Chlorophytum comosum* involucran, además de una alta concentración contaminante en el aire interior, factores climatológicos como la lluvia y el viento. Por lo cual, en un espacio interior, la planta requiere de un tiempo mayor para poder acumular todos los HAPs presente en el lugar. La presencia de HAPs en la raíz de la planta indican su potencial uso como fitorremediador y bioindicador.

Por otra parte, no se hallaron estudios acerca de los HAPs acumulados por *Chlorophytum comosum*, sin embargo, Popek, et al. (2017) registro los mismo 11HAPs identificados en *Chlorophytum comosum*, dentro de los 12HAPs provenientes de la contaminación del aire de cinco ciudades en Polonia que se acumulan en la hojas de *Tilia cordata*; los HAPs son, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(b)antraceno, benzo(k)antraceno, benzo(a)pireno, dibenzo(a,h)antraceno y benzo(g,h,i)perileno, Indeno(1,2,3-cd) pireno. De manera semejante, Li, et al, (2017) identifco 11HAPs acomulados en la hoja de las especies *Photinia serratifolia*, *Mahonia fortunei* y *Pinus massoniana*, sin embargo no se identificó los hidrocarburos benzo(a)pireno, dibenzo (a, h) antraceno y benzo (g, h,i)perileno.

Asimismo, tampoco hay estudios que indique el uso de por *Chlorophytum comosum* u otro organismo vivo para caracterizar ni cuantificar los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) presente en el aire de espacios interinos. No obstante, Irga, et al. (2017) y Gawrońska & Bakera (2015) implementa a *Chlorophytum comosum* como fitorremediador del material particulado en espacios interiores, sin embargo, estos autores no asocian los contaminantes acumulados por la planta con HAPs. Sin embargo, si hay estudios acerca del uso de plantas para monitorear el aire en áreas urbanas, basados en los contaminantes orgánicos persistentes en la misma vegetación, Lehndorff & Schwark (2004) considera factible y rentable evaluar la calidad del aire a través de la distribución de la 16 HAPs presentes en la aguja del pino, *Pinus sylvestris*. De igual forma Gómez, et al. (2013) usa la especie de líquenes de *Parmotrema sancti-angelii*, para caracterizar y cuantificar 13 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) presentes en el aire de la ciudad de Caracas

5.2 Identificación de metales pesados en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* expuesta al aire de espacios interiores.

Los metales pesados Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn encontrados en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* son los metales pesados provenientes de las actividades industriales y de las emisiones vehiculares; además son los mismos metales pesados relacionados con las contaminaciones urbanas en ciudades de Polonia, acumulados en las hojas de la especie *Tilia cordata* reportados (Popek, et al., 2017). Estos resultados coinciden con metales hallados por Quijano et al. (2010) en el PM_{2,5} presente en el aire de la ciudad de Pamplona (Tabla 12). Por lo cual, las presencias de metales pesados en la raíz de la planta indican su podrían emplearse como fitorremediador y bioindicador.

En las áreas urbanas de Colombia se han reportados en el aire urbano los mismos metales, en sentido, Pachón & Vela (2008) reportaron en la materia orgánica del PM_{1,0} del aire urbano de la ciudad de Bogotá Fe, Pb, Cu, Cr, Zn, Ni, Mn, Cd y Ag (Tabla 12), también en el aire urbano de la ciudad de Cúcuta, Quijano et al. (2014) reporto los metales de Cd, Cr, Pb, Zn y Fe, en la materia orgánica del PM_{2,5}.

Por otro lado, la concentración de los metales de Fe y Cr, mayor y menor respectivamente, encontrados en la lámina foliar de la plata expuesta al aire urbano e interior, podría relacionarse con las concentraciones registrada por Quijano et al. (2010) en el aire de Pamplona, puesto que la concentración del Fe en el aire de Pamplona es alta y en contra posición, la concentración del Cr en el aire se registra como baja.

Tabla 12. Comparación de metales pesados hallados en el PM_{2,5} de Cúcuta, pamplona y la lámina foliar de *Tilia cordata*.(X) presencia; (-----) ausencia.

Metales pesados	<i>Chlorophytum comosum</i>	PM _{2,5} Pamplona	PM _{2,5} Cúcuta	PM _{2,5} Bogota	<i>Tilia cordata</i>
Ca	-----	-----	X		X
Fe	X	X	X	X	X
Pb	X	X	X	X	X
K	-----	X	X	-----	X
Cr	X	X	X	X	X
Zn	X	X	X	X	X
Cd	-----	X	X	-----	X
Mn	X	-----	X	X	X
Ni	-----	X	-----	X	X
Cu	X	X	-----	X	X

Es necesario recalcar que no se han encontrado de reporte de estudios acerca de la acumulación en las hojas de *Chlorophytum comosum* de metales pesados asociados a la contaminación del aire provenientes de fuentes móviles que utilizan el diésel y la gasolina como combustible. Sin embargo, Wang et al. (2011) implemento la planta como mecanismo de reparación para la desintoxicación de suelos contaminado por plomo, sus resultados indicaron la tolerancia de la planta al estrés provocado por el metal plomo.

En cuanto a la presencia de plomo (Pb) en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* colocada en los espacios interiores de la Universidad de Pamplona, ello podría implicar el uso de la planta como organismo vivo para el biomonitoreo del metal; en ese sentido, el uso de organismos vivos para el biomonitoreo del metal del aire no es nuevo, Noriega et al. (2008) implemento el musgo del género *Rhaphidorrhynchium* como indicador de la concentración de plomo en el aire de la ciudad de Quito. La importancia de detectar la disponibilidad del metal en el aire atmosférico en espacios interior, es debido al riesgo que representa el plomo para la salud humana, de acuerdo con Tchounwou et al. (2012) el ingreso del Pb al cuerpo por las vías respiratorias da como resultado patologías medicas como retraso en el desarrollo, cáncer, daño renal, neurotoxicidad y hasta la muerte.

Estudios previos en diferentes especies han demostrado la capacidad de las plantas para la acumulación de metales pesados presentes en la contaminación atmosférica en las áreas urbanas; en este sentido, Popek, et al. (2017) corroboraron con la especie *Tilia cordata* su capacidad de acumular en sus hojas metales pesados como Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sr y Zn presenten en la aire urbano de cinco ciudades en Polonia, de igual modo, sugieren el uso

potencial de *Tilia cordata* como bioindicador y fitorremediador del aire atmosférico urbano. Desde este contexto, se sugiere el uso de *Chlorophytum comosum* como fitorremediador y bioindicador de los contaminantes atmosféricos presente en el aire de espacios interiores.

6 CONCLUSIONES

- Los contaminantes del aire exterior en la ciudad de Pamplona, provenientes de la combustión vehicular están presentes en el aire de los espacios interiores, de la Universidad de Pamplona.
- Las condiciones climáticas podrían jugar un rol importante en la acumulación de HAPs en las ceras epicuticulares de *Chlorophytum comosum*.
- Puede considerarse a *Chlorophytum comosum* para su uso como bioindicador de la calidad del aire atmosférico.
- *Chlorophytum comosum* puede considerarse como un sistema de fitorremediación de contaminación del aire interior, que puede complementar eficazmente las medidas de ingeniería para reducir la contaminación del aire en interiores, y por lo tanto mejorar el bienestar humano.
- Los 11 HAPs prioritarios identificados en *Chlorophytum comosum* podría indicar el uso posible de la planta como organismo vivo en la caracterizar y cuantificar 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) considerados contaminantes atmosféricos prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) presentes en el aire de espacios interiores.
- Los metales pesados Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn encontrados en la lámina foliar de *Chlorophytum comosum* podrían indicar el posible uso como un organismo vivo para el biomonitoreo de metales pesados del aire en espacios interiores
- Los (HAPs) y metales pesados encontrados en los extractos de las plantas *Chlorophytum comosum* analizados coinciden con los encontrados en filtros de equipos utilizados para monitoreo de la calidad del aire de ambientes exteriores de la Universidad de Pamplona en estudios anteriores.

7 Bibliografía

- Fullerton, D. G., Bruce, N. & Gordon, S. B., 2008. Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 102(9), pp. 843-851.
- Pachón, J. E. & Vela, H. S., 2008. Análisis espacio-temporal de la concentración de metales pesados en la localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, Volumen 43, pp. 120-133.
- Pandey, B. K., Vyas, S., Pandey, M. & Gaur, A., 2016. Caracterización de municipal solid waste generated from Bhopal, India. *Current Science Perspectives*, Volumen 2, pp. 52-56.
- Peart, V., 1992. Indoor Air Quality in Florida: Houseplants to Fight Pollution. *Department of Family, Youth and Community Services, Florida Cooperative Extension Service*, Volumen FCS 3208.
- Quijano Parra, A., Quijano Vargas, M. J. & Henao, J. A., 2010. Caracterización físico-química del material particulado-fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 8(1), pp. 53-66.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K. & Sutton, D. J., 2012. Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, clinical and environmental toxicology*, Volumen 101, pp. 133-164.
- Wang, Y., Tao, J. & Dai, J., 2011. Lead tolerance and detoxification mechanism of *Chlorophytum comosum*. *Journal of Biotechnology*, 10(65), pp. 1416-14521.
- Zampolli, S. y otros, 2004. An electronic nose based on solid state sensor arrays for low-cost indoor air quality monitoring applications. *Sensors and Actuators*, Volumen 101, pp. 39-46.
- Arias Martínez, S. A. y otros, 2010. Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador técnico*, Volumen 74, pp. 12-22.
- Bercu, R., 2007. ANATOMICAL ASPECTS OF *CHLOROPHYTUM COMOSUM* (THUNB.) JACQUES „VARIEGATUM” (ANTHERICACEAE). pp. 463-468.
- Brody, J. E., 2001. Another source of air pollution: the home. *The New York Times*, January.
- Brundrett, M. C., 2002. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New phytologist*, 154(2), pp. 275-304.
- Carazo Fernández, L., Fernández Alvarez, R., González Barcala, F. J. & Rodríguez Portal, J. A., 2013. Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Archivos de Bronconeumología*, 49(1), pp. 22-27.

Chithra, V. S. & Nagendra, S., 2013. Chemical and morphological characteristics of indoor and outdoor particulate matter in an urban environment. *Atmospheric Environment*, Volumen 77, pp. 579-587.

Chong, N. S., Sivaramakrishnan, K., Wells, M. & Jones, K., 2002. Characterization of inhalable particulate matter in ambient air by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray analysis. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 1(3), pp. 145-164.

Cornejo, J. J., Muñoz, F. G., Ma, C. Y. & Stewart, A. J., 1999. Studies on the decontamination of air by plants. *Ecotoxicology*. *Ecotoxicology*, 8(4), pp. 311-320.

Costa, P. C. & James, R. W., 1995. Constructive use of vegetation in office buildings. *In Proceedings the plants for people symposium*, Volumen 23, pp. 1-23.

D'Amato, G., Liiccardi G, G., D'Amato, M. & M, Cazzola, M., 2002. Outdoor air pollution, climatic changes and allergic bronchial asthma. *Eur Respir J*, Volumen 20, pp. 763-776.

Daisey, J. M., Angell, W. J. & Apte, M. G., 2003. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor air*, 13(1), pp. 53-64.

Daisey, J. M., Angell, W. J. & Apte, M. G., 2003. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor air*. *Indoor Air*, 13(1), pp. 53-64.

Dzierżanowski, K. y otros, 2011. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species.. *International Journal of Phytoremediation*, 13(10), pp. 1037-1046.

EEA, 2207. Air pollution in Europe 1990–2004. *Report No 2*.

Farmer, A., 2002. Effects of particulates. *Air pollution and plant life*, Volumen 2, p. 187–199.

Gavidia, Gavidia, T., Proncuk, J. & Sly, P. D., 2009. Impactos ambientales sobre la salud respiratoria de los niños: Carga global de las enfermedades respiratorias pediátricas ligada al ambiente.. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 25(2), pp. 99-108.

Gawrońska, H. & Bakera, B., 2015. Phytoremediation of particulate matter from indoor air by *Chlorophytum comosum* L. plants.. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(3), pp. 265-272.

Gawronski, S. W. y otros, 2017. Plants in Air Phytoremediation. *Advances in Botanical Research*, Volumen 83, pp. 319-346.

Giese, M. y otros, 1994. Detoxification of formaldehyde by the spider plant (*Chlorophytum comosum*) and by soybean (*Glycine max* L.) cell-suspension culture.. *Plant Physiol*, Volumen 104, p. 1301–1309.

- Giese, M., Doranth, U. B., Langebartels, C. & H. Sandermann, J., 1994. Detoxification of formaldehyde by the spider plant (*Chlorophytum comosum* L.) and by soybean (*Glycine max* L.) cell-suspension cultures.. *Plant Physiology*, 104(4), pp. 1301-1309|.
- Gil, L., Cáceres, D., Quiñones, L. & Adonis, M., 1997. Contaminación del aire en espacios exteriores e interiores en la ciudad de Temuco. *Ciencia y ambiente*, 13(1), pp. 70-78.
- Gómez, H. y otros, 2013. Líquenes como biomonitores de la contaminación atmosférica por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). *Revisión. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 28(2), pp. 45-58.
- Guieysse, B. y otros, 2008. Biological treatment of indoor air for VOC removal: Potential and challenges. *Biotechnology Advances*, Volumen 26, pp. 398-410.
- Irga, P. J., Paull, N. J., Abdo, P. & Torpy, F. R., 2017. An assessment of the atmospheric particle removal efficiency of an in-room botanical biofilter system. *Building and Environment*, Volumen 115, pp. 281-290.
- Kaup, H., Blumenstock, M. & McLachlan, M. S., 2002. Retention and mobility of atmospheric particle-associated organic pollutant PCDD/Fs and PAHs in maize leaves. *New Phytologist*, Volumen 148, pp. 443-480.
- Kaushik, N., 2005. Saponins of *Chlorophytum* Species. *Phytochemistry Reviews*, 4(2), pp. 191-196.
- Kleeberger, S. R., 2003. Genetic aspects of susceptibility to air pollution. *Eur Respir J*, Volumen 21, pp. 52-56.
- Kosiba, P., 2008. Variability of morphometric leaf traits in small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) under the influence of air pollution.. *Acta Soc. Bot. Pol*, 77(2), pp. 125-137.
- Lehndorff, E. & Schwark, L., 2004. Biomonitoring of air quality in the Cologne Conurbation using pine needles as a passive sampler—Part II: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH).. *Atmospheric Environment*, 38(23), pp. 3793-3808.
- Li, Q. y otros, 2017. Dependence of Plant Uptake and Diffusion of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Leaf Surface Morphology and Micro-structures of Cuticular Waxes. *Scientific Reports*, Volumen 7, p. 46235.
- Mastandrea, C. y otros, 2005. Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos. *Acta bioquímica clínica latinoamericana*, 39(1), pp. 27-36.
- Meléndez Gélvez, I., Martínez Montañez, M. L. & Quijano Parra, A., 2012. Actividad mutagénica y genotóxica en el material particulado fracción respirable MP2,5 en Pamplona, Norte de Santander, Colombia. *Iatreia*, 25(4), pp. 347-356.
- Molina, 2004. Megacities and atmospheric pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(6), pp. 644-680..

- Noriega, P. y otros, 2008. Estudio de la concentración de cadmio y plomo en el aire de la ciudad de Quito, empleando briofitas como biomonitores.. *La Granja*, 8(2), pp. 17-24.
- Pandey, A. K., Pandey, M. & Tripathi, B. D., 2015. Air Pollution Tolerance Index of climber plant species to develop Vertical Greenery Systems in a polluted tropical city. *Landscape and Urban Planning*, Volumen 144, pp. 119-127.
- Philips, W. S., 1963. Depth of roots in soil. *Ecology*, 44(2), p. 424.
- Popek, R., Gawronska, H. & Gawronski, S. W., 2015. The level of particulate matter on foliage depends on the distance from the source of emission. *International journal of phytoremediation*, 17(12), pp. 1262-1268.
- Popek, R., Łukowski, A., Bates, C. & Oleksyn, J., 2017. Particulate matter, heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons accumulation on the leaves of *Tilia cordata* Mill. in five Polish cities with different level of air pollution.. *International Journal of Phytoremediation*.
- Pough , T., MacKenzie , A. R., Whyatt , J. D. & Hevitt , N., 2012. Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons. *Environ Sci Technol*, Volumen 46, pp. 7692-7699.
- Quijano, M. J., Quijano, A. & Meléndez, I., 2014. Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en el PM_{2.5} del aire de Pamplona-Colombia.. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), pp. 25-33.
- Quintana, N. L. & Olivero Vebel, J., 2008. Fitorremediación: una alternativa para mitigar los procesos de contaminación ambiental.. *Unicarta*, pp. 75-79.
- Saravita, J. y otros, 2013. Particulate matter containing environmentally persistent free radicals and adverse infant respiratory health effects: a review.. *Biochem Mol Toxicol*, Volumen 27, pp. 56-68.
- Schwitzguébel , J. P., 2000. POTENTIAL OF PHYTOREMEDIATION, AN EMERGING GREEN. *Ecosystem Service and Sustainable Watershed Management in North China*, pp. 23-25.
- Shi, J. y otros, 2017. Quantifying the particulate matter accumulation on leaf surfaces of urban plants in Beijing, China. *Atmospheric Pollution Research*, pp. 1-7.
- Silva, R. A., Wes, J. J., Zhang, Y. & Anenberg, S. C., 2013. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change. *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*, 8(3), pp. 1-11.
- Soreanu, G., Michael, D. & Darlington, A., 2013. Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants – A mini-review. *Chemical Engineering Journal*, p. 585–594.

Sorkhoh , N. A. y otros, 2001. ioremediation of volatile oil hydrocarbons by epiphytic bacteria associated with American grass (*Cynodon sp.*) and broad bean (*Vicia faba*) leaves.. *Int Biodeter Biodegrad*, Volumen 65, pp. 797-802.

Springer, M., 2010. Biomonitoring acuático. *Biol. Trop*, 58(4), pp. 53-59.

Sun, F. y otros, 2014. Deposition Velocity of PM_{2.5} in the Winter and Spring above Deciduous and Coniferous Forests in Beijing, China. *PLoS One*, 9(5).

Torpy, F. R., Zavattaro, M. & Irga, P. J., 2016. Green wall technology for the phytoremediation of indoor air: a system for the reduction of high CO₂ concentrations.. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10(5), pp. 1-11.

Torpy, F. R., Irga, P. J. & Burchett, M. D., 2014. Reducing Indoor Air Pollutants Through Biotechnology. *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*, pp. 181-210.

Vidali M., e. a., 2001. Biorremediación. una visión general.. *Química Pura y Aplicada*, 73(7), pp. 1163-1172.

Volk, H. E., Lurmann, F. & Penfold, B., 2013. Traffic-related air pollution, particulate matter, and autism. *JAMA psychiatr*, 70(1), pp. 71-77.

Voutsas , D. & Samara , C., 2002. Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial areas. *Atmos Environ*, Volumen 36, p. 3583–3590.

Wolverton , B. C., 2008. How to grow fresh air—50 houseplants that purify your home or office. *Cathy Meeus (ed) Weidenfeld & Nicolson*, pp. 8-27.

Wolverton , B. C., 2008. How to grow fresh air—50 houseplants that purify your home or office.. *Cathy Meeus (ed) Weidenfeld & Nicolson*, pp. 8-27.

Wolverton, B. C. & Wolverton , J. D., 1993. Plants and soil microorganisms: removal of formaldehyde, xylene and ammonia from the indoor environment. *J Miss Acad Sci*, 38(11), pp. 11-15.

Wood, R. A. y otros, 2006. The Potted-Plant Microcosm Substantially Reduces Indoor Air VOC Pollution: I. Office Field-Study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 175(1), pp. 163-180.

Wood, R. A., 2003. Improving the indoor environment for health, well-being and productivity. Greening Cities: a new urban ecology. . *Australian Technology Park, Sydney*, 30(4).

Wood, R. A. y otros, 2002. Potted-plant/growth media interactions and capacities for removal of volatiles from indoor air. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 77(1), pp. 120-129.

Yang, J., McBride, J., Zhou, J. & Sun, Z., 2005. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening*, 3(2), pp. 65-78.

Yan, J. y otros, 2016. A novel approach for quantifying particulate matter distribution on leaf surface by combining SEM and object-based image analysis. *Remote Sensing of Environment*, Volumen 173, pp. 156-161.