

**ESTUDIO PRELIMINAR EN LA ATMÓSFERA DE LA CIUDAD DE SANTIAGO DE
CALI PARA LA EVALUACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS PERSISTENTES
EMPLEANDO MUESTREADORES PASIVOS DE AIRE CON DISCOS DE ESPUMA
DE POLIURETANO**

ÁNGELA LIZETH ÁLVAREZ JIMÉNEZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2012

**ESTUDIO PRELIMINAR EN LA ATMÓSFERA DE LA CIUDAD DE SANTIAGO DE
CALI PARA LA EVALUACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS PERSISTENTES
EMPLEANDO MUESTREADORES PASIVOS DE AIRE CON DISCOS DE ESPUMA
DE POLIURETANO**

ÁNGELA LIZETH ÁLVAREZ JIMÉNEZ

Trabajo presentado como requisito parcial para optar el título de Químico

Director

Martha Isabel Páez PhD

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2012

Este trabajo lo dedico a mi Dios, pues es una muestra más de su amor y fidelidad, en el cual nunca deje de ver el cumplimiento de sus promesas.

*No temas, tierra,
sino alégrate y regocíjate,
porque el Señor hará grandes cosas.*

Joel 2:21

AGRADECIMIENTOS

- En primer lugar agradezco a Dios por acompañarme y ayudarme en la realización de este proyecto, cumpliendo este sueño en realidad.
- A mis padres por brindarme completamente su apoyo en la realización de mis estudios y permitirme contar con ellos en todo momento, esforzándose siempre para darnos lo mejor a mi hermana y a mí.
- A mi hermana por estar pendiente y tenerme en sus oraciones para el desarrollo de este proyecto, brindándome ánimo y consejos.
- A la profesora Martha Isabel Páez Melo por aceptar y disponerse a ser mi directora tesis y permitirme trabajar en su grupo de investigación GICAMP (Grupo de Investigación de Contaminación Ambiental por Metales y Plaguicidas).
- A Ana María Barbosa por acompañarme durante la carrera y poder contar con su amistad, además por su ayuda en las largas jornadas de trabajo en el laboratorio para el desarrollo experimental de la tesis.
- A Julieth Banguera por disponerse en el inicio de este proyecto a explicarme e introducirme en el tema de los muestreadores de aire.
- Al DAGMA (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente) por su apoyo en el desarrollo del proyecto, en especial al señor Jairo Fernando Copete quien en todo momento estuvo presto a colaborar en las visitas, instalaciones y recolecciones del material.
- A Mauricio Zapata por su ayuda en la instalación de los equipos de aire y en la recolección de las muestras.

- A Karla Pozo por sus explicaciones y ofrecimiento para el análisis de muestras en el laboratorio del Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Siena, Italia.
- A Víctor Hugo Estellano por el procesamiento de datos de las muestras enviadas al laboratorio de Siena, a pesar de sus diferentes ocupaciones.
- A Mario Velasco por la realización y arreglos de material de vidrio.
- A mi gran amiga Norha, un tesoro que Dios me dio durante mi carrera, pues poder contar con su amistad y apoyo fue algo muy valioso para mí, ya que sus cualidades únicas y llena de sinceridad me permitieron ganarme una gran amiga.
- A Isabel Domínguez por su acompañamiento en el tratamiento de las muestras.
- A la Universidad del Valle por permitirme vivir este ciclo en mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE GRÁFICAS	X
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	XII
LISTA DE ANEXOS.....	XIV
RESUMEN.....	XV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. MARCO TEÓRICO.....	4
3.1. PLAGUICIDAS ORGANOCLORADOS	5
3.2. BIFENILOS POLICLORADOS	6
3.3. HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS.....	8
3.4. MUESTREADOR DE AIRE PASIVO	8
3.4.1. <i>Teoría del muestreo de aire pasivo</i>	9
4. METODOLOGÍA	12
4.1. SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	12
4.2. MATERIALES.....	13
4.2.1. <i>Reactivos</i>	13
4.2.2. <i>Instrumentación</i>	14

4.3. MUESTREADORES DE AIRE PASIVO TE-200	14
4.3.1. <i>Muestreadores artesanales pasivos de aire.....</i>	<i>15</i>
4.3.2. <i>Discos de espuma de poliuretano TE-1014</i>	<i>16</i>
4.4. LIMPIEZA Y PREPARACIÓN DE LOS DISCOS DE ESPUMA DE POLIURETANO TE-1014 Y LOS MUESTREADORES DE AIRE PASIVO TE-200 ...	16
4.4.1. <i>Discos de espuma de poliuretano.....</i>	<i>16</i>
4.4.2. <i>Muestreadores pasivos.....</i>	<i>17</i>
4.5. INSTALACIÓN DE LOS MUESTREADORES DE AIRE PASIVO Y DISCOS DE ESPUMA DE POLIURETANO.....	17
4.6. PERÍODOS DE MUESTREO	17
4.7. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	18
4.7.1. <i>Estación Éxito.....</i>	<i>18</i>
4.7.2. <i>Estación ERA</i>	<i>19</i>
4.7.3. <i>Estación URG.....</i>	<i>20</i>
4.7.4. <i>Estación FCNE</i>	<i>22</i>
4.8. RECOLECCIÓN DE DISCOS DE ESPUMA DE POLIURETANO.....	23
4.8.1. <i>Control de calidad de la toma de muestras.....</i>	<i>23</i>
4.9. EXTRACCIÓN DE LOS DISCOS DE ESPUMA DE POLIURETANO RECOLECTADOS.....	24
4.9.1. <i>Control de calidad de la extracción de las muestras de discos PUF</i>	<i>24</i>
4.10. TRATAMIENTO DEL EXTRACTO	24
4.11. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS	25
4.11.1. <i>Muestras de tres meses de exposición.....</i>	<i>25</i>
4.11.2. <i>Muestras de cuatro y cinco meses de exposición</i>	<i>26</i>
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5.1. ANÁLISIS DE MUESTRAS DE TRES MESES DE EXPOSICIÓN.....	28
5.2.1.1. <i>Hexaclorobenceno</i>	<i>32</i>
5.2.1.2. <i>Hexaclorociclohexanos.....</i>	<i>34</i>
5.2.1.3. <i>Clordanos.....</i>	<i>35</i>

5.2.1.4.	<i>Heptacloro y epóxido de heptacloro</i>	<i>36</i>
5.2.1.5.	<i>Endosulfanos</i>	<i>37</i>
5.2.1.6.	<i>Diclorodifeniltricloroetanos</i>	<i>39</i>
5.2.1.7.	<i>Bifenilos policlorados.....</i>	<i>41</i>
5.2.1.8.	<i>Hidrocarburos aromáticos policíclicos</i>	<i>43</i>
5.2.2.	<i>Comparación de las concentraciones de los COP con otros países</i>	<i>45</i>
6.	CONCLUSIONES.....	49
7.	RECOMENDACIONES	51
8.	REFERENCIAS.....	52
	ANEXOS.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura molecular general de los bifenilos policlorados.....	7
Figura 2. Gráfica de volumen muestreado vs tiempo de exposición para diferentes valores de K_{OA}^{13}	11
Figura 3. Transecto norte-sur de 12.8 km para la evaluación de COPs en la ciudad de Santiago de Cali.....	13
Figura 4. Muestreador pasivo de aire. a) Diagrama del muestreador ¹⁵ . Las flechas indican el flujo de aire. b) Muestreador de aire TE-200 instalado en la estación FCNE.	15
Figura 5. Espuma de poliuretano TE-1014 ubicada en el muestreador de aire y sostenida por la barra central.....	16
Figura 6. Estación Éxito	18
Figura 7. Estación ERA	19
Figura 8. Estación URG. Ubicación de los PASs para el muestreo de cuatro y cinco meses	20
Figura 9. Estación URG. Ubicación de los PASs en el muestreo de tres meses	21
Figura 10. Estación FCNE. Ubicación de los PASs para el muestreo de cuatro y cinco meses	22
Figura 11. Estación FCNE. Ubicación de los PASs en el muestreo de tres meses.....	22
Figura 12. Recolección de la muestra disco PUF pasivo	24
Figura 13. Extracción de discos PUFs y tratamiento de la muestra	25
Figura 14. Cromatograma de los 12 plaguicidas organoclorados: (1) α -HCH; (2) β -HCH; (3) γ -HCH; (4) Heptacloro; (5) Aldrin; (6) α -Endosulfán; (7) p,p' -DDE; (8) Dieldrin; (9) Endrin; (10) p,p' -DDD; (11) β -Endosulfán; (12) p,p' -DDT	29

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Concentraciones (pg/m ³) del HCB en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses	33
Gráfica 2. Acumulado de las concentraciones (pg/m ³) de hexaclorociclohexanos (α- y γ-HCH) en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses	34
Gráfica 3. Acumulado de las concentraciones (pg/m ³) de clordanos (<i>trans</i> -clordano, <i>cis</i> -clordano, <i>trans</i> -nonaclordano) en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses	36
Gráfica 4. Acumulado de las concentraciones (pg/m ³) de heptacloro y epóxido de heptacloro en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses	37
Gráfica 5. Acumulado de las concentraciones (pg/m ³) de endosulfanos (α- y β-endosulfán) en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses	38
Gráfica 6. Acumulado de las concentraciones (pg/m ³) de <i>p,p'</i> -DDT, <i>o,p'</i> -DDE, <i>p,p'</i> -DDE y <i>o,p'</i> -DDD en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses	40
Gráfica 7. Acumulado de las concentraciones (pg/m ³) de PCBs en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses.....	41
Gráfica 8. Concentraciones (pg/m ³) de hidrocarburos aromáticos policíclicos en las estaciones de muestreo durante el período de 4 meses	43
Gráfica 9. Acumulado de las concentraciones (pg/m ³) de hidrocarburos aromáticos policíclicos en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses.....	44

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Medidas de los muestreadores de aire pasivo artesanales	15
Tabla 2. Fechas de los períodos de muestreo	18
Tabla 3. Descripción de los tiempos de muestreo en la estación Éxito	19
Tabla 4. Descripción de los tiempos de muestreo en la estación ERA.....	20
Tabla 5. Descripción de los tiempos de muestreo en la estación URG	21
Tabla 6. Descripción de los tiempos de muestreo en la estación FCNE	23
Tabla 7. Condiciones de trabajo en GC-ECD para el análisis de los extractos	26
Tabla 8. Parámetros de calibración para la cuantificación de POCs en el GC-ECD	28
Tabla 9. Porcentajes de recuperación obtenidos de los plaguicidas organoclorados	30
Tabla 10. Límite de detección instrumental para cada (pg/m ³) compuesto de interés...	31
Tabla 11. Rango de concentraciones de PCBs en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses de exposición.....	42
Tabla 12. Concentraciones de contaminantes orgánicos persistentes encontradas en este estudio comparadas con otros países	46
Tabla 13. Niveles de permisibilidad según OSHAS en 8 horas de exposición y 5 días a la semana en el lugar de trabajo	48

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

ACS	<i>American Chemistry Society</i>
A_{PUF}	Área expuesta del muestreador pasivo
C_A	Concentración en el aire
C_{PUF}	Concentración en el disco de espuma de poliuretano
COP	Contaminantes orgánicos persistentes
CORPOICA	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
CV	Coeficiente de variación
DAGMA	Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente
DDD	Diclorodifenildicloroetano
DDE	Diclorodifenildicloroetileno
DDT	Diclorodifeniltricloroetano
ECD	<i>Electron capture detector</i>
EI-SIM	<i>Electron impact-selected ion monitoring</i>
GC	<i>Gas chromatography</i>
HCB	Hexaclorobenceno
HCH	Hexaclorociclohexano
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
K_A	Coeficiente de transferencia del aire
K_{aw}	Coeficiente de distribución aire-agua
K_{OA}	Coeficiente de reparto octanol-aire
K_{oc}	Coeficiente carbón orgánico-agua
K_{ow}	Coeficiente octanol-agua
K_{PUF}	Coeficiente de transferencia de la espuma de poliuretano
K_{PUF-A}	Coeficiente de partición del disco PUF-aire
LDI	Límite de detección instrumental
POC	Plaguicida organoclorado

OEHHA	Oficina de Evaluación de Riesgos de Salud Ambiental
OSHAS	Administración de Salud y Seguridad Ocupacional
PAH	<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i>
PAS	<i>Passive air sampling</i>
PCB	<i>Polychlorinated biphenyls</i>
PUF	<i>Polyurethane foam</i>
S	Desviación estándar
TE	<i>Tisch Enviromental</i>
V_{PUF}	Volumen del disco de espuma de poliuretano

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Concentraciones de plaguicidas organoclorados (pg/m ³) en las estaciones de muestreo.....	58
Anexo 2. Concentraciones de bifenilos policlorados (pg/m ³) en las estaciones de muestreo.....	59
Anexo 3. Concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (pg/m ³) en las estaciones de muestreo	60

RESUMEN

En este estudio se evaluó de manera preliminar la presencia de contaminantes orgánicos persistentes en la atmósfera de la ciudad de Santiago de Cali empleando muestreadores de aire pasivo con discos de espuma de poliuretano. Para ello, se ubicaron diez muestreadores de aire pasivo en cuatro estaciones a lo largo de un transecto de 12.8 km norte-sur de la ciudad, en tres períodos de exposición correspondientes a tres, cuatro y cinco meses, durante mayo de 2011 y marzo de 2012. Los contaminantes en el disco de espuma de poliuretano fueron extraídos durante 24 horas mediante el método *soxhlet* usando éter de petróleo como disolvente. Los extractos correspondientes a tres meses fueron analizados cuantitativamente por cromatografía de gases con detector de captura de electrones en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali y enviados a analizar por cromatografía de gases acoplado a masas en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Universidad de Siena-Italia, los extractos pertenecientes a cuatro y cinco meses.

Para el período de tres meses se rastrearon 12 plaguicidas organoclorados (α -, β -, γ -HCH, heptacloro, aldrin, dieldrin, endrin, α -, β -endosulfán, *p,p'*-DDE, *p,p'*-DDD, *p,p'*-DDT), sin embargo el instrumento no logró detectar ninguno de los analitos de interés debido a que las concentraciones presentes de estos plaguicidas en el aire se encuentran por debajo del límite de detección del método empleado.

En los períodos de cuatro y cinco meses se evaluó la presencia de bifenilos policlorados, plaguicidas organoclorados e hidrocarburos aromáticos policíclicos. El

acumulado de las concentraciones de los bifenilos policlorados estuvo entre 54-840 pg/m³. Las medias (pg/m³) de plaguicidas organoclorados en las estaciones fueron altas respecto a lo reportado por otros países; su presencia se debe a la proximidad de la ciudad a zonas que anteriormente fueron utilizadas en cultivos donde los plaguicidas se aplicaron intensivamente, siendo el endosulfán el plaguicida más abundante. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentaron una mayor incidencia en la zona centro y norte de la ciudad, principalmente el fenantreno, fluoreno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, fluoranteno y dibenzo(a,h)antraceno posiblemente debido a la densidad de automóviles, fuentes directas de combustión y las actividades industriales que se desarrollan dentro y fuera de la ciudad. Los resultados conforman información preliminar sobre las concentraciones de estos contaminantes en el aire de la ciudad de Santiago de Cali y generan la base para desarrollar un programa de monitoreo en la ciudad.

Palabras claves: muestreadores de aire pasivo, discos de espuma de poliuretano, contaminantes orgánicos persistentes, método *soxhlet*.

1. INTRODUCCIÓN

Los contaminantes orgánicos persistentes son compuestos que en diversa medida resisten la degradación fotolítica, biológica y química, por lo que son persistentes en el medio ambiente. Además, son semivolátiles, característica que les permite presentarse en la fase de vapor o ser adsorbidos por las partículas atmosféricas, facilitando de esta manera su transporte a largas distancias a través de la atmósfera y, a su vez, permitiendo que estos compuestos entren a diferentes ecosistemas, constituyéndose de esta forma en un riesgo para la salud humana, la vida silvestre y los ecosistemas. Aunque en la actualidad estos contaminantes están prohibidos en la mayoría de los países, todavía existen en el mundo muchos sitios contaminados con estas sustancias, detectándose su persistencia en la atmósfera.¹

Las mediciones simultáneas de las concentraciones de estos contaminantes en el aire en diferentes lugares son necesarias para evaluar las fuentes, los procesos atmosféricos y el potencial de transporte a larga distancia en la atmósfera de los contaminantes orgánicos persistentes, ya sea a nivel urbano, regional o incluso nacional y mundial. Sin embargo, este tipo de estudio no es tan práctico con los sistemas convencionales de muestreo de aire de alto volumen (activo) puesto que estos requieren de energía eléctrica para su funcionamiento y su implementación es de mayor costo.²

Por otro lado, se encuentran los muestreadores de aire pasivo los cuales son una alternativa de muestreo factible debido a su bajo costo, sin necesidad de energía eléctrica y facilidad de operación. Su pequeño tamaño permite que sea de fácil

instalación en varios lugares de difícil acceso y los muestreos se desarrollen al mismo tiempo, lo que ha hecho que su empleo se incremente en los últimos años. Además, son útiles para evaluar la exposición de largo plazo y para una diversidad de funciones de sondeos de área, mapeo y diseño de redes. Entre los medios de absorción para la implementación de estos muestreadores, se encuentran los discos de espuma de poliuretano los cuales son capaces de retener los compuestos orgánicos persistentes de interés. ²

Diferentes estudios se han realizado para la evaluación de estos contaminantes (POCs, PCBs y PAHs) a nivel regional o global. La validez de los resultados obtenidos en los estudios comprueba la eficacia del empleo de los muestreadores de aire pasivo con discos de espuma de poliuretano para la determinación de diferentes compuestos orgánicos persistentes en el medio ambiente.

Puesto que no hay un registro de evaluación de la residualidad, persistencia, distribución y concentraciones de contaminantes orgánicos persistentes en la ciudad de Santiago de Cali, para este estudio se emplearon muestreadores pasivos con discos PUF para determinar de manera preliminar las concentraciones de POCs, PCBs y PAHs. Se ubicaron diez muestreadores en cuatro estaciones a lo largo de un transecto norte-sur de la ciudad, durante períodos de tres, cuatro y cinco meses entre el año 2011 y 2012 en un convenio con el DAGMA y la Universidad del Valle.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar de manera preliminar la presencia de contaminantes orgánicos persistentes en la atmósfera de la ciudad de Santiago de Cali a lo largo de un transecto norte-sur, empleando muestreadores pasivos de aire con discos de espuma de poliuretano.

2.2. Objetivos específicos

1. Evaluar la eficiencia de los muestreadores pasivos de aire con discos de espuma de poliuretano para la captación de contaminantes orgánicos persistentes en la atmósfera de la ciudad de Santiago de Cali.
2. Evaluar la residualidad, persistencia, distribución y concentración de contaminantes orgánicos persistentes en un transecto norte-sur de la ciudad de Santiago de Cali.
3. Contribuir al conocimiento de las concentraciones de contaminantes orgánicos persistentes y su distribución en la atmósfera de la ciudad de Santiago de Cali.
4. Comparar las concentraciones de los contaminantes orgánicos persistentes presentes en la ciudad de Santiago de Cali con las concentraciones reportadas en otros estudios realizados en el mundo.

3. MARCO TEÓRICO

Los COPs liberados al ambiente pueden viajar a través del aire y el agua hacia regiones muy distantes de su fuente original. Estos pueden concentrarse en los organismos vivos, incluidos los humanos, a niveles que pueden dañar la salud humana y el ambiente, aún en regiones alejadas de donde son usados o emitidos. Los problemas generados por este tipo de contaminantes motivaron su prohibición y restricción severa en muchos países, así como la implementación de acciones internacionales dentro de las que se encuentra el Convenio de Estocolmo.³

La mayoría de los COPs son compuestos organoclorados que se utilizaron en diversas aplicaciones. Tal es el caso de los POCs que fueron inicialmente producidos para proteger los cultivos agrícolas contra plagas y para prevenir la transmisión de enfermedades a los seres humanos provocada por mosquitos, piojos, ácaros, entre otros. Mientras que los OCs industriales, tales como los PCBs, fueron ampliamente utilizados como fluidos dieléctricos en instalaciones eléctricas y equipos electrónicos y para evitar la dispersión de fuego. Por otro lado, se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos que son subproductos de la combustión incompleta del carbón, aceites, madera, residuos domésticos, y en general sustancias de origen orgánico.¹

Las principales propiedades físico-químicas que influyen tanto en la distribución espacial como temporal de los COPs son: a) solubilidad en el agua, b) constante de distribución aire-agua (K_{aw}), c) coeficiente de reparto octanol-agua (K_{ow}), d) coeficiente carbón orgánico-agua (K_{oc}), e) vida media en agua, materia sólida y aire, y f) presiones de vapor las cuales varían entre 10^{-2} y 10^{-5} Pa.¹

Durante el transporte atmosférico, los COPs sufren un número de procesos de degradación; principalmente foto-degradación, isomerización así como deposición a suelos, vegetación, cuerpos de agua; revolatilización, sedimentación, bioacumulación y biomagnificación. Todos esos procesos dependen de las condiciones climáticas, principalmente temperatura, dinámica de vientos de cada región y de las propiedades físico-químicas del compuesto.¹

3.1. Plaguicidas organoclorados

Los POCs son compuestos sintéticos cuya estructura molecular incluye cadenas alifáticas, cíclicas, grupos aromáticos y específicamente átomos de cloro, dispuestos en variadas formas estructurales. La estructura química le confiere estabilidad, por ello su alta persistencia en los ecosistemas.⁴

Los POCs se desarrollaron con el propósito de controlar las plagas que afectaban los cultivos y los insectos que transmitían enfermedades al hombre. Estas sustancias inicialmente ofrecieron una solución eficiente a este problema por sus características (baja degradabilidad, persistencia, entre otras); no obstante, con el paso del tiempo y dado el uso intensivo que se hizo de ellas, se encontró que las mismas características que los hicieron útiles en su momento, constituían un riesgo tanto para la salud como para el medio ambiente. Por lo cual, quedaron en desuso y finalmente fue prohibido su uso en 1993. En ese momento quedaron algunos excedentes de plaguicidas, bien sea porque su fecha de vencimiento había expirado o porque no se alcanzaron aplicar. Este problema se agravó como consecuencia de algunas prácticas inadecuadas para eliminar dichas existencias, que consistían en enterrar los excedentes y/o los materiales de empaque y envase.⁵

En Colombia, durante la década del 70, se intensificó el uso de POCs, principalmente en cultivos de algodón, maíz, arroz y papa, que consumieron más del 90% del total de los insecticidas producidos. Se mantuvieron controladas las plagas en los cultivos de maíz, arroz y papa, pero el cultivo de algodón demandó el mayor consumo de plaguicidas, 45 % del total. En estos cultivos, los POCs más utilizados fueron el aldrin, el endrin, el DDT, el dieldrin, el heptacloro, el clordano, el hexaclorobenceno, en el que generalmente, se preparaban formulaciones que combinaban estos plaguicidas, buscando una mayor efectividad de las aplicaciones para el control de plagas.⁵

3.2. Bifenilos policlorados

Los PCBs son compuestos orgánicos aromáticos que fueron creados por el hombre y que se componen de dos anillos fenilos con átomos de cloro (ver Figura 1). En la mezcla comercial, la cantidad de átomos de cloro en los bifenilos depende de la duración y la temperatura del proceso de cloración. Los átomos de cloro pueden sustituir el hidrógeno en las posiciones para, meta y orto de los bifenilos, por lo que existen 209 posibles congéneres de los PCBs, de los cuales cerca de 130 se utilizaron en productos comerciales.^{6, 7}

La posición de los átomos de cloro en la molécula es muy importante para determinar su toxicidad. Los PCBs son más tóxicos cuando las posiciones orto no son substituidas. En estas condiciones, los dos grupos fenilos pueden libremente rotar y alinearse siguiendo una estructura plana. Los compuestos mono-orto y di-orto son los menos tóxicos.^{6, 7}

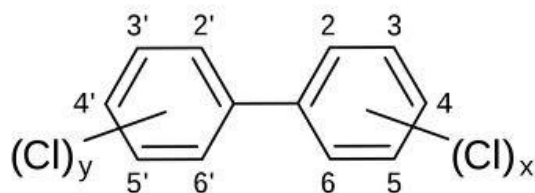


Figura 1. Estructura molecular general de los bifenilos policlorados

Los PCBs son compuestos muy estables, resistentes a la degradación térmica, química y biológica y altamente tóxicos. Poseen excelentes propiedades aislantes, longevidad y no son inflamables, por lo cual fueron utilizados ampliamente en equipos eléctricos como transformadores y condensadores, intercambiadores de calor, sistemas hidráulicos y también en la fabricación de pinturas y plásticos.^{6, 7} Estos compuestos fueron fabricados a partir del año 1929 en varios países y se identificaron con diferentes nombres comerciales, entre los cuales se encuentran: Abestol, Aroclor, Askarel, Clophen, Fenchlor, Inerteen, Kaneclor, Phenoclor, Pyranol, entre otros. El principal período de fabricación tuvo lugar entre 1930 y finales de los años 70 en los Estados Unidos; en China, hasta 1974 y en Europa, hasta principios de la década de los 80. En Colombia nunca fueron fabricados; sin embargo los PCBs existentes corresponden a equipos y aceites importados.⁷

Los PCBs han sido y son introducidos de manera incontrolada al medio ambiente, mediante goteras, filtraciones, fugas de sistemas hidráulicos e industriales, por difusión o a través de otros productos durante la producción, en la incineración de desechos o mediante accidentes. En la actualidad, la fabricación de PCBs se encuentra prohibida a nivel mundial, debido a los graves impactos y riesgos sobre la salud humana y el ambiente. Su uso ha sido restringido a transformadores y condensadores hasta el final de su vida útil.⁷

3.3. Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Los PAHs son un grupo de sustancias compuestas por dos o más anillos aromáticos unidos. Estos se producen cuando materia orgánica que contiene carbono e hidrógeno se expone a temperaturas de más de 700 °C, en procesos pirolíticos y de combustión incompleta. La presencia de los PAHs en la atmósfera proviene de las emisiones naturales y antropogénicas. Los PAHs en la atmósfera están asociados principalmente con partículas, pero también se encuentran en fase gaseosa. Las principales fuentes naturales de PAHs de la atmósfera son los incendios forestales y los volcanes.⁷

En términos generales son volátiles y relativamente persistentes lo que les hace susceptibles al transporte atmosférico de larga distancia, son poco solubles en agua y solubles en solventes orgánicos y son también fuertemente lipofílicos, pero en la medida que son transformados por el metabolismo de los organismos no se acumulan en las redes tróficas. Los PAHs así como los productos de su transformación metabólica en organismos pueden ser carcinogénicos.⁷

3.4. Muestreador de aire pasivo

Los PASs consisten en un medio absorción / acumulación con una alta capacidad de retención de los analitos de interés.⁸ Han sido definidos por el Comité Europeo de Normalización como dispositivos capaces de captar muestras de vapores de la atmósfera a una velocidad controlada por la difusión de moléculas de analito en fase gaseosa, a través de un material poroso absorbente como resultado de la diferencia de potencial de fugacidad del analito en dos medios.⁹

Puesto que es necesario que el muestreo se desarrolle satisfactoriamente, debe cumplirse con la condición de que no haya un intercambio de analito entre el filtro y el medio, y que la tasa de muestreo permanezca constante durante todo el proceso. Sin embargo, como en los PASs con discos PUF la adsorción física es el proceso de control a través del cual se captan las muestras del analito, el control cuantitativo sólo puede ocurrir siempre y cuando la duración de muestreo se mantenga dentro de la fase lineal de la captación. Durante esta etapa de captación líneal, la cantidad de masa de analito depende de su concentración en el aire y el tiempo de exposición.¹⁰

3.4.1. Teoría del muestreo de aire pasivo

Cuando se realiza la recolección de contaminantes orgánicos sobre la superficie de un soporte adsorbente uniformemente poroso, se debe considerar la unidad de muestreo como un “compartimento”. En la superficie del soporte adsorbente se da la resistencia a la transferencia de masa entre el disco PUF y el aire de los compuestos, generándose un coeficiente de reparto, K , entre las dos fases (ver Ecuación 1).¹¹

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_{PUF} \times K_{PUF-A}} \quad (1)$$

En la ecuación, K_A y K_{PUF} son las constantes del coeficiente de transferencia del aire y del disco PUF respectivamente, y K_{PUF-A} es la capacidad de retención del disco PUF (adimensional) y corresponde a lo máximo que puede absorber el disco PUF.¹²

Para compuestos orgánicos no polares, K_{PUF-A} es similar en magnitud al coeficiente de reparto octanol-aire, K_{OA} , el cual es función de la temperatura. Los compuestos con valores de K_{OA} por encima de 10^7 hace que el término $(1 / K_{PUF} K_{PUF-A})$ de la ecuación

(1) sea despreciable, incluso cuando K_{PUF} es similar K_A . Por lo tanto, la transferencia de masa en la interfase PUF-aire es igual a K_A .

De tal manera, la concentración de compuestos adsorbidos por el muestreador es equivalente a: la tasa de compuestos adsorbidos menos la tasa de pérdida de estos compuestos cuando hay saturación,¹¹ como se describe en la ecuación 2.

$$V_{PUF} \left(\frac{dC_{PUF}}{dt} \right) = K_A \times A_{PUF} \left(C_A - \frac{C_{PUF}}{K_{PUF-A}} \right) \quad (2)$$

En la ecuación 2, el término V_{PUF} es el volumen del disco PUF (cm^3); C_{PUF} y C_A son las concentraciones (pg/m^3) en el disco PUF y el aire respectivamente de los compuestos, y A_{PUF} es el área de la parte expuesta del muestreador pasivo (cm^2). En este caso K_A está dada en cm/s . Cuando la concentración del analito es pequeña, el término (C_{PUF} / K_{PUF-A}) es pequeño y la captación es lineal, siendo ésta la condición ideal de trabajo del muestreador pasivo quedando como función de K_A , A_{PUF} y C_A .¹³

En la Figura 2, se muestra que para los compuestos químicos con valores K_{OA} mayores de $10^{8.5}$, la tasa de muestreo permanece lineal dentro de los primeros 100 días aproximadamente a $3\text{-}4 \text{ m}^3/\text{d}$, mientras que para compuestos con K_{OA} menores, el disco PUF se satura con respecto al aire en menos de 100 días.¹³

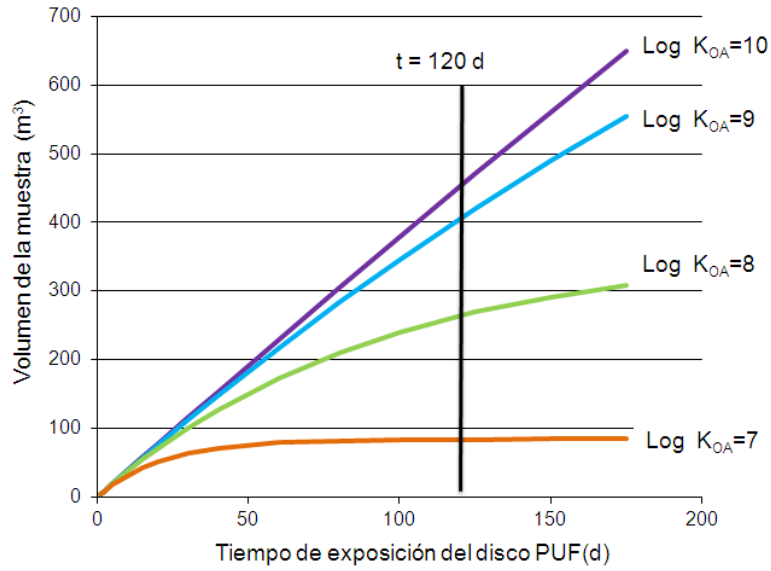


Figura 2. Gráfica de volumen muestreado vs tiempo de exposición para diferentes valores de K_{OA} ¹³

La gráfica permite visualizar que la saturación del disco PUF depende del tiempo de exposición, del K_{OA} y del volumen de aire al cual está expuesto. Este volumen se puede medir adicionando en el disco PUF compuestos orgánicos marcados isotópicamente o compuestos no marcados que no se encuentren presentes en el aire, denominados “compuestos depuradores”, los cuales deben tener el mismo comportamiento en la tasa de captación y pérdida. De ese modo K_A puede ser calculado a partir de la recuperación de los compuestos de depuración inicialmente inyectados dentro del disco PUF usando la ecuación 3.¹⁴

$$K_A = \ln \left(\frac{C}{C_0} \right) \delta_{Film} \times K'_{PUF-A} / t \quad (3)$$

En la ecuación 3, los términos C_0 y C son las concentraciones iniciales y finales de los compuestos depuradores respectivamente, δ_{Film} en metros, es el cociente entre el volumen y el área del PUF, K'_{PUF-A} es el producto entre K_{PUF-A} y la densidad del disco PUF y t es el tiempo de exposición (días).

4. METODOLOGÍA

4.1. Selección de los puntos de muestreo

La selección de los puntos de muestreo se realizó con el objetivo de determinar preliminarmente la residualidad, persistencia, distribución y concentraciones de los contaminantes orgánicos persistentes en la ciudad de Santiago de Cali. Para ello, se seleccionaron cuatro estaciones de muestreo: Éxito, Escuela República de Argentina (ERA), Conjunto Residencial Gratamira (CRG) y la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad del Valle (FCNE), de tal modo que su ubicación permitiera abarcar un transecto norte-sur de la ciudad (ver Figura 3). Cabe aclarar que el nombre asignado a cada una de las estaciones se realizó siguiendo la misma nomenclatura empleada por el DAGMA.

Por otra parte para el desarrollo y la garantía de un muestreo representativo, se debía considerar la aerodinámica de sondeo y la protección del sitio, por lo tanto, la estructura de cada una de las estaciones seleccionadas debía permitir que los muestreadores se situaran a cierta distancia de la superficie terrestre de tal modo que el aire que pasara a través de los estos fluyera libremente y no fuera obstruido por los alrededores. A su vez, era necesario que los muestreadores estuvieran ubicados en lugares seguros y no fueran hurtados durante los períodos de monitoreo. En consideraciones prácticas, las estaciones debían ser accesibles para las visitas a los sitios de muestreo pero no debían estar expuestas a interferencias del público.

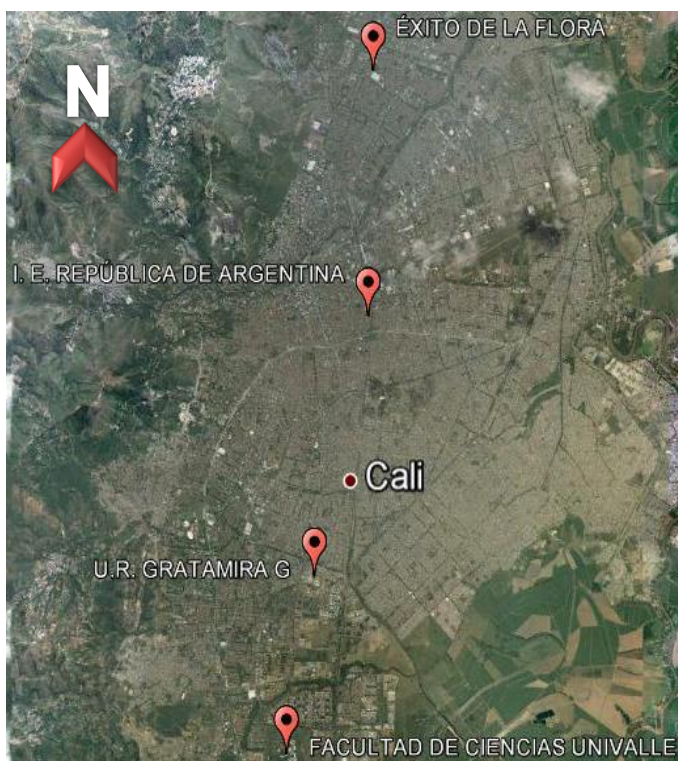


Figura 3. Transecto norte-sur de 12.8 km para la evaluación de COPs en la ciudad de Santiago de Cali

4.2. Materiales

4.2.1. Reactivos

Estándares (α -hexaclorobenceno Chem Service – 99.5%; β -hexaclorobenceno Chem Service – 98.5%; γ -hexaclorobenceno Chem Service – 99.5%; heptacloro Chem Service – 99.4%; aldrin Chem Service-98.9%; endosulfán Chem Service – 67.9% I y 31.7% II; 4,4'-DDE Dr Ehrenstorfer GmbH – 99.0%; dieldrin Chem Service – 99.1%; endrin Chem Service – 98.3%; 4,4'-DDD Dr Ehrenstorfer GmbH – 98.0%; 4,4'-DDT Dr Ehrenstorfer GmbH – 99.0%), éter de petróleo Sigma-Aldrich grado reactivo ACS e ISO, bencina de petróleo Yequim Ltda, hexano JT Baker grado analítico ACS, isooctano (2,2,4-trimetilpentano JT Baker grado reactivo ACS).

4.2.2. Instrumentación

Jeringa para cromatografía de gases Hamilton Syringe de 10 μ L, equipo Cromatografía de Gases Shimadzu GC-2010 Plus (equipado con automuestreador AOC-20I Shimadzu) con detector de captura de electrones Ni^{63} , la columna cromatográfica empleada para las separaciones fue una columna capilar Shimadzu de 15 m de longitud, 0.25 mm de diámetro interno, 0.25 μ m de espesor y una fase estacionaria SHRXL-5ms (5 % difenil, 95 % dimetil polisiloxano) y helio como gas portador con un flujo de 0.87 mL/min. Equipo CG Trazas 2000 (equipado con automuestreador AS3000), acoplado a un Masas PolarisQ con trampa iónica (ThermoFinnigan), usando EI-SIM. La columna cromatográfica que se empleó en las separaciones realizadas fue una columna capilar Phenomenex de 30 m de longitud, 0.25 mm de diámetro interno, 0.25 μ m de espesor y una fase estacionaria Zebron ZB-5ms (5 % fenil-arileno, 95 % dimetilpolisiloxano) e hidrógeno como gas transportador.

4.3. Muestreadores de aire pasivo TE-200

El muestreador es modelo TE-200 de Tisch Environmental. Se compone externamente de una cámara semiabierta conformada por dos bandejas de acero inoxidable. La bandeja externa es de 30 cm de diámetro y la bandeja interna de 20 cm de diámetro conectadas mediante una barra central de ensamblado, con una altura de 15 cm. Existe un espacio de 2.5 cm entre ambas bandejas y agujeros en la parte inferior de la cámara, por los cuales el aire fluye a través del disco PUF (ver Figura 4). El disco PUF, se ubica en medio de las dos bandejas que forman el muestreador, sostenido por soporte de acero inoxidable. El muestreador se conecta mediante un brazo posicionado a 90°, asegurado con tornillos ya sea a una barra o a un poste (ver Figura 4). Las bandejas del muestreador protegen al disco PUF de la precipitación, la radiación ultravioleta y la deposición de material particulado que pueden degradar los compuestos de interés; a su vez, reduce el efecto de la variación de la velocidad del

viento sobre la absorción, permitiendo que el flujo de aire que recibe el disco PUF sea constante, el cual es de aproximadamente 3-4 m³ de aire por día lo que representaría aproximadamente 300 m³ después de 3 meses de exposición.^{8, 12}

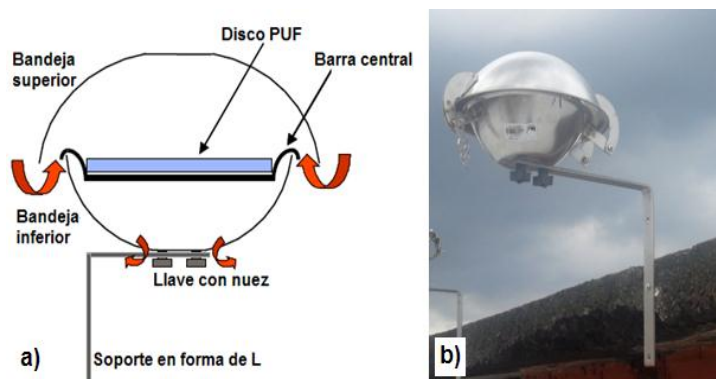


Figura 4. Muestreador pasivo de aire. a) Diagrama del muestreador¹⁵. Las flechas indican el flujo de aire. b) Muestreador de aire TE-200 instalado en la estación FCNE

4.3.1. Muestreadores artesanales pasivos de aire

Se fabricaron cuatro muestreadores de aire con el mismo diseño de los PAS TE-200, a los cuales se les ha denominado “muestreadores artesanales pasivos de aire”. Los muestreadores artesanales estaban constituidos con las medidas que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Medidas de los muestreadores de aire pasivo artesanales

ESTACIÓN	BANDEJA EXTERNA (cm de diámetro)	BANDEJA INTERNA (cm de diámetro)	ALTURA (cm)	ESPACIO ENTRE BANDEJAS (cm)	# agujeros
Éxito	95	78.3	19	1.5	8
ERA	87.6	69	19.5	2.5	
CRG	82	69	15	1.5	
FCNE	87	69.2	19.2	2.5	

4.3.2. Discos de espuma de poliuretano TE-1014

El disco PUF tienen una forma circular con 14 cm de diámetro, 1.35 cm de grosor, un área de superficie de 365 cm², 4.40 g de masa, un volumen de 207 cm³ y una densidad de 0.0213 g/cm³.⁸



Figura 5. Espuma de poliuretano TE-1014 ubicada en el muestreador de aire y sostenida por la barra central

4.4. Limpieza y preparación de los discos de espuma de poliuretano TE-1014 y los muestreadores de aire pasivo TE-200

4.4.1. Discos de espuma de poliuretano

Los discos PUF TE-1014 (PacWill Environmental) deben limpiarse antes de ser ubicados en los PASS con el fin de eliminar cualquier tipo de material y productos interferentes mediante extracción *soxhlet*. Para ello, se limpió el equipo *soxhlet* con agua y jabón neutro. Se dejó en ácido nítrico al 10 % y se lavó con agua destilada. Posteriormente se seca el equipo en un horno a 100 °C. Se enjuagó el interior del equipo *soxhlet* con acetona y hexano. Luego se introdujeron los discos PUF dentro de la campana del tubo *soxhlet* y una vez ensamblado el balón y el tubo *soxhlet* al condensador, se dejó recircular 350 mL de acetona y 350 mL de éter de petróleo¹⁶ durante 48 horas a una temperatura entre 35 y 40 °C. A continuación, los discos PUF se

dejaron secar a temperatura ambiente dentro de una bolsa de aluminio. Finalmente, se almacenaron en doble bolsa plástica hasta el día del montaje de los PAS.

4.4.2. Muestreadores pasivos

Antes de llevar los muestreadores al punto de muestreo, se lavaron con agua y jabón, luego se limpiaron con acetona⁸, se dejaron secar y se guardaron en bolsas plásticas para su traslado a las estaciones de muestreo.

4.5. Instalación de los muestreadores de aire pasivo y discos de espuma de poliuretano

Los muestreadores fueron instalados de tal modo que permanecieran muy bien asegurados con el fin de evitar su desajuste durante los períodos de muestreo. En todos los puntos se aseguraron con alambre, excepto en la estación de la FCNE, donde se emplearon los soportes en forma de L. Posteriormente, se ubicaron los discos PUF en el soporte central de cada muestreador.

4.6. Períodos de muestreo

Los discos PUF fueron expuestos durante tres períodos entre el año 2011 y el año 2012. La recolección se realizó permitiendo diferentes tiempos de duración de muestreo, para comprobar y evaluar la estabilidad y pérdida de los contaminantes con respecto al tiempo de exposición en la atmósfera de la ciudad. El primer período fue de una duración aproximada de cuatro meses, el segundo de cinco meses y el último de tres meses. El muestreo inició el 19 de mayo de 2011 y finalizó el 8 de marzo de 2012. Los tiempos de muestro en cada una de las estaciones se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Fechas de los períodos de muestreo

PERÍODO	ESTACIÓN			
	ÉXITO	E.R.A	GRATAMIRA	UNIVALLE
1	Mayo 19 a Septiembre 27 de 2011	Mayo 19 a Septiembre 27 de 2011	Mayo 28 a Septiembre 27 de 2011	Junio 9 a Octubre 6 de 2011
2	Mayo 19 a Noviembre 2 de 2011	Mayo 19 a Noviembre 3 de 2011	Mayo 28 a Noviembre 5 de 2011	Junio 9 a Noviembre 1 de 2011
3	Noviembre 30 de 2011 al Marzo 6 de 2012	Noviembre 30 de 2011 al Marzo 6 de 2012	Diciembre 1 de 2011 al Marzo 8 de 2012	Noviembre 29 de 2011 al Marzo 5 de 2012

4.7. Ubicación de los puntos de muestreo

4.7.1. Estación Éxito

La zona de muestreo se encuentra ubicada N 3° 29.297', W 76° 31.086', 988 m de altitud. En la estación Éxito, el DAGMA mide ozono, material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre. Los muestreadores de aire fueron ubicados a 13.71 m de altura sobre el suelo. En esta estación se ubicaron tres muestreadores de aire (ver Figura 6), dos de ellos muestreadores comerciales y uno artesanal.



Figura 6. Estación Éxito

En el primer muestreo de cuatro meses, se recolectaron sólo dos discos PUF, una muestra de un muestreador comercial y la otra de un muestreador artesanal. En el segundo muestreo de cinco meses se recolectó el disco PUF del muestreador comercial. Finalmente, en el tercer período se recolectaron tres muestras de disco PUF, cada una correspondiente a tres meses de exposición (ver Tabla 3).

Tabla 3. Descripción de los tiempos de muestreo en la estación Éxito

ESTACIÓN	MUESTRA	MUESTREADOR	PERÍODO DE EXPOSICIÓN (días)
Éxito	1	Comercial	132
	2	Artesanal	132
	3	Comercial	168
	4	Comercial	98
	5	Comercial	98
	6	Artesanal	98

4.7.2. Estación ERA

Los muestreadores de aire fueron ubicados a 7.2 m de altura sobre el suelo. La zona de muestreo se encuentra ubicada N 3° 26.857', W 76° 31.146', 987 m de altitud. En la estación ERA, el DAGMA mide material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre.



Figura 7. Estación ERA

En la estación se ubicaron dos muestreadores de aire (ver Figura 7), un muestreador comercial y el otro artesanal. En el primer muestreo correspondiente a cuatro meses, se recolectó el disco PUF del muestreador artesanal. Mientras que la muestra del PAS comercial se recolectó para el segundo período de cinco meses. Finalmente, en el tercer período se recolectaron las dos muestras de disco PUF de cada muestreador instalado, correspondiente a tres meses de exposición (ver Tabla 4)

Tabla 4. Descripción de los tiempos de muestreo en la estación ERA

ESTACIÓN	MUESTRA	MUESTREADOR	PERÍODO DE EXPOSICIÓN (días)
ERA	1	Artesanal	132
	2	Comercial	169
	3	Comercial	98
	4	Artesanal	98

4.7.3. Estación URG

En esta estación los PAS fueron ubicados a 12.08 m de altura sobre el suelo. La estación se localiza N 3° 24.291', W 76° 31.720', 992 m de altitud.



Figura 8. Estación URG. Ubicación de los PASs para el muestreo de cuatro y cinco meses



Figura 9. Estación URG. Ubicación de los PASs en el muestreo de tres meses

En la estación se ubicaron dos muestreadores de aire, un muestreador comercial y el otro artesanal. En el primer muestreo correspondiente a cuatro meses, se recolectó el disco PUF del muestreador artesanal. Mientras que la muestra del PAS comercial se recolectó para el segundo período de cinco meses. La Figura 8 corresponde a muestreadores del primer y segundo muestreo. Sin embargo, se re-ubicaron los muestreadores para el tercer muestreo con el fin de que no se presentara una diferencia de altura con respecto al techo de la torre, sino con respecto al piso y el flujo de aire que pasara por el muestreador fuera mejor (ver Figura 9). Finalmente, para el tercer período se recolectaron las dos muestras de disco PUF de cada muestreador instalado, correspondiente a tres meses de exposición (ver Tabla 5)

Tabla 5. Descripción de los tiempos de muestreo en la estación URG

ESTACIÓN	MUESTRA	MUESTREADOR	PERÍODO DE EXPOSICIÓN (días)
URG	1	Artesanal	123
	2	Comercial	162
	3	Comercial	98
	4	Artesanal	98

4.7.4. Estación FCNE

La estación se localiza N 3° 22.523', W 76° 32.023', 1004 m de altitud. Los muestreadores de aire fueron ubicados a 15.40 m de altura sobre el suelo.



Figura 10. Estación FCNE. Ubicación de los PASs para el muestreo de cuatro y cinco meses



Figura 11. Estación FCNE. Ubicación de los PASs en el muestreo de tres meses

En esta estación se ubicaron tres muestreadores de aire, dos de ellos muestreadores comerciales y uno artesanal. En el primer muestreo de cuatro meses, se recolectaron sólo dos disco PUF, una correspondiente a un muestreador comercial y la otra del muestreador artesanal. En el segundo muestreo de cinco meses se recolectó el disco PUF del muestreador comercial. La Figura 10 corresponde a muestreadores del primer y segundo muestreo. Finalmente, en el tercer período se recolectaron tres muestras de disco PUF, cada una correspondiente a tres meses de exposición (ver Tabla 6). En este período se reubicaron los muestreadores (ver Figura 11), ya que donde se instalaron inicialmente era un conducto que conecta con los laboratorios de química.

Tabla 6. Descripción de los tiempos de muestreo en la estación FCNE

ESTACIÓN	MUESTRA	MUESTREADOR	PERÍODO DE EXPOSICIÓN (días)
FCNE	1	Comercial	120
	2	Artisanal	120
	3	Comercial	146
	4	Comercial	98
	5	Comercial	98
	6	Artisanal	98

4.8. Recolección de discos de espuma de poliuretano

Para la recolección de las muestras, se levantó la tapa superior del muestreador. Luego se retiró el disco PUF y se introdujo en una bolsa de aluminio que se encontraba empacada en doble bolsa plástica, sellándolas perfectamente. Posteriormente se guardaron las muestras en una nevera de poliestireno (ver Figura 12). Cada una de las muestras fueron identificadas con sus respectivos rótulos teniendo en cuenta la estación, hora, temperatura y período de muestro. Finalmente, las muestras se refrigeraron a 4 °C hasta su extracción.

4.8.1. Control de calidad de la toma de muestras

Debido al riesgo de contaminación cruzada que puede presentarse en la manipulación del disco PUF en el momento de ser retirado y durante su transporte, se realizó un blanco de campo^{3,4} empleando un disco PUF previamente preparado exponiéndolo durante el tiempo de la recolección de las muestras. Este blanco de campo fue tratado como una muestra real.



Figura 12. Recolección de la muestra disco PUF pasivo

4.9. Extracción de los discos de espuma de poliuretano recolectados

La extracción de los compuestos contenidos en cada disco PUF se realizó por el método *soxhlet*, dejando recircular 200 mL de éter de petróleo (Sigma-Aldrich grado reactivo ACS e ISO) durante 24 horas⁴ a una temperatura entre 35-40 °C (ver Figura 13). Transcurrido el tiempo el extracto se dejó enfriar a temperatura ambiente.

4.9.1. Control de calidad de la extracción de las muestras de discos PUF

Para analizar el riesgo de contaminación durante la extracción se realizó un blanco de solvente^{2,17} donde se trató el solvente de extracción, éter de petróleo, como una muestra real.

4.10. Tratamiento del extracto

Antes de realizar el proceso de concentración, fue necesario agregar al extracto obtenido de la muestra 1 mL de isooctano (JT Baker grado reactivo ACS), el cual presenta un punto de ebullición de 99.3 °C, siendo mayor que el punto de ebullición del éter de petróleo (p.e. 30-40 °C). Esto se realiza con el fin de retener la muestra y evitar

que se pierda o evapore en el proceso de concentración. A su vez, actúa como matriz que contiene la muestra durante el análisis cromatográfico. Posteriormente, se concentró hasta 10 mL por rota-evaporación. Finalmente se depositó en un vial ámbar de 10 mL y se concentró hasta 0.5 mL con un flujo de nitrógeno suave¹⁷ (ver Figura 13). Finalmente, el extracto obtenido se enrasó con hexano-acetona 80:20 y es almacenado en un vial ámbar de 1 mL protegido con papel de sellado a temperatura cercana a los 0 °C hasta su inyección en el equipo de GC.

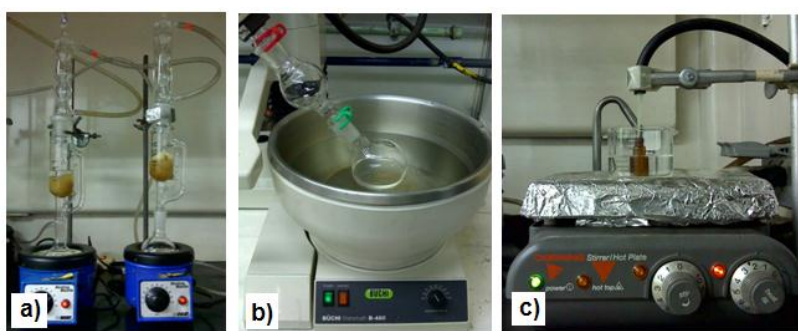


Figura 13. Extracción de discos PUFs y tratamiento de la muestra

4.11. Análisis de las muestras

4.11.1. Muestras de tres meses de exposición

Las muestras correspondientes a tres meses de exposición fueron analizadas en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales de la Pontificia Universidad Javeriana Cali en un equipo de GC-ECD. La rampa de temperatura (ver Tabla 7) aplicada permitió la adecuada separación de los compuestos analizar. Las condiciones cromatográficas óptimas establecidas permitieron el análisis de los diferentes extractos, las cuales se registran en la Tabla 7.

Tabla 7. Condiciones de trabajo en GC-ECD para el análisis de los extractos

PARÁMETRO	VALOR
Temperatura detector	290°
Temperatura inyector	260°
Modo inyector	<i>Splitless</i>
Gas portador	Helio
Flujo del gas	0.87 mL/min
Velocidad lineal	27 cm/s
Presión	44.4 kPa
Rampa de temperatura	0 °C/min hasta 60 °C 1 min 25 °C/min hasta 200 °C 0 min 10 °C/min hasta 220 °C 10 min 10 °C/min hasta 250 °C 1min
Cantidad inyectada	1 µL

El análisis se realizó para los siguientes plaguicidas organoclorados:

- α -, β -, γ - Hexaclorociclohexano (HCH)
- Heptacloro
- Aldrin
- Dieldrin
- Endrin
- α -, β - Endosulfán
- Diclorodifeniltricloroetano (*p,p'*-DDE, *p,p'*-DDD, *p,p'*-DDT)

4.11.2. Muestras de cuatro y cinco meses de exposición

Las muestras de cuatro y cinco meses de exposición fueron enviadas analizar en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Universidad de Siena-Italia en un equipo de GC-MS.

El análisis se realizó para los siguientes compuestos:

1. Plaguicidas organoclorados:

- Hexaclorobenceno
- α -, γ - Hexaclorociclohexanos
- Heptacloro y epóxido de heptacloro
- α -, β - Endosulfán
- Clordanos (*Trans*-clordano, *Cis*-clordano, *Trans*nona-clordano)
- Diclorodifeniltricloroetano (*o,p'*-DDE, *o,p'*-DDD, *p,p'*-DDE, *p,p'*-DDT)

2. Bifenilos policlorados.

3. Hidrocarburos aromáticos policíclicos:

- Acenafteno
- Acenaftileno
- Fluoranteno
- Fenantreno
- Antraceno
- Fluoreno
- Pireno
- Benzo(a)antraceno
- Criseno
- Benzo(b)fluoranteno
- Benzo(a)pireno
- Indeno(1,2,3-cd)pireno
- Dibenzo(a,h)antraceno
- Benzo(g,h,i)pireno

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis de muestras de tres meses de exposición

En la siguiente tabla se resume los parámetros del calibración para la cuantificación de los compuestos de interés en el GC del Laboratorio de Investigaciones Ambientales: ecuación de calibración, límites de detección y cuantificación, los cuales fueron evaluados con las recomendaciones de la IUPAC (1995) y son expresados en ppb ($\mu\text{g/L}$) en un rango de concentración para todos los compuestos entre 5 y 30 $\mu\text{g/L}$.

Tabla 8. Parámetros de calibración para la cuantificación de POCs en el GC-ECD

Plaguicida	Ecuación de calibración	Límite de detección (LD) (ppb)	Límite de cuantificación (LC) (ppb)	r^2 de las curvas de calibración
α -HCH	$Y=250128,9x-855647,4$	0.02	0.08	0,9988
β -HCH	$Y=235568,5-725089,4$	0.07	0.2	0.9991
γ -HCH	$Y=118167,9-164842,2$	0.1	0.3	0,9998
Heptacloro	$Y=217508,2-743972,7$	0.3	0.1	0,9978
Aldrin	$Y=235888,4-775275,1$	0.6	0.2	0,9973
α -Endosulfán	$Y=200700,0-545526,8$	0.3	0.9	0,9976
p,p' -DDE	$Y=240271,1-582966,4$	0.1	3.3	0,9985
Dieldrin	$Y=174949,3-433901,0$	0.4	1.3	0,9978
Endrin	$Y=174949,3-433901,0$	0.6	2.1	0.9975
p,p' -DDD	$Y=176261,3-399487,0$	1	3.6	0,9993
β -Endosulfán	$Y=129901,4-276961,4$	0.6	2.1	0.9980
p,p' -DDT	$Y=167459,3-304412,4$	0.7	2.2	0,9980

Los límites de detección, de cuantificación del instrumento, y el r^2 , muestran que el método empleado para la cuantificación de las muestras es aceptable puesto que los

coeficientes de correlación son cercanos a 0.999. En la Figura 14 se puede observar el cromatograma típico obtenido de los compuestos de interés.

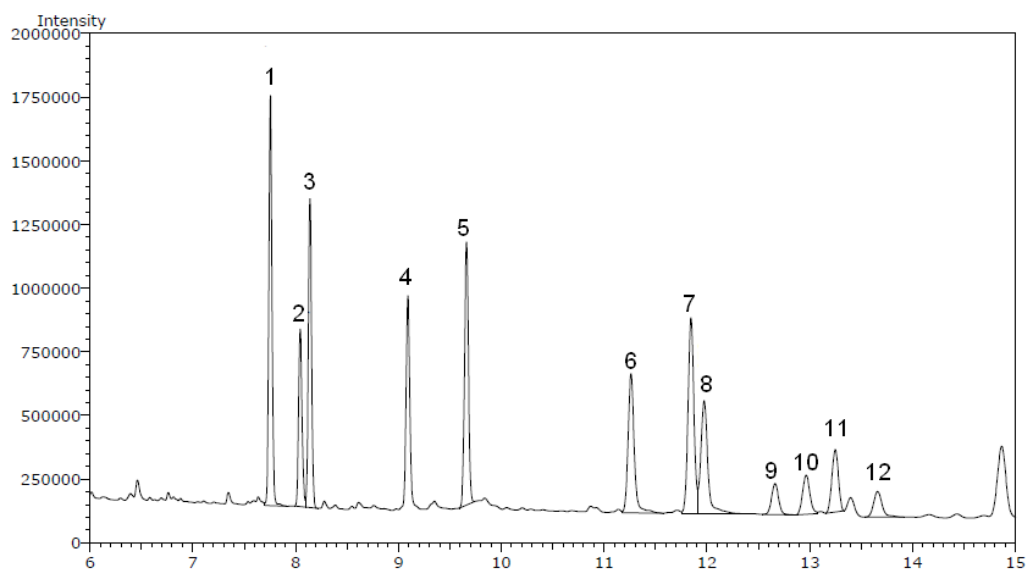


Figura 14. Cromatograma de los 12 plaguicidas organoclorados: (1) α -HCH; (2) β -HCH; (3) γ -HCH; (4) Heptacloro; (5) Aldrin; (6) α -Endosulfán; (7) p,p' -DDE; (8) Dieldrin; (9) Endrin; (10) p,p' -DDD; (11) β -Endosulfán; (12) p,p' -DDT

Los porcentajes de recuperación obtenidos de los 12 POCs en los discos PUF (ver Tabla 9) estuvieron entre 66.3 % para el α -HCH y 93.5 % para el dieldrin a una concentración de 10 ppb. Mientras que a 25 ppb, la recuperación osciló entre 80.8 % para el β -HCH y 101 % para el p,p' -DDT, los cuales son porcentajes aceptables puesto que se trabaja con multiresiduos de compuestos donde su polaridad puede variar ligeramente. En estudios donde se han reportado análisis de multiresiduos, estos datos son similares a ellos, en los cuales los porcentajes de recuperación oscilan entre 60-85 %¹⁸ y 81-94 %¹⁹ para varios POCs. Los datos de recuperación fueron utilizados para confirmar la integridad del análisis, por lo que no se realizaron correcciones en las muestras para las recuperaciones.

Tabla 9. Porcentajes de recuperación obtenidos de los plaguicidas organoclorados

Plaguicida	Recuperación 10 ppb (%)	S	CV	Recuperación 25 ppb (%)	S	CV
α -HCH	66.3	8.8	0.1	90.5	6.5	0.07
β -HCH	69.3	4.7	0.07	80.8	8	0.1
γ -HCH	70.1	6.1	0.1	83.4	7.5	0.1
Heptacloro	80.1	6.5	0.08	85.2	8.4	0.1
Aldrin	77.5	7.3	0.1	90.1	2.3	0.03
α -Endosulfán	90.4	9.4	0.1	90.3	5	0.05
<i>p,p'</i> -DDE	85.9	4.4	0.05	94.2	3.3	0.04
Dieldrin	93.5	8.2	0.1	95	4.3	0.05
Endrin	82.5	6.8	0.08	88.3	3.8	0.04
<i>p,p'</i> -DDD	92.1	1.1	0.01	94.7	2.4	0.03
β -Endosulfán	70.5	8.6	0.1	88.9	8.9	0.1
<i>p,p'</i> -DDT	92.1	3.3	0.03	101	3.3	0.03

Los porcentajes de recuperación de los analitos de interés muestran que al poseer los compuestos organoclorados y el éter de petróleo un carácter ligeramente apolar, existe gran afinidad del analito por el solvente, permitiendo remover en gran proporción a los plaguicidas del disco PUF, logrando que el solvente rompa la quimiosorción entre el plaguicida y éste.

En el proceso de extracción de los blancos ninguno de los analitos fue detectado. Se rastrearon 12 plaguicidas organoclorados de interés en las muestras obtenidas, no obstante el instrumento no logró detectar ninguno de los analitos, lo cual puede deberse a que las concentraciones presentes de estos plaguicidas en el aire se encuentran por debajo del límite de detección del método empleado.

5.2. Análisis de muestras de cuatro y cinco meses de exposición

El límite de detección instrumental (LDI) para POCs presentó un rango de 3-41 pg, para los PCBs el rango estuvo entre 3-16 pg y para los PAHs presentó un rango de 0.4-8 pg, los cuales se encuentran reportados para cada analito de interés en la Tabla 10.

Tabla 10. Límite de detección instrumental para cada (pg/m³) compuesto de interés

Compuesto	LDI (pg/m ³)	Compuesto	LDI	Compuesto (pg/m ³)	LDI
α-HCH	10	Acenafteno	2	PCB 52	14
γ-HCH	15	Acenaftileno	1	PCB 95	16
α-Endosulfán	26	Benzo(a)antraceno	0.4	PCB 101	2
B-Endosulfán	26	Benzo(b)fluoranteno	1	PCB 138	13
Epóxido de heptacloro	19	Benzo(a)pireno	2	PCB (28, 99, 110)	3
Heptacloro	19	Benzo(g,h,i)pireno	3		
Hexaclorobenceno	3	Criseno	0.4	PCB (187, 167, 177, 157, 180, 209)	4
Trans-clordano	13	Dibenzo(a,h)antraceno	2		
Cis-clordano	15	Fluoranteno	2		
Trans-nonaclordano	14	Fenantreno	2	PCB(151, 149, 118, 123, 146, 153)	15
o,p'-DDD	18	Fluoreno	4		
o,p'-DDE	19	Indeno(1,2,3-cd)pireno	8		
p,p'-DDE	19	Pireno	2		
p,p'-DDT	41				

5.2.1. Concentraciones de contaminantes orgánicos persistentes

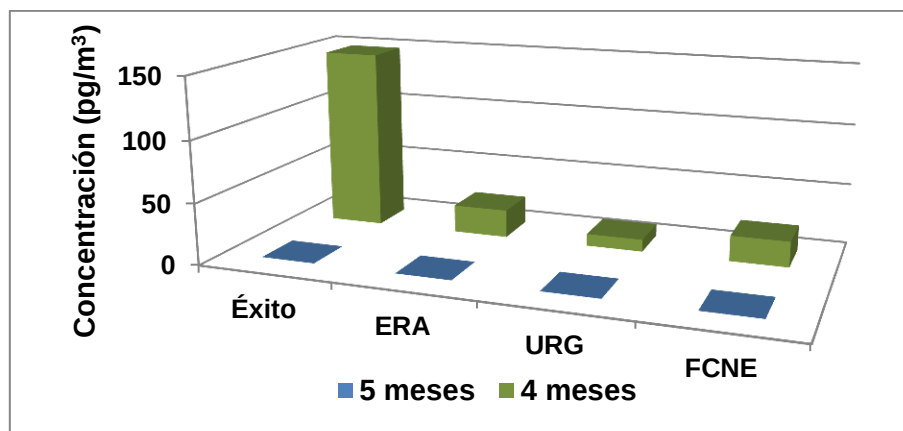
Los resultados de las concentraciones de POCs, PCBs e PAHs se encuentran reportados en los anexos 1,2 y 3 respectivamente.

En este estudio, se observó que las concentraciones de los COPs presentaron un patrón de decrecimiento con respecto a los tiempos de muestreo. Esto mismo lo habían reportado Harner y Pozo en el 2002¹¹ y 2004¹² respectivamente, en climas estacionales donde factores como la temperatura atmosférica, el cambio de flujo de los vientos y las variaciones climáticas afectaban la saturación y estabilidad de los compuestos captados en el PUF, comportamiento que se quería evaluar en condiciones tropicales. Los resultados obtenidos muestran que las pérdidas en climas tropicales son mucho más severas, lo cual hace importante el uso de los compuestos depuradores para el cálculo de la tasa de pérdida y el volumen de aire muestreado. Actualmente, Harner y Pozo están realizando la validación de su modelo de cálculo donde incluirán los datos obtenidos en la ciudad de Cali. Por el comportamiento observado en los períodos de muestreo se puede concluir que tres meses es el tiempo ideal aun en países tropicales.

Otro aspecto a resaltar es que los muestreadores artesanales presentaron desajustes mecánicos durante los tiempos de exposición, no obstante este aspecto no fue determinante en la pérdida de los compuestos durante la variación de tiempo de exposición, puesto que los muestreadores comerciales también presentaron este comportamiento. Los futuros muestreadores artesanales se recomiendan que sean fabricados con las medidas exactas y de ajuste preciso para no tener variables que interfieran en los resultados.

5.2.1.1. Hexaclorobenceno

Los resultados de las concentraciones del HCB, prohibido en Colombia en el año 1993²⁰, fueron valores bajos en comparación con las obtenidas de los demás contaminantes (ver Anexo 1). Las concentraciones variaron entre 10 y 148 pg/m³ en el período de 4 meses, mientras que en los 5 meses de exposición no se observó en ninguna de las estaciones como se puede observar en la Gráfica 1.



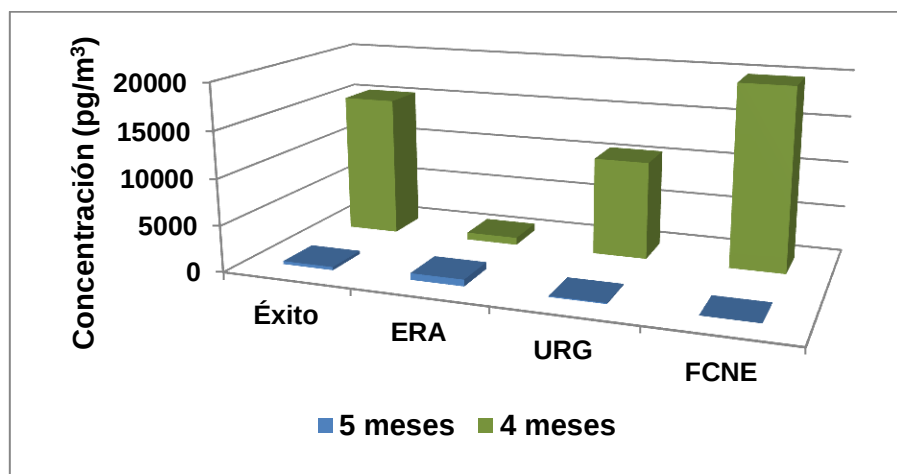
Gráfica 1. Concentraciones (pg/m³) del HCB en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses

La cantidad de HCB que se evapora al aire bajo condiciones normales no es significativa puesto que se volatiliza de un modo lento debido a su pequeña presión de vapor (2.3×10^{-3} Pa). Sin embargo, una vez presente en el aire a través de partículas de polvo contaminado, puede ser transportado a largas distancias, con una vida media de 0.63 a 6.28 años.²¹

En procesos de combustión como la incineración de basura municipal se producen pequeñas cantidades de HCB, siendo las emisiones gaseosas procedentes de este proceso la principal ruta de entrada del HCB a la atmósfera. Una vez que el HCB alcanza la atmósfera, comienza a oxidarse y simultáneamente las moléculas experimentan una redistribución de los grupos de isómeros. Posteriormente, debido a la baja presión de vapor se movilizan a la atmósfera aquellos isómeros de baja grado de cloración. Los de mayor grado de cloración (menor volatilidad), además de las fuentes de incineración, pueden ser transportados a la atmósfera como consecuencia de la desintegración de las partículas y posterior aglomeración de las micropartículas. Más allá de una cierta distancia las partículas cargadas con HCB se entremezclan con las demás partículas atmosféricas.²²

5.2.1.2. Hexaclorociclohexanos

En este estudio, se observó la presencia del α -HCH y γ -HCH, donde el acumulado de las concentraciones de estos HCHs varía desde 805 hasta 1.97×10^4 pg/m^3 durante el período de 4 meses y de 0 hasta 723 pg/m^3 en los 5 meses de exposición (ver Gráfica 2).



Gráfica 2. Acumulado de las concentraciones (pg/m^3) de hexaclorociclohexanos (α - y γ -HCH) en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses

El HCH fue utilizado como mezcla técnica isomérica que contiene principalmente cinco formas que sólo difieren en la orientación de los átomos de cloro alrededor del anillo de ciclohexano. Entre los isómeros principales están presentes en la mezcla como α -HCH (53-70 %), β -HCH (3-14 %), γ -HCH (11-18 %) y δ -HCH (6-10 %). De todos los isómeros, el responsable de la actividad insecticida es el gamma. La otra forma que ha sido utilizado es como lindano que consiste casi enteramente de γ -HCH.²³ Este plaguicida fue prohibido en Colombia en el año 1997.²⁰

Las concentraciones para los diferentes isómeros varían desde 0 hasta 1.86×10^4 pg/m^3 durante los 4 meses de exposición y de 0 hasta 723 pg/m^3 en los 5 meses de

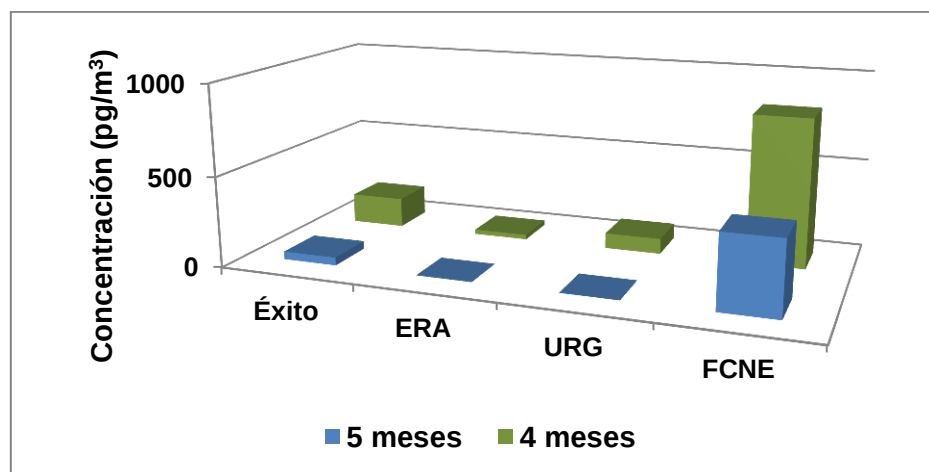
muestreo, con una media de concentración de $4.48 \times 10^3 \text{ pg/m}^3$ para el α -HCH. Para el γ -HCH, se encontraron concentraciones desde 0 hasta $1.41 \times 10^3 \text{ pg/m}^3$ en el período de 4 meses, mientras que para los 5 meses de exposición no se observaron concentraciones de este plaguicida en ninguna de las estaciones, con una media de concentración de 351 pg/m^3 (ver anexo 1).

Estas POCs son isómeros volátiles con presión de vapor de $1.6 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, que una vez liberados en el aire, se dispersan en todos los ámbitos del medio ambiente, siendo la evaporación el proceso más importante de su distribución en el medio. Teniendo en cuenta que las concentraciones más altas entre estos dos isómeros fue el del α -HCH, probablemente se debe a que éste es el isómero en mayor concentración en la mezcla técnica de HCHs, como se mencionó con anterioridad. Además, porque el isómero γ -HCH se transforma en α -HCH por acción de la radiación ultravioleta²⁴ contribuyendo este proceso a que se obtenga mayores concentraciones del isómero alfa.

5.2.1.3. Clordanos

Los resultados obtenidos del acumulado de las concentraciones de los clordanos (*trans*-clordano, *cis*-clordano, *trans*-nonaclordano) no fueron tan altos con respecto a los otros POCs. El período de 4 meses presentó concentraciones con valores desde 26 hasta 822 pg/m^3 , y de 0 hasta 407 pg/m^3 durante los 5 meses de exposición. El *cis*-clordano sólo se observó en la estación FCNE en el período de 4 meses, estación en la cual se hallaron las mayores concentraciones de los clordanos (ver Gráfica 3). Las medias de las concentraciones estuvieron entre 94 pg/m^3 para el *trans*-clordano, 26 pg/m^3 para el *cis*-clordano y 37 pg/m^3 para el *trans*-nonaclordano. Estos valores obtenidos se deben a que el clordano es una mezcla técnica de compuestos diferentes, en la cual los principales constituyentes son el *cis*-clordano (70 %), *trans*-clordano (25 %), *trans*-nonaclordano y *cis*-nonaclordano (< 1 %). Tras su aplicación en el suelo una buena parte de este compuesto se evapora o se lava por medio de los escurrimientos

provocados por la lluvia y el riego, pero posteriormente se volatiliza, especialmente el *cis*-clordano y el *trans*-clordano. Su volatilidad, persistencia y poca solubilidad en agua hacen que se desplace largas distancias en la atmósfera.²⁵



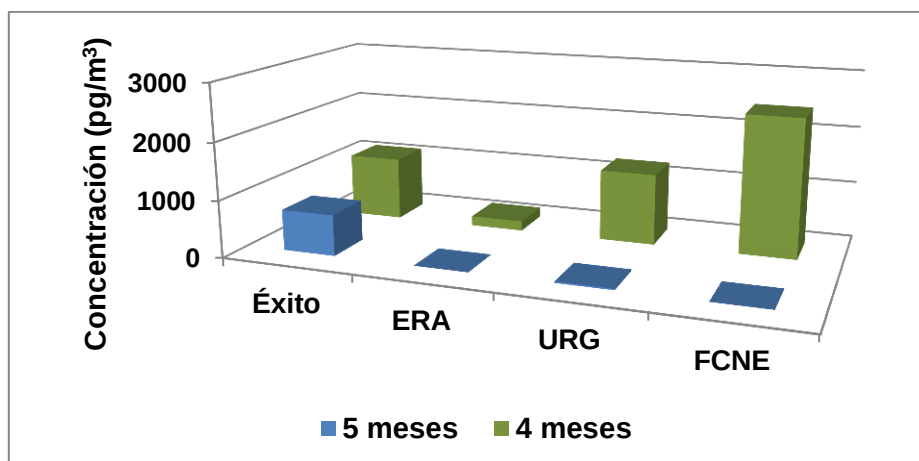
Gráfica 3. Acumulado de las concentraciones (pg/m^3) de clordanos (*trans*-clordano, *cis*-clordano, *trans*-nonaclordano) en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses

Según los resultados, se obtuvieron mayores concentraciones del *trans*-clordano que del *cis*-clordano el cual está presente en la mezcla técnica en un 70 %. De este modo, se esperaba encontrar mayores concentraciones del *cis*-clordano, sin embargo la alta concentración del *trans*-clordano se puede deber a que este isómero, también se encuentra presente entre un 20 y 22 % del heptacloro grado técnico.²⁶ En Colombia, se importó clordano en forma continua al país, 743 toneladas desde 1975 hasta 1988, y fue prohibido en el año 1993²⁰

5.2.1.4. Heptacloro y epóxido de heptacloro

El acumulado de las concentraciones del heptacloro y epóxido de heptacloro estuvo entre 172 hasta $2.43 \times 10^3 \text{ pg/m}^3$ en los 4 meses de exposición y de 0 hasta 721 pg/m^3 en el período de 5 meses. La concentración más baja de heptacloro se observó en la

estación ERA, mientras que la más alta fue en URG y FCNE en el período de 4 meses. Las medias de concentraciones estuvieron entre 497 y 94 pg/m^3 para el heptacloro y epóxido de heptacloro respectivamente.



Gráfica 4. Acumulado de las concentraciones (pg/m^3) de heptacloro y epóxido de heptacloro en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses

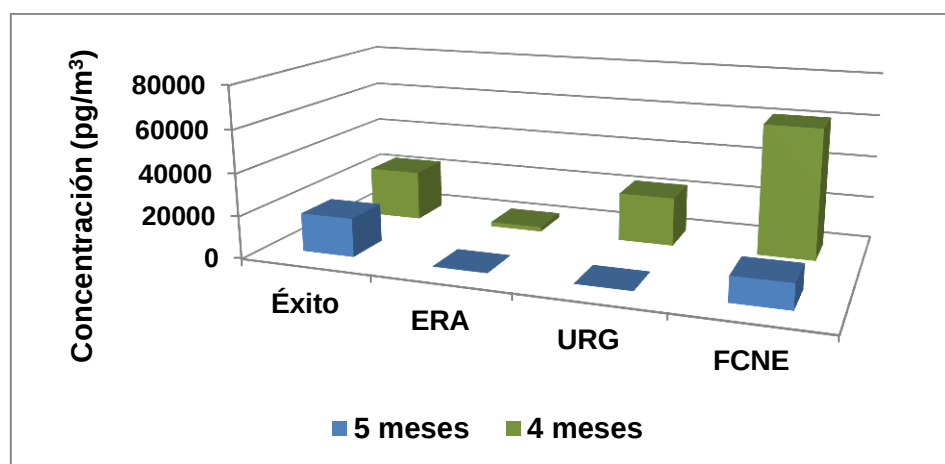
Las concentraciones encontradas del heptacloro se debe a su uso extenso en el pasado para matar insectos en viviendas, edificios y en cosechas de alimentos, especialmente maíz. El heptacloro se importó al país en forma continua desde 1974 hasta 1986 (619 toneladas) y a pesar que su uso está prohibido en Colombia desde 1993²⁰, actualmente se sigue utilizando para el control de hormigas mediante la inyección al suelo, adhiriéndose fuertemente a éste y luego se evaporan lentamente al aire. Por otro lado la presencia del epóxido de heptacloro se debe a que es el producto de oxidación biológica del heptacloro.⁶

5.2.1.5. Endosulfanos

Los resultados obtenidos para el acumulado de las concentraciones de los endosulfanos (ver Gráfica 5) varían desde 2.16×10^3 hasta 6.13×10^4 pg/m^3 durante 4

meses de exposición y de 95 hasta 1.82×10^4 pg/m³ en el período correspondiente a 5 meses. Concentraciones relativamente altas debido a que el endosulfán es un plaguicida que fue recientemente prohibido en el año 2001²⁰, sumado a que es un compuesto que además de ser persistente es muy volátil, lo que facilita su difusión en el ambiente después de ser aplicado. Este proceso le permite subir a la tropósfera y viajar grandes distancias en el aire, ya sea en forma de gas o de partículas.²⁷

Cabe notar que el endosulfán es el POC con más altas concentraciones atmosféricas en el mundo. En el año 2005, el monitoreo realizado por el Proyecto Global de Muestreo Pasivo, relevó concentraciones entre un rango de decenas a miles de picogramos por metro cúbico (pg/m³). De todos sus isómeros analizados, el α -endosulfán fue el más abundante, representando más del 90% del total de endosulfán.²⁷



Gráfica 5. Acumulado de las concentraciones (pg/m³) de endosulfanos (α - y β -endosulfán) en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses

Las concentraciones para los diferentes isómeros, variaron desde 926 hasta 5.98×10^4 pg/m³ durante los 4 meses de exposición y de 95 hasta 1.51×10^4 pg/m³ en los 5 meses de exposición, con una media de concentración de 1.36×10^4 pg/m³ para el α -

endosulfán, representando la mayor media de concentración de todos los plaguicidas organoclorados investigados. Para el β -endosulfán, se encontraron concentraciones desde 89 hasta 1.78×10^3 pg/m³ en el período de 4 meses y durante los 5 meses de exposición se observaron concentraciones desde 0 hasta 1.57×10^3 pg/m³, con una media de 468 pg/m³ (ver anexo 1).

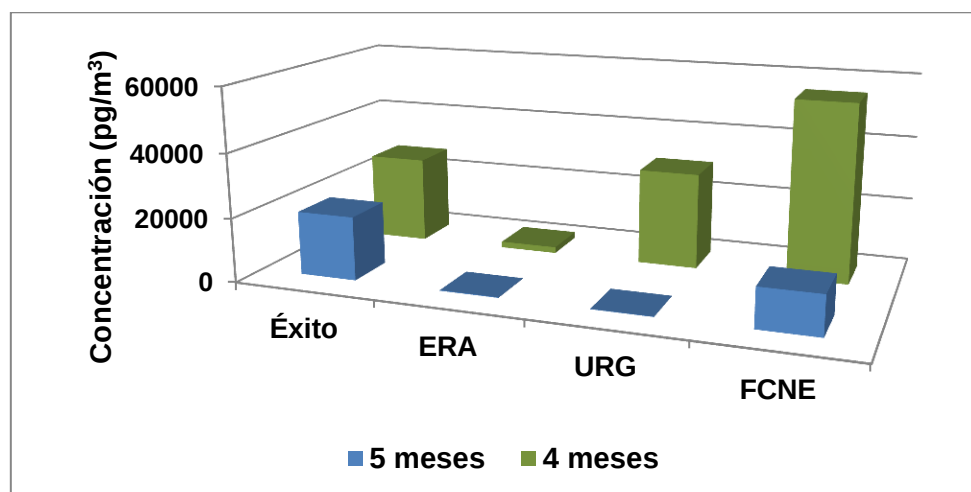
De esta forma el α -endosulfán es el compuesto e isómero más abundante de los endosulfanes encontrados, lo cual se debe a su composición comercial (en una proporción de 2:1 a 7:3) y a su presión de vapor (1.05×10^{-3} Pa) que le permite transportarse a largas distancias, siendo de este modo ubicuo y mucho más abundante. Mientras que el β -endosulfán se oxida más rápidamente en el medio ambiente por fotólisis, hidrólisis y biotransformación, formando predominantemente endosulfán sulfato y α -endosulfán.²⁸ Sin embargo, las concentraciones obtenidas del β -endosulfán no se pueden desestimar puesto que están entre miles de picogramos por metro cúbico, probablemente su presión de vapor (1.38×10^{-4} Pa) le confiere la tendencia a la volatilización, además de su persistencia en el ambiente, con un tiempo de vida media de 800 días.

5.2.1.6. *Diclorodifeniltricloroetanos*

El diclorodifeniltricloroetano es una mezcla de tres formas de DDT: *p,p'*-DDT (85 %), *o,p'*-DDT (15 %) y pequeñas cantidades de *o,o'*-DDT, también puede contener DDE y DDD como impureza²⁹. En el país se importaron aproximadamente 9.221 toneladas de DDT para el control de vectores transmisores de malaria y fue prohibido en el año de 1993²⁰. Tanto el DDE como el DDD son productos de degradación del DDT siendo compuestos estables, de larga vida en el medio y bastante tóxicos.²⁹ Por lo cual, en este estudio se observó la presencia de los isómeros *p,p'*-DDT, *o,p'*-DDE, *p,p'*-DDE y *o,p'*-DDD con una acumulado de concentraciones de 1.93×10^3 hasta 5.75×10^4 pg/m³

para el período de 4 meses y de 115 hasta 1.98×10^4 pg/m³ durante los 5 meses de exposición (ver Gráfica 6).

Las concentraciones para los isómeros del DDE fueron altas (ver anexo 1), las cuales varían entre $559-2.89 \times 10^4$ pg/m³ y $366-2.26 \times 10^4$ pg/m³ en el período de 4 meses; $68-8.83 \times 10^3$ pg/m³ y $47-5.62 \times 10^4$ pg/m³ durante 5 meses de exposición para el *o,p'*-DDE y *p,p'*-DDE respectivamente. Para el *p,p'*-DDT se observaron concentraciones desde 339 hasta 9.91×10^3 pg/m³ en los 4 meses y desde 0 hasta 5.44×10^3 pg/m³ en los 5 meses de muestreo. No obstante, las concentraciones del *o,p'*-DDD presentaron valores bajos ($0-38$ pg/m³, período de 4 meses) comparados con los demás isómeros, no observándose en ninguna de las estaciones durante el período de 5 meses. Las medias de concentración (pg/m³) para cada isómero fue de 7.02×10^3 para el *o,p'*-DDE, 5.31×10^3 para el *p,p'*-DDE, 2.9×10^3 para el *p,p'*-DDT y 6 para el *o,p'*-DDD.



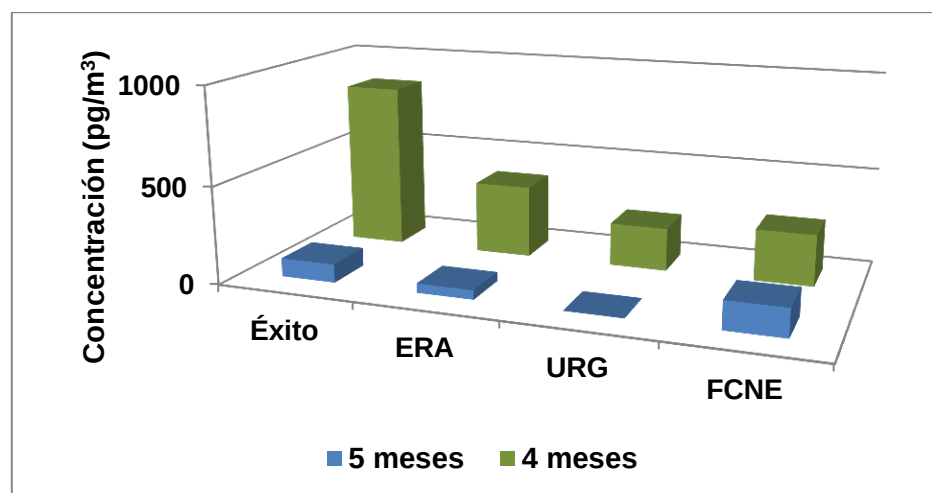
Gráfica 6. Acumulado de las concentraciones (pg/m³) de *p,p'*-DDT, *o,p'*-DDE, *p,p'*-DDE y *o,p'*-DDD en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses

Puesto que el DDT y sus isómeros son compuestos semivolátiles, ellos pueden entrar al aire cuando se evaporan desde el agua y suelos contaminados. El DDE es hasta ocho veces más volátil que el DDT, mientras que el DDD es cinco veces menos volátil que el DDT. Esto es consistente con los resultados obtenidos porque el DDE es el isómero

más persistente y se encuentra en concentraciones considerables en niveles superiores de la cadena trófica, sedimentos y sitios remotos.²⁹

5.2.1.7. Bifenilos policlorados

El acumulado de las concentraciones de los PCBs estuvo entre 223 hasta 852 pg/m^3 en el muestreo de 4 meses y de 0 hasta 144 pg/m^3 en el período de 5 meses (ver Gráfica 7). El valor más alto de concentración obtenido fue de 458 pg/m^3 para el PCB-95 en la estación Éxito. Puesto que aún se encuentran presentes materiales que están en uso y desuso del sector industrial, los PCBs probablemente han entrado al medio ambiente a través de derrames accidentales y por escapes o incendio de equipos que contenían este tipo de contaminante.²¹



Gráfica 7. Acumulado de las concentraciones (pg/m^3) de PCBs en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses

De los isómeros de PCBs que fueron detectados (ver anexo 2), según la cantidad de cloros y el sistema de numeración de la IUPAC, se incluyen en la Tabla 11 con el rango de concentración observado en las cuatro estaciones de muestreo según el tiempo de exposición.

Tabla 11. Rango de concentraciones de PCBs en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses de exposición

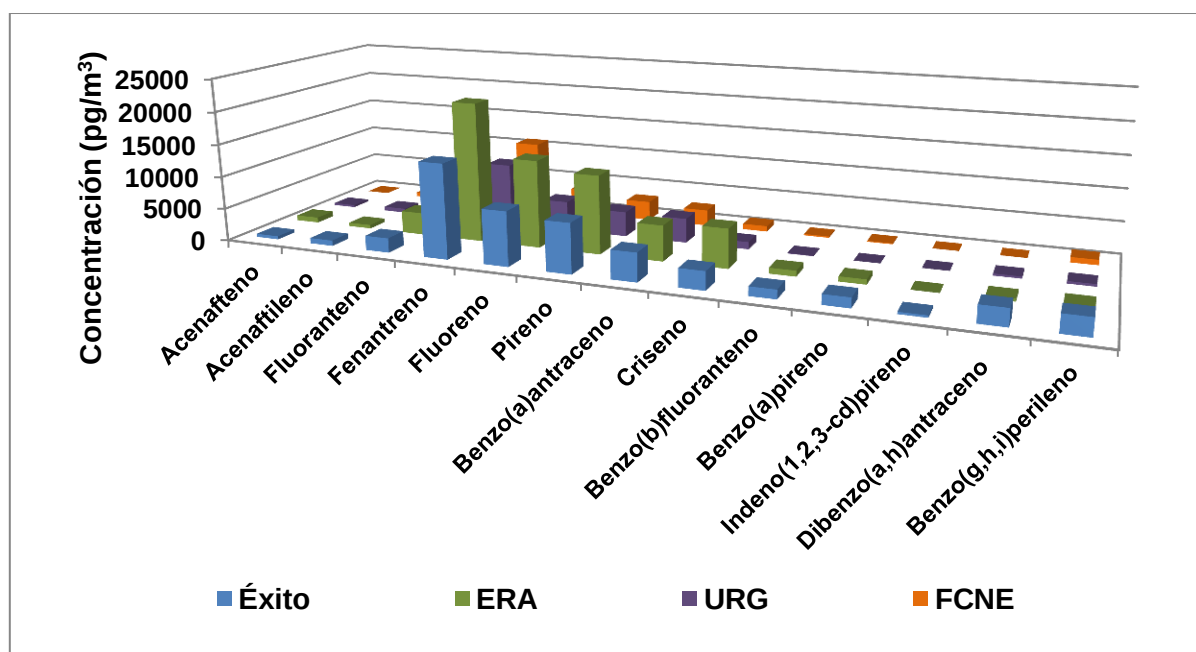
Estructura	PCB #	Rango de concentración (pg/m ³)	
		4 meses	5 meses
Triclorobifenilo	28	0-137	0-38.4
Tetraclorobifenilo	52	0-30.3	0-12.5
Pentaclorobifenilo	95	0-458	0-51.3
	99	0-14.1	0-4.5
	101	2.9-57.5	0-17.0
	110	0-31.2	0-4.4
	118	0-97.3	0-8.0
	123	72-140	0-39.3
Hexaclorobifenilo	138	0-7.2	0-4.0
	146	0-1.2	0
	149	0-7.8	0
	151	0-4.8	0
	153	0-10.5	0-2.8
	157	0-1.6	0
	167	0-23.2	0 - 2.7
Heptaclorobifenilo	177	0-3.3	0
	180	0-3.7	0
	187	0-1.8	0

La volatilización, la degradación, la presión de vapor y la persistencia de los PCBs varían según el grado de cloración de cada bifenilo. Los PCBs con mayores posiciones cloradas se depositan preferentemente en sedimentos, adhiriéndose firmemente al suelo, mientras que los PCBs más livianos se evaporan al aire.³⁰ La persistencia de estos contaminantes puede oscilar entre unos pocos días para bifenilos monoclorados hasta años o décadas para los bifenilos con mayor cloración,³¹ razones por las cuales en este estudio se observó la presencia en general de bifenilos triclorados hasta pentaclorados en todas las estaciones y períodos de muestreo, mientras que los

bifenilos con mayor cloración presentaron menores concentraciones y no fueron constantes en todas las estaciones.

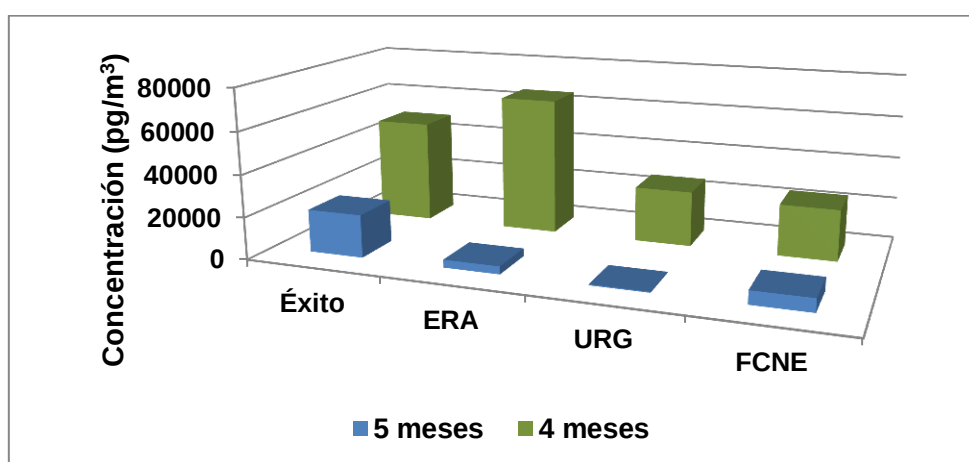
5.2.1.8. Hidrocarburos aromáticos policíclicos

En la atmósfera de la ciudad se observó la presencia de diferentes PAHs (ver anexo 3). De 13 PAHs, 6 mostraron valores de concentraciones altas en todas las estaciones en el período de 4 meses de exposición (ver Gráfica 8). Los rangos de las máximas concentraciones de estos contaminantes en las cuatro estaciones son $(1.8-3.42) \times 10^3$ pg/m³ para el fluoranteno, $(9.63-21.3) \times 10^3$ pg/m³ para el fenantreno, $(4-13.4) \times 10^3$ pg/m³ para el fluoreno, $(2-12) \times 10^3$ pg/m³ para el pireno, $(2.5-5.4) \times 10^3$ pg/m³ para el benzo(a)antraceno y $857-6 \times 10^3$ pg/m³ para el criseno.



Gráfica 8. Concentraciones (pg/m³) de hidrocarburos aromáticos policíclicos en las estaciones de muestreo durante el período de 4 meses

El acumulado de las concentraciones de los hidrocarburos estuvo para el período de 4 meses entre $(2.45-6.56) \times 10^4 \text{ pg/m}^3$ y de 459 hasta $2.04 \times 10^4 \text{ pg/m}^3$ en los 5 meses de exposición (ver Gráfica 10). En el período de 4 meses, las mayores concentraciones detectadas se presentaron en la estación ERA, localizada en el centro de la ciudad. Sin embargo, para el posterior período de muestreo, las concentraciones de estos PAHs disminuyeron moderadamente en la estación Éxito en comparación de las otras estaciones.



Gráfica 9. Acumulado de las concentraciones (pg/m^3) de hidrocarburos aromáticos policíclicos en las estaciones de muestreo durante los períodos de 4 y 5 meses

Las elevadas concentraciones de PAHs en la estación ERA se deben principalmente al denso flujo vehicular de transporte público y particular de la zona, a las actividades industriales y a las quemas realizadas en la zona oriental de la ciudad que generan los PAHs y son transportados por los vientos. Al observar el comportamiento de los vientos según los datos meteorológicos del DAGMA, en esta estación prevalecen los vientos provenientes del occidente de la ciudad, lo que indicaría un transporte desde la zona del Pacífico a través de los Farallones.

Al tener buena facilidad de transporte desde la zona de origen existe la posibilidad de que algunos PAHs contaminen suelos agrícolas y se ingieran mediante alimentos que

estuvieron cultivados en este tipo de suelos.. Por ello, se ha demostrado que ocho PAHs tienen capacidad cancerígena vía oral, en el cual siete, fueron encontrados en este estudio: benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(g,h,i)perileno, indeno(1,2,3-c,d)pireno; para el resto, se desconoce si son cancerígenos a través de los alimentos.³²

Por otra parte, en los procesos que generan PAHs siempre dan lugar a mezclas de composición similar, donde se toma el benzo(a)pireno como referencia para el control de PAHs totales, puesto que suele representar entre un 1-15 % de la concentración total. Por lo tanto, la OEHHA ha establecido que $1.7 \times 10^3 \text{ pg/m}^3$ es el valor de exposición permitido por inhalación. En este estudio, la concentración obtenida del benzo(a)pireno no se encuentra por encima de este valor permitido, pues el máximo observado fue $1.5 \times 10^3 \text{ pg/m}^3$ en la estación Éxito.

5.2.2. Comparación de las concentraciones de los COP con otros países

En la Tabla 12 se reportan las concentraciones (pg/m^3) de COPs encontradas en estudios realizados en Concepción-Chile, Ciudad de México-México e Iconio-Turquía, empleando muestreadores de aire con discos PUF y los rangos obtenidos en los períodos de muestreo de este estudio. Se puede observar que las concentraciones obtenidas de los POCs en Cali, son rangos de valores más elevados que en las ciudades de Concepción, Ciudad de México e Iconio. En el caso del rango del acumulado de los PCBs con el presentado en la Ciudad de México ($229\text{-}657 \text{ pg/m}^3$) no se encuentran tan alejados de los valores obtenidos en Cali ($0\text{-}852 \text{ pg/m}^3$), mientras que en Concepción e Iconio las concentraciones son menores. Para los valores de las concentraciones de los HAPs, el fluoranteno, pireno, fluoreno, fenantreno y acenafteno encontradas en Iconio, son consistentes con las concentraciones obtenidas en la ciudad de Cali. En general para estas dos familias de COPs, los valores obtenidos para este

estudio preliminar son altos, lo cual implica la necesidad de evaluaciones con mayor número de estaciones y una secuenciación temporal anual.

Tabla 12. Concentraciones de contaminantes orgánicos persistentes encontradas en este estudio comparadas con otros países

COP	CHILE ³⁴ Concepción (pg/m ³)	MÉXICO ³⁵ Ciudad de México (pg/m ³)	TURQUÍA ³⁶ Iconio (pg/m ³)	COLOMBIA Cali (pg/m ³)
HCB	-	22.8-37.1	-	0-148
α-HCH	0.2-1.7	5.1	360	0-18.6 x 10 ³
γ-HCH	0.3-17.4	20.9	160	0-1.4 x 10 ³
TC	0.4-4.7	4.3-8.8	-	0-420
CC	0.8-3	3.1-6.8	-	0-255
TNC	0.5	-	-	0-147
Hep	1.7-12.2	-	20	0-1.7 x 10 ³
Hepx	1.8	-	-	0-744
α-End	2.0-36.3	-	8	95-59.8 x 10 ³
β-End	0.4-5	-	-	0-1.8 x 10 ³
<i>p,p'</i> -DDE	N/D	5.1-34.3	10	47-22.6 x 10 ³
<i>o,p'</i> -DDE	-	2.8-6.8	-	68-28.9 x 10 ³
<i>o,p'</i> -DDD	-	1.6-3.1	-	0-38
<i>o,p'</i> -DDT	N/D	21.1-82.8	-	0-9.9 x 10 ³
ΣPCB	0.2-27.2	229-657	78	0-852
Flu	5.6-1.2 x 10 ³	4.8-9.7	15 x 10 ³	0-3.4 x 10 ³
Pir	146-509	2.7-5.4	11 x 10 ³	32.8-12 x 10 ³
B(a)A	2.5-14.7	0.28-0.51	300	0-5.4 x 10 ³
Cri	0.7-55.4	0.37	700	0-6 x 10 ³
F	-	2.8-4	9.8 x 10 ³	31-13.4 x 10 ³
Fen	-	21.1-45.7	53.6 x 10 ³	0-21.3 x 10 ³
B(b)F	-	0.1	100	0-1.4 x 10 ³
B(a)P	-	0.05	100	0-1.5 x 10 ³
Ace	-	0.4-0.6	3.8 x 10 ³	0-812
I(1,2,3-cd)P	-	-	40	0-326
DB(a,h)A	-	-	30	0-2.6 x 10 ³

Sin embargo, en un estudio realizado por el grupo de investigación GICAMP en el 2010, en el Centro de Investigación CORPOICA (Palmira-Valle) se observaron altas concentraciones de algunos plaguicidas organoclorados que concuerdan con las obtenidas en este estudio. Para el β -endosulfán la concentración estuvo en un rango de 4909 hasta 12090 pg/m^3 y el *pp'*-DDE fue de 140 hasta 396 pg/m^3 .³⁷

Estas concentraciones de los COPs muestran que, a pesar de que están prohibidos, aún existen residuos por su uso prolongado en el pasado, debido a que son persistentes y volátiles. A su vez, su evaporación se ve influenciada por las condiciones ambientales locales, especialmente por la temperatura y la humedad.

Por otra parte, las concentraciones encontradas de los contaminantes orgánicos persistentes en este estudio todavía se encuentran bajo los niveles de permisibilidad según OSHAS en 8 horas de exposición y 5 días a la semana en el lugar de trabajo (ver Tabla 13). Estos niveles se toman como referencia puesto que no hay un registro de los niveles permitidos en aire por ninguna entidad ambiental. Sin embargo, la exposición ocupacional se considera como una forma de exposición ambiental, pero con unas características peculiares. La principal es que la exposición laboral tiene lugar a concentraciones mucho mayores que la ambiental. Por otra parte es una exposición que puede tener variaciones en su concentración, y que tiene lugar durante un período limitado de tiempo a lo largo del día y de la semana. Finalmente, con frecuencia la exposición ocurre en lugares confinados, sometidos a condiciones no habituales de temperatura, y en muchas ocasiones con exposición relacionada a otros compuestos químicos.³² Por lo tanto, no se puede desestimar que las concentraciones observadas son por lo general relativamente altas, con muy probable influencia del clima tropical³⁸ de la ciudad, que presenta una temperatura media de 25 °C³⁹ con un mínimo promedio de 18.7 °C y un máximo promedio de 30 °C, lo cual influye en su proceso de volatilización.

Tabla 13. Niveles de permisibilidad según OSHAS en 8 horas de exposición y 5 días a la semana en el lugar de trabajo

COP	Límite permitido por OHSAS (pg/m ³) ²¹
HCB	----
Hexaclorociclohexanos Clordanos Heptacloro Epóxido de heptacloro	5 x 10 ⁸
Endosulfán	1 x 10 ⁸
DDT	1 x 10 ⁹
ΣPCB	1 x 10 ⁵
ΣPAH	1 x 10 ⁸

Es necesario aclarar que, en cuanto al HCB, la EPA sólo ha promulgado advertencias para proteger al público de los posibles efectos sobre la salud de la exposición de este contaminante en el agua potable. No hay normas de salud o recomendaciones adicionales para esta sustancia.

6. CONCLUSIONES

- La evaluación preliminar las concentraciones de contaminantes orgánicos persistentes en la atmósfera de la ciudad de Santiago de Cali, empleando muestreadores de aire pasivo con espuma de poliuretano, evidencia la persistencia y la residualidad de estos contaminantes aun cuando su empleo ha sido prohibido. Aunque la distribución y los valores de las concentraciones de estos contaminantes en la ciudad es diferente en cada zona, por lo general su presencia se observó a lo largo de los puntos de muestreo en el transecto norte-sur de la ciudad.
- Debido al uso intensivo y prolongado que se hizo en el pasado la presencia de los plaguicidas organoclorados continua vigente en el aire de la ciudad de Santiago de Cali a pesar de que estos contaminantes fueron prohibidos hace años. De los plaguicidas organoclorados, los que presentaron concentraciones relativamente elevadas en el período de 4 y 5 meses fueron el α -HCH, el γ -HCH, el α -endosulfán, el β -endosulfán, el o,p'-DDE, el p,p'-DDE y el p,p'-DDT. El resto de los plaguicidas observados (HCB, heptacloro y epóxido de heptacloro, clordanos y el o,p'-DDD) presentaron concentraciones esporádicas, restringidas a ciertos períodos y puntos de monitoreo.
- La concentración total obtenidas de los bifenilos policlorados en el período de cuatro y cinco meses puede atribuirse a que estos aún se encuentran presentes en materiales que están en uso y desuso del sector industrial, su presencia se continúa observando puesto que estos contaminantes no se degradan fácilmente en el ambiente, permaneciendo por largo tiempo en la atmósfera de la ciudad. Cabe notar, que se observó la presencia en general de bifenilos triclorados hasta pentaclorados en todas las estaciones y períodos de muestreo, mientras que los bifenilos con mayor cloración presentaron menores concentraciones y no fueron constantes en todas las estaciones.

- Se observó la presencia de diferentes hidrocarburos aromáticos policíclicos, seis de los trece observados presentaron mayor continuidad con medias de concentraciones todas ellas en miles de pg/m^3 . Las altas concentraciones encontradas en este estudio se deben principalmente a fuentes directas de combustión, como el tráfico automotor, así como las actividades industriales que se desarrollan dentro y fuera de la ciudad.
- La ciudad Santiago de Cali presenta concentraciones de plaguicidas organoclorados y bifenilos policlorados relativamente más altas que los valores registrados en otras ciudades del mundo. Aunque las concentraciones obtenidas de hidrocarburos aromáticos policíclicos no se encuentran tan alejadas de las reportadas en otros estudios, las concentraciones obtenidas de estos contaminantes aún se encuentran bajo los niveles de permisibilidad de la OSHAS.

7. RECOMENDACIONES

Este estudio representa una exploración preliminar de la calidad actual del ambiente de la ciudad de Santiago de Cali, puesto que se comprobó la presencia de contaminantes orgánicos persistentes. En estudios futuros es importante efectuar un inventario de las fuentes directas de estos contaminantes y monitorear en tres a cinco estaciones con un muestreo activo de alto volumen, así como una red de 10 a 15 estaciones de muestreo pasivo. Los muestreadores pasivos deben localizarse en los sitios de alto volumen para efectos de comparación y en períodos de integración de tres meses.⁴⁰ A su vez, es necesario tener en cuenta el empleo de compuestos depuradores con el fin de conocer la tasa de muestreo en los muestreadores ubicados en cada estación y calcular la posible pérdida de analitos originada por efecto de volatilización y arrastre del compuesto por el flujo del aire al recircular dentro del muestreador.

Además, es necesario que se apliquen en conjunto las tres herramientas principales para evaluar la calidad de aire: i) monitoreo del ambiente; ii) modelos e iii) inventario o medición de emisiones, con el fin de que no sea sólo recopilar datos sino proporcionar la información necesaria para que los encargados de formular políticas y los planificadores tomen decisiones fundamentadas sobre la gestión y mejoramiento del ambiente de la ciudad. De este modo, el monitoreo, la elaboración de modelos de simulación y la evaluación de las emisiones deben ser concebidos como componentes interrelacionados en todo enfoque integral para estudiar la exposición o determinar el cumplimiento de los criterios de calidad del aire.³

8. REFERENCIAS

1. Fernández, P; Grimalt, J. On the Global Distribution of Persistent Organic Pollutants. *Environmental Analysis*, 2003. 57, 514-521 pp.
2. Jaward, F; Farrar, N; Harner, T; Sweetman, A; Jones, K. Passive air sampling of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated naphthalenes across europe. *Environmental Chemistry*, 2004. 23, 1355-1364 pp.
3. United Nations Environment Programme (UNEP). Guía para el Plan de Vigilancia Mundial de Contaminantes Orgánicos Persistentes. UNEP Chemicals, 2007.
4. Lans, E; Marrugo, J; Diaz, B. Study of Contamination by Organochlorine Pesticides in the Cienaga Grande Waters of the Low Sinu River Valley. *Temas Agrarios*, 2008. 13, 49-56.
5. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Global Environment Facility (GEF), Banco Mundial (BM). Inventario Nacional de Existencias de Plaguicidas COP, Colombia 2006. Proyecto de actividades habilitadoras en el marco del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP). Bogotá D.C, Colombia. 2007.
6. World Health Organization. Health Risks of Persistent Organic Pollutants from Long-Range Transboundary Air Pollution. Netherlands. 2003.
7. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Global Environment Facility (GEF), Banco Mundial (BM). Inventario preliminar de compuestos bifenilos policlorados-PCB existentes en Colombia. Proyecto de actividades habilitadoras en el

marco del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP). Bogotá D.C, Colombia. 2007.

8. Harner, T; Pozo, K; Gouin T; Macdonald, A; Hung, H; Cainey, J. Global pilot study for persistent organic pollutants (POPs) using PUF disk passive air samplers. *Environmental Pollution*, 2006. 144, 445-452 pp.
9. Thomas, J; Holsen, T.M; Dhaniyala, S. Computational fluid dynamic modeling of two passive samplers. *Environmental Pollution*, 2006. 144, 384-392 pp.
10. Hazrati, S; Harrad, S. Calibration of polyurethane foam (PUF) disk passive air samplers for quantitative measurement of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): Factors influencing sampling rates. *Chemosphere*, 2007. 67, 448-455 pp.
11. Shoeib, M; Harner, T. Characterization and comparison of three passive air sampler for persistent organic pollutants. *Environmental Science and Technology*, 2002. 36, 4142-4151 pp.
12. Pozo, K; Harner, T; Shoeib, M; Urrutia, R; Barra, R; Parra, O; Focardi, S. Passive-Sampler Derived Air Concentrations of Persistent Organic Pollutants on a North-South Transect in Chile. *Environmental Science and Technology*, 2004. 38, 6529-6537 pp.
13. Harner, T; Shoeib, M; Diamond, M; Stern, G; Rosenberg, B. Using Passive Air Samplers To Assess Urban-Rural Trends for Persistent Organic Pollutants. 1. Polychlorinated Biphenyls and Organochlorine Pesticides. *Environmental Science and Technology*, 2004. 38, 4474-4483 pp.

14. Pozo, K; Harner, T; Shoeib, M; Urrutia, R; Barra, R; Parra, O; Focardi, S. Passive-Sampler Derived Air Concentrations of Persistent Organic Pollutants on a North-South Transect in Chile. *Environmental Science and Technology*, 2004. 38, 6529-6537 pp.
15. Passive VOC: Tisch Passive Air Samplers. Disponible: <http://www.pacwill.ca/en/Products/Tisch/TE-PAS.html> [Consultada: Abril 4 de 2012]
16. Gouin, T; Harner, T; Blanchard, P; Mackay, D. Passive and Active Air Samplers as Complementary Methods for Investigating Persistent Organic Pollutants in the Great Lakes Basin. *Environmental Science and Technology*, 2005. 39, 9115-9122 pp.
17. Estellano, V; Harner, T. Pozo, K; Zaballa M; Franken, M. Concentración de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) en un gradiente altitudinal durante las estaciones de verano y otoño en la cara oriental de la cordillera Real de los Andes, Bolivia. *Acta Nova*, 2006. Volumen 3, 155-169 pp.
18. Jaward, F; Farrar, N; Harner, T; Sweetman, A; Jones, K. Passive Air Sampling of PCBs, PBDEs, and Organochlorine Pesticides Across Europe. *Environmental Science and Technology*, 2004. 38, 34-41 pp.
19. Chaemfa, C; Barber, J; Gocht, T; Harner, T; Klanova, J; Jones, K. Field calibration of polyurethane foam (PUF) disk passive air samplers for PCBs and OC pesticides. *Environmental Pollution*, 2008. 156, 1290-1297 pp.
20. ICA. Subgerencia protección y regulación agrícola. Restricciones, prohibiciones y suspensión de registros de plaguicidas de uso agrícola en Colombia. Disponible: <http://www.ica.gov.co> [Consultada: Julio 15 de 2012]

21. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, ATSDR. Disponible: <http://www.atsdr.cdc.gov/es/> [Consultada: Julio 15 de 2012]
22. Instituto Nacional de Ecología Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Actividades de Preparación del Plan Nacional de Implementación (PNI) de la Convención de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) y de los Planes de Acción Nacional sobre Lindano, Dioxinas, Furanos y Hexaclorobenceno. 2003.
23. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes, Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes. Perfil de Riesgos del Lindano. 2006.
24. Rodríguez, B. Movilidad, Biodisponibilidad y Degradación Inducida de Isómeros de Hexaclorociclohexano (HCH) en Suelos Contaminados. Universidad de Santiago de Compostela. España, 2009.
25. Directrices técnicas para el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en los plaguicidas aldrina, clordano, dieldrina, endrina, heptacloro, hexaclorobenceno (HCB), mírex o toxafeno o HCB como producto químico industrial, o que los contengan o estén contaminados con ellos. Disponible: <http://archive.basel.int/pub/techguid/pesticides/tg-pesticides-s.pdf> [Consultada: Julio 15 de 2012].
26. Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación. Desarrollos de niveles guía nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a heptacloro + epóxido de heptacloro. Argentina, 2005.
27. Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina (RAP-AL), Grupo de Plaguicidas de la Red Internacional de Eliminación sobre Contaminantes

Orgánicos Persistentes (IPEN), Red de Acción sobre Plaguicidas y sus Alternativas en México A.C. (RAPAM). “El endosulfán y sus alternativas en América Latina”. 2008

28. Persistent Organic Pollutants Review Committee. Endosulfan: supporting document for the draft risk profile. UNEP, 2009.
29. Ortiz, M; Yáñez, L; Díaz, F. Comportamiento Ambiental del DDT y de la Deltametrina. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.
30. Ruiz, G. Biodegradación de Bifenilos Policlorados (BPCS) por Microorganismos. Universidad de Guanajuato, México. 2005. Acta universitaria, volumen 15, 19-28 pp.
31. Centro Nacional de Referencia sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Bifenilos policlorados (Polychlorinated biphenyls, PCBs). Disponible: <http://www.cnrcoop.es/gc/assets/docs/Bifenilos%20policlorados.pdf> [Consultada: Julio 17 de 2012]
32. Agudo, A. Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) Acercamiento a su problemática como riesgo laboral. Instituto Catalán de Oncología. España, 2009.
33. Oficina de Evaluación de Riesgos de Salud Ambiental, OEHA. Disponible: http://oeha.ca.gov/air/toxic_contaminants/html/benzo%5Ba%5Dpyrene.htm [Consultada: Julio 20 de 2012]
34. Shunthirasingham, Ch; Barra, R; Mendoza, G; Montory, M. Spatial variability of atmospheric semivolatile organic compounds in Chile. Atmospheric Environment, 2011. 42, 303-309 pp.
35. Bohlin, P; Jones, K; Tovalin, H; Strandberg, B. Observations on persistent organic pollutants in indoor and outdoor air using passive polyurethane foam samplers. Atmospheric Environment, 2008. 45, 7234-7241 pp.

36. Ozcan, S, Emin, M. Polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in urban air of Konya, Turkey. *Atmospheric Research*, 2009. 93, 715-722 pp.
37. Banguera, J. Aplicación de una Metodología para el uso de Muestreadores de Aire Pasivo con Espuma de Poliuretano en un Estudio Preliminar para la Determinación de Residualidad de Plaguicidas Organoclorados en una Zona Agrícola. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Química. Universidad del Valle. Cali, Valle del Cauca. 2011.
38. Wikipedia. Cali. Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/Cali> [Consultada: Julio 17 de 2012]
39. Alcaldía de Santiago de Cali. La ciudad. Disponible: <http://www.cali.gov.co> [Consultada: Julio 17 de 2012]
40. Organización Mundial de la Salud, OMS. Guías para la Calidad del Aire. Lima, Perú. 2004.

ANEXOS

Anexo 1. Concentraciones de plaguicidas organoclorados (pg/m³) en las estaciones de muestreo

ESTACIÓN	Muestra	POC (pg/m ³)													
		HCB	α-HCH	γ-HCH	TC	CC	TNC	Hep	Hepx	α-End	β-End	o,p'-DDE	p,p'-DDE	o,p'-DDD	p,p'-DDT
Éxito	C-4.1	148	14x10 ³	1.4x10 ³	102	0	65	932	194	20x10 ³	1.8x10 ³	11x10 ³	8.5x10 ³	38	8.1x10 ³
	A-4.2	13	0	0	0	0	5	56	0	926	108	559	366	13	346
	C-5.1	0	342	0	0	0	44	721	0	15x10 ³	1.6x10 ³	8.8x10 ³	5.6x10 ³	0	5.4x10 ³
ERA	A-4.3	23	805	0	18	0	8	172	0	1.7x10 ³	221	900	686	0	339
	C-5.2	0	723	0	0	0	0	0	0	157	0	118	69	0	0
CRG	A-4.4	10	9.6x10 ³	1x10 ³	43	0	43	1.3x10 ³	0	23x10 ³	89	11x10 ³	9.2x10 ³	9	10 x 10 ³
	C-5.3	0	106	0	0	0	1	25	0	95	0	68	47	0	0
FCNE	C-4.5	0	19x10 ³	1x10 ³	420	255	147	1.7x10 ³	744	60x10 ³	747	29x10 ³	23x10 ³	0	4 x 10 ³
	A-4.6	21	630	0	0	0	14	122	0	3x10 ³	163	1.8x10 ³	1.2x10 ³	0	815
	C-5.4	0	0	0	362	0	45	0	0	12x10 ³	0	7.5x10 ³	5x10 ³	0	0

(HCB) Hexaclorobenceno, (α,γ-HCH) Hexaclorociclohexano, (TC) *Trans*-clordano, (CC) *Cis*-clordano, (TNC) *Trans*-nonaclordano, (Hep) Heptacloro, (Hepx) Epóxido de heptacloro, (α, β-End) α, β-Endosulfán, (o,p'-DDE, p,p'-DDE) Diclorodifenildicloroetileno, (o,p'-DDD) Diclorodifenildicloroetano, (p,p'-DDT) Diclorodifeniltricloroetano.

C: Muestreador comercial, A: Muestreador Artesanal, 4: 4 meses de exposición, 5: 5 meses de exposición

Anexo 2. Concentraciones de bifenilos policlorados (pg/m³) en las estaciones de muestreo

ESTACIÓN	Muestra	PCB (pg/m³)																		
		28	52	95	99	101	110	118	123	138	146	149	151	153	157	167	177	180	187	Total
Éxito	C-4.1	34	16	458	14	34	31	97	140	6	1	4	0	7	0	8	3	0	0	852
	A-4.2	0	0	96	0	3	4	0	76	0.4	0	0	0	0	0	2	1	0	0	182
	C-5.1	25	13	11	0	17	0	8	13	4	0	0	0	3	0	3	0	0	0	95
ERA	A-4.3	46	10	135	9	19	8	0	111	7	0	8	2	11	0	7	0	0	2	373
	C-5.2	0	0	16	5	0	4	0	22	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	48
CRG	A-4.4	19	0	98	0	16	0	0	72	4	0	3	0	5	2	5	0	1	0	223
	C-5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FCNE	C-4.5	137	30	0	0	58	0	0	0	0	0	0	5	8	0	23	2	4	0	266
	A-4.6	0	0	126	0	4	4	0	110	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	245
	C-5.4	38	0	51	0	15	0	0	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144

C: Muestreador comercial, A: Muestreador Artesanal, 4: 4 meses de exposición, 5: 5 meses de exposición

Anexo 3. Concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (pg/m³) en las estaciones de muestreo

ESTACIÓN	Muestra	PAH (pg/m ³)												
		Ace	Acet	Flu	Fen	F	Pir	B(a)A	Cri	B(b)F	B(a)P	I(1,2,3-cd)P	DB(a,h)A	B(g,h,i)P
Éxito	C-4.1	491	837	2.2x10 ³	1.4x10 ⁴	8.3x10 ³	7.6x10 ³	4x10 ³	3x10 ³	1.4x10 ³	1.5x10 ³	326	2.6x10 ³	2.7x10 ³
	A-4.2	163	102	81	657	414	328	83	0	138	276	0	705	988
	C-5.1	154	477	2.2x10 ³	6.5x10 ³	4.2x10 ³	3.6x10 ³	1.6x10 ³	894	316	0	0	0	345
ERA	A-4.3	813	554	3.4x10 ³	2.1x10 ⁴	1.4x10 ⁴	12x10 ³	5.4x10 ³	6x10 ³	886	761	0	452	616
	C-5.2	153	0	154	937	597	471	602	0	135	166	0	165	376
CRG	A-4.4	334	631	1.8x10 ³	9.6x10 ³	4.5x10 ³	4x10 ³	3.8x10 ³	1x10 ³	73	0	0	314	376
	C-5.3	0	0	0	0	30	33	0	0	53	0	0	0	343
FCNE	C-4.5	0	649	1.8x10 ³	11 x10 ³	4 x10 ³	3x10 ³	2.5x10 ³	857	0	0	0	0	820
	A-4.6	0	0	116	976	418	255	212	0	213	127	0	0	0
	C-5.4	0	161	288	3.5x10 ³	168	811	803	609	0	0	0	0	0

(Ace) Acenafteno, (Acet) Acenaftileno, (Flu) Fluoranteno, (Fen) Fenantreno, (F)Fluoreno, (Pir) Pireno, (B(a)A) Benzo(a)antraceno, (Cri) Criseno, (B(b)F) Benzo(b)fluoranteno, (B(a)P)Benzo(a)pireno, (I(1,2,3-cd)P) Indeno(1,2,3-cd)pireno, (DB(a,h)A) Dibenzo(a,h)antraceno, (B(g,h,i)P) Benzo(g,h,i)pireno.

C: Muestreador comercial, A: Muestreador Artesanal, 4: 4 meses de exposición, 5: 5 meses de exposición