

DIRECCIÓN GENERAL DE POLÍTICAS INTERIORES

**DEPARTAMENTO TEMÁTICO** **C**  
DERECHOS DE LOS CIUDADANOS Y ASUNTOS CONSTITUCIONALES



# El lindano (contaminante orgánico persistente) en la UE

ESTUDIO PARA LA COMISIÓN PETI



**DIRECCIÓN GENERAL DE POLÍTICAS INTERIORES**  
**DEPARTAMENTO TEMÁTICO C: DERECHOS DE LOS CIUDADANOS Y**  
**ASUNTOS CONSTITUCIONALES**

**PETICIONES**

**El lindano (contaminante orgánico  
persistente) en la UE**

**ESTUDIO**

**Resumen**

Este estudio es resultado de un encargo del Departamento Temático de Derechos de los Ciudadanos y Asuntos Constitucionales del Parlamento Europeo, a instancias de la Comisión de Peticiones (PETI). El lindano se produjo de forma extensiva en la UE hasta la década de 1990 y se utilizó como insecticida de amplio espectro hasta 2008. Actualmente, el uso y la producción de lindano están prohibidos en la mayoría de países del mundo. Sin embargo, lamentablemente continúa dándose a conocer. Su persistencia, sus propiedades bioacumulativas y tóxicas, los derrames de antiguos lugares de producción y el vertido ilegal de residuos de HCH han suscitado serias preocupaciones a medida que se comprende mejor la capacidad de los lugares contaminados por HCH para dispersar ampliamente la contaminación en aguas superficiales y subterráneas.

Este informe presenta un mapa actualizado de las plantas de producción de lindano y los vertederos de residuos de HCH en la UE. También se indican posibles técnicas de rehabilitación, incluidos experimentos de laboratorio y sobre el terreno, con una selección de mejores prácticas de restauración de lugares contaminados y participación de las partes interesadas. Asimismo, se analiza la información sobre el lindano de páginas web oficiales.

## **ACERCA DE LA PUBLICACIÓN**

El presente documento de investigación fue solicitado por la Comisión de Peticiones del Parlamento Europeo y fue encargado, supervisado y publicado por el Departamento Temático de Derechos de los Ciudadanos y Asuntos Constitucionales. Los departamentos temáticos ofrecen conocimientos con carácter independiente, tanto de forma interna como externa, para ayudar a las comisiones del Parlamento Europeo y otros órganos parlamentarios a conformar la legislación sobre las políticas interiores y exteriores de la UE y a ejercer un control democrático sobre las mismas.

Para ponerse en contacto con el Departamento Temático de Derechos de los Ciudadanos y Asuntos Constitucionales o suscribirse a su boletín, escriba a:

[Poldep-citizens@ep.europa.eu](mailto:Poldep-citizens@ep.europa.eu)

## **ADMINISTRADORA RESPONSABLE**

Martina Schonard

Departamento Temático C: Derechos de los Ciudadanos y Asuntos Constitucionales

Parlamento Europeo

B-1047 Bruselas

Correo electrónico: [Poldep-citizens@ep.europa.eu](mailto:Poldep-citizens@ep.europa.eu)

## **AUTORES**

ERA-Consult Madrid es una consultoría fundada en 2001 dedicada a la evaluación de riesgos medioambientales de sustancias químicas y especializada en aspectos relacionados con la aplicación de la legislación europea.

Milagros Vega, Dolores Romano, Elina Uotila

## **VERSIONES LINGÜÍSTICAS**

Original: EN

Manuscrito terminado en noviembre de 2016.

© Unión Europea, 2016

Este documento está disponible en la siguiente dirección de internet:

<http://www.europarl.europa.eu/committees/es/supporting-analyses-search.html>

## **EXENCIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Las opiniones que se expresan en este documento son exclusivamente responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente la posición oficial del Parlamento Europeo.

Se autoriza la reproducción y traducción con fines no comerciales, a condición de que se indique la fuente, se informe previamente al editor y se le transmita un ejemplar.

# ÍNDICE

<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE ILUSTRACIONES</b>	<b>9</b>
<b>SÍNTESIS</b>	<b>10</b>
<b>1. El legado del lindano: INFORMACIÓN GENERAL</b>	<b>13</b>
<b>1.1. Identidad de la sustancia</b>	<b>13</b>
<b>1.2. Fabricación y usos</b>	<b>15</b>
1.2.1. Fabricación	15
1.2.2. Usos	16
<b>1.3. Propiedades preocupantes</b>	<b>16</b>
1.3.1. Distribución ambiental	16
1.3.2. Persistencia (P)	17
1.3.3. Bioacumulación (B)	17
1.3.4. Toxicidad y ecotoxicidad (T)	17
1.3.5. Transporte a larga distancia en el medio ambiente: movimiento transfronterizo	18
<b>1.4. Situación reglamentaria del lindano en la UE</b>	<b>18</b>
1.4.1. Legislación sobre los niveles de lindano en suelos	19
1.4.2. Legislación sobre los niveles de lindano en el agua	21
<b>2. El legado del lindano en la UE</b>	<b>23</b>
<b>2.1. Austria</b>	<b>26</b>
<b>2.2. Bulgaria</b>	<b>26</b>
<b>2.3. Croacia</b>	<b>26</b>
<b>2.4. República Checa</b>	<b>26</b>
<b>2.5. Dinamarca</b>	<b>28</b>
<b>2.6. Francia</b>	<b>28</b>
<b>2.7. Alemania</b>	<b>29</b>
<b>2.8. Hungría</b>	<b>35</b>
<b>2.9. Italia</b>	<b>36</b>
<b>2.10. Letonia</b>	<b>37</b>
<b>2.11. Polonia</b>	<b>37</b>
<b>2.12. Rumanía</b>	<b>38</b>

<b>2.13.</b>	<b>Eslovaquia</b>	<b>39</b>
<b>2.14.</b>	<b>España</b>	<b>40</b>
<b>2.15.</b>	<b>Países Bajos</b>	<b>46</b>
<b>2.16.</b>	<b>Reino Unido</b>	<b>48</b>
<b>3.</b>	<b>OPCIONES DE CONFINAMIENTO, TRATAMIENTO Y DESCONTAMINACIÓN</b>	<b>50</b>
<b>3.1.</b>	<b>Contención</b>	<b>51</b>
<b>3.2.</b>	<b>Combustión</b>	<b>51</b>
3.2.1.	Incineradoras específicas	51
3.2.2.	Hornos de cemento	52
<b>3.3.</b>	<b>Métodos de tratamiento físico-químico para la rehabilitación y descontaminación de residuos, suelo y agua</b>	<b>53</b>
3.3.1.	Decloración catalizada por bases (tratamiento de residuos)	53
3.3.2.	Reducción química en fase gaseosa (tratamiento de residuos)	54
3.3.3.	Procesos de decloración no mediados por bases (deshalogenación catalizada por cobre; destrucción catalizada por cenizas volantes (proceso Hagenmaier); reducción por sodio) (tratamiento de residuos)	54
3.3.4.	Arco de plasma (tratamiento de residuos)	55
3.3.5.	Desorción térmica (tratamiento de suelos)	55
3.3.6.	Extracción por solvente (tratamiento de suelos)	57
3.3.7.	Rehabilitación mediante nanopartículas (tratamiento de suelo y agua)	57
3.3.8.	Adsorción por carbón activo (tratamiento de agua)	58
3.3.9.	Oxidación en agua supercrítica (tratamiento de agua)	59
3.3.10.	Fotocatálisis (tratamiento de agua)	60
3.3.11.	Decloración biocatalítica (tratamiento de agua)	61
3.3.12.	Oxidación química <i>in situ</i> (tratamiento de suelo y aguas <b>subterráneas</b> )	<b>61</b>
<b>3.4.</b>	<b>Métodos biológicos: biorrehabilitación de suelo y agua</b>	<b>62</b>
3.4.1.	Degradación microbiana	63
3.4.2.	Microbios de biosorción	66
3.4.3.	Fitorrehabilitación	67
<b>3.5.</b>	<b>Actividades de reciclado</b>	<b>69</b>
<b>4.</b>	<b>Mejores prácticas</b>	<b>70</b>
<b>4.1.</b>	<b>Transparencia: Construcción del vertedero de seguridad de Argalarío en el País Vasco (España)</b>	<b>71</b>
<b>4.2.</b>	<b>Participación de las partes interesadas y Centro Técnico de Coordinación (Sabiñánigo)</b>	<b>71</b>
<b>4.3.</b>	<b>Participación de partes interesadas: PNA de España</b>	<b>72</b>

<b>4.4.</b>	<b>Descontaminación de fábricas: Hamburg-Moorfleet</b>	<b>73</b>
<b>4.5.</b>	<b>Vigilancia de aguas subterráneas: Bitterfeld-Wolfen</b>	<b>75</b>
<b>4.6.</b>	<b>Identificación de lugares contaminados por HCH: Twente, Países Bajos</b>	<b>77</b>
<b>5.</b>	<b>INFORMACIÓN SOBRE EL LINDANO</b>	<b>79</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>82</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>CA</b>	Carbón activado
<b>PV</b>	País Vasco
<b>DCB</b>	Descomposición catalizada por bases
<b>CH</b>	Suiza
<b>DMC</b>	Destrucción mediada por cobre
<b>CZ</b>	República Checa
<b>DDT</b>	Dicloro difenil tricloroetano
<b>DK</b>	Dinamarca
<b>LDFNA</b>	Líquido denso en fase no acuosa
<b>ES</b>	España
<b>UE</b>	Unión Europea
<b>FR</b>	Francia
<b>RQFG</b>	Reducción química en fase gaseosa
<b>HCH</b>	Hexaclorociclohexano
<b>HU</b>	Hungría
<b>OQIS</b>	Oxidación química <i>in situ</i>
<b>L(E)C50</b>	Concentración letal efectiva que causa un 50 % de letalidad
<b>LV</b>	Letonia
<b>GNC</b>	Grupo Nacional de Coordinación
<b>PNA</b>	Plan Nacional de Aplicación
<b>NL</b>	Países Bajos
<b>NOEC</b>	Concentración sin efecto observado
<b>CO</b>	Compuestos organoclorados
<b>PCB</b>	Bifenilos policlorados
<b>PCDD/PCDF</b>	Policlorodibenzodioxinas/policlorodibenzofuranos
<b>COP</b>	Contaminante orgánico persistente (Convenio de Estocolmo)
<b>PF</b>	Productos fitosanitarios

<b>RO</b>	Rumanía
<b>OAS</b>	Oxidación en agua supercrítica
<b>VES</b>	Valores exploratorios del suelo
<b>PTAR</b>	Planta de tratamiento de aguas residuales
<b>TCB</b>	Triclorobenceno
<b>EQT</b>	Equivalentes tóxicos

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b>	
Identidad química del lindano	<b>14</b>
<b>Cuadro 2</b>	
Propiedades físico-químicas del lindano	<b>15</b>
<b>Cuadro 3</b>	
Sistema regulador nacional para la protección del suelo y valores exploratorios para el lindano	<b>20</b>
<b>Cuadro 4</b>	
Normas generales de calidad para ΣHCH (α-, β-, δ-, ε-, γ-HCH) (Comisión Europea, 2005)	<b>21</b>
<b>Cuadro 5</b>	
Normas específicas de calidad para el lindano (γ-HCH) (Comisión Europea, 2005)	<b>22</b>
<b>Cuadro 6</b>	
Normas específicas de calidad para HCH excepto el lindano	<b>22</b>
<b>Cuadro 7</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en la República Checa	<b>28</b>
<b>Cuadro 8</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en Francia	<b>29</b>
<b>Cuadro 9</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en Alemania	<b>33</b>
<b>Cuadro 10</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en Hungría	<b>35</b>
<b>Cuadro 11</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en Italia	<b>37</b>
<b>Cuadro 12</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en Polonia	<b>38</b>
<b>Cuadro 13</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en Rumanía	<b>39</b>
<b>Cuadro 14</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en Eslovaquia	<b>40</b>
<b>Cuadro 15</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en España	<b>46</b>
<b>Cuadro 16</b>	
Producción de residuos de HCH (toneladas) en los Países Bajos	<b>48</b>
<b>Cuadro 17</b>	
Ejemplos de bacterias capaces de degradar el lindano y otros isómeros del HCH	<b>63</b>
<b>Cuadro 18</b>	
Capacidad de biosorción del lindano de distintos adsorbentes	<b>66</b>
<b>Cuadro 19</b>	
Información de distintas autoridades y organizaciones para los ciudadanos	<b>79</b>
<b>Cuadro 20</b>	
Páginas web con información sobre sustancias químicas	<b>80</b>

## LISTA DE ILUSTRACIONES

### **Ilustración 1**

Estructura molecular de los isómeros alfa, beta, gamma (lindano), delta y epsilon del HCH **14**

### **Ilustración 2**

Lugares de producción y contaminados identificados ( ) + países productores pero sin información sobre los lugares ( ? ) **49**

### **Ilustración 3**

Representación esquemática del Grupo Nacional de Coordinación sobre COP **73**

### **Ilustración 4**

Esquema de las medidas de aseguramiento en el subsuelo **75**

## SÍNTESIS

El objetivo de este informe es hacer un diagnóstico de la situación en la Unión Europea relacionada con el estado actual de los lugares que están potencialmente contaminados por lindano y obtener información sobre actividades de restauración del terreno. Con este objetivo se ha compilado la siguiente información:

- Localización de antiguas plantas de producción de lindano;
- Lugares contaminados identificados;
- Actividades de campo de restauración de lugares contaminados por lindano; y
- Técnicas punteras de investigación y laboratorio para la degradación del lindano.

Para elaborar este informe se enviaron más de cien cuestionarios a distintos actores que se consideraban relevantes a nivel nacional. Entre ellos se incluían personas de contacto y delegados recientes del Convenio de Estocolmo<sup>1</sup>, representantes de los gobiernos autonómicos españoles (3), círculos académicos (1), ONG (6) y consultorías sectoriales que trabajan en la rehabilitación de los lugares contaminados por COP (3). Las respuestas recibidas figuran en el anexo I. Para elaborar este documento se ha tenido en cuenta esta información, así como la revisión de una amplia bibliografía científica.

El documento presenta:

- el panorama actual de los emplazamientos europeos potencialmente contaminados por lindano o residuos de HCH debido a la presencia de una planta de producción o un vertedero ilegal conocido;
- una revisión de las técnicas de laboratorio para la degradación y eliminación del lindano y las actividades de restauración del terreno en lugares contaminados por lindano (suelo, aguas superficiales y aguas subterráneas); y
- un análisis del nivel de información sobre el lindano que figura en páginas web oficiales.

En el capítulo 1 puede encontrarse **información general sobre el lindano y los isómeros del HCH**. La identidad de la sustancia figura en la sección 1.1. Lindano es el nombre común del isómero gamma del 1,2,3,4,5,6-hexaclorociclohexano (HCH). El lindano y el HCH técnico se produjeron en varios países europeos desde la década de 1950 hasta la década de 1970 o 1990. Por cada tonelada de lindano obtenida se generaban aproximadamente entre seis y diez toneladas de otros isómeros de HCH residuales. Esta bajísima eficiencia de producción del lindano dio lugar a grandes cantidades de residuos de HCH (sección 1.2). Debido a la gran preocupación por sus propiedades (carcinógeno, persistente, bioacumulativo y alterador endocrino y pruebas de transporte a larga distancia), el HCH técnico y el lindano se convirtieron en sustancias muy controladas desde los años 70 en adelante (sección 1.3). La situación reglamentaria actual en la UE se presenta en la sección 1.4.

La baja eficiencia de la **producción de lindano ha generado una enorme cantidad de residuos que provocan una contaminación generalizada de suelos, aguas superficiales y aguas subterráneas** con sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulativas como isómeros de HCH, clorobenzenos y dioxinas (capítulo 2). Para recabar información actualizada sobre posibles lugares contaminados por HCH en la UE, se envió un cuestionario a las autoridades competentes de la Unión en materia de COP, organizaciones no gubernamentales, círculos académicos y consultorías para solicitar información. Las

---

<sup>1</sup> Veinticinco países de la UE (no había información de contacto para Grecia, Eslovenia y Luxemburgo) y catorce países terceros.

respuestas al cuestionario figuran en el anexo I. Los lugares contaminados por lindano y HCH no se han identificado íntegramente en todos los Estados miembros. Puesto que las plantas de producción químicas con frecuencia se sitúan cerca de ríos, las inundaciones han contribuido a la movilización difusa de contaminantes procedentes de derrames de antiguos lugares de producción. Además, el vertido ilegal de grandes cantidades de residuos está suscitando preocupación actualmente porque los numerosos lugares contaminados por HCH se sitúan cerca de ríos y, por lo tanto, están generando una amplia contaminación dispersa a través de las aguas superficiales y subterráneas (es decir, desde Sabiñánigo y Vitoria al río Ebro y desde Bitterfeld-Wolfen al río Elba).

Se han desarrollado varios métodos para **el tratamiento y la gestión de residuos y para la eliminación del lindano del suelo y el agua** (capítulo 3). Entre los métodos convencionales están la excavación del suelo contaminado y su contención en rellenos sanitarios específicos, el confinamiento de las aguas subterráneas o los suelos contaminados para contenerlos en un lugar o métodos de bombeo y tratamiento de aguas subterráneas (sección 3.1). Sin embargo, estos métodos son muy caros y ni el depósito de la sustancia en un vertedero ni su confinamiento destruyen o eliminan los contaminantes de la matriz edáfica. Por lo tanto, no se consideran métodos de rehabilitación definitiva sostenibles. Otro método tradicional es la combustión de los residuos contaminados (sección 3.2). Sin embargo, las desventajas de la combustión son la mala relación coste-eficacia y su potencial para producir compuestos aún más tóxicos como dioxinas y furanos. Los métodos de tratamiento físico separan los contaminantes de la matriz del agua, el suelo y los residuos utilizando las diferencias físicas entre la matriz y el contaminante. Los métodos de tratamiento físico-químico destruyen, fijan o concentran los contaminantes utilizando reacciones químicas (sección 3.3) y son los que se consideran con mayor frecuencia. También se presentan actividades de campo con distintos métodos. Los métodos de tratamiento biológico (sección 3.4) de aguas y suelos contaminados entrañan el uso de microorganismos o vegetación. Los microorganismos y las plantas pueden destruir los contaminantes o transformarlos en sustancias químicas menos peligrosas, así como extraerlos y acumularlos. La ventaja de los métodos biológicos es que son métodos rentables y ecológicos y pueden utilizarse *in situ*. Sin embargo, la eficiencia de estos métodos en condiciones de campo todavía puede ser bastante limitada, puesto que hay numerosos factores que afectan a los procesos.

El vertido de residuos, los rellenos sanitarios y los suelos contaminados normalmente están diseminados y se propagan a través de aguas superficiales o subterráneas durante largos períodos de tiempo y a grandes distancias. Las interacciones complejas por ejemplo de múltiples contaminantes con elevada persistencia y gran potencial de propagación a distintos compartimentos medioambientales también complican más la cuestión. Esta es la razón por la que **los enfoques multidisciplinares y colaborativos dan lugar a mejores herramientas de gestión y toma de decisiones para mejorar la rehabilitación** de los lugares contaminados por lindano y residuos de HCH (capítulo 4). Se han recopilado varios casos como ejemplos de transparencia y participación de las partes interesadas (secciones 4.1, 4.2 y 4.3) y se documentan actividades de rehabilitación del terreno, incluidas actividades de demolición y estrategias para edificios que también es probable que estén muy contaminados por PCDD/PCDF y PCB (secciones 4.4, 4.5 y 4.6). Los lugares donde se ha depositado lindano requieren actividades continuas de vigilancia a largo plazo, bombeo y tratamiento de lixiviados y mantenimiento durante décadas.

El capítulo 5 tiene por objeto mejorar el nivel de **información proporcionada en páginas web oficiales**. Parece que, por regla general, todos los Estados miembros facilitan información general sobre sustancias químicas. Sin embargo, solo los gobiernos regionales con megaemplazamientos contaminados específicos proporcionan información sobre el lindano.

## **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestro agradecimiento a las personas que han facilitado información y especialmente a John Vijgen por su ayuda y contribución a este documento.

## 1. EL LEGADO DEL LINDANO: INFORMACIÓN GENERAL

### PRINCIPALES CONCLUSIONES

- El lindano es el isómero gamma del 1,2,3,4,5,6-hexaclorociclohexano (HCH). El HCH técnico es una mezcla de cinco isómeros distintos del HCH, incluido el isómero gamma. Pertenecen al grupo de plaguicidas organoclorados. El HCH técnico ha sido un plaguicida muy ineficiente, debido a que solo el isómero gamma tiene propiedades insecticidas y durante su aplicación se han propagado los demás isómeros «ineficientes» por todos los países.
- El lindano se produjo en varios países europeos desde la década de 1950 hasta la década de 1970 o 1990. Por cada tonelada de lindano obtenida se generan aproximadamente entre seis y diez toneladas de otros isómeros del HCH residuales.
- El lindano se utilizaba como insecticida de amplio espectro para numerosos fines agrícolas y no agrícolas. Entre 1950 y 2000 se utilizaron en total en Europa cientos de miles de toneladas.
- Desde 2008, todos los usos del lindano están prohibidos en la Unión. En 2009, el lindano y otros dos isómeros del HCH se incluyeron en el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP) para lograr la eliminación mundial de estas sustancias.
- El lindano y otros isómeros del HCH son persistentes en el medio ambiente, se bioacumulan en organismos vivos y son tóxicos para la salud humana y el medio ambiente. Además, existen pruebas de su transporte a larga distancia.
- Actualmente no hay normas a nivel europeo relativas a los suelos contaminados por lindano, pero algunos Estados miembros tienen su propia legislación para la protección del suelo, incluidos valores límite de lindano.

### 1.1. Identidad de la sustancia

Lindano es el nombre común del isómero gamma del 1,2,3,4,5,6-hexaclorociclohexano (HCH). La estructura molecular del HCH consiste en un anillo de seis carbonos con un cloro y un hidrógeno unidos a cada carbono. El llamado HCH técnico también contiene los demás isómeros del HCH, que solo difieren en la orientación de los átomos de cloro (posiciones axial o ecuatorial) alrededor del anillo de ciclohexano (ilustración 1). Los cinco isómeros principales están presentes en la mezcla en las siguientes proporciones: alfa-hexaclorociclohexano (53 %-70 %) en dos formas enantioméricas ((+) alfa-HCH y (-) alfa-HCH), beta-hexaclorociclohexano (3 %-14 %), gamma-hexaclorociclohexano (11 %-18 %), delta-hexaclorociclohexano (6 %-10 %) y epsilon-hexaclorociclohexano (3 %-5 %). El isómero gamma es el único isómero que muestra fuertes propiedades insecticidas. La pureza del lindano corresponde normalmente a más de un 99 % de gamma-HCH.

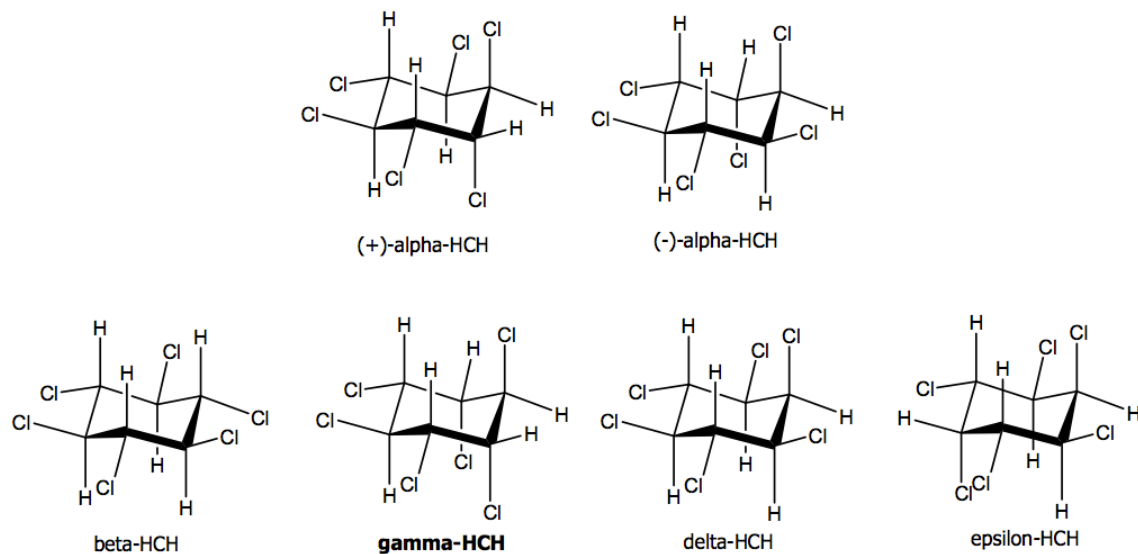
El lindano pertenece a la familia química de los hidrocarburos clorados y al grupo de plaguicidas organoclorados. Otros plaguicidas de este grupo son, por ejemplo, el DDT, la aldrina, la dieldrina, la endrina, el heptacloro, el clordano y el endosulfán. Los plaguicidas organoclorados son algunos de los plaguicidas más antiguos utilizados, pero debido a su alta persistencia y toxicidad, muchos de estos plaguicidas utilizados anteriormente de forma generalizada, incluido el lindano, se han prohibido.

Las principales propiedades físicas y químicas del lindano se muestran en el cuadro 1.

**Cuadro 1. Identidad química del lindano**

Nombre común	Lindano
Denominación química	$\gamma$ -1,2,3,4,5,6-hexaclorociclohexano
Número CE	200-401-2
Número CAS	58-89-9
Fórmula química	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>6</sub>
Peso molecular	290,83

Ilustración 1. Estructura molecular de los isómeros alfa, beta, gamma (lindano), delta y epsilon del HCH



Fuente: CECOP 2006

**Cuadro 2. Propiedades físico-químicas del lindano**

Propiedad	Valor
Color/forma	Polvo/sólido incoloro a blanco cristalino
Punto de ebullición	323,4 °C
Punto de fusión	112,5 °C
Solubilidad en agua	7,3 mg/l a 25 °C
Presión de vapor	4,2x10 <sup>-5</sup> mmHg a 20 °C 4,4 x 10 <sup>-3</sup> Pa a 24 °C
Constante de la ley de Henry	1,48-5,14 x 10 <sup>-6</sup> atm m <sup>3</sup> /mol a 25 °C
Coefficiente de partición (log K <sub>ow</sub> )	3,51-3,72
Coefficiente de adsorción (K <sub>oc</sub> )	1080,9 871-1671

Fuente: HSD 2016

## 1.2. Fabricación y usos

### 1.2.1. Fabricación

El lindano se produjo en muchos países europeos, como la República Checa, España, Francia, Alemania, el Reino Unido, Italia, Rumanía y Polonia, principalmente desde la década de 1950 hasta la década de 1970 o 1990. En Rumanía, la producción continuó hasta 2006. También se han producido estas sustancias en otros países, entre ellos Argentina, Azerbaiyán, Brasil, China, Ghana, la India, Japón, Rusia y los Estados Unidos (Vijgen, 2006). Actualmente se cree que solo existe una planta operativa en todo el mundo, ubicada en la India, que sigue produciendo lindano para fines farmacéuticos (Vijgen et al. 2011).

El material de partida para la fabricación del lindano es el HCH técnico. Este se fabrica mediante fotocloración de benceno, que genera una mezcla de cinco isómeros principales. El gamma-HCH se extrae y purifica a partir de esta mezcla de isómeros utilizando cristalización fraccionada para producir un 99 % de lindano puro. La producción de lindano es ineficiente, ya que por cada tonelada de lindano (isómero gamma) obtenida, se obtienen también aproximadamente entre seis y diez toneladas de otros isómeros residuales (Vijgen, 2006).

Según la Asociación Internacional de HCH y Plaguicidas (IHPA, por sus siglas en inglés) (Vijgen, 2006), se han intentado desarrollar métodos para destruir y reutilizar los demás isómeros del HCH formados durante la fabricación del lindano. Sin embargo, la mayoría de estos métodos se han rechazado con los años y, en consecuencia, la mayoría de los productos

residuales se han desechado en los últimos 50 años (Vijgen, 2006). La IHPA (Vijgen, 2006) ha calculado que la cantidad mundial de isómeros de HCH residuales todavía presentes puede ascender a entre 1,7 y 4,8 millones de toneladas. En algunos países europeos que fabricaban antiguamente lindano y HCH técnico (por ejemplo, Francia, Alemania y España), se calcula que la cantidad de residuos de HCH se eleva a cientos de miles de toneladas (Vijgen, 2006).

### 1.2.2. Usos

El lindano y el HCH técnico se han utilizado como insecticidas de amplio espectro, que actúan por contacto, para fines agrícolas y no agrícolas. Se utilizaban entre otras cosas para tratamiento de semillas y suelos, aplicaciones foliares, tratamiento de árboles y maderas y tratamiento contra ectoparásitos en aplicaciones veterinarias y humanas (OMS, 1991).

La Asociación Internacional de HCH y Plaguicidas (Vijgen, 2006) calculó que el uso mundial de lindano durante el período de 1950 a 2000 ascendió a 600 000 toneladas. La mayor parte, aproximadamente 450 000 toneladas a nivel mundial y 290 000 toneladas en Europa, se utilizaron para fines agrícolas (Vijgen 2006). En otro estudio, Breivik et al. (1999) calcularon que entre 1970 y 1996 se utilizaron en Europa alrededor de 400 000 toneladas de HCH técnico y 81 000 toneladas de lindano. En Europa, los diez países donde más se utilizó el lindano entre 1950 y 2000, que representaron el 96 % del uso total en Europa, fueron: Checoslovaquia, Alemania, Italia, Francia, Hungría, España, Rusia, Ucrania, Yugoslavia y Grecia (Vijgen, 2006).

## 1.3. Propiedades preocupantes

El alfa-HCH, beta-HCH y gamma-HCH (lindano) se han incluido en el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP), puesto que cumplen los criterios establecidos en su anexo D por ser persistentes y bioacumulativos, tener efectos perniciosos en la salud humana o en el medio ambiente y tener potencial de transporte a larga distancia. En este capítulo se resume la información sobre estas propiedades del lindano. Los demás isómeros principales del HCH presentan propiedades similares.

### 1.3.1. Distribución ambiental

Una vez liberado en el medio ambiente, el lindano puede propagarse a todos los compartimentos medioambientales. En comparación con otros plaguicidas organoclorados (por ejemplo, el DDT), el lindano y otros isómeros del HCH son generalmente más solubles en agua y más volátiles, lo que explica por qué son tan ubicuos. Sobre la base de la constante de Henry<sup>2</sup>, la evaporación procedente del agua y el suelo húmedo es el proceso más importante en la distribución ambiental del lindano (USEPA, 2006).

El lindano muestra una fuerte tendencia a ser adsorbido en material orgánico (Koc 871-1671) y, por lo tanto, se espera que la movilidad de la sustancia sea muy baja en suelos con un alto contenido de material orgánico y más alta en suelos con poca materia orgánica. La difusión del lindano está muy influida por el contenido de agua del suelo y por la temperatura (véase la revisión de Phillips et al. 2005).

Debido a la baja solubilidad en agua (7,3 mg/l) y el elevado potencial de adsorción, se espera que el lindano se divida en sedimentos y se una a partículas sólidas en la columna de agua en los medios acuáticos.

---

<sup>2</sup> La constante de Henry de una sustancia es la medida de su equilibrio entre la fase líquida y la fase gaseosa. Por lo tanto, es una medida del potencial de pérdida de una sustancia por evaporación.

### 1.3.2. Persistencia (P)

El lindano es estable a la luz. Puesto que no contiene cromóforos que absorban la luz, no se espera que se produzca fotólisis directa en el aire, el agua o el suelo.

La hidrólisis no se considera un proceso importante de degradación del lindano en entornos acuáticos en condiciones de pH neutro. Se ha informado de que los distintos valores de semidesintegración calculados para el lindano son: 11 años con pH 8 y 20 °C en agua marina, 42 años con pH 7,6 y 5 °C en el lago Huron y 110 años con pH 8 y 0 °C en el océano Ártico (USEPA, 2006).

El lindano se degrada muy lentamente por acción microbiana, con una semidesintegración calculada en suelo de 980 días en condiciones aeróbicas de laboratorio. La degradación se produce más rápidamente en condiciones anaeróbicas que en presencia de oxígeno. Los posibles productos de la degradación son pentaclorociclohexeno, 1,2,4-triclorobenceno y 1,2,3-triclorobenceno (USEPA, 2006).

Según estas características, el lindano y sus isómeros se consideran sustancias persistentes.

### 1.3.3. Bioacumulación (B)

El lindano puede bioacumularse fácilmente en la cadena alimentaria debido a su elevada solubilidad en lípidos y puede bioconcentrarse con rapidez en microorganismos, invertebrados, peces, aves y mamíferos. Los factores de bioconcentración (FBC) en especies acuáticas varían considerablemente y los datos experimentales revelan un FBC de 3-36 (Berny, 2002), 43-4 220 sobre la base del peso húmedo y un FBC medio de 11 000 sobre la base lipídica (Geyer et al., 1997), y también 1 200-2 100 (Oliver et al., 1985).

Se ha observado bioacumulación del lindano en la mayoría de grupos taxonómicos, desde plantas y algas hasta vertebrados. En los mamíferos marinos se encuentran concentraciones a unos niveles equivalentes o incluso superiores a algunos de los contaminantes más hidrofóbicos como los bifenilos policlorados (PCB) y el DDT (ATSDR, 2005). La exposición humana al lindano, especialmente de mujeres embarazadas y niños, constituye una preocupación acrecentada por la actual presencia de isómeros de HCH en tejidos humanos y leche materna (AMAP, 2002).

### 1.3.4. Toxicidad y ecotoxicidad (T)

La Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) ha clasificado el lindano como cancerígeno para los seres humanos (grupo 1). Existen suficientes pruebas en seres humanos de la carcinogenicidad del lindano respecto al linfoma no hodgkiniano (IARC, 2016).

El lindano es el isómero del HCH más tóxico que afecta al sistema nervioso central y al sistema endocrino. En los seres humanos, los efectos de una exposición aguda a altas concentraciones pueden ser desde irritaciones cutáneas leves a mareos, dolores de cabeza, diarrea, náuseas, vómitos e incluso convulsiones y muerte (CEC, 2005). También se han notificado efectos respiratorios, cardiovasculares, hematológicos, hepáticos y endocrinos en seres humanos, tras una inhalación aguda o crónica de lindano. Se han notificado alternaciones hematológicas como leucopenia, leucocitosis, granulocitopenia, granulocitosis, eosinofilia, monocitosis y trombocitopenia tras una exposición laboral crónica humana al gamma-HCH en instalaciones de producción (ATSDR, 2005).

El lindano es muy tóxico para los organismos acuáticos. Los valores de toxicidad aguda (L(E)C50) y crónica (NOEC) en numerosos peces e invertebrados acuáticos son a nivel de

microgramos/l (véanse los estudios mencionados por ejemplo en HSB 2006 y la hoja de datos EQS de la Comisión Europea, 2005). La sustancia muestra una toxicidad aguda moderada en aves y mamíferos y se han observado efectos a largo plazo en la reproducción y el desarrollo de estos animales (USEPA, 2006). El lindano es también muy tóxico para las abejas (USEPA, 2006). Además, se han detectado propiedades de alteración endocrina en muchos animales, por ejemplo aves, ranas y mamíferos (USEPA, 2006), lo que suscita una gran preocupación para la salud humana y el medio ambiente.

#### 1.3.5. Transporte a larga distancia en el medio ambiente: movimiento transfronterizo

Se registraron altas concentraciones de gamma-HCH en Francia, Portugal, España, los Países Bajos y Bélgica, que pueden explicarse por las elevadas densidades de emisión de lindano en estos países. También se hallaron concentraciones relativamente altas en el aire en Alemania, Italia, Suiza y Luxemburgo, a pesar de las menores densidades de emisión de lindano en estos países. Estas elevadas concentraciones probablemente se explican por el transporte atmosférico desde los países europeos con altas densidades de emisión anteriores (Shatalov y Malanichev, 2000; Shatalov et al., 2000).

El lindano es muy prevalente en el medio marino y el suelo y su potencial de transporte atmosférico a larga distancia ha sido demostrado en la Unión Europea (OMS, Europa, 2003), especialmente por el Programa Europeo de Seguimiento y Evaluación.

Muchos estudios han informado de la presencia de residuos de HCH, especialmente los isómeros alfa y gamma, en toda América del Norte, el Ártico, Asia meridional, el Pacífico occidental y la Antártida. Los isómeros del HCH, incluido el lindano, son los contaminantes insecticidas organoclorados más abundantes y persistentes en el Ártico, y su presencia en el Ártico y la Antártida, donde no se han utilizado HCH técnico y lindano, evidencia su transporte a larga distancia. Los isómeros del HCH, incluido el lindano, están sujetos a una «destilación mundial», en la que los climas cálidos a latitudes más bajas favorecen la evaporación a la atmósfera donde las sustancias químicas pueden ser transportadas a latitudes más altas. En las latitudes altas, las temperaturas frías favorecen la deposición atmosférica (Walker et al., 1999).

### 1.4. Situación reglamentaria del lindano en la UE

Debido a sus propiedades carcinogénicas, persistentes, bioacumulativas y alteradoras endocrinas (OMS 1991; ATSDR 1998; ATSDR 2005; PNUMA 2005a, b; IARC, 2016), el HCH técnico y el lindano se convirtieron en sustancias muy controladas desde la década de los 70 en adelante. Muchos países prohibieron o restringieron primero el uso del HCH técnico en los años 70 y luego el uso del lindano en los años 80 y 90 (Hauzenberger et al., 2004). Además, varios acuerdos y tratados bilaterales y multilaterales internacionales han contemplado estas sustancias, por ejemplo el Convenio de Rotterdam, el Protocolo de Aarhus sobre los contaminantes orgánicos persistentes, la Comisión OSPAR para la protección del medio marino del Atlántico Nordeste, la Estrategia binacional para las sustancias tóxicas en los Grandes Lagos entre Canadá y los Estados Unidos y el Plan de acción regional norteamericano sobre el lindano y otros isómeros del hexaclorociclohexano en el marco de la Comisión de Cooperación Medioambiental entre Canadá, los Estados Unidos y México.

En 2009, el lindano, el alfa-HCH y el beta-HCH se incluyeron en el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP) para lograr la eliminación mundial de estas sustancias. Esto supuso la prohibición de la producción y el uso de estas sustancias desde agosto de 2010 en adelante en todos los países que son miembros del Convenio de Estocolmo, con la posibilidad de una excepción específica de uso del lindano como fármaco

humano para el control de piojos y sarna como tratamiento de segunda línea. Esta excepción se ha aplicado en algunos países.

En la UE, la Directiva 79/117/CEE prohibió el uso de productos fitosanitarios que contengan HCH con menos de un 99 % del isómero gamma en 1979. En 2004, el Reglamento (CE) n.º 850/2004 prohibió todos los usos del lindano con determinadas excepciones que expiraban a finales de 2007. Así, desde 2008, el uso de estas sustancias no se permite en la UE.

#### 1.4.1. Legislación sobre los niveles de lindano en suelos

El suelo no está sujeto a un conjunto integral y coherente de normas en la Unión Europea. La Comisión decidió en mayo de 2014 retirar la propuesta de Directiva marco sobre el suelo, incluida en el Séptimo Programa de Acción en materia de Medio Ambiente. Este Programa preveía que, para 2020, se gestionase la tierra de forma sostenible en la Unión, se protegiese adecuadamente el suelo y estuviese bien avanzada la rehabilitación adecuada de los lugares contaminados. También compromete a la UE y a sus Estados miembros a redoblar los esfuerzos para reducir la erosión del suelo, aumentar su contenido en materia orgánica y rehabilitar los lugares contaminados (Comisión Europea, 2016a).

En la actualidad, solo algunos Estados miembros de la UE tienen una legislación específica sobre la protección del suelo. Esta se basa en valores exploratorios del suelo, que son niveles de calidad genéricos que se utilizan para regular la gestión de la tierra contaminada. Las consecuencias de rebasar los valores exploratorios del suelo varían en función de los marcos reguladores nacionales. Van desde la necesidad de mayores investigaciones hasta la necesidad de medidas de rehabilitación.

Los valores exploratorios en los países europeos suelen clasificarse sobre la base de su uso y son ampliamente variables. Las desventajas de este tipo de clasificación son, entre otras, que el uso prescrito de valores exploratorios es específico a cada marco regulador nacional y que a menudo incluyen un complejo sistema de normas y excepciones (por ejemplo, el momento en el que se determinó la contaminación) y tipo de sustancias a las que se aplican (por ejemplo, móviles y no móviles). Además, el uso de valores exploratorios está cambiando actualmente en muchos países sin modificaciones en los métodos de derivación utilizados para determinar dichos valores. Como norma general, la clasificación de los valores exploratorios se basa en niveles de riesgo (insignificante, intermedio y potencialmente inaceptable). En Carlon (2007) puede consultarse información sobre la forma de determinar los distintos sistemas reguladores nacionales para la protección del suelo.

En el cuadro 3 se presentan los países de la UE con sistemas reguladores nacionales para la protección del suelo junto con sus correspondientes valores para el lindano. Además, se incluyen los valores correspondientes a los HCH totales y/o a los isómeros alfa-HCH y beta-HCH, cuando están disponibles.

**Cuadro 3. Sistema regulador nacional para la protección del suelo y valores exploratorios para el lindano**

	Valores exploratorios para el lindano			
	Valor umbral (mg/kg-dw)	Valor inferior (mg/kg-dw)	Valor superior (mg/kg-dw)	Aguas subterráneas (µg/l)
Austria	-	-	-	-
Bélgica	-	-	-	2
	-	-	-	0,06 <sup>h</sup>
	-	-	-	0,2 <sup>i</sup>
República Checa	-	-	-	-
Dinamarca	-	-	-	-
Finlandia	0,01	0,2 <sup>f</sup>	2 <sup>g</sup>	-
Francia	0,2	0,5	470	0,1-2
	5 <sup>e</sup>	10 <sup>e</sup>	400 <sup>e</sup>	0,1-2
Alemania	-	-	-	-
Italia	-	0,01 <sup>c</sup>	0,5 <sup>d</sup>	0,1
	-	0,01 <sup>h</sup>	0,5 <sup>h</sup>	0,1 <sup>h</sup>
	-	0,01 <sup>i</sup>	0,5 <sup>i</sup>	0,1
Lituania	-	-	0,02 <sup>e</sup>	-
Polonia	0,000005	0,0005	0,5	*
	0,0025 <sup>h</sup>	0,25 <sup>h</sup>	2 <sup>h</sup>	*
	0,001 <sup>i</sup>	0,1 <sup>i</sup>	2 <sup>i</sup>	*
Eslovaquia	-	-	-	-
España	0,01	0,1	1 <sup>h,i</sup>	*
	0,01 <sup>h</sup>	0,01 <sup>h</sup>	0,01 <sup>h</sup>	*
	0,01 <sup>i</sup>	0,01 <sup>i</sup>	0,01 <sup>i</sup>	*
Suecia	-	-	-	-
Países Bajos	-	0,00005	-	-
	-	0,003 <sup>h</sup>	-	-
	-	0,009 <sup>i</sup>	-	-
	-	0,01 <sup>e</sup>	2 <sup>e</sup>	1 <sup>e</sup>

Fuente: Carlon, 2007.

c: uso residencial/zonas verdes públicas; d: uso industrial/comercial; e: HCH totales; f: basado en el riesgo ecológico; g: basado en el riesgo para la salud humana; h: valores para  $\alpha$ -HCH; i: valores para  $\beta$ -HCH; \* El valor umbral para la protección del ecosistema incluye las aguas subterráneas.

#### 1.4.2. Legislación sobre los niveles de lindano en el agua

La Directiva marco sobre el agua (2000/60/CE) busca reducir progresivamente las emisiones, vertidos y pérdidas de sustancias prioritarias en las aguas. Las sustancias peligrosas prioritarias deberán haberse eliminado completamente en un plazo de veinte años. El lindano está incluido en esta lista.

La Directiva marco sobre el agua también establece dos tipos de normas de calidad ambiental (NCA) para sustancias prioritarias: concentraciones medias anuales y concentraciones máximas admisibles. Las primeras protegen contra los problemas de contaminación crónica a largo plazo y las segundas contra la contaminación aguda a corto plazo. Los Estados miembros son responsables de la vigilancia de las concentraciones de sustancias prioritarias en las aguas superficiales. Todos los isómeros del HCH se incluyen en la lista de sustancias prioritarias (Comisión Europea, 2005). Se han establecido normas de calidad ambiental para el lindano y también para la suma de isómeros del HCH:

**Cuadro 4. Normas generales de calidad para  $\Sigma$ HCH ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\delta$ -,  $\epsilon$ - ,  $\gamma$ -HCH) (Comisión Europea, 2005).**

Ecosistemas	Normas de calidad (NC)	Valores redondeados de las normas de
NC aguas superficiales continentales	0,02 $\mu\text{g/l}$ (10,8 $\mu\text{g/kg}$ SPM peso seco)	0,02 $\mu\text{g/l}$ (11 $\mu\text{g/kg}$ SPM peso seco)
NC otras aguas superficiales contempladas en	0,002 $\mu\text{g/l}$ (1,1 $\mu\text{g/kg}$ SPM peso seco)	0,002 $\mu\text{g/l}$ (1 $\mu\text{g/kg}$ SPM peso seco)
NC concentración máxima admisible	0,04 $\mu\text{g/l}$	0,04 $\mu\text{g/l}$

**SPM = Materia particulada en suspensión**

**Cuadro 5. Normas específicas de calidad para el lindano ( $\gamma$ -HCH) (Comisión Europea, 2005).**

Objetivo de protección	Norma de calidad
Comunidad pelágica (agua dulce)	0,02 $\mu\text{g/l}$ (10,8 $\mu\text{g/kg}$ SPM peso seco)
Comunidad pelágica (agua salada)	0,002 $\mu\text{g/l}$ (1,1 $\mu\text{g/kg}$ SPM peso seco)
Comunidad béntica (sedimento en agua dulce)	2,4 $\mu\text{g/kg}$ peso húmedo ( $\approx$ 10,3 $\mu\text{g/kg}$ peso seco)
Comunidad béntica (sedimento marino)	0,24 $\mu\text{g/kg}$ peso húmedo ( $\approx$ 1,1 $\mu\text{g/kg}$ peso seco)
Predadores (envenenamiento secundario)	33 $\mu\text{g/kg}$ (tejido de presa, peso húmedo) concentración correspondiente en agua: 0,026 $\mu\text{g/l}$
Ingesta de alimentos por el ser humano	61 $\mu\text{g/kg}$ (mariscos, peso húmedo); concentración correspondiente en agua 0,047 $\mu\text{g/l}$
Extracción de agua destinada al consumo humano	< 1 $\mu\text{g/l}$
Agua destinada al consumo humano	0,1 $\mu\text{g/l}$

**Cuadro 6. Normas específicas de calidad para HCH excepto el lindano**

Objetivo de protección #	Norma de calidad
Comunidad pelágica (agua dulce)	0.1
Comunidad pelágica (agua salada)	0.01
Comunidad béntica	no se exige
Predadores (envenenamiento secundario)	67 $\mu\text{g/kg}$ (tejido de presa, peso húmedo) concentración correspondiente
Ingesta de alimentos por el ser humano	la derivación de NC no es posible pero se exige según los criterios desencadenantes
Extracción de agua destinada al consumo humano	< 1 $\mu\text{g/l}$
Agua destinada al consumo humano	0,1 $\mu\text{g/l}$

## 2. EL LEGADO DEL LINDANO EN LA UE

### PRINCIPALES CONCLUSIONES

- En casi todos los Estados miembros en los que se produjo lindano es necesario eliminar y descontaminar suelos, aguas superficiales y aguas subterráneas.
- La contaminación en los lugares de producción no siempre fue resultado de actividades de deposición específicas, sino que se produjo principalmente por derrames durante las operaciones rutinarias cotidianas. Las operaciones normales de desecho a largo plazo de la producción de la fábrica también deberían considerarse una fuente potencial de contaminación por HCH (por ejemplo, Morfleet en Hamburgo).
- La producción de lindano en la UE ha provocado una extensa contaminación de suelos, aguas superficiales y aguas subterráneas con sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulativas como lindano, isómeros de HCH, clorobenzenos y dioxinas.
- Los lugares contaminados por lindano y HCH no se han identificado íntegramente en todos los Estados miembros.
- Los residuos de HCH normalmente suman cientos y miles de toneladas y, por lo tanto, representan una gran reserva de contaminantes.
- Los puntos críticos, con miles y a menudo cientos de miles de toneladas de residuos de lindano y HCH, están a la espera de rehabilitación en, al menos, los siguientes Estados miembros: Alemania, Eslovaquia, España, Francia, Hungría, Italia, Polonia, la República Checa y Rumanía.
- Las plantas de producción de sustancias químicas suelen situarse cerca de ríos y las inundaciones han contribuido a la movilización difusa de contaminantes (de Sabiñánigo y Vitoria al río Ebro y de Bitterfeld-Wolfen al río Elba). El cambio climático y el creciente número de inundaciones contribuirán a la intensificación del vertido de COP en los ríos.

Como se ha indicado (sección 1.2.1.1), la eficiencia del proceso de producción del lindano es muy baja y genera un gran volumen de residuos de producción que contienen varios isómeros de HCH. Inicialmente, estos residuos se consideraban inertes y se almacenaban en los lugares de producción, se tiraban en vertederos y canteras e incluso se utilizaban para el relleno de carreteras y como material de construcción. Las emisiones de aguas residuales, junto con los derrames resultantes de las operaciones rutinarias, incluidos los desbordamientos en los procesos de producción, las fugas de las tuberías de transporte, el almacenamiento, la carga y descarga de sustancias químicas y el almacenamiento provisional de residuos de isómeros de HCH, contribuyeron a la contaminación de los lugares de producción y fuera de ellos.

Para tener una idea del legado del lindano en los Estados miembros de la UE, se ha recopilado información centrada en los lugares de producción, las cantidades de HCH y lindano producidas, la generación de residuos y la gestión de los efectos medioambientales. Cuando había información disponible, también se describe la situación actual de los lugares de producción, los depósitos de residuos y la contaminación de distintos entornos (suelo, aguas superficiales y aguas subterráneas).

Aunque en la mayoría de Estados miembros de la UE se formuló lindano para distintos productos comerciales, este capítulo se centra en los 14 Estados miembros en los que hubo producción, debido a la generación de residuos y al mayor impacto ambiental de la producción en comparación con la formulación.

## Metodología

Para elaborar este informe se enviaron más de cien cuestionarios a distintos actores que se consideraban relevantes a nivel nacional: personas de contacto y delegados recientes del Convenio de Estocolmo<sup>3</sup>, representantes de los gobiernos autonómicos españoles (3), círculos académicos (1), ONG (6) y consultorías que trabajan en la rehabilitación de los lugares contaminados por COP (3).

Se han recibido respuestas de:

- Delegados de seis Estados miembros

El Ministerio de Medio Ambiente de la República Checa  
La Agencia de Protección del Medio Ambiente de Dinamarca  
El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España  
La Oficina Nacional de Seguridad de la Cadena Alimentaria de Hungría  
El Ministerio de Protección del Medio Ambiente y Desarrollo Regional de Letonia  
El Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Bosques de Rumanía

- Tres gobiernos autonómicos españoles

País Vasco: Dirección de Administración Ambiental  
Xunta de Galicia  
Gobierno de Aragón

- Seis organizaciones no gubernamentales

Greenpeace Europa central y oriental  
Asociación Soriana para la Defensa y Estudio de la Naturaleza (ASDEN)  
Cruz Verde  
Ecologistas en Acción  
Ekologistak Martxan  
Asociación Internacional de HCH y Plaguicidas (IHPA)

- Tres consultorías

Tauw bv  
Kruger A/S  
Martin Forter, científico independiente para municipios, residentes y organizaciones medioambientales

- Un organismo académico

Departamento de Bioquímica de Isótopos del Centro Halmholz para la Investigación Medioambiental - UFZ

En las siguientes secciones se resume la información proporcionada en las respuestas al cuestionario, junto con otra información disponible. Las respuestas recibidas pueden consultarse en el anexo I.

---

<sup>3</sup> Veinticinco países de la UE (no había información de contacto para Grecia, Eslovenia y Luxemburgo) y catorce países no pertenecientes a la UE.

## 2.1. Austria

Una empresa fabricó lindano en Austria hasta 1965. No hay información disponible sobre las cantidades producidas o los métodos de gestión de residuos. No hay sitios contaminados registrados en Austria (Vijgen, 2006). UBA Austria está a punto de iniciar investigaciones en el emplazamiento del antiguo productor (Vijgen, comunicación personal).

## 2.2. Bulgaria

Varias fuentes indican que en Bulgaria se fabricó lindano (Vijgen, 2006; CECOP, 2006); sin embargo, no hay datos disponibles sobre los lugares, períodos de producción o cantidades. Según lo que se sabe actualmente, pueden que nunca se haya producido lindano en el país (Vijgen, comunicación personal).

## 2.3. Croacia

Cuatro fabricantes produjeron una cantidad total de siete toneladas de lindano al año en Croacia (Vijgen, 2006). No hay más información disponible.

## 2.4. República Checa

Se han identificado 34 lugares contaminados por lindano en la República Checa, incluidos aquellos donde ha concluido la rehabilitación o está en marcha. Según la información proporcionada por el Ministerio de Finanzas en cooperación con la Inspección Medioambiental checa (Vytopilova, comunicación personal), cada lugar se evalúa por separado y se gestiona caso por caso según las directrices checas y las recomendaciones metodológicas del Ministerio de Medio Ambiente (véase el anexo I).

Se han destacado varios lugares contaminados:

### Neratovice

Spolana Neratovice, situado en Neratovice, a 25 km al norte de Praga en el río Elba, fue el único fabricante de lindano en la República Checa. Produjo alrededor de 3 300 toneladas de lindano (Beránek et al., 2006) y 61 680 toneladas de HCH técnico entre 1963 y 1972 (Vijge, 2006). La producción cesó debido a la aparición de cloracné durante la producción de Agente Naranja. Los residuos de lastre isomérico y bencenos clorados se depositaron junto con otros residuos industriales en la mina «Hájek» cercana al pueblo del mismo nombre situado en la región de Karlovy Vary.

La rehabilitación del lugar comenzó en 2005 y sigue en marcha. Las actividades incluyen descontaminación y demolición de dos edificios, excavación y tratamiento de suelos colindantes, tratamiento de sustancias químicas almacenadas cerca del edificio principal, desmontaje y tratamiento de la unidad de procesos y restauración final del lugar. Los residuos se trataron *in situ* mediante deoloración catalizada por bases (Holoubek et al., 2011) (véase la sección 3.3.1 para más información sobre este método).

La fábrica Spolana Neratovice es uno de los puntos críticos de COP mejor estudiados en el país. Desde marzo de 2009, el programa MONET-Europe (MONitoring NETwork) ha medido cientos de nanogramos de HCH por dispositivo de filtrado en el aire ambiente en las proximidades de la fábrica (Holoubek et al., 2011).

### Vertedero en la mina «Hájek» (Karlovy Vary)

Uno de los problemas medioambientales más graves de la República Checa, pero menos conocidos que Spolana Neratovice, está relacionado con la antigua producción de lindano y HCH técnico en la mina «Hájek» cercana al pueblo del mismo nombre (sudeste de Ostrov en la región de Karlovy Vary). En la década de 1960, las autoridades gubernamentales decidieron depositar lastre isomérico resultante de la producción de lindano y bencenos clorados en la mina «Hájek» en barriles metálicos, envases de papel o libremente incrustados. La cantidad estimada de sustancias químicas depositadas en un vertedero como este se eleva a entre 3 000 y 5 000 toneladas. El agua de la mina fluye hacia el este hasta el arroyo de Ostrovsk, que abastece a un sistema de estanques de peces a 1,5 km de distancia del vertedero. Debido al elevado nivel de aguas subterráneas debajo de este, las partículas sólidas, así como las sustancias orgánicas cloradas disueltas, son llevadas hasta las aguas superficiales, con la posibilidad de que estas sustancias contaminen cadenas alimentarias. En 1999 se llevaron a cabo obras para evitar que se infiltrase agua en el lugar y detener el agua contaminada que salía de él. Se han descontaminado 12,1 ha del lugar (Beránek y Havel, 2006).

### Klatovy-Luby - antiguo almacenamiento de plaguicidas

Otro punto crítico de lindano en la República Checa es un antiguo almacenamiento de plaguicidas situado en el centro de una zona deshabitada de Klatovy-Luby. Desde la década de los 60 hasta principios de la década de los 90 se utilizaron edificios comerciales de Klatovy-Luby para el almacenamiento y formulación de plaguicidas. Los análisis de yeso del edificio, el suelo y el agua subterránea demostraron que estas zonas están muy contaminadas por DDT, lindano, fenson o atrazina y derivados del petróleo.

El caso del almacenamiento de plaguicidas en Klatovy-Luby sin duda no es el único en la República Checa. En la antigua Checoslovaquia probablemente había almacenes similares y pabellones de preparación de plaguicidas en, más o menos, cada uno de los distritos (véase el anexo I). El yeso y las partes de las paredes interiores contaminados se utilizaron para un ejercicio de demostración de descontaminación utilizando una tecnología sin combustión llamada destrucción mediada por cobre (Beránek y Havel, 2006).

Según la información proporcionada por la autoridad medioambiental, las existencias de plaguicidas obsoletos se eliminaron principalmente por incineración a alta temperatura en la década de los 90 (Vytopilova, comunicación personal. Véanse las referencias).

**Cuadro 7. Producción de residuos de HCH (toneladas) en la República Checa**

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Neratovice, distrito de Melnik (Spolana Neratovice): 1961-1972	60 000 toneladas	La descontaminación y rehabilitación del lugar comenzó en 2005
Hájek, Karlovy Vary (vertedero de la mina «Háek»)	La cantidad estimada de sustancias químicas depositadas en un vertedero como este se eleva a entre 3 000 y 5 000 toneladas. El vertedero tiene un volumen de aproximadamente 7 millones de metros cúbicos.	En 1999 comenzaron las obras de recuperación. Se ha completado la recuperación de una zona de 12,1 hectáreas
Luby, Klatovy (Klatovy-Luby - antiguo almacenamiento de plaguicidas): década de 1960-década de 1990	Lindano en existencias obsoletas, 180 toneladas	Utilizado para demostración de una tecnología de descontaminación mediante destrucción mediada por cobre

## 2.5. Dinamarca

Según la información proporcionada por la autoridad medioambiental (Gravesen, comunicación personal. Véanse las referencias), nunca se ha producido lindano en Dinamarca y no se tiene conocimiento de ningún vertido o lugar contaminado.

El lindano está prohibido en Dinamarca desde 1994. Se cree que los plaguicidas obsoletos que contenían lindano se eliminaron en una incineradora para residuos peligrosos.

## 2.6. Francia

Nueve fabricantes produjeron lindano en Francia entre los años 40 y los años 80, con una capacidad de producción global de 1 800 t/año. El HCH se depositaba en siete lugares. Parte de los residuos se quemaron en 1986 y alrededor de 500 toneladas se trasladaron al norte de Francia para su destrucción en los años 80. Se han localizado alrededor de 260 000 toneladas de residuos de producción de HCH en un área de aproximadamente 35 400 m<sup>2</sup> (Vijge, 2006). Por desgracia, solo hay disponible información relativa a uno de los fabricantes.

### Huningue, Alto Rin

Entre 1947 y 1974, la empresa Chemicals Ugine Kuhlman (PCUK) ubicada en Huningue fabricó lindano, produciendo alrededor de 100 000 toneladas de residuos de HCH. La planta cerró en 1976 y los edificios fueron demolidos. Los residuos de HCH y el hormigón cargado con estos residuos se abandonaron en el sótano del lugar. Varias miles de toneladas de residuos de HCH están enterradas en la planta industrial. Sin embargo, la mayor parte de los residuos producidos por PCUK se almacenaron en once graveras en la Alta y Baja Alsacia, así como en Gouhenans (Forter, 2015).

En 1972-73 se excavaron cerca de 4 000 m<sup>3</sup> de gravilla de la planta industrial y se utilizaron en carreteras a través de los campos de Hagenthalle- Bas (FR) y Hagenthal-le-Haut (FR) hasta una comunidad suiza. El hormigón de HCH en Hagenthal-le-Bas (FR) contenía hasta 750 g/kg de HCH.

Entre 1981 y 2012 estuvo en funcionamiento una planta de tratamiento de aguas residuales en Huningue para Sandoz AG y más adelante para Novartis Basilea (CH) y Huningue, Clariant Huningue (FR) y BASF Huningue (FR). En 2013, Novartis y SITA Remediation iniciaron las labores de rehabilitación en el lugar eliminando los residuos de HCH (Steih, 2012). Los materiales muy poco contaminados se clasifican directamente *in situ* (Steih, 2016). Los materiales muy contaminados se colocan primero en contenedores y los materiales moderadamente contaminados se cargan directamente en barcos y se transportan hasta una empresa acreditada para la eliminación de residuos para su incineración o desorción térmica. En 2013, el traslado del material de HCH excavado para su transporte generó una nube de olor al otro lado del río Rin en la ciudad de Basilea (CH) y emisiones de polvo de HCH (Forter, 2015). Además, se han detectado isómeros de HCH en leche materna y leche de vacas en la región de Basilea (Forter, 2015).

En noviembre de 2013, Novartis paró las obras de rehabilitación, que se reanudaron posteriormente en 2015. Para evitar nuevas emisiones de polvo de HCH procedentes de las obras de rehabilitación, se adoptaron distintas medidas de precaución (Steih, 2016). Por ejemplo, ahora se realizan mediciones periódicas de aire y polvo en el lugar y en las zonas aledañas. Además, la excavación de zonas muy contaminadas solo se desarrolla bajo grandes tiendas selladas que están equipadas con un aspirador, y el aire extraído se trata con carbón activo. En las zonas menos contaminadas, el suelo se excava bajo grandes campanas de extracción con sistemas de filtrado de aire y, para evitar la formación de polvo, la superficie se cubre con una película de un polímero de enlace al agua para fijar el polvo al suelo. Según las estimaciones actuales del coste del proyecto de rehabilitación, el cálculo inicial de alrededor de 100 millones EUR prácticamente se duplicará (Steih 2016).

**Cuadro 8. Producción de residuos de HCH (toneladas) en Francia**

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Nueve fabricantes con una capacidad total de 1 800 t/año	Se han localizado 260 000 toneladas de residuos de producción de HCH	No hay datos sobre la mayoría de lugares
Huningue ,Alto Rin, Alsacia (Ugine Kuhlmann): 1947-1975	100 000 toneladas	Residuos de HCH u hormigón con residuos de HCH identificados en 18 lugares. Obras de rehabilitación e investigación realizadas en algunos lugares. En varios lugares no se están llevando a cabo obras.

## 2.7. Alemania

Diez empresas fabricaron lindano en Alemania: cuatro empresas estaban situadas en la antigua República Democrática Alemana (RDA) y seis en la República Federal Alemana (RFA).

En conjunto, se calcula que la cantidad de lindano producido asciende a 20 000 t/año en la RDA y alrededor de 1 500-1 700 t/año en la RFA. La producción total estimada de residuos de isómeros de HCH se eleva a entre 236 000 y 246 000 toneladas en la RDA y entre 127 400 y 137 400 toneladas en la RFA (Vijn, 2006; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1993; Heinisch et al., 2005). Lamentablemente, no ha sido posible compilar información sobre todos los lugares de producción en la antigua RFA. Tampoco hay disponible información sobre el paradero exacto de los cuatro lugares de producción en la antigua RDA. Sin embargo, se han destacado varios lugares de producción:

### Magdeburgo

Fahlberg List (FALIMA) era una de las empresas farmacéuticas y químicas más importantes de la RDA. Produjo lindano entre 1946 y 1981. La empresa VEB Fahlberg produjo 5 645 toneladas de lindano entre 1967 y 1981. Entre 1960 y 1964, los residuos de la producción se depositaron en un vertedero en Cracauer Anger al este de Magdeburgo. Hasta agosto de 1964 se desechaban en dos antiguas canteras en Emden, en Haldensleben. En total se depositaron 76 000 toneladas en Emden (Heinisch et al., 2005). Los suelos agrícolas y las plantas que rodean los depósitos han mostrado elevados niveles de isómeros de HCH (Heinisch et al., 1993).

### Chemnitz (Karl-Marx-Stadt)

La empresa Fettchemie en Chemnitz (conocida entre 1953 y 1990 como Karl-Marx-Stadt) produjo 30 985 toneladas de HCH entre 1967 y 1977. El producto se transportaba a Magdeburgo donde FALIMA lo transformaba en lindano (Heinisch et al., 2005).

### Berlin-Adlershof

La empresa VEB Berlin (Grupo Menarini desde 1990) produjo 4 617 toneladas de HCH y 1 245 toneladas de lindano entre 1949 y 1961. Durante el período entre 1951 y 1972, la empresa produjo 28 452 toneladas de residuos sólidos y 78 677 toneladas de aguas residuales que contenían HCH. Después de estar almacenados durante un corto período de tiempo en los terrenos de la empresa, los residuos sólidos se depositaron en la mina abandonada Regina en Freienwalde (Brandenburgo) en una zona recreativa. Las aguas residuales se depositaron en unos llamados estanques de filtración en los terrenos de la empresa (Heinisch et al., 2005). Se ha encontrado lindano en agua de pozos, aguas superficiales y sedimentos del lugar de producción y en las inmediaciones. Entre 1985 y 1989 se descubrió que las muestras de agua contenían isómeros alfa y gamma hasta 1 590 y 6 900 µg/l, delta hasta 2 500 µg/l y también beta (Börner, 2012). También se hallaron elevados niveles de isómeros de HCH en muestras de agua y sedimentos (7 820 µgHCH/kg) del Teltowkanal en 2002.

### Bitterfeld-Wolfen

La empresa Chemiekombinat Bitterfeld, ubicada en la región de Bitterfeld-Wolfen, sintetizó 93 000 toneladas de HCH entre 1959 y 1982. Parte del HCH se suministró a otras empresas para la producción de lindano, como FALIMA. La producción de lindano *in situ* ascendió a 5 410 toneladas entre 1967 y 1982. Parte de los residuos de la producción de HCH se depositaron en el lugar y posteriormente fueron arrastrados al arroyo Spittelwasser, que desemboca en el río Mulde, un afluente del Elba. También se vertieron aguas residuales muy contaminadas sin tratar en el arroyo Spittelwasser, lo que provocó la contaminación de la llanura del arroyo, la meseta del Mulde y el río Elba, que no cumple las normas de calidad química del agua. Todavía hoy, el agua vertida desde el parque químico emite HCH al sistema de aguas superficiales. Se calcula que se emiten 17,5 k/año de isómeros de HCH al río Mulde. Los sedimentos contaminados que son movilizados y desplazados durante grandes inundaciones, como la de 2002, también son importantes fuentes de contaminación del

sistema hídrico por HCH (Jacobs, 2014).

Entre 60 000 y 80 000 toneladas de HCH se depositaron en la mina a cielo abierto de lignito «Antoine» cerca de la fábrica, con el objetivo de reutilizarlas posteriormente. También se enterraron cantidades considerables de residuos en un lugar situado a 2 km de la mina. Se han documentado emisiones de HCH y otros organoclorados en aguas subterráneas, aguas superficiales y la atmósfera. Se han encontrado elevados niveles de concentración de HCH en suelos y aguas subterráneas cerca del depósito Antoine, los antiguos lugares de producción y cerca del arroyo Spittelwasser. En las proximidades del lugar de producción al sur, el acuífero superior (cuaternario) está muy afectado por los cuatro isómeros, lo que implica que se transfirieron grandes cantidades de HCH al suelo/superficie durante la producción o por el almacenamiento. En general, la contaminación por HCH abarca un área de alrededor de 40 km<sup>2</sup> y, por lo tanto, su escala es regional (Wallbaum y Fuchs, 1993; Wycisk et al., 2013).

### Gernsheim, Darmstadt

La empresa química Merck produjo lindano en su fábrica de Gernsheim, Darmstadt, entre 1954 y 1972. En esa época, los residuos se depositaron en el lugar como material de construcción para un aparcamiento. Entre 2008 y 2014, la empresa renovó el lugar, que engloba un área de aproximadamente 5 200 m<sup>2</sup> con 25 000 toneladas de residuos de HCH. Los residuos se enviaron a incineradoras externas para ser eliminados (Merck, 2009; Merck, 2016). Los datos analíticos de agua, lodo y materia suspendida de zonas aledañas a Darmstadt revelaron en 2004 la presencia de elevados niveles de isómeros de HCH, hasta 4 124 µg/kg, en lodos de la planta de tratamiento de residuos de Merck Darmstadt (Heinisch et al., 2005).

### Ludwigshafen

BASF fabricó lindano en su complejo químico situado en Ludwigshafen. Entre 1955 y 1966, BASF depositó en un antiguo pozo de arena y grava ubicado en la calle Maudacher de la ciudad aproximadamente 780 000 m<sup>3</sup> de residuos, incluidos residuos de la producción de HCH. El lugar contaminado tiene una superficie de 4,5 hectáreas. En 1972, Metro AG construyó un centro comercial en el lugar que funcionó hasta 1999. En los años 90, BASF instaló 19 pozos de seguridad para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas. Con este sistema se bombeaban alrededor de 300 metros cúbicos de agua contaminada por hora y circulaban hasta la planta de tratamiento de aguas residuales de BASF. En el año 2000, el centro comercial se externalizó y los edificios originales fueron desmantelados. Inicialmente estaba previsto eliminar completamente los residuos almacenados bajo tierra, pero en 2009 el municipio decidió que la mejor opción era sellar la superficie. Entre 2013 y 2014 se llevaron a cabo medidas de saneamiento, incluida la instalación de un sellador plástico, una capa de drenaje y cobertura del suelo y un sistema de vigilancia de las aguas subterráneas.

Las pruebas de contaminación de las aguas subterráneas han dado lugar a un nuevo programa de descontaminación y rehabilitación que se aprobó en 2016. Incluye la construcción de un muro de sellado de 500 metros de largo y la excavación de una zanja a lo largo del trazado de entre 60 cm y 10 m de profundidad, donde se utilizará un compuesto especial de sellado para que actúe como barrera de flujo en el subsuelo. Asimismo, BASF y la ciudad de Ludwigshafen instalarán conjuntamente pozos reformados, estaciones de muestreo de aguas subterráneas y una planta de tratamiento de agua, que estarán listos para iniciar una operación de rehabilitación de las aguas subterráneas en 2018 (página web de Ludwigshafen am Rhein, 2014 y 2016).

## Hamburgo-Moorfleet

La filial Cella-Merck de Boehringer Ingelheim GmbH produjo lindano entre 1951 y 1984 en Hamburgo. Durante tres años almacenó los residuos en el lugar y en 1953 comenzó a reciclarlos para sintetizar plaguicidas comercializables (2,4,5-T y bromofos). Esta actividad generó dioxinas y furanos que contaminaron edificios de la fábrica, suelos y residuos. El suelo y el agua subterránea bajo la fábrica estaban/están muy contaminados por HCH (260 toneladas), clorobencenos (550 toneladas) y PCDD/PCDF (6 kg de equivalentes de toxicidad (EQT)) procedentes de los derrames y fugas ocurridos durante los 30 años de historia de producción de la fábrica.

Se calcula que los residuos organoclorados vertidos documentados procedentes de esta fábrica (aproximadamente 16 000 toneladas) contienen entre 52 y 171 toneladas de PCDD/PCDF total con entre 333 y 854 kg I-EQT depositados junto con 2 000 toneladas de HCH y otros residuos organoclorados en al menos siete vertederos de Alemania, incluido el megavertedero Georgswerder. El contenido de PCDD/PCDF en el residuo de la descomposición de HCH finalmente provocó el cierre de la fábrica. La mayoría de PCDD/PCDF terminaron en corrientes de residuos y se depositaron en vertederos. También se destruyeron residuos en un buque incinerador en alta mar.

A finales de 1984 se iniciaron actividades de exploración, rehabilitación y contención en el lugar de producción y continuaron hasta 1998. Para asegurar el lugar, se construyó un muro de contención (46 m de profundidad) y, después de que se demoliesen los edificios, toda la zona se recubrió con hormigón asfáltico. Para asegurar que las aproximadamente 830 toneladas de contaminantes organoclorados no penetrasen a través de los poros del muro de seguridad en las aguas subterráneas fuera de la zona de contención, se instaló un sistema de bombeo y tratamiento a fin de establecer un gradiente de presión para el flujo de agua hacia el lugar. Todavía sigue en curso. De las cerca de 830 toneladas de organoclorados que están bajo tierra, entre 10 y 30 toneladas se han bombeado e incinerado en los últimos 15 años más o menos. Por lo tanto, la mayor parte de la carga de contaminación sigue en el subsuelo (Götz et al., 2013; Weber y Varbelow, 2013). Al igual que en Spolana, aparecieron problemas de salud (cloracné) debido a la exposición de los trabajadores a las dioxinas durante la producción de Agente Naranja (Weber y Varbelow, 2013).

## Vertedero Georgswerder, Hamburgo

El vertedero Georgswerder es uno de los más grandes de Europa. Tiene un volumen consolidado de residuos de cerca de 7 millones m<sup>3</sup> depositados entre 1948 y 1979. El vertedero se extiende sobre una superficie de 45 ha y mide cerca de 40 m de alto. Los residuos consisten principalmente en 5 millones de residuos municipales y voluminosos y 1,77 millones de toneladas de suelo excavado, así como residuos de demolición. Además, entre 1967 y 1974 se depositaron alrededor de 150 000 m<sup>3</sup> de residuos líquidos peligrosos en diez estanques.

Se calcula que la cantidad total de hidrocarburos clorados en la fase aceitosa del vertedero se eleva a varios miles de toneladas. En este vertedero se depositaron 5 780 toneladas de residuos de producción de HCH de la antigua fábrica de plaguicidas de Hamburgo-Moorfleet. De estos residuos peligrosos, 1 750 toneladas son residuos de descomposición de HCH, que contienen entre 25 y 48 toneladas de dioxinas y furanos, que se han depositado en barriles cerrados.

La preocupación en torno al contenido de dioxinas de los residuos dio lugar a actividades de contención en 1984. Las pruebas de contaminación de las aguas subterráneas aparecidas en 1995 dieron lugar a nuevas actividades de rehabilitación consistentes en: la instalación de

una cubierta de múltiples capas en el vertedero; un sistema periférico de recogida de lixiviados con una planta de purificación en múltiples fases; un sistema de extracción de gases del vertedero; y la rehabilitación de las aguas subterráneas contaminadas con sistemas de bombeo y tratamiento. Anualmente se bombean y se tratan alrededor de 65 000 m<sup>3</sup> de aguas subterráneas. La modelización por ordenador indica que será necesario bombear aguas subterráneas en el límite sur del vertedero durante un largo período de tiempo. Asimismo, el sistema de cubierta del vertedero y todas las demás estructuras diseñadas requerirán intensas medidas de mantenimiento. Se prevé que el sistema de contención tendrá que renovarse en aproximadamente cien años (Götz et al., 2013).

**Cuadro 9. Producción de residuos de HCH (toneladas) en Alemania**

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Magdeburgo (Fahlberg List): 5 645 toneladas de lindano de 1967 a 1981	76 000 toneladas	n.d.
Karls-Marx Stadt (VEB Fettchemie): 30 985 toneladas de HCH de 1967 a 1977	n.d.	n.d.
Berlin-Adlershof (VEB Berlin Chemie): 14 617 toneladas de HCH y 1 245 toneladas de lindano entre 1949 y 1961.	Durante el período entre 1951 y 1972, la empresa produjo 28 452 toneladas de residuos sólidos de HCH y 78 677 toneladas de aguas residuales que contenían HCH.	n.d.
Bitterfeld-Wolfen (Bitterfeld CKB) 93 000 toneladas de HCH entre 1959 y 1982. La producción de lindano <i>in situ</i> ascendió a 5 410 toneladas entre 1967 y 1982.	Se vertieron 60 000 toneladas de residuos de HCH en la mina «Antoine» y también se enterraron cantidades desconocidas de residuos en un lugar a 2 km de la mina	La contaminación por HCH cubre una superficie de 40 km <sup>2</sup> y, por lo tanto, la escala es regional
Gernsheim y Darmstadt (Merck): 1954 – 1972	Se enviaron 25 000 toneladas de residuos a incineradoras externas para ser eliminados (sin embargo, en Darmstadt parece haber almacenado HCH encapsulado. Por lo tanto, las cantidades podrían ser mucho mayores)	La renovación del lugar terminó en 2014. Los datos analíticos de agua, lodo y materia suspendida de las inmediaciones de Darmstadt revelaron en 2004 la presencia de elevados niveles de isómeros de HCH, hasta 4 124 µg/kg, en lodos de la planta de tratamiento de residuos de Merck Darmstadt

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Hamburgo–Moorfleet (Cela-Merck): 1951- 1984	16 000 toneladas	Se aplicó una estrategia de demolición y renovación escalonada. La mayor parte de la contaminación sigue estando en el subsuelo
Ludwigshafen(BASF)	n.d.	En el lugar sigue habiendo 780 000 m <sup>3</sup> de residuos industriales, incluidos residuos de la producción de HCH. El suelo se ha sellado. Se están construyendo instalaciones de contención, vigilancia y tratamiento de aguas subterráneas.
Vertedero Georgswerder	5 780 toneladas de residuos de producción de HCH de la fábrica Cela-Merck en Hamburgo-Moorfleet y 1 750 toneladas de residuos de descomposición de HCH, que contienen entre 25 y 48 toneladas de dioxinas y furanos, se han depositado en barriles cerrados.	Sistemas de contención, rehabilitación y vigilancia y actividades en marcha.

**n.d - no hay datos disponibles**

## 2.8. Hungría

Según la información proporcionada por la Oficina Nacional de Seguridad Alimentaria (Pethö, comunicación personal. Véanse las referencias), tres plantas químicas produjeron lindano en Hungría:

- Nitrokémia Ipartelepek (Balatonfűzfő) es una empresa pública que produjo lindano entre 1962 y 1975. En 2006, el perfil de la empresa cambió del sector químico a la protección medioambiental. Los expertos consultados indican que el lugar no se ha limpiado y puede estar considerablemente contaminado por lindano.
- La empresa Budapest Vegyi Művek produjo lindano entre 1966 y 1992 (Simon, comunicación personal) en su fábrica situada en Budapest central. Los residuos se depositaron en el lugar y también en otros emplazamientos, como Garé, al sur de Budapest. Cerca de 2 500 toneladas de materiales extremadamente peligrosos se almacenaron en terribles condiciones (Greenpeace, 2016). Los barriles químicos que quedaban en la fábrica se retiraron en 2015, aunque no se han llevado a cabo actividades de limpieza. Los controles aleatorios realizados *in situ* mostraron concentraciones de DDT 500 veces superiores a los límites húngaros y niveles de benceno y clorobenceno en las aguas subterráneas alrededor de 300 000 veces superiores a lo que permiten los límites de la UE.

En cuanto a las plantas químicas citadas, el uso de lindano fue de aproximadamente 180 toneladas (no en ingredientes activos, sino vendido en productos fitosanitarios formulados), lo que representa el 7,5% del uso total de plaguicidas. La mayor parte de los residuos de plaguicidas se trataron mediante incineración en incineradoras de residuos peligrosos, independientemente del contenido en COP (Simon, comunicación personal).

- Una tercera empresa, la Empresa Petroquímica de Csepel y Komárom (Csepeli és Komáromi Kőolajipari Vállalat) puede haber formulado plaguicidas que contenían lindano (Pethö, comunicación personal. Véanse las referencias).

No hay información sobre los valores de concentración de lindano, aunque los tres lugares pueden estar considerablemente contaminados (Simon, comunicación personal).

**Cuadro 10. Producción de residuos de HCH (toneladas) en Hungría**

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Balatonfűzfő, Veszprém (Nitrokémia Ipartelepek): 1962-1975	n.d	No se han llevado a cabo actividades de limpieza
Budapest (Budapesti Vegyi Művek): 1961-1978	n.d	No se han llevado a cabo actividades de limpieza. Los barriles con residuos fueron retirados de la zona. El suelo del lugar de producción y otros vertederos situados en Hidas y Garé siguen estando fuertemente contaminados

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Csepeli és Komáromi Kőolajipari Vállalat (Empresa Petroquímica de Csepel y Komárom)	n.d	n.d

n.d - no hay datos disponibles

## 2.9. Italia

### Colleferro

La empresa Società di Navigazione Italo Americana Bombardi Pavodi Delfino (SNIA BPD) ubicada en Colleferro, una población de la ciudad metropolitana de Roma en la región del Lacio en Italia central, fue el único fabricante de lindano en Italia. Los residuos de la producción de HCH se enterraron en el lugar, contaminando acuíferos superficiales, mientras que un canal que abastecía a la planta industrial propagó la contaminación al río Sacco. También se depositaron residuos en varios lugares en las inmediaciones de la fábrica (Arpa 1 y Arpa 2), contaminando suelos y aguas subterráneas. Se encontraron concentraciones de HCH de hasta un 51 % en peso seco en suelos donde se vertieron residuos de HCH.

Las muestras de sedimentos y suelos agrícolas cercanos a las orillas del río Sacco en una longitud lineal total de 72 km río abajo desde la confluencia de Fosso Cupo están contaminadas por alfa, beta y gamma-HCH por encima de 0,01 mg/kg, que es el límite italiano establecido para jardines públicos. Las muestras extraídas de varios pozos y canales dentro de la zona industrial, incluido Fosso Cupo, han revelado niveles muy altos de isómeros de HCH (max. 50 087 mg/kg; valor medio 2 368 mg/kg, mediana 1,7 mg/kg) (Fuscoletti et al., 2015).

En 2005, un análisis de muestras de leche evidenció concentraciones de beta-HCH casi 20 veces superiores al nivel permitido por ley, lo que pone de relieve la contaminación de la cadena alimentaria. Se estableció un programa de vigilancia de la leche y la carne producidas en la zona y se realizó un estudio epidemiológico de la población en riesgo de las tres ciudades más cercanas al emplazamiento industrial infractor (Colleferro, Gavignano, Signs) (Ruzzenenti, 2013).

El Ufficio Commissariale lleva a cabo actividades de rehabilitación y reclamación desde 2005. Entre ellas se incluyen: la restauración del canal Fosso Cupo y la retirada de 60 toneladas de sedimentos contaminados de él; el tratamiento del agua de lluvia que recoge; el almacenamiento permanente en un lugar seguro de 58 000 m<sup>3</sup> de suelo contaminado; el sellado *in situ* de cerca de 3 500 m<sup>3</sup> de suelo muy contaminado por HCH; la construcción de una barrera hidráulica para recoger las aguas contaminadas río abajo de los lugares Arpa 1 y Arpa 2; un sistema de drenaje más profundo para recoger las aguas contaminadas de los acuíferos a profundidad media; y la construcción de una planta de tratamiento del agua recogida por esta red. Antes de introducirse en la red de distribución, el agua potable de los pozos localizados en la zona industrial se trata con carbón activo. Las actividades de vigilancia y rehabilitación en la zona siguen en marcha (Fuscoletti et al., 2015).

**Cuadro 11. Producción de residuos de HCH (toneladas) en Italia**

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Colleferro, Lacio, Roma (Società di Navigazione Italo Americana Bombardi Pavodi Delfino, SNIA BPD):	58 000 m <sup>3</sup> de suelo contaminado se han trasladado a un lugar seguro. 3 500 m <sup>3</sup> de suelo muy contaminado permanecen <i>in situ</i> .	Actividades de vigilancia y rehabilitación en marcha. Agua potable tratada con carbón activo antes de introducirse en la red de distribución. Estudio epidemiológico de la población en riesgo de las tres ciudades más cercanas al emplazamiento industrial infractor (Colleferro, Gavignano, Signs).

## 2.10. Letonia

Según la información proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente, en Letonia nunca se ha producido ninguno de los COP actuales, incluido el lindano (Ozola, comunicación personal. Véanse las referencias).

Desde 1999 está prohibido el uso del lindano. Sin embargo, la información facilitada en el Programa Nacional de Acción sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes 2005-2020 muestra que en el período entre 1995 y 1999 se importaron 49 toneladas de lindano. El lindano se utilizó como insecticida de exposición compleja para luchar contra insectos, por ejemplo en monte bajo, huertos no productores y cereales.

No se tiene conocimiento de ningún vertido o lugar contaminado. La mayoría de las existencias y almacenes de COP se han eliminado con programas nacionales y apoyados por la UE (Vijgen, comunicación personal).

## 2.11. Polonia

Se han señalado varios lugares de producción:

### Jaworzno, Silesia

La empresa Organika–Azot Chemical Plant localizada en Jaworzno, Silesia, ha sido el único fabricante de lindano en Polonia. Entre 1956 y 1982 produjo entre 3 900 y 4 450 t/año de lindano y 35 000 toneladas de HCH (Vijgen, 2006; Stobiecki, 2013).

Hasta 1967, los residuos probablemente se depositaban en la planta y sus alrededores. En 1967 comenzó a depositar sus residuos, incluidas 10 000 toneladas de isómeros de HCH, en el vertedero Rudna Góra ubicado también en Jaworzno, en la cuenca del río Vístula. El vertedero ocupa una superficie de 20 hectáreas y almacena más de 160 000 toneladas de residuos, de las cuales 88 000 son residuos peligrosos. Este vertedero se ha incluido en la lista de puntos críticos elaborada en el marco del Convenio de Helsinki sobre la protección del mar Báltico (Stobiecki, 2011).

La vigilancia de las aguas subterráneas del vertedero ha detectado hasta 300 µg/l de plaguicidas, y también se han detectado hasta 100 µg/l de plaguicidas en el arroyo de Wawolnica y en las zanjas que rodean al vertedero (Stobiecki, 2013).

En 2001 dejaron de almacenarse residuos en el lugar. La empresa y el municipio han tomado algunas medidas prácticas para frenar la propagación de contaminantes del vertedero, entre ellas: la construcción de una red de zanjas de drenaje alrededor del lugar; la construcción de una estación de bombeo de lixiviados; y la colocación de una cubierta temporal sobre la mayor parte del vertedero utilizando material inerte. En 2003-2004, la planta modernizó su tecnología de tratamiento de aguas residuales y su estación de tratamiento para eliminar los contaminantes de plaguicidas a través de un lecho de carbón activo. En 2009 se modernizó la estación de bombeo existente y todos los lixiviados interceptados desde el vertedero fueron tratados y cumplen ahora las normas aplicables. El Instituto Central de Minería de Katowice, la ciudad de Jaworzno y Organika-Azot Chemical Plant desarrollaron en 2011 un proyecto internacional de investigación llamado FOKS (IETU News, 2012) para determinar y seleccionar la mejor tecnología para frenar las emisiones de contaminantes del vertedero.

**Cuadro 12. Producción de residuos de HCH (toneladas) en Polonia**

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Jaworzno, Silesia (Organika-Azot Chemical Plant): 1956- 1982	35 000 toneladas  Teniendo en cuenta la mezcla de suelo y residuos, esta cantidad aumenta a 140 000 toneladas	n.d.
Jaworzno (vertedero Rudna Góra)	Más de 160 000 toneladas de residuos, de las cuales 88 000 son residuos peligrosos (todos mezclados)  Más de 17 000 toneladas de residuos de producción de lindano	Red de zanjas de drenaje alrededor del lugar y estación de bombeo de lixiviados  No hay propuestas de vigilancia y rehabilitación

n.d - no hay datos disponibles

## 2.12. Rumanía

Según la información proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente, dos empresas produjeron lindano en Rumanía (Paun, comunicación personal. Véanse las referencias):

- SC Oltchim SA – produjo lindano entre 1969 y 2006; la historia de la empresa puede encontrarse en el siguiente enlace: <http://www.oltchim.ro/en/index.php?name=about-us/history> y
- Turda Chemical Plants (U.C.T.) – produjo lindano durante el período entre 1954 y 1983; la actividad de la planta cesó en 1998.

Sin embargo, un informe sobre el país de 2005 indica que Rumanía produjo 6 431 t/año de HCH en 1989. En 2001 se redujo a 555 toneladas. En total, se calcula que Rumanía produjo 250 000 toneladas de residuos de HCH (Vijgen, 2006). Además, un informe del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Rumanía (2008) también indica que el país

produjo 90 000 kg de lindano en 2005 y 12 000 kg en 2006. En 2005 y 2006 se exportaron a España 7 800 kg y 12 000 kg de lindano respectivamente.

Según el inventario, no hay existencias de lindano a nivel nacional. La última fecha en que se identificó una reserva de lindano fue 2010, en concreto 563 kg de Lindatox (que contiene un 20 % de lindano), conservado por un operador económico en un almacén de productos fitosanitarios. Tras una inspección realizada por la Guardia Medioambiental Nacional y las autoridades locales, el propietario de la reserva la eliminó a través de una empresa especializada en mayo de 2010 (Ministerio de Medio Ambiente y Bosques de Rumanía, 2010). Otra fuente afirmó que se estaba comerciando ilegalmente HCH obsoleto como plaguicida (Mogos, 2016).

En un inventario preliminar se identificaron siete lugares potencialmente contaminados por HCH. Tres de estos lugares se sitúan en SC Olchim SA y los otros cuatro en el emplazamiento de la empresa conocida como Turda Chemical Plants (Paun, comunicación personal. Véanse las referencias).

Los residuos de la producción de HCH de la antigua UCT Turda Chemical Plants se almacenaron entre 1954 y 1983 en cuatro asentamientos no controlados en la zona de Turda, incluida Poșta Rât (Violeta, 2010). Poșta Rât se sitúa en la orilla izquierda del río Arieș en el territorio no incorporado del municipio de Turda, que ocupa una superficie de aproximadamente 10 ha. Los estudios realizados en Poșta Rât han revelado que la cantidad total estimada de residuos depositados a lo largo del tiempo asciende a 10 000 m<sup>3</sup>, el equivalente a 18 500 toneladas de sustancias tóxicas. Se está ejecutando un proyecto de rehabilitación del lugar, financiado a través del Programa Operativo Sectorial Medioambiental<sup>4</sup>.

### Cuadro 13. Producción de residuos de HCH (toneladas) en Rumanía

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Ramnicu Valcea, Oltenia (SC Olchim SA): 1969-2006	Rumanía produjo 250 000 toneladas de residuos de HCH.	La planta sigue en funcionamiento. 3 lugares de depósito sin control en la zona de SC Olchim SA.
Turda, Cluj (Turda Chemical Plants (U.C.T.): 1954-1983	Rumanía produjo 250 000 toneladas de residuos de HCH.	4 asentamientos descontrolados en Poșta Rât en la zona de Turda, que ocupa una superficie de aproximadamente 10 ha, el equivalente a 18 500 toneladas de sustancias tóxicas. Se está llevando a cabo un proyecto de rehabilitación.

## 2.13. Eslovaquia

Juraj Dimitrov Chemical Enterprises (CHZJD), situada en Bratislava, fue el único productor de lindano en Eslovaquia. Entre 1956 y 1966, esta fábrica produjo más de 13 000 toneladas

<sup>4</sup> Los detalles del proyecto pueden encontrarse en el siguiente enlace: <http://postaratturda.ro/?lang=en>

de lindano. Varios autores informan de grandes existencias de residuos de HCH (alrededor de 90 000 m<sup>3</sup>) y cantidades considerables de aguas subterráneas contaminadas (millones de m<sup>3</sup>) (Vijgen, 2016).

Los residuos químicos de la empresa se depositaron en el vertedero Vrakuna en la ciudad de Bratislava en parte del cauce del río Malý Dunaj. El vertedero tiene forma de media luna y ocupa una superficie de 46 500 m<sup>2</sup>. Se calcula que el volumen de los residuos es de 90 000 m<sup>3</sup>. En 1989 se cubrió con un material inerte. Después de que empezase a funcionar una central hidroeléctrica en Gabčíkovo en 1989, el nivel de aguas subterráneas aumentó, llegando a los residuos químicos y contaminando las aguas subterráneas locales. Como consecuencia, no se han utilizado los pozos locales desde entonces. En febrero de 2016, el Ministerio de Medio Ambiente anunció la aprobación de un presupuesto para encapsular el vertedero (Machlica, 2015; Slovak Spectator, 2016).

#### Cuadro 14. Producción de residuos de HCH (toneladas) en Eslovaquia

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Bratislava (Juraj Dimitrov)(CHZJD): 1956-1966	90 000 m <sup>3</sup>	n.d.
Vertedero Vrakuna (distrito de Bratislava)	n.d.	Los residuos permanecen en el lugar. Se han realizado estudios de ingeniería, hidrogeológicos y geológicos. El Ministerio de Medio Ambiente ha aprobado un presupuesto para la encapsulación.

n.d - no hay datos disponibles

### 2.14. España

Según la información proporcionada por la autoridad medioambiental española (García, comunicación personal. Véanse las referencias), se ha producido lindano en los siguientes lugares:

#### País Vasco (Barakaldo, Bizkaia)

Según la información proporcionada por la autoridad medioambiental vasca (Betanzos, comunicación personal. Véanse las referencias), dos empresas produjeron lindano en el País Vasco entre 1947 y 1987:

- Nexana Celamerck, situada en Asua-Erandio, que produjo lindano entre 1952 y 1982. Se calcula que generó alrededor de 7 000 toneladas de residuos de HCH.
- Bilbao Chemicals, situada en Ansio-Barakaldo, que produjo lindano entre 1947 y 1987. Esta planta generó alrededor de 75 000 toneladas de residuos de HCH.

Ambas empresas pertenecían a Merk y Boehringer (del Moral, 2012). Se calcula que, en conjunto, estas empresas generaron un total de 82 000 toneladas de residuos. Entre ellos se incluyen 5 000 toneladas de isómeros de residuos puros y 77 000 toneladas de residuos

mixtos que se vertieron en al menos 36 puntos diferentes, dando lugar a la contaminación de al menos 410 ha de terrenos y 450 000 m<sup>3</sup> de suelo. Las autoridades calculan que se han diseminado entre 500 000 y 1 millón de toneladas de residuos contaminados por HCH en esta región. Muchos de los antiguos lugares de vertido pertenecen actualmente a la zona urbana de Barakaldo y sus alrededores.

Como consecuencia de la producción del plaguicida lindano en la Comunidad Autónoma Vasca y la gestión inadecuada de los residuos generados por esta actividad, durante las últimas décadas del siglo XX han quedado contaminados en gran medida varios lugares del País Vasco que representan una clara amenaza para la salud pública y el medio ambiente y suponen también un freno que impidió el desarrollo de las zonas donde se situaban. En los años 90 se procedió a la identificación de potenciales lugares contaminados por residuos de HCH en la zona de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Esta tarea se centró en a) los terrenos donde operaban las dos empresas productoras y b) los lugares donde se sospecha que se vertieron sin control residuos de HCH. De esta forma, se identificaron cuarenta lugares.

Debido a las características de los suelos contaminados por residuos de HCH, y tras analizar alternativas, la mejor solución encontrada para su gestión fue excavar el suelo y depositarlo en una infraestructura de seguridad construida para tal fin. Así, los suelos contaminados de los cuarenta lugares que se habían identificado previamente se confinaron en dos depósitos de seguridad: la celda de seguridad Loiu construida en este municipio y la celda de seguridad Argalarío construida en el municipio de Barakaldo. En 1993, el Gobierno del País Vasco construyó un almacén para residuos de lindano puro y varios depósitos temporales para suelos contaminados por HCH. El Gobierno también construyó dos vertederos, Argalarío (depósito de seguridad) y Loiu, entre 1996 y 2002 para el almacenamiento de residuos y suelos contaminados extraídos de veintisiete lugares contaminados. Durante esos años se llevó a cabo un proceso de limpieza del suelo. El depósito de Argalarío almacena 340 000 m<sup>3</sup> y el vertedero de Loiu almacena 113 718 m<sup>3</sup> de residuos y suelo contaminado. Estos almacenes siguen siendo vigilados y sus lixiviados tratados (Escolar, 2015; Vijgen, 2006).

Esta última infraestructura se sometió durante y después de su construcción a intensos controles medioambientales y de seguridad. Este método y, especialmente la información facilitada a los ciudadanos, se mencionan en la sección 4. como ejemplo de mejor práctica.

Los residuos puros de HCH abandonados en las instalaciones de las plantas de producción se trataron mediante el proceso de descomposición catalizada por bases, una tecnología química que estaba desarrollando la USEPA (véase la sección 3.3.1 para consultar información adicional). Su tratamiento se llevó a cabo en una planta construida a tal efecto en el terreno en el que desarrolló su negocio Bilbao Chemicals, una de las actividades que generaron estos residuos. Esta planta de tratamiento de residuos puros, que funcionó de 1999 a 2001, trató 3 211 toneladas de residuos y generó 500 toneladas de desechos.

En cuanto a la contaminación del agua, en los últimos años se han determinado las siguientes condiciones para las masas de agua del País Vasco:

- Embalse de Oiola (Bizkaia). En julio de 2008 se detectaron niveles anómalos de HCH, entre 13 y 154 ng/l (Ekologistan Martxan, 2016), en el embalse de Oiola (Bizkaia), que abastece de agua potable a 100 000 habitantes. Se cerró inmediatamente hasta que pudiese garantizarse la calidad del agua con una seguridad máxima de saneamiento para la población. A través de una comisión interinstitucional se llevaron

a cabo distintos estudios para determinar el origen de la contaminación y eliminar los focos correspondientes.

En la actualidad, el embalse se somete a controles periódicos de calidad del agua y los sedimentos.

- Aguas de transición del Nervión (Bizkaia). El Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental determina la existencia de un mal estado químico en dos masas de aguas de transición (Nervión interior y Nervión exterior) y en distintos tramos de sus afluentes, con rebasamientos locales de las nuevas normas de calidad establecidas para el HCH (20 ng/l). Este mal estado no se evaluó de la misma forma en el pasado, puesto que las anteriores normas de calidad eran menos exigentes (100 ng/l). En estas masas de agua, el Plan Hidrológico propone la elaboración de un plan de acción para lograr un buen estado químico, así como una prórroga del cumplimiento objetivo hasta 2027.
- Río Zadorra (Álava). Durante los controles del agua realizados en 2013 y 2014 se detectaron niveles de HCH en el punto de control Vitoria-Trespuentes. Siete de las veintitrés muestras superaban la concentración máxima admisible en el agua, con niveles entre 0,049 y 0,139 µg/l. En febrero de 2015, la Confederación Hidrográfica del Ebro informó a la Agencia Vasca del Agua (URA) de la existencia de concentraciones de HCH que superaban la normas de calidad ambiental en la estación 0179-FQ (Zadorra / Vitoria-Trespuentes). Durante 2015, cuando se superó cuatro veces la concentración máxima admisible de HCH, la Agencia Vasca del Agua concluyó que los isómeros de HCH provenían del vertedero Gardelegi, cuyos lixiviados están conectados con la estación Crispijana. Además, se descubrió que estos contaminantes no se detectaban en las muestras del río cuando el caudal superaba los 1 000 litros por segundo, lo que indicaba que la lixiviación de lindano es un proceso continuo, pero que con caudales altos el lindano no se detecta.

Como consecuencia de esta situación, la URA realizó un control para determinar el origen de los residuos municipales sólidos en el vertedero municipal. En este contexto, se ha emplazado al propietario de la infraestructura a presentar un plan de acción para corregir esta situación, que se está elaborando en este momento. Esta cuestión suscita especial preocupación, puesto que la presencia de lindano en el río se asocia a los lixiviados de un vertedero municipal, en vez de al vertido ilegal habitual.

En el País Vasco se han gastado 50 millones EUR en lugares donde se vertieron 82 000 toneladas. De esta cantidad, 8,4 millones EUR se gastaron en el tratamiento de 3 500 toneladas utilizando el proceso de descomposición catalizada por bases. El resto se gastó en dos vertederos seguros para residuos peligrosos. Esto apunta a un coste de entre (al menos) 0,53 EUR (vertedero: 41,6 millones EUR para 78 500 toneladas) y 2,40 EUR (descomposición catalizada por bases) por kilogramo de HCH (Osterhuis y Browver, 2015).

#### Galicia (O Porriño, Pontevedra)

Entre 1947 y 1964, la empresa farmacéutica Zeltia produjo lindano junto con otros plaguicidas, incluido DDT, en su fábrica de O Porriño, en la región de Galicia. La empresa continuó formulando productos con lindano durante algunos años. Hasta 1964 se vertieron 1 000 toneladas de residuos de la producción de lindano principalmente en la zona industrial de Torneiros en el municipio de Porriño (Pontevedra). Posteriormente, el municipio utilizó la zona como vertedero para residuos de construcción. En 1975 se construyeron viviendas sociales en este lugar y en 1990 se construyó un carril bici. Los residuos se dispersaron a lo

largo de los años debido a las obras de nivelado de la zona asociadas a la construcción de una carretera y a la construcción urbanística (El Atlántico, 2012).

Los residuos generados en la planta de producción también se vertieron en otros lugares de la región y se reutilizaron como material de edificación, reparación y construcción de carreteras y como insecticida. Estas actividades dieron lugar a la contaminación por HCH de varias zonas secundarias. Un estudio del área realizado en 1999 reveló varias zonas con altas concentraciones de isómeros de HCH en suelos, aguas subterráneas y pozos utilizados para obtener agua potable. Se detectaron niveles de hasta 1 000 mg/kg en suelos. Los vecinos que vivían en algunas de las viviendas sociales construidas sobre el vertedero fueron realojados en 2010 (Faro de Vigo, 2010); sin embargo, todavía en 2012, varios vecinos de otros edificios exigían ser realojados fuera de la zona contaminada (El Atlántico, 2012).

Los suelos en O Porriño (zona de Torneiros) donde había empresas dedicadas a la producción de lindano se incluyen en el Plan para Suelos Contaminados y el Programa de Operaciones de la Xunta de Galicia. Los primeros análisis (1998) revelaron unos valores de contaminantes superiores a los objetivos de calidad, lo que hizo que estos suelos se declarasen contaminados de conformidad con distintas normativas de la Xunta de Galicia. En esta zona hay ahora varias instalaciones que están sujetas a autorizaciones medioambientales. Entre ellas se incluyen Syngenta Agro y Astra Zéneca Farmacéutica, que tienen redes piezométricas que muestran elevados niveles de lindano en las aguas.

Entre las medidas más urgentes que tomaron las autoridades regionales de Galicia en Torneiros se incluían: a) el vallado de 3,2 ha de suelo con una concentración mínima de 2 ppm de HCH; b) el cierre de los pozos en la zona; c) la restricción del uso agrícola del suelo; d) la encapsulación de la principal fuente de contaminación con paneles verticales de bentonita-cemento de 30 m de profundidad máxima (para incrustarlos en la roca granítica); y e) la excavación y el depósito de suelos con concentraciones de HCH superiores a 5 ppm en vertederos de residuos peligrosos.

Las zonas con concentraciones de isómeros de HCH entre 2 y 5 ppm se cubrieron con sellantes.

En cuanto a la gestión de los terrenos públicos contaminados fuera del volumen encapsulado, la biodegradación *in situ* se ha considerado la mejor técnica. El gobierno autonómico gallego está respaldando la investigación de estas técnicas en cooperación con distintos grupos de investigación. La superficie total contaminada cubre 1 km<sup>2</sup> y se han encapsulado 150 000 m<sup>3</sup> de suelo contaminado (Crespo, 2001; Varela-Castejón y Lozano, 2008; Rodríguez, 2009). Las redes piezométricas de empresas instaladas en el lugar muestran actualmente elevados niveles de lindano en las aguas subterráneas (García, comunicación personal. Véanse las referencias).

### Aragón (Sabiñánigo, Huesca)

Desde 1975 hasta 1988, la empresa Inquinosa estuvo produciendo lindano en su fábrica ubicada en la ciudad de Sabiñánigo, en la provincia de Aragón a las orillas del río Gállego (afluente del río Ebro). Continuó formulando lindano hasta 1992. Se calcula que la empresa produjo 6 800 t/año de residuos sólidos y entre 300 y 1 500 t/año de residuos líquidos, es decir, entre 115 000 y 160 000 toneladas de residuos de HCH.

Los residuos de HCH se depositaron principalmente en dos vertederos sin recubrimiento localizados en Sardas y Bailín, en los alrededores de Sabiñánigo:

- Entre 1975 y 1983, los residuos de HCH se llevaron al vertedero de Sardas. Las autoridades medioambientales españolas (García, comunicación personal) calcularon que actualmente contiene 60 000 m<sup>3</sup> de residuos sólidos de HCH, alrededor de 30 m<sup>3</sup> de líquido denso en fase no acuosa y otros 350 000 m<sup>3</sup> de residuos municipales e industriales peligrosos. En 1992 se procedió a una impermeabilización superficial.
- Entre 1984 y 1989, los residuos de HCH se transportaron al vertedero de Bailín. En 1994 también se procedió a la impermeabilización superficial de este vertedero, que fue ineficaz. En 2014, para evitar la lixiviación de contaminantes y la contaminación del río Gállego, las autoridades regionales de Aragón transportaron los residuos del vertedero de Bailín a una nueva celda de seguridad en el mismo barranco, que contenía un revestimiento superior e inferior y tratamiento de lixiviados. En esta nueva celda de seguridad hay 65 000 toneladas de residuos sólidos de HCH y 342 000 toneladas de suelo contaminado (García, comunicación personal). En el antiguo vertedero, se calcula que hay 25 m<sup>3</sup> de residuos líquidos en el subsuelo (Fernández et al., 2013; Calleja, comunicación personal).

Estos dos vertederos, así como el lugar de producción, son importantes fuentes potenciales de contaminación por isómeros de HCH y otras sustancias tóxicas (otros COP, metales pesados, etc.). Se han detectado altos niveles de dioxinas (2 633 ng/k) en los residuos de HCH depositados en Bailín (Ecologistas en Acción, comunicación personal). En el lugar sigue habiendo otras sustancias químicas y 90 000 m<sup>3</sup> de suelo contaminado, que todavía no se han desmantelado. Al año se bombean alrededor de 1,2 m<sup>3</sup> y 0,8 m<sup>3</sup> de líquido denso en fase no acuosa de Sardas y del antiguo vertedero de Bailín respectivamente. Estos residuos se transportan a Francia para ser incinerados.

La presa en el río Gállego está totalmente obstruida excepto 1 m por encima de la misma. La presa del embalse de Sabiñánigo recibió emisiones directas de la fábrica durante su período de actividad. Los sedimentos del río presentan altas concentraciones de isómeros de HCH, otros químicos organoclorados, metales pesados, PAH y otras sustancias tóxicas (CHE, 2010). Antes de que se instalasen las tres plantas de tratamiento de aguas residuales con carbono activo, se calcula que el río Gállego recibió 140 kg/año de HCH de ambos vertederos por la entrada de aguas superficiales (Fernández et al., 2013). Existe un procedimiento de vigilancia del río Gállego llevada a cabo por las autoridades locales (Protección Civil) para coordinar a las administraciones involucradas en la purificación y potabilización del agua del río Gállego, aguas abajo de los lugares. Veinte personas trabajan en la contención de esta contaminación.

Entre 1992 y 2015 se invirtieron 54 millones EUR en contener la contaminación, de los cuales el 9 % procedían de la UE, el 21 % del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España y el 70 % del Gobierno de Aragón.

El traslado de residuos del antiguo vertedero de Bailín a la nueva celda de seguridad produjo contaminación del suelo y generó un pico de HCH en el agua del río Gállego, que dio lugar a un corte del suministro de agua potable a 6 000 habitantes de la zona durante unos 30 días.

Todo esto significa que 50 ha de tierra y tres acuíferos están contaminados y se encuentran probablemente en un estado similar al lecho del río Gállego y sus embalses. Se calcula que la limpieza y rehabilitación completas durarán al menos 25 años y costarán 550 millones EUR (Ortega, 2016; Martínez, 2016). En cuanto a las ruinas de la planta de Inquinosa, como paso preliminar a su demolición, está previsto cartografiar la estructura de la planta y los suelos en la zona aledaña. Suman un total de 31 000 m<sup>2</sup>. El volumen global de residuos supera las

130 000 toneladas de residuos sólidos de HCH, 6 000 toneladas de residuos líquidos (líquido denso en fase no acuosa) y alrededor de 1 millón de toneladas de tierra contaminada.

En cuanto a la restauración del lugar contaminado, el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón está probando actualmente la descontaminación de las aguas subterráneas mediante oxidación química en el marco de un proyecto de demostración Life Plus de la UE llamado DISCOVERED LIFE 2012 (GA, 2016a). Véase la sección 3.3.12 para consultar más información sobre el método y el proyecto.

#### Castilla y León (Borobia, Soria)

En 1988 se vertieron 70 toneladas de residuos de HCH de la fábrica de lindano de Barakaldo en una mina abandonada en el municipio de Borobia, en la provincia de Soria. Las quejas de los vecinos obligaron a la empresa a recoger los residuos. En 2013, un análisis del agua de la entrada a la mina realizado por las autoridades de aguas revelaron concentraciones de beta-HCH de 0,025 µg/l en 2013 y 0,017 µg/l en 2015 (ASDEN, 2015). Otras muestras de agua recogidas y analizadas por la CHE indicaron valores por debajo del límite de detección (<0,015 µg/l) (ASDEN, comunicación personal). Este límite de detección es ligeramente superior al valor exploratorio establecido para el lindano en muestras de aguas subterráneas (0,01 µg/l) con arreglo a la legislación española, que se utiliza para justificar la necesidad de nuevos estudios a fin de confirmar si un suelo puede considerarse contaminado (Real Decreto de 2005).

Las autoridades medioambientales confirman esta situación:

- Un informe de la Confederación Hidrográfica del Ebro de 16 de noviembre de 2015 indica que se han detectado restos de beta-HCH, aunque en concentraciones inferiores a las establecidas en la Directiva 2006/118/CE.
- Un informe del Servicio de Prevención Ambiental y Cambio Climático de 16 de mayo de 2016 indica que se han detectado beta-HCH y alfa-HCH en concentraciones superiores a los niveles genéricos de referencia establecidos en el Real Decreto 9/2005.

#### Castilla y León (Cabria, Palencia)

Hay otro caso de vertido ilegal de 360 toneladas de lindano en la ciudad de Cabria (Aguilar de Campoo, Palencia) en paralelo a los vertidos en la mina de Borobia. En mayo de 1988, las autoridades (incluido el gobierno autonómico) actuaron de forma diligente y adecuada descontaminando el lugar afectado por el derrame y abrieron los correspondientes procedimientos disciplinarios que concluyeron con una condena penal, que confirmó el Tribunal Supremo español (1993).

#### Navarra

Las empresas Inquinosa y Bilbao Chemicals también vertieron residuos de HCH en Navarra, una provincia entre el País Vasco y Aragón. Existen pruebas del vertido en los municipios de Viana y Iguzquiza (AV, 1990; AIguzquiza, 2016).

En 2016 se inició una investigación para evaluar la situación actual. Este examen no está motivado por ningún problema sanitario o medioambiental que requiera medidas urgentes. El objetivo es evaluar el estado actual de las zonas afectadas. Todavía no hay resultados disponibles.

**Cuadro 15. Producción de residuos de HCH (toneladas) en España**

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Porriño, Galicia (ZELTIA): 1947-1964	200 000 toneladas	1 fábrica (Inquinosa) pendiente de desmantelamiento y limpieza.
Sabiñánigo, Aragón (Inquinosa): 1975-1988		4 rellenos de seguridad que contienen residuos de HCH.
Barakaldo, País Vasco (Bilbao Chemicals): 1947-1987		1 vertedero sin control.
Erandio, País Vasco (Nexana Celamerck): 1947-1987		Lugares contaminados por HCH pendientes de descontaminación en Aragón, el País Vasco y Galicia.  Existen lugares contaminados pendientes de identificación en varias regiones, entre ellas Aragón, Castilla y León, Galicia, Navarra y el País Vasco.  Elevados niveles de isómeros de HCH en aguas superficiales y subterráneas de varias regiones.

## 2.15. Países Bajos

En los Países Bajos se produjo HCH técnico, sobre todo entre 1947 y 1952, en cinco lugares. Hay muy poca información disponible sobre las cantidades de HCH producido. A principios de la década de los 50, la producción cambió al lindano, lo que dio lugar a la producción de enormes cantidades de residuos de isómeros de HCH que se almacenaron en lugares de producción y también se mezclaron con materiales de construcción y se depositaron en cientos de lugares, entre ellos zonas agrícolas de todo el país. Uno de los fabricantes ubicado en Hengelo generó por sí solo más de 400 000 toneladas de suelos contaminados. Se han llevado a cabo actividades de rehabilitación en los lugares de producción y vertido (Langenhoff, 2001; Vijgen, 2006; Bouwknegt, 2016). Varios lugares se han aislado geohidrológicamente para reducir la contaminación de las aguas subterráneas. Se están vigilando, bombeando y tratando aguas subterráneas de distintos lugares. También están en marcha actividades de biorrehabilitación del suelo.

Osterhuis y Browver (2015) indicaron los costes de alrededor de 40 lugares en los Países Bajos donde se ha reparado la contaminación por HCH/lindano de suelos y aguas subterráneas.

### Twente (Overijssel)

La empresa Stork & Co. produjo HCH en la ciudad de Twente entre 1948 y 1952, depositando los residuos en un almacén abierto. La empresa fue vendida a Azko en 1954. En esa época se estaban almacenando al menos 5 500 toneladas de HCH en las instalaciones de la

empresa. En los años 50 y 60, una parte de los isómeros residuales restantes del almacén se recogieron ilegalmente y se mezclaron con suelo para fines de construcción y, por lo tanto, se vertieron en numerosos lugares de los alrededores, como Borne y Oldenzaal, a entre 10 y 20 km de distancia de la fuente. En 1975, debido a la indignación pública por la enorme cantidad de muertes de peces en un canal cercano al almacén de residuos, las autoridades pidieron a Azko que pagase la retirada de 4 000 toneladas de isómeros. Quinientas toneladas se vendieron a otra fábrica neerlandesa para reprocesado. Veintidós mil quinientos bidones se empaquetaron y se transportaron a una mina de sal al este de Alemania. En 1983, tras la entrada en vigor de la Ley Provisional sobre Limpieza del Suelo, se realizó un inventario de los lugares contaminados. De un total de 132 lugares sospechosos de estar contaminados, 42 se seleccionaron finalmente para limpieza y ulterior investigación. A finales de los años 80 se estableció un almacenamiento temporal en el lugar donde a lo largo de varios años se almacenaron alrededor de 200 000 toneladas de suelo contaminado excavado en las zonas contaminadas. Puesto que en esa época no había una tecnología adecuada para tratar el HCH, el Gobierno invitó a empresas a probar su tecnología para demostrar su viabilidad. Las 200 000 toneladas de suelo contaminado se trataron finalmente a principios de 2002. En 2006, otras 200 000 toneladas de suelo de zonas menos contaminadas seguían sin tratar (Grinwis, 1992; ICIS News, 2004; Vijgen, 2006).

Los costes totales de las medidas ejecutadas ascienden a alrededor de 27 millones EUR. Debido a que no está claro si se tratará la contaminación restante y cuándo, no puede concluirse cuáles serán los costes finales.

Se calcula que, de la cantidad original de 5 500 toneladas de residuos de HCH, 4 000 toneladas se transportaron al este de Alemania, lo que significa que una cantidad de alrededor de 1 500 toneladas que se diseminaron por la región ha creado un daño de cerca de 27 millones EUR. Resulta obvio que la retirada y la destrucción directa o incluso la encapsulación de estas 1 500 toneladas habría supuesto una fracción del dinero gastado hasta ahora en la limpieza de la región.

### Deveneter (Overijssel)

En una fábrica de plaguicidas situada en Deveneter se produjeron cantidades desconocidas de HCH entre 1946 y 1962. Los residuos de la producción se almacenaron temporalmente en edificios de la fábrica y en el lugar, y posiblemente parte de ellos también se enterraron *in situ*. El suelo se analizó por primera vez en 1985, revelando que este y las aguas subterráneas del lugar estaban contaminadas por elevados niveles de HCH y sus productos de descomposición (principalmente clorobenzenos). Se supone que se vertieron aguas residuales a través del sistema municipal de alcantarillado.

En 1990, las autoridades decidieron que el aislamiento geohidrológico del lugar era la mejor opción, junto con medidas de rehabilitación suplementarias, con el fin de posibilitar el desarrollo urbanístico. Se llevaron a cabo obras de demolición y se excavó y retiró una capa de 20 000 toneladas de suelo. Posteriormente se aplicó una capa aislante de un metro de suelo limpio y sellante de asfalto para prevenir una nueva propagación de la contaminación a través de las aguas subterráneas. Desde 1994 hay en funcionamiento un sistema de extracción de aguas subterráneas. Las aguas subterráneas contaminadas se trataron con una combinación de carbón activo biológico y granular. Fue el primer lugar de los Países Bajos donde, sobre la base de la evaluación de riesgos toxicológicos humanos con el modelo CSOIL, y con la autorización del Ministerio de Medio Ambiente, se permitió la reurbanización del lugar tras una limpieza parcial. La restauración del subsuelo mediante extracción por vapor del suelo sigue en marcha (Cobouw, 1994; Grinwis, 1992; Bouwknegt, 2016).

En 2006 se compiló una lista de alrededor de 290 lugares sospechosos de estar contaminados por HCH en la región de Overijssel (comunicado de prensa de VROM 20.02.04, citado en Vijgn (2006)). La provincia de Overijssel espera cumplir el objetivo de limpieza del suelo para 2030 (IHPA, 2016).

#### **Cuadro 16. Producción de residuos de HCH (toneladas) en los Países Bajos**

Ubicación (empresa): período	Producción de residuos de HCH	Situación actual
Lindano producido en cinco lugares entre 1947 y 1952.	Más de 400 000 toneladas de suelo contaminado.	Se están vigilando, bombeando y tratando aguas subterráneas de distintos lugares. También están en marcha actividades de biorrehabilitación del suelo.
Twente, Overijssel (Stork & Co): 1948-1952	5 500 toneladas de residuos de isómeros de HCH almacenadas <i>in situ</i> en los años 70; 400 000 toneladas de suelos contaminados excavados.	Desde 2002 se llevan a cabo actividades de rehabilitación.
Deveneter, Overijssel: 1946-1962	20 000 toneladas de suelo contaminado excavado.	Aislamiento geohidrológico y restauración del lugar. Vigilancia y tratamiento de aguas subterráneas en curso.
Dagra, Bunschoten, provincia de Utrecht 1984-1987?	Volumen excavado de alrededor de 11 000 m <sup>3</sup> . Muchos años de pluma en aguas subterráneas. Rehabilitación y posterior contención hidráulica.	

### **2.16. Reino Unido**

El Reino Unido, al igual de Francia, fue uno de los «países progenitores» del HCH. Se calcula que produjo 1 200 toneladas de lindano (Vijgen, 2006). No hay información disponible sobre los lugares de fabricación, producción o tratamiento de residuos. En el PNA más reciente para el Convenio de Estocolmo, el Reino Unido ha declarado que ha iniciado investigaciones históricas sobre la producción de lindano y los residuos de HCH (véase el cuadro sinóptico en la página web del Convenio de Estocolmo).

**Ilustración 2. Lugares de producción y contaminados identificados ( ) + países productores pero sin información sobre los lugares ( ? )**



### 3. OPCIONES DE CONFINAMIENTO, TRATAMIENTO Y DESCONTAMINACIÓN

#### PRINCIPALES CONCLUSIONES

- Se han desarrollado varios métodos para la rehabilitación de suelos y aguas subterráneas contaminados por lindano, HCH y residuos de HCH. Especialmente la gestión y el tratamiento de residuos de HCH son complejos, puesto que estos residuos contienen alrededor de un 70 % de cloro.
- Entre los métodos convencionales y más utilizados están: la excavación de suelos contaminados y su contención en rellenos sanitarios específicos; el confinamiento de aguas subterráneas o suelos contaminados para contenerlos en un lugar; métodos de bombeo y tratamiento para el agua subterránea e incineración.
- Los métodos de tratamiento físico separan los contaminantes de la matriz del suelo/agua utilizando las diferencias físicas entre la matriz y el contaminante. Los métodos de tratamiento químico destruyen, fijan o concentran los contaminantes utilizando reacciones químicas.
- Los métodos de tratamiento biológico entrañan el uso de microorganismos o vegetación que pueden destruir o transformar los contaminantes en sustancias químicas menos peligrosas, así como extraerlos y acumularlos.
- Muchos de los métodos de tratamiento físico-químico y biológico se han probado únicamente en experimentos de laboratorio o de lotes y, por lo tanto, se necesita mayor experiencia en campo.
- El reciclado del HCH (70 % de contenido en cloro) en HCl debería considerarse e investigarse más en profundidad, puesto que podría ser un negocio rentable para la industria, especialmente porque existen cantidades considerables de residuos de HCH a escala mundial. Sin embargo, debe tenerse especial cuidado de prevenir las potenciales emisiones de sustancias más peligrosas, por ejemplo dioxinas.

Debido al uso intensivo generalizado del lindano en el pasado y al depósito sin control de sus residuos de producción, puede encontrarse lindano y otros isómeros del HCH en muestras de aire, agua y suelo de todo el mundo. Desde los años 90 se ha prestado una gran atención a la limpieza de lugares medioambientales contaminados por esta sustancia química peligrosa.

Se han desarrollado varios métodos para gestionar y tratar los residuos y eliminar el lindano del suelo y el agua. Entre los métodos convencionales se incluyen: la excavación de suelos contaminados y su contención en rellenos sanitarios específicos; el confinamiento de aguas subterráneas o suelos contaminados para contenerlos en un lugar; o métodos de bombeo y tratamiento del agua subterránea. Estos métodos se han utilizado para rehabilitar numerosos lugares contaminados por lindano y HCH en Europa (véase el capítulo 2). Sin embargo, estos métodos son muy caros y el depósito de la sustancia en un vertedero y su confinamiento no destruyen o eliminan los contaminantes de la matriz edáfica. Por lo tanto, no se consideran métodos de rehabilitación definitiva sostenibles. Otro método tradicional es la combustión de los residuos contaminados. Sin embargo, suele ser caro y puede crear aún más compuestos tóxicos como dioxinas y furanos.

Los procedimientos basados en el tratamiento, que incluyen diferentes métodos físico-químicos y biológicos, destruyen, eliminan o transforman los contaminantes del material contaminado (por ejemplo, residuos, suelo o agua subterránea). Por lo tanto, se considera que estos métodos presentan mayor valor medioambiental añadido que los métodos más convencionales mencionados anteriormente.

Los tratamientos pueden clasificarse como procedimientos *ex situ* e *in situ*. Los procedimientos *ex situ* se aplican a suelos excavados o aguas subterráneas extraídas, mientras que los procedimientos *in situ* utilizan procesos que tienen lugar en suelos no excavados o aguas subterráneas no extraídas, que se mantienen relativamente inalterados. En la rehabilitación *ex situ* pueden controlarse las condiciones para hacer más eficiente el proceso, pero todo el proceso es a menudo muy costoso. La rehabilitación *in situ* cuesta menos, pero la aplicación del tratamiento al lugar contaminado es difícil y el control de las condiciones favorables y los posibles efectos colaterales perjudiciales (por ejemplo, formación y liberación al medio ambiente de otras sustancias químicas peligrosas) puede resultar más complicado.

Este capítulo presenta un panorama selectivo de los logros y las técnicas de confinamiento, tratamiento y descontaminación disponibles actualmente, así como ejemplos de casos de rehabilitación en campo. En estos casos se han adoptado métodos físicos-químicos y biológicos para eliminar el lindano y sus isómeros de suelos y compartimentos acuáticos contaminados en diferentes condiciones medioambientales.

### **3.1. Contención**

La contención es una técnica común adaptada para contener las aguas subterráneas o suelos contaminados en un lugar o desviar las aguas superficiales o subterráneas de un lugar contaminado para limitar su contacto con personas y con el ecosistema de los lugares y minimizar el potencial de mayor contaminación.

El objetivo de contención se logra mediante la construcción de muros de contención de baja permeabilidad o impermeables. La mayoría de los muros se construyen con una mezcla de suelo, bentonita y agua. Los muros con esta composición ofrecen una barrera de baja permeabilidad y resistencia química a bajo coste. La permeabilidad deseada del muro completado es normalmente entre  $1 \cdot 10^{-3}$  y  $1 \cdot 10^{-6}$  cm/seg.

La construcción de muros suele llevarse a cabo de manera continua con procesos simultáneos de excavación de zanjas. A una profundidad mayor de 30 m se produce un incremento sustancial de los costes.

La contención y el sellado se han utilizado en las obras de rehabilitación de numerosos lugares contaminados por lindano y HCH en la UE, por ejemplo en Alemania, los Países Bajos y España (véase la sección 2 para más información).

### **3.2. Combustión**

#### **3.2.1. Incineradoras específicas**

La incineración de compuestos de cloro es una opción cara, puesto que se necesita una gran cantidad de energía y equipos sofisticados:

- a) los residuos se incineran con ayuda de petróleo u otro combustible a altas temperaturas, normalmente entre 1 200 y 1 400 °C, para convertir las sustancias químicas en gases que posteriormente garantizan su descomposición completa; y
- b) deben incorporarse equipos de control de emisiones de alta tecnología para limitar la generación y las emisiones de contaminantes más peligrosos a niveles por debajo de los límites de detección, por ejemplo dioxinas.

Cuando se considera la incineración como método de rehabilitación de matrices contaminadas, por ejemplo suelos o sedimentos, deben tenerse en cuenta no solo los contaminantes, sino también las matrices incineradas, lo que supone una desventaja adicional debido a la mayor complejidad. Los volúmenes de material son mucho mayores y las partículas del suelo, los bidones de acero y muchos otros materiales no se queman. Por lo tanto, no parece ser la tecnología más rentable cuando hay que tratar grandes cantidades (cientos o miles de toneladas de sustancias químicas unidas a matrices). Hay que tener esto en cuenta al ocuparse de mezclas complejas de residuos. Todo ello hace que esta opción sea cara y no muy eficiente.

La incineración se ha utilizado ampliamente para la eliminación de residuos de HCH y suelos y otros materiales contaminados por lindano y HCH en la UE.

### 3.2.2. Hornos de cemento

Los hornos de cemento están diseñados principalmente para quemar piedra caliza a temperaturas entre 1 400 y 2 000 °C y generalmente se alimentan con combustibles fósiles. Su uso para la destrucción de sustancias químicas tóxicas implica alimentar el horno con una combinación de combustibles fósiles y una mezcla adecuada de residuos químicos, dependiendo de sus propiedades. Existen varios diseños de hornos de cemento, pero los modernos a menudo consisten en hornos rotatorios largos que no difieren mucho de las incineradoras específicas de residuos tóxicos, excepto en que su temperatura de funcionamiento es mayor y que el tiempo de resistencia del combustible y el material a estas elevadas temperaturas suele ser más largo que en las incineradoras específicas.

Existen reservas acerca de la aplicabilidad de los hornos de cemento, pero también hay interés en el seguimiento de los avances. Los hornos de cemento se utilizan cada vez más para el tratamiento de residuos peligrosos. Los hornos de cemento para residuos peligrosos utilizan plataformas de mezcla que garantizan la mezcla adecuada de los distintos componentes, de forma que se asegure un bajo contenido en cloro de entre un 1 % y un 2 % como máximo. En el caso de los residuos de HCH con una composición de cloro al 50 %, tiene que realizarse una gran dilución. Es necesaria una selección cuidadosa, un control de las sustancias y el suministro continuo (cloro) de residuos que entran en el horno<sup>5</sup> (Karstensen, 2013).

Además, tienden a tener equipos de control de emisiones menos sofisticados y no pueden admitir materiales para incineración que puedan contaminar o alterar las propiedades del cemento que se está produciendo. Por lo tanto, los residuos que pueden quemar solo pueden tener un bajo contenido en cloro.

---

<sup>5</sup> Hornos de cemento que queman residuos peligrosos. Folleto 3. Convenio de Estocolmo. [www.pops.int/documents/.../Book%206%20Cement%20Kilns.doc](http://www.pops.int/documents/.../Book%206%20Cement%20Kilns.doc)

### 3.3. Métodos de tratamiento físico-químico para la rehabilitación y descontaminación de residuos, suelo y agua

Los métodos de rehabilitación física separan los contaminantes de la matriz de suelo o agua utilizando las diferencias físicas entre la matriz y el contaminante (por ejemplo, la volatilidad) o entre las partículas de suelo contaminadas y no contaminadas (por ejemplo, la densidad). Los métodos de rehabilitación química destruyen, fijan o concentran los contaminantes utilizando reacciones químicas. Algunos de estos métodos únicamente pueden utilizarse *ex situ* y otros tanto *ex situ* como *in situ*.

Los métodos físico-químicos de eliminación de lindano incluyen, por ejemplo, el uso de adsorbentes, nanopartículas y de cloración química.

#### 3.3.1. Decloración catalizada por bases (tratamiento de residuos)

La decloración/descomposición catalizada por bases es un proceso de reacción química que puede utilizarse para la deshalogenación o descomposición de una serie de contaminantes orgánicos persistentes clorados y no clorados (IHPA, 2009e). El método fue desarrollado originalmente por la USEPA. El proceso de decloración catalizada por bases conlleva el tratamiento de residuos líquidos y sólidos en presencia de una mezcla de reactivos alcalinos consistente en un hidrocarburo de alto punto de ebullición y un catalizador patentado. La mezcla se calienta a una temperatura adecuada para que se produzca la reacción de descomposición. Los residuos producidos por la descomposición de compuestos heteroatómicos son carbono y sales sódicas de aniones liberados durante las reacciones de descomposición completa. El proceso puede utilizarse para la deshalogenación o descomposición directa del material de residuo o puede asociarse a un paso de pretratamiento como la desorción térmica para eliminar y recoger los contaminantes de forma que solo tenga que tratarse mediante el proceso de decloración catalizada por bases un volumen más pequeño (IHPA, 2009e).

La IHOBE (Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco), con una ayuda considerable de los Fondos de Cohesión, terminó de eliminar en 2001 unas 4 000 toneladas de residuos de lindano puro y su tratamiento mediante decloración catalizada por bases. Esta actividad se enmarcó en un proyecto LIFE (1994) con el objetivo principal de diseñar una planta de demostración para el tratamiento de residuos de lindano utilizando el proceso de decloración catalizada por bases. El objetivo era demostrar la viabilidad a escala real de convertir HCH en triclorobenceno comercial. En resumen, la planta de tratamiento eliminó o transformó de manera irreversible el lindano puro mediante el proceso de decloración catalizada por bases, que destruye el HCH a una temperatura de 150 °C mediante una reacción química que lo convierte en cloruro de sodio (sal común), triclorobenceno (TCB) y agua. La investigación permitió maximizar la eficiencia de la reacción para alcanzar una tasa de conversión del 99,9995 % con un rendimiento de una tonelada por hora. En Barakaldo, en sus dos años de funcionamiento antes de ser desmantelada en 2001, la estación eliminó 3 200 toneladas de HCH puro. Este proceso permitió el reciclado de 1 074 toneladas de TCB, destilado y comercializado como material primario para la industria química sin las dificultades asociadas a otros métodos de producción. Asimismo, la sal resultante de la conversión del HCH se purificó y utilizó para la producción de salmuera; por cada kg de lindano se obtienen 625 gr de triclorobenceno y 300 gr de salmuera. Los residuos se transfirieron a las zonas de aislamiento.

Según los datos de la IHOBE, alrededor de 1 000 toneladas de triclorobenceno se enviaron a la India, cerca de 8 000 toneladas de salmuera se derivaron a colectores debidamente

controlados y en torno a 300 toneladas de subproductos de recogieron y depositaron en la celda de seguridad de Barakaldo. Otras 92 toneladas de residuos producidos en el proceso de descontaminación se han enviado a un gestor autorizado de residuos peligrosos.

La planta de tratamiento de Barakaldo ha sido la primera planta de dechloración catalizada por bases en tratar lindano (El País, 2001). Posteriormente también se ha utilizado la dechloración catalizada por bases en el tratamiento de residuos y suelos contaminados por lindano en un proyecto de rehabilitación de una antigua fábrica de plaguicidas en Spolana (República Checa), donde se construyó una planta de descontaminación propiamente dicha para tratar 35 000 toneladas de residuos *in situ* (Holoubek et al., 2011; SE, 2006). La tecnología también se ha utilizado a plena escala para tratar otros contaminados clorados y no clorados en otros países como Australia, Japón y México. El coste estimado de entre 1 400 y 1 700 EUR por tonelada (1,40 a 1,70 EUR por kg) corresponde al año 2004 y se basa en información de la IHPA (2009e).

### 3.3.2. Reducción química en fase gaseosa (tratamiento de residuos)

La tecnología de reducción química en fase gaseosa es un proceso diseñado para destruir agentes químicos. El proceso utiliza hidrógeno y vapor a elevadas temperaturas (hasta 850 °C) y normalmente presión atmosférica para transformar los residuos orgánicos en materiales menos tóxicos. El proceso total requiere un recipiente de reacción a alta temperatura, donde se produce la reducción química, seguido por un tren de lavado de gases para eliminar los subproductos inorgánicos. El proceso también prevé la eliminación de otros subproductos y la regeneración de gas de hidrógeno a través del reformado con vapor. Se utiliza agua como enfriador para reducir la temperatura del gas y adsorber productos solubles en agua, incluido el HCl. Estos y otros productos ácidos se depuran adicionalmente mediante depuradores cáusticos. Puede utilizarse un depurador de aceite pesado en el tren de lavado para eliminar algunos hidrocarburos (NRC, 1996). El gas depurado enfriado del proceso puede reutilizarse como combustible para componentes de la planta o consumido en un quemador (IHPA, 2009b).

En el caso del tratamiento de suelos y sedimentos, los contaminantes primero se desorben de los sólidos utilizando un dispositivo de desorción térmica (de los cuales hay muchos probados y disponibles en todo el mundo). El gas que contiene los contaminantes se condensa posteriormente, se elimina el agua, y el líquido contaminante concentrado restante se incorpora al precalentador y al reactor de reducción química en fase gaseosa como alimentador de residuos líquidos contaminantes concentrados (IHPA, 2009a,b).

En Australia lleva más de cinco años en funcionamiento un sistema comercial de reducción química en fase gaseosa que ha tratado más de 2 500 toneladas de PCB, HCB, DDT y otros COP. Con este sistema se obtuvieron eficiencias de destrucción del 99,9999 % para estos contaminantes (IHPA, 2009b). En Japón lleva en funcionamiento desde 2003 una planta semimóvil de reducción química en fase gaseosa para el tratamiento de residuos de PCB (Ecologic, 2016). El método de reducción química en fase gaseosa también se ha utilizado para tratar residuos contaminados por lindano (IHPA, 2009b).

### 3.3.3. Procesos de dechloración no mediados por bases (deshalogenación catalizada por cobre; destrucción catalizada por cenizas volantes (proceso Hagenmaier); reducción por sodio) (tratamiento de residuos)

Las técnicas de dechloración no mediada incluyen métodos como la deshalogenación catalizada por cobre, la destrucción catalizada por cenizas volantes y la reducción por sodio. La nueva tecnología sin combustión conocida como destrucción mediada por cobre se

desarrolló y patentó recientemente. Los principios, los parámetros experimentales y los ensayos del método de destrucción mediada por cobre se presentaron recientemente para las dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/F), bifenilos policlorados (PCB) y plaguicidas organoclorados (como DDT y metabolitos, HCH, PCPh, PCBz). Esta técnica se ha utilizado en la República Checa para tratar varios contaminantes clorados, incluido el HCH (ProjectFOKS, 2009).

La ventaja de las técnicas de dechloración no mediada por bases como la deshalogenación catalizada por cobre y la destrucción catalizada por cenizas volantes es que el riesgo de formación de PCDD/PCDF a partir de precursores es más bajo en comparación con los procesos mediados por bases. Sin embargo, también debería evaluarse el destino de las reacciones de condensación para la destrucción de residuos que contienen precursores (Weber, 2004).

#### 3.3.4. Arco de plasma (tratamiento de residuos)

El arco de plasma se basa en principios similares a una máquina de soldadura por arco, donde se coloca un arco eléctrico entre dos electrodos. El arco de gran energía crea elevadas temperaturas que oscilan entre 3 000 y 7 000 °C. El plasma es gas de alta ionización. El arco de plasma está encerrado en una cámara. El material residual se coloca en la cámara y el intenso calor del plasma descompone las moléculas orgánicas en sus átomos elementales. En un proceso cuidadosamente controlado, estos átomos se recombinan en gases inofensivos como el dióxido de carbono. Los sólidos como el cristal y los metales se funden para formar materiales, similares a la lava endurecida, en los que se encapsulan metales tóxicos. Con la tecnología de arco de plasma no hay quema ni incineración ni tampoco formación de ceniza. Existen dos tipos principales de procesos de arco de plasma: el fundidor de plasma y el soplete de plasma. Los fundidores de plasma tienen una eficiencia de destrucción muy alta. Las elevadas temperaturas producidas por el arco convierten los residuos orgánicos en elementos orgánicos ligeros y primarios (CPEO, 2010).

Se han planteado preocupaciones respecto a la fiabilidad de la tecnología del soplete de plasma. El soplete de cobre refrigerado por agua tiene que reemplazarse periódicamente para evitar quemaduras en el punto de unión del arco y la posterior explosión de vapor debido al rápido calentamiento del agua de refrigeración liberada (CPEO, 2010).

La tecnología de arco de plasma «*in-flight*» de PLASCON funciona comercialmente desde 1992 y ha tratado varios plaguicidas COP y PCB (IHPA, 2009d). Hasta la fecha, hay en funcionamiento diez plantas comerciales con licencias de la Agencia de Protección Medioambiental (APM) de Victoria y Queensland en Australia, la APM del Reino Unido, la APM de los Estados Unidos, la APM de México y el Ministerio de Medio Ambiente de Japón (IHPA, 2009d).

#### 3.3.5. Desorción térmica (tratamiento de suelos)

En resumen, la desorción térmica consiste en calentar el suelo a entre 400 y 600 °C (dependiendo del punto de ebullición del contaminante) provocando la evaporación de los contaminantes, que posteriormente se pasan a una cámara de poscombustión donde se incineran convencionalmente. La desorción térmica puede realizarse *ex situ* en plantas de tratamiento especializadas, pero también se han desarrollado sistemas *in situ* (Krügger, 2016). La ventaja de la desorción térmica es que puede utilizarse en varios tipos de suelo para extraer una amplia variedad de contaminantes, por ejemplo PAH, hidrocarburos clorados y diferentes plaguicidas (Agassi et al. 1998). Además, el suelo tratado puede reutilizarse, por ejemplo, en obras civiles. Sin embargo, la desorción térmica requiere tecnologías sofisticadas para evitar la formación y liberación de dioxinas y furanos durante

la incineración final de los contaminantes en la fase gaseosa. Los sistemas de desorción térmica requieren el tratamiento del gas de salida para eliminar las partículas y contaminantes. Las partículas se eliminan mediante equipos convencionales, como depuradores húmedos o filtros de tejido. Los contaminantes se destruyen en una cámara de combustión secundaria o un incinerador catalítico o se eliminan mediante condensación seguida por adsorción de carbono.

Como ejemplo, a continuación se explica un método *in situ* mejorado (SOC, 1993) para la rehabilitación de suelos que contienen contaminantes orgánicos o inorgánicos semivolátiles. Este proceso es especialmente útil para la rehabilitación de suelos contaminados con sustancias orgánicas no volátiles o semivolátiles, como combustibles diésel, combustibles de aviación y carburorreductores, petróleo crudo, PCB y plaguicidas y sustancias inorgánicas semivolátiles como mercurio metálico. Este sistema de desorción térmica *in situ* utiliza un tubo perforado o ranurado enterrado en el suelo por debajo de la profundidad de contaminación. La superficie de suelo se cubre con una capa de aislamiento permeable (para conservar el calor y ofrecer una vía de migración del gas en la parte superior del suelo) y una capa de material impermeable por encima del aislamiento.

Un sistema de recuperación/tratamiento de vapor induce un vacío entre la capa impermeable y la superficie del suelo (por ejemplo, una bomba de vacío o un ventilador de tiro inducido) y un sistema de tratamiento del vapor contaminado (por ejemplo, una trampa de frío, adsorción de carbono o incineración). Se introducen combustible y aire comprimido en una cámara de combustión presurizada y se queman. Los productos de la combustión fluyen por el tubo enterrado y se distribuyen por todo el suelo contaminado. El calor de los productos de la combustión presurizada hacen que los contaminantes orgánicos del suelo se evaporen, se pirolíen, se descompongan o reaccionen con el oxígeno. Los contaminantes y sus subproductos son arrastrados por los productos de la combustión al sistema de recuperación/tratamiento de vapor.

La desorción térmica se ha utilizado para la limpieza de suelos contaminados por HCH y otros compuestos clorados desde los años 80 en los Países Bajos (van Hasselt et al. 1998). Casi 300 000 toneladas de suelos contaminados por HCH han sido tratadas con éxito principalmente mediante desorción térmica y parcialmente con lavado del suelo (Vijgen, comunicación personal). Por ejemplo, 60 000 toneladas de suelo de una antigua fábrica de plaguicidas muy contaminado por HCH, dioxinas y furanos se trató en una planta de tratamiento térmico en Rotterdam en 1996 (Agassi, 1998). Se obtuvieron elevadas eficiencias de eliminación (>99 %) de lindano: las concentraciones iniciales de HCH de hasta 1 500 mg/kg se redujeron a 0,01 mg/kg. Las concentraciones iniciales de dioxinas y furanos de 20 000 ng EQT<sup>6</sup>/kg se redujeron a 100 ng EQT/kg tras el tratamiento. La concentración media de dioxinas y furanos en la chimenea fue de 0,01 ng EQT/m<sup>3</sup>, muy inferior al valor objetivo de 0,1 ng EQT/m<sup>3</sup>. Así, se logró una alta eficiencia de eliminación de HCH y se controlaron de manera eficiente las posibles emisiones de dioxinas y furanos de la cámara de poscombustión.

En Spolana Neratovice (República Checa) se han tratado con éxito grandes cantidades de suelo mediante una combinación de desorción térmica y de cloración catalizada por bases. La desorción térmica se utilizó para extraer los residuos puros de los suelos y la tecnología de

---

<sup>6</sup>La equivalencia tóxica de una mezcla se define por la suma de las concentraciones de los compuestos individuales (Ci) multiplicada por su toxicidad relativa (TEF). (TEF) expresa la toxicidad de dioxinas, furanos y PCB en términos de la forma más tóxica de dioxina, 2,3,7,8-TCDD

decoloración catalizada por bases para tratar dichos residuos puros (Vijgen, comunicación personal).

Araújo et al. (2016) han estudiado el efecto de la temperatura y el tiempo de calentamiento en la eficiencia de la desorción térmica de HCH de suelos contaminados en condiciones de laboratorio. Los resultados mostraron que el gamma-HCH se eliminaba eficientemente, pasando de una concentración inicial de 0,96 µg/g de suelo a 0,01 µg/g de suelo al calentar el suelo a 200 °C durante treinta minutos. A 350 °C, la eliminación de este isómero ya era significativa después de seis minutos de calentamiento. En el caso de los demás isómeros, se requerían mayores temperaturas y tiempos de calentamiento para obtener una eliminación significativa del suelo. El beta-HCH solo se eliminaba significativamente después de calentar el suelo a 350 °C durante 96 horas y la concentración seguía siendo de 0,2 µg/g de suelo incluso después de 480 horas de calentamiento.

### 3.3.6. Extracción por solvente (tratamiento de suelos)

La extracción por solvente puede utilizarse para disolver y extraer los contaminantes del suelo u otro medio en el que estén presentes. Los solventes pueden reutilizarse, mientras que los contaminantes se destruyen o contienen de forma segura. El método consta normalmente de cuatro pasos: la extracción del contaminante con el solvente; la separación del agente de extracción de la matriz tratada (suelo/sedimento/agua); la eliminación de las cantidades residuales de solvente en la matriz tratada; y la recuperación del solvente para su reutilización. A menudo, el suelo tiene que pretratarse (por ejemplo, aplastamiento y homogenización) antes de aplicar la extracción por solventes. Entre los factores que influyen en la eficiencia del método están el tipo de solvente utilizado, el coeficiente suelo/solvente, la concentración del contaminante y las características del suelo (u otra matriz).

Los solventes utilizados en la extracción del lindano son entre otros el hexano, el isopropanol y la acetona. Por ejemplo, Salas et al. (1999) observaron en un estudio de laboratorio una reducción de más del 90 % del HCH en muestras de suelo cuanto se añadían 30 g de solvente (metanol, isopropanol, acetona o MEK) a 10 g de suelo y se agitaban los recipientes de ensayo durante cinco minutos. Si el paso de extracción se realizaba dos o tres veces, era posible obtener una concentración residual de HCH en el suelo de 1 ppm y una eficiencia de eliminación superior al 99 %.

Westcott y Worobey (1985) han demostrado que el trifluoruro de boro en metanol es un reactivo útil utilizado como pretratamiento para la extracción de residuos de lindano del suelo. El pretratamiento con trifluoruro de boro en metanol dio lugar a un aumento de entre el 20 % y el 70 % del lindano extraído de suelos degradados a la intemperie en comparación con la extracción con hexano-acetona. El lindano que no era extraíble mediante hexano-acetona, pero era extraíble con el tratamiento de trifluoruro de boro en metanol, fue confirmado por el método de espectro de masa y químico.

En los Países Bajos se han tratado con éxito alrededor de 70 000 toneladas de suelos contaminados por HCH en una planta de lavado de suelo a plena escala, que demostró una eficiencia de eliminación del HCH de más del 99,7 % (Cuyten, 1999).

### 3.3.7. Rehabilitación mediante nanopartículas (tratamiento de suelo y agua)

Las nanopartículas son partículas que tienen una o más dimensiones externas a nanoescala. El uso de nanopartículas fabricadas en la rehabilitación de aguas y suelos contaminados es un creciente ámbito de investigación y ya se utilizan algunas aplicaciones (Mueller y Nowack 2009). La nanorrehabilitación puede brindar una opción más rentable de rehabilitación de aguas subterráneas y suelos contaminados por lindano que los métodos más convencionales,

por ejemplo la degradación química y la adsorción física, debido a la gran superficie y, por ende, a la alta reactividad de las nanopartículas y la posibilidad de utilizarlas *in situ*. Sin embargo, todavía no se conocen el destino y los efectos de las nanopartículas fabricadas en el medio ambiente, especialmente en el suelo, así como sus potenciales efectos en la salud humana y, por lo tanto, es necesario investigar más antes de que pueda utilizarse más ampliamente la nanorrehabilitación *in situ*.

Una de las nanopartículas más investigadas utilizadas en la rehabilitación medioambiental es el nanohierro cerovalente (nZVI). Algunos autores (por ejemplo Song y Carraway 2005) han indicado que esta nanopartícula puede aumentar la tasa de degradación de los contaminantes. El uso de metales como agente de rehabilitación se basa en una reacción química de reducción-oxidación ampliamente conocida que utiliza un donante de electrones neutro (un metal) para reducir químicamente un aceptor de electrones (un contaminante). Elliot et al. (2009) estudiaron el uso de nZVI en la degradación de lindano en el agua. En su estudio, el lindano (a una concentración inicial de 7,5 mg/l) desaparecía de la solución acuosa en 24 horas en presencia de concentraciones de nZVI de entre 0,015 y 0,39 g/l, mientras que aproximadamente el 40 % de la dosis inicial de lindano permanecía en la solución después de 24 horas en presencia de 0,53 g/l de partículas de hierro de mayor microescala. En el experimento no se detectaron productos finales orgánicos no halogenados, pero sí rastros de concentraciones de benceno. Se detectó cloro como producto final estable, lo que demostraba la degradación reductiva del lindano. En otro estudio, Singh et al. (2001) observaron que el nZVI aumentaba la degradación de lindano en suelo contaminado. El lindano a una concentración inicial de 10 µg/g desapareció completamente del suelo contaminado en un período de 24 horas con una concentración de nZVI de 1,6 g/l.

Se ha observado que el recubrimiento de las nanopartículas de hierro con otro metal catalítico aumenta aún más la eficiencia de la degradación. Por ejemplo, en un estudio de Nagpal et al. (2010), el lindano en una solución acuosa a una concentración inicial de 5 mg/l quedó completamente degradado en cinco minutos por las nanopartículas bimetálicas de hierro y paladio presentes a una concentración de 0,5 g/l, mientras que solo entre el 65 % y el 70 % del lindano fue degradado por las nanopartículas de hierro (0,5 g/l) en el mismo período de tiempo. El aumento concomitante del ión cloruro observado en el estudio confirmó que la eliminación del lindano se produjo principalmente por degradación y no por otros procesos, por ejemplo adsorción a la superficie de las nanopartículas. Joo y Zhao (2008) observaron que la tasa de degradación del lindano aumentaba progresivamente a medida que se incrementaba el contenido en paladio de las nanopartículas bimetálicas de hierro y paladio del 0,05 % al 0,8 % de hierro, y el efecto catalítico del paladio era más significativo en condiciones anaeróbicas.

No existe información sobre la aplicación de esta técnica para el tratamiento de lindano a escala piloto.

### 3.3.8. Adsorción por carbón activo (tratamiento de agua)

El proceso de adsorción está reconocido como método más eficiente de tratamiento de aguas residuales, puesto que puede eliminar diferentes tipos de contaminantes orgánicos y tiene un diseño simple y un funcionamiento fácil (Foo y Hameed, 2009). Entre una gran variedad de adsorbentes, el carbón activo se está utilizando ampliamente en los países desarrollados para controlar la contaminación medioambiental de muestras acuosas debido a su gran superficie, elevada capacidad de adsorción, estructura porosa interna y adsorción selectiva (Babel y Kurniawan, 2003; Cheremisinoff y Ellerbush, 1979; Mattson y Mark, 1971; Pillar et al., 1992; Ucer et al., 2006).

Se ha probado la eficacia de diferente carbón activo en polvo en la eliminación de lindano y otros isómeros de HCH del agua. Por ejemplo, se comparó la capacidad de adsorción de huesos de dátiles activos procedentes de residuos agrícolas con el carbón activo comercial (Norit) (El Kady et al., 2013). Se constató que la adsorción de lindano alcanzaba su máximo (98,6 %) en condiciones neutras (pH 7). La adsorción máxima de lindano en el carbón activo se lograba a temperatura ambiente ( $25\text{ °C} \pm 1$ ).

Hassan et al. (2009) utilizaron carbón activo en polvo, obtenido a partir de huesos de albaricoque, como absorbente barato y eficaz para la eliminación de lindano y malatión de aguas residuales. Los autores observaron una adsorción del 95,52 % del lindano a  $30\text{ °C}$ . La adsorción (%) era muy baja con pH 4, aumentaba rápidamente con pH 5,5 y alcanzaba su máximo con pH 6. Esto también lo observaron Vinod et al. (2002), cuando la eliminación máxima de lindano se producía con un pH 6 y se alcanzaba el equilibrio de adsorción después de seis horas. La superficie del carbón activo era de  $642\text{ m}^2/\text{g}$ .

Kouras et al. (1998) observaron en su estudio de laboratorio que el carbón activo en polvo en concentraciones superiores a  $20\text{ mg/l}$  es capaz de reducir la concentración de lindano en soluciones acuosas de  $10\text{ }\mu\text{g/l}$  a  $0,1\text{ }\mu\text{g/l}$  en un hora de tiempo de contacto. Al contrario que los estudios citados anteriormente, no constataron una diferencia significativa en la eficiencia de adsorción del lindano del carbón activo en un rango de pH de 4 a 10. Sin embargo, los autores señalaron que, con valores de pH más bajos, la cantidad de materia orgánica (por ejemplo, ácidos húmicos y fúlvicos) presente en el agua puede ser mayor, lo que podría dar lugar a una competición por la adsorción de distintos compuestos orgánicos en el carbón activo y, por consiguiente, podría disminuir la adsorción de HCH.

El carbón activo se ha utilizado en el tratamiento de aguas residuales o lixiviados de vertederos contaminados por HCH en la UE, por ejemplo en Italia, Alemania, los Países Bajos, Polonia y España (véase la sección 2).

### 3.3.9. Oxidación en agua supercrítica (tratamiento de agua)

La oxidación en agua supercrítica es un proceso que ocurre en el agua a temperaturas y presiones por encima del punto crítico termodinámico de la mezcla. El proceso normalmente se produce en un rango de temperaturas de  $450$  a  $600\text{ °C}$  y presiones de  $24$  a  $28\text{ MPa}$ . La corriente acuosa de residuos que contiene la sustancia orgánica se somete a presión y se precalienta hasta condiciones de reacción. Entonces se «invierte» el comportamiento del agua como disolvente, de forma que los hidrocarburos clorados se vuelven solubles en el agua, permitiendo una reacción monofásica de los residuos acuosos con un oxidante disuelto. La mezcla monofásica de agua, sustancia orgánica y oxidante entra en la zona de reacción, donde tanto los compuestos orgánicos como el oxígeno son completamente solubles y la temperatura es suficientemente elevada para que se produzcan rápidamente reacciones de oxidación de radicales libres. La sustancia orgánica se oxida con rapidez y por completo (eficiencia de destrucción  $>99,99\%$  con tiempos de residencia inferiores a un minuto) transformándose en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Veriansyah y Kim, 2007).

La eficacia de la oxidación en agua supercrítica se ha demostrado en el tratamiento de sustancias químicas cloradas tóxicas como bifenilos policlorados (PCB) (Anitescu y Tavlarides, 2005), el plaguicida DDT (Modell, 1990) y dioxinas (Thomason et al., 1990), entre otros compuestos. Los compuestos cuyo reciclado o depósito resultan problemáticos debido a la formación de subproductos y residuos peligrosos, como el polímero de policloruro de vinilo

(PVC) y el clorocarbono-hexaclorociclohexano y gamma-hexaclorociclohexano, se oxidan completamente sin formación de subproductos peligrosos (Hirth et al., 1998).

La oxidación en agua supercrítica puede clasificarse como química ecológica o como tecnología limpia. Las elevadas presiones y temperaturas necesarias para la oxidación en agua supercrítica se encuentran de forma rutinaria en aplicaciones industriales como refinado de petróleo y síntesis química.

Los sistemas comerciales de oxidación en agua supercrítica se explotan en Japón, los Estados Unidos, el Reino Unido, Corea y Francia (IHPA, 2009c).

### 3.3.10. Fotocatálisis (tratamiento de agua)

La aceleración de una transformación química mediante la presencia de un catalizador con luz se llama fotocatálisis. Varios estudios han investigado la degradación fotocatalítica de contaminantes en entornos acuáticos. El fotocatalizador más ampliamente utilizado es la nanopartícula de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) debido a su alta estabilidad fotoquímica, alta fotoactividad, energía de banda prohibida aceptable y bajo coste (Kabra et al., 2004). Para evitar que las nanopartículas libres terminen en el agua, las partículas de  $\text{TiO}_2$  normalmente se inmovilizan en un sustrato, por ejemplo mediante recubrimiento por inmersión, recubrimiento por pulverización o recubrimiento electroforético. Otra opción es utilizar delgadas películas de  $\text{TiO}_2$  en sustratos de vidrio.

Las partículas de  $\text{TiO}_2$  solo absorben una estrecha banda en la región UV del espectro solar. Sin embargo, pueden doparse con otro semiconductor (por ejemplo un metal noble o nitrógeno) para aumentar la eficiencia del fotocatalizador y permitir el uso de un espectro más amplio de longitudes de onda (por ejemplo luz visible).

Se ha estudiado la degradación fotocatalítica del lindano mediante partículas de  $\text{TiO}_2$  en el agua. Zaleskaa et al. (2000) informaron de una degradación máxima del 77 % del lindano a una concentración inicial de 40 ppm en una solución acuosa con  $\text{TiO}_2$  después de 150 minutos de irradiación bajo luz UV. Senthilnathan y Philip (2010) observaron una degradación del 100 % del lindano a una concentración inicial de entre  $8,62 \times 10^{-5}$  y  $5,17 \times 10^{-4}$  mmol/l en un período de entre 120 y 450 minutos utilizando  $\text{TiO}_2$  dopado con nitrógeno bajo luz visible. El análisis de cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS) reveló que el lindano se degradó completamente y no se observaron productos intermedios al término del análisis. La tasa de degradación del lindano disminuyó gradualmente con el aumento de la concentración inicial del plaguicida.

Aunque la mayor parte de la investigación sobre la fotocatálisis se ha llevado a cabo en entornos acuáticos, hay algunos estudios que han investigado la degradación fotocatalítica de contaminantes en suelos superficiales. Por ejemplo, Zhao et al. (2007) estudiaron el uso de un fotocatalizador compuesto de  $\text{TiO}_2$  y montmorillonita en la degradación de lindano presente en suelos y el efecto del pH del suelo en la degradación. El índice de fotodegradación aumentaba con el pH del suelo. Con un pH de 10,3, el 76 % del lindano se degradó en dos horas y más del 90 % después de doce horas. Con un pH de 8,2, el índice de degradación era ligeramente inferior y con un pH de 4,6 considerablemente inferior. Entre los productos intermedios de la fotodegradación detectados estaban el pentaclorociclohexeno, el triclorociclohexeno y el diclorobenceno. Después de nueve horas de irradiación, estas sustancias dejaron de detectarse en las muestras, lo que indica que los productos intermedios de la fotodegradación se degradaron progresivamente.

No existe información sobre la aplicación de esta técnica para el tratamiento de lindano a escala piloto.

### 3.3.11. Decloración biocatalítica (tratamiento de agua)

Una opción para la eliminación del lindano es la decloración reductiva utilizando biocatalizadores. Por ejemplo, Mertens et al. (2007) han demostrado que las nanopartículas biogénicas de paladio («bio-Pd») pueden utilizarse como catalizadores para la decloración del lindano. El bio-Pd (0) son nanopartículas formadas por bacterias (por ejemplo *Shewanella oneidensis*). La ventaja del bio-Pd en comparación con el paladio en polvo comercial, que se utiliza a menudo como catalizador en los procesos de decloración, es que su superficie es mayor y, por lo tanto, tienen mayor reactividad. En el estudio de Mertens et al. (2007), en el que se inmovilizaron nanopartículas de bio-Pd en una membrana de diálisis en un proceso de alimentación por lotes, se logró un porcentaje de eliminación del gamma-HCH de entre un 85 % y un 98 % en una solución acuosa (concentración inicial de 10 mg/l) en un período de 24 horas.

Hennebel et al. (2011) estudiaron el uso de nanopartículas de bio-Pd encapsuladas en perlas de polímero en la eliminación de bajas concentraciones de isómeros de HCH (concentración total de isómeros de HCH de alrededor de 5 µg/l) de aguas subterráneas. En su estudio a escala piloto se eliminaron el 29 % y el 75 % del HCH aplicando un tiempo de residencia de cuatro y ocho horas respectivamente para el flujo de agua en el reactor. Los distintos isómeros de HCH presentaron porcentajes de eliminación variables con una eliminación máxima del gamma-HCH (75 % y 90 %). Sin embargo, los autores señalaron que el proceso debería mejorarse para obtener eficiencias de eliminación comparables a las observadas con el carbón activo (alrededor del 98 %).

No existe información sobre la aplicación de esta técnica para el tratamiento de lindano a escala piloto.

### 3.3.12. Oxidación química *in situ* (tratamiento de suelo y aguas subterráneas)

La oxidación química *in situ* es una técnica de rehabilitación medioambiental utilizada para rehabilitar suelos y/o aguas subterráneas con el fin de reducir las concentraciones de determinados contaminantes medioambientales. Se lleva a cabo inyectando o introduciendo fuertes oxidantes químicos directamente en el medio contaminado (suelo o agua subterránea) para destruir los contaminantes químicos presentes. Puede utilizarse para reparar varios compuestos orgánicos, incluidos algunos que son resistentes a la degradación natural.

Los siguientes compuestos son los oxidantes que se utilizan más habitualmente en este proceso:

**Permanganato:** El permanganato se utiliza en la rehabilitación de aguas subterráneas en forma de permanganato potásico ( $\text{KMnO}_4$ ) y permanganato sódico ( $\text{NaMnO}_4$ ). La mayor diferencia entre las dos sustancias químicas es que la primera es menos soluble que la segunda (Amarante, 2000).

**Reactivo de Fenton:** El reactivo de fenton es básicamente una mezcla de sales ferrosas como catalizador y peróxido de hidrógeno. Cuando el hierro soluble cataliza el peróxido, forma radicales de hidróxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) que oxidan los contaminantes como los solventes clorados, los fuelóleos y el BTEX (Amarante, 2000).

Persulfato: El radical sulfato reacciona con los compuestos orgánicos para formar un catión radical orgánico. En cambio, no reacciona tanto en compuestos que contienen grupos atractores de electrones como el nitro (-NO<sub>2</sub>) y el carbonilo (C=O) y también en presencia de sustancias que contienen átomos de cloro. Asimismo, a medida que aumenta el número de enlaces de éter, disminuyen las velocidades de reacción (Tsitonaki et al., 2010).

El Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón está probando actualmente la descontaminación de aguas subterráneas mediante oxidación química en el marco de un proyecto Life Plus de la UE llamado DISCOVERED LIFE 2012 (GA, 2016a). Este proyecto de demostración, basado en la oxidación química *in situ* con activación alcalina, tiene como objetivo diseñar, instalar y explotar un sistema prototipo de mitigación de la contaminación que se utilizará para restaurar la calidad del agua en los acuíferos contaminados por lindano en la zona de Sabiñánigo (Huesca).

Uno de los principales cometidos del proyecto es demostrar que las elevadas tasas de destrucción de contaminantes logradas en el laboratorio también pueden lograrse en campo. Para ello, se desarrollará una prueba piloto de oxidación química *in situ* para movilizar y oxidar los contaminantes presentes en líquidos densos en fase no acuosa que no pueden bombearse y siguen atrapados en la fracturas del suelo. El objetivo es reducir la carga de contaminación existente en el acuífero y transformarla en compuestos menos perjudiciales o inocuos.

En cuanto al estudio de la ejecución del proyecto a plena escala, el resultado principal será una evaluación de la viabilidad técnica y económica de ampliar el sistema piloto y poner a prueba la practicabilidad de las técnicas desarrolladas en relación con la gestión de líquidos densos en fase no acuosa. Se documentará el tratamiento de líquidos densos en fase no acuosa y la pluma de contaminación, así como los coeficientes costes/beneficios y una evaluación de impacto socioeconómico. Este conocimiento servirá de base para un conjunto de directrices metodológicas asociadas.

Aunque el proyecto se desarrolla para Bailín, se espera que pueda transferirse a otros lugares donde existan problemas similares. El proyecto, que comenzó el 1 de enero de 2014, sigue en marcha y está previsto que termine a más tardar el 30 de junio de 2017.

### **3.4. Métodos biológicos: biorrehabilitación de suelo y agua**

Los métodos de tratamiento biológico de aguas y suelos contaminados entrañan el uso de microorganismos o vegetación. Los microorganismos y las plantas pueden destruir los contaminantes o transformarlos en sustancias químicas menos peligrosas, así como extraerlos y acumularlos.

La ventaja de los métodos biológicos es que son métodos rentables y ecológicos y pueden utilizarse *in situ*. Sin embargo, la eficiencia de estos métodos en condiciones de campo todavía puede ser bastante limitada, puesto que hay numerosos factores que afectan a los procesos. Por lo tanto, es necesaria una mayor investigación, especialmente estudios de campo, para entender mejor los factores que afectan a la biorrehabilitación y mejorar su eficiencia.

### 3.4.1. Degradación microbiana

Ciertos microorganismos son capaces de digerir algunas sustancias químicas tóxicas y a menudo esta es una vía importante de degradación de los plaguicidas una vez aplicados en el campo. Al seleccionar los microorganismos más eficaces y crear las condiciones medioambientales ideales para ellos, a veces es posible acelerar considerablemente el proceso de degradación.

La biorrehabilitación se está investigando como forma de descontaminación de suelos en lugar de la destrucción de existencias de sustancias químicas. Es una tecnología relativamente subdesarrollada, que en la actualidad parece limitarse a algunas sustancias químicas y condiciones específicas. Es un ámbito que se beneficiará de una mayor investigación a fin de desarrollar sistemas ampliamente aplicables para ayudar a la descontaminación *in situ*.

La biorrehabilitación por microorganismos puede clasificarse en dos métodos distintos: bioestimulación y bioaumentación. La bioestimulación consiste en la modificación de las condiciones medioambientales (por ejemplo, adición de nutrientes limitantes u oxígeno, control de pH) para apoyar el crecimiento y la actividad de la población microbiana autóctona ya presente en el lugar. La bioaumentación consiste en la adición de células microbianas vivas capaces de degradar. Estas células pueden ser cultivos enriquecidos que se han aislado originalmente del lugar contaminado para ser tratadas o pueden provenir de otros lugares contaminados. También puede utilizarse una combinación de ambos métodos. La elección depende de las propiedades y características del lugar contaminado y su población microbiana, por ejemplo la presencia de microorganismos adecuados capaces de degradar, la biodisponibilidad del contaminante, la disponibilidad de nutrientes, el pH y otros factores medioambientales.

Se ha investigado mucho la degradación bacteriana del lindano y otros isómeros del HCH. Se ha descubierto que tanto las bacterias aeróbicas como las anaeróbicas pueden degradar estos contaminantes (véase cuadro 17). La reacción principal durante la degradación microbiana de compuestos halogenados es la eliminación del átomo de halógeno. Durante este paso, los átomos de halógeno, que por lo general son los responsables del carácter tóxico y xenobiótico del compuesto, normalmente son sustituidos por hidrógeno o un grupo hidróxilo. La degradación aeróbica avanza a través de varios productos intermedios de la degradación, por ejemplo pentaclorociclohexenos y tetraclorociclohexenos (PCCH y TCCH) y triclorobenzenos y diclorobenzenos (TCB y DCB), y puede desembocar en una mineralización completa (revisiones de Phillips et al., 2005, Lal et al., 2010). La degradación anaeróbica de isómeros del HCH normalmente da lugar a la formación de benceno y clorobenzenos como productos finales (Lal et al., 2010).

**Cuadro 17. Ejemplos de bacterias capaces de degradar el lindano y otros isómeros del HCH**

Modo de degradación	Bacterias	Referencia
Procesos aeróbicos	<i>Micromonospora sp</i>	Fuentes et al. 2010
	<i>Streptomyces sp</i>	Fuentes et al. 2010
	<i>Pseudomonas sp.</i>	Nawab et al. 2003
	<i>Sphingobium sp.</i>	Jagnow et al. 1977

Modo de degradación	Bacterias	Referencia
	<i>Microbacterium sp</i>	Manickam et al. 2006
	<i>Pandoraea sp.</i>	Okeke et al. 2002
	<i>Sphingomonas sp</i>	Mohn et al., 2006; Lal et al., 2010
Procesos anaeróbicos	<i>Clostridium sp.</i>	MacRae et al. 1969
	Cultivo de enriquecimiento metanogénico	Middeldorp et al. 1996
	Lodos de depuración	Buser y Muller 1995

Las bacterias gram negativas pertenecientes a la familia de las *Sphingomonadaceae* están entre las especies más estudiadas (revisión de Lal et al., 2010). Los genes que codifican las enzimas de degradación del HCH de estas bacterias, los llamados genes lin, se han clonado, secuenciado y caracterizado (Nagata et al 1999; Mohn et al., 2006; Lal et al., 2010).

En los últimos años se ha investigado el uso de actinobacterias (por ejemplo la especie *Streptomyces*) en la eliminación de lindano de los suelos (por ejemplo, Benimelli et al., 2008, Fuentes et al., 2010). Las actinobacterias son un grupo diverso de bacterias gram positivas que forman una parte importante de la comunidad microbiana del suelo. Estas bacterias son menos estudiadas que las bacterias gram negativas, pero pueden ofrecer un método eficiente de biorrehabilitación de suelos contaminados por lindano y otros plaguicidas debido a su diversidad metabólica y características de crecimiento específicas (Shelton et al. 1996).

También se ha observado que varias cianobacterias degradan el lindano y el HCH en el agua (Kuritz y Wolk, 1995). Las ventajas de estas bacterias fotosintéticas en la rehabilitación de aguas contaminadas son que tienen escasas necesidades de nutrientes y, al ser autotróficas, pueden producir una gran biomasa sin adiciones de fuentes de carbono.

Además de las bacterias, otros microorganismos, como los hongos, pueden degradar también los isómeros del HCH. En concreto, se ha demostrado que diversos hongos de podredumbre blanca, como el *Phanerochaete sp*, (Mougin et al., 1997), el *Trametes sp.* (Singh y Kuhad, 1999) y el *Pleurotus sp.* (p. ej., Mohapatra y Pandey, 2015), pero también algunos otros hongos, por ejemplo el *Conidiobolus* (Nagpal et al., 2008), son capaces de degradar distintos isómeros del HCH. Los hongos son capaces de degradar contaminantes como el lindano debido a su producción de enzimas extracelulares no específicas (por ejemplo peroxidasas, fenoloxidasas, manganeso y lignina peroxidasa, lacasas) que catalizan una amplia variedad de reacciones de oxidación, dando lugar a la descomposición de compuestos orgánicos (Dashtban et al., 2010).

Se ha informado de la mineralización completa de isómeros del HCH con algunos microorganismos, por ejemplo las bacterias *Sphingobium* (Nagata et al., 2007) y algunos hongos de podredumbre blanca (Mougin et al. 1997; Singh y Kuhad 1999). Sin embargo, para la degradación eficiente y completa del lindano y otros isómeros del HCH a menudo resulta beneficioso un consorcio de distintos microorganismos. Esto se debe a que la mayoría de especies no son capaces de degradar todos los isómeros del HCH o sus productos de transformación (Phillips et al., 2005).

Hay varios factores que afectan a la biodegradación microbiana de los contaminantes. Un factor importante es la biodisponibilidad de los contaminantes para el microorganismo degradador (Phillips et al., 2005). El lindano y los isómeros del HCH tienen propiedades de elevada adsorción y, por lo tanto, limitada disponibilidad en muchos tipos de suelos, lo que puede dar lugar a menores tasas de degradación en condiciones de campo en comparación con las condiciones de laboratorio.

La concentración de lindano y otros isómeros del HCH también puede afectar a la tasa de biodegradación. Cuando las concentraciones son demasiado altas, los contaminantes pueden tener efectos tóxicos en los microorganismos. En cambio, una baja concentración de contaminantes puede impedir la inducción de enzimas de degradación microbiana. Por ejemplo, Okeke et al. (2002) observaron en un estudio sobre la eliminación de lindano mediante *Pandoraea* sp. en líquido y suelos fangosos que la tasa de eliminación del lindano aumentaba con concentraciones crecientes hasta 150 mg/l pero disminuía con 200 mg/l, después de entre cuatro y seis semanas de incubación. Benemelli et al. (2008) constataron un patrón similar en su estudio sobre la eliminación de lindano mediante *Streptomyces* sp. en suelos contaminados. Con concentraciones iniciales de lindano de 100, 150, 200 y 300 µg/kg, el porcentaje de eliminación del plaguicida tras una incubación de cuatro semanas era de un 29,1 %, un 78 %, un 38,8 % y un 14,4 % respectivamente. Sin embargo, en este estudio se observó que el crecimiento de la *Streptomyces* sp. no se veía significativamente afectado por la concentración de lindano. Por lo tanto, los autores indican que, puesto que el suelo contenía nutrientes orgánicos fácilmente disponibles que la bacteria puede preferir para su crecimiento, sería posible utilizar el plaguicida como fuente de sustrato secundaria (cometabolismo).

Los factores medioambientales más importantes que afectan a la tasa de degradación de microorganismos son el pH, la temperatura, el contenido de humedad del suelo y la disponibilidad de nutrientes, puesto que pueden impedir el crecimiento de los degradadores. El pH óptimo depende de la especie. Por ejemplo, se ha observado que la degradación de isómeros del HCH mediante *Streptomyces* sp. es mayor con un pH alrededor de 7 (Sinelli et al., 2016), mientras que en el caso de la *Pandoraea* sp., la tasa más alta de degradación se observó con un pH inicial 8 (Siddique et al., 2002). La temperatura óptima para la degradación microbiana del lindano parecen ser alrededor de 30 °C (Siddique et al., 2002, Benimelli et al., 2007, Sinelli et al. 2016). Sin embargo, Zheng et al. (2011) demostraron que algunas cepas de *Sphingobium* pueden degradar eficientemente el lindano y otros isómeros del HCH también con bajas temperaturas (4 °C).

La biorrehabilitación microbiana se ha utilizado para la rehabilitación de algunos lugares contaminados por lindano en la UE, por ejemplo en los Países Bajos (Bouwknegt, comentario personal) y Alemania (Richnow, comentario personal). Langenhoff et al. (2013) llevaron a cabo un experimento de campo utilizando una biopantalla *in situ* para mejorar la biodegradación anaeróbica de HCH en aguas subterráneas en un antiguo lugar de producción de HCH en los Países Bajos. Biopantalla significa una zona local en el suelo que tiene una elevada capacidad de retención y una mayor actividad de degradación microbiana. Cuando el agua subterránea fluye a través de la zona de la biopantalla, la concentración de contaminantes se reduce. En el lugar contaminado en los Países Bajos, las concentraciones típicas de HCH en las aguas subterráneas oscilaban entre 100 y 2 000 µg/l. Las aguas subterráneas contaminadas fluían hacia un canal de agua dulce y, por lo tanto, se necesitaban medidas para proteger el canal de la contaminación por HCH. Se observó que se estaba produciendo una biodegradación de HCH en el lugar, pero no era suficientemente eficiente para evitar que el HCH entrase en el canal.

Se creó la biopantalla inyectando en el suelo una solución de infiltración anaeróbica que contenía metanol como donante de electrones y nutrientes para crear una zona anaeróbica activada donde se potenció la biodegradación de isómeros del HCH, especialmente los más recalcitrantes: los isómeros beta y epsilon. Tras la degradación anaeróbica en la zona de la biopantalla, las aguas subterráneas que contenían los productos de transformación (principalmente benceno y clorobenceno) se extrajeron y se pasaron por una planta de tratamiento *in situ* ya existente donde se produjo la degradación aeróbica. Fueron necesarias condiciones aeróbicas para una degradación eficiente de los productos de transformación. La concentración de HCH en las aguas subterráneas se redujo de 600 µg/l hasta el límite de detección de concentraciones de isómeros de HCH individuales (0,01 µg/l) después de un año de funcionamiento. Además, los resultados del experimento indicaron que la tasa mejorada de biodegradación del HCH en aguas subterráneas aumentó la tasa de desorción del HCH del suelo al agua subterránea, dando lugar a una mayor degradación global del HCH.

Aunque se ha demostrado la eficiencia de la degradación microbiana del lindano y otros isómeros del HCH en varios estudios de laboratorio, el alcance y la tasa de degradación en condiciones de campo puede ser diferente (p. ej. Anupama y Paul 2007) debido a los distintos factores que afectan la actividad microbiana y la biodegradación (Phillips et al. 2005). Solo hay algunos estudios de campo sobre la rehabilitación microbiana de aguas y suelos contaminados por lindano y, por lo tanto, es necesario investigar más. Además, la mayoría de los estudios sobre biodegradación del suelo se han realizado con concentraciones relativamente bajas de HCH y no hay muchos estudios disponibles sobre la biodegradación de HCH con concentraciones más altas que resulten relevantes para muchos de los antiguos lugares de producción y vertederos de HCH y lindano (Phillips et al. 2005).

#### 3.4.2. Microbios de biosorción

Existen algunos informes sobre especies microbianas naturales, incluidas bacterias y hongos, que son capaces de eliminar el lindano por biosorción demostrando una baja capacidad de captación (Tsezos y Bell, 1989); Ju et al., 1997).

Se aisló una levadura perteneciente a la familia edáfica de las *Basidiomycota* de campos agrícolas de plantas de maíz para la eliminación de concentraciones medias-altas de lindano en soluciones acuosas (Salam y Das, 2013). La biomasa seca obtenida se molió en polvo fino utilizando una trituradora y se tamizó a un tamaño constante (100-125 µm). Este biosorbente fue designado como biomasa nativa. Entre las diversas sustancias químicas pretratadas probadas para las modificaciones de superficie, la *C. sorghi* tratada con ácido cítrico tenía una capacidad mejorada de captación de lindano entre tres y cuatro veces mayor que la biomasa de levadura nativa. Con un pH ácido se produce la protonación de los grupos funcionales superficiales en el biosorbente y, por lo tanto, aumenta la aproximación de la molécula de carga negativa del plaguicida a la superficie del biosorbente, dando lugar a una mayor biosorción. En el presente estudio, la capacidad de biosorción del lindano de la biomasa de levadura nativa alcanzaba su máximo con un pH 3. Por otro lado, el aumento del pH por encima de 3 provocaba una disminución de la captación de lindano.

**Cuadro 18. Capacidad de biosorción del lindano de distintos adsorbentes**

Sorbente	Capacidad <sub>max</sub>	Referencia
<i>R. arehizus</i>	3,622 mg/l	Tsezos y Bell, 1989
<i>E.coli</i> pretratada	4 mg/l	Ju et al., 1997
Carbón activo en polvo pretratado	1,5 mg/l	Hassan et al., 2009
Bagazo de cenizas volantes	2 µg/g	Gupta et al., 2002

Sorbente	Capacidad <sub>max</sub>	Referencia
Suelo de compost	48,42±1,8 mg/g	Krishna y Philip, 2008
Carbón activo granular	487±72 mg/g	Sotelo et al., 2002
Corteza de pino	3,17 mg/g	Ratola et al., 2003
<i>C. sorghi</i> pretratada	100 mg/g	Salam y Das, 2013

### 3.4.3. Fitorrehabilitación

La fitorrehabilitación consiste en cultivar plantas en una matriz contaminada para eliminar los contaminantes o facilitar su inmovilización (unión/contención) o degradación. Los métodos de fitorrehabilitación pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- Fitodegradación: uso de plantas para captar, almacenar y degradar contaminantes en su tejido.
- Rizodegradación: uso de plantas y microbios simbióticos del suelo para degradar contaminantes en la zona de la raíz.
- Fitoextracción: uso de plantas para absorber, trasladar y almacenar contaminantes tóxicos de una matriz edáfica en el tejido de sus raíces y brotes.
- Fitovolatilización: uso de la capacidad de las plantas para captar contaminantes de la matriz de crecimiento y posteriormente transformarlos y volatilizarlos en la atmósfera.
- Fitoestabilización: inmovilización o unión mediante plantas de los contaminantes a la matriz del suelo, reduciendo así su biodisponibilidad.
- Rizofiltración: uso de las raíces para captar y almacenar contaminantes de una matriz de crecimiento acuosa.

La selección adecuada de las especies de plantas desempeña un importante papel en la fitorrehabilitación. La especie seleccionada tiene que ser capaz de extraer o degradar los contaminantes que preocupan y poderse adaptar al clima local y las características del suelo. Entre otros aspectos que deberían tenerse en cuenta están la tasa de crecimiento de la planta, la profundidad de la estructura de la raíz de la planta, la facilidad de plantación y mantenimiento y si la planta es autóctona de la zona para evitar introducir especies alóctonas invasoras. Además, puede resultar beneficioso utilizar algunas modificaciones orgánicas e inorgánicas (por ejemplo, nutrientes, residuos agrícolas o industriales, biocarbón, ácidos húmicos y otros materiales inorgánicos) para mejorar la biodisponibilidad de los contaminantes y aumentar el crecimiento de las plantas y la actividad de los microorganismos (véase la revisión de Wyszniowska et al. 2016).

La mayor parte de la investigación sobre la fitorrehabilitación de COP se ha centrado en la fitodegradación o fitotransformación (Cherian y Oliveira, 2005; Aken et al., 2010) y solo una minoría ha utilizado la fitoextracción. La investigación de la fitoextracción de plaguicidas se ha centrado principalmente en cultivos de alimentos para extraer clordano y DDT (Whitfield et al., 2010), dieldrina y endrina (Otani y Seike, 2006), PCB (Ficko et al., 2010) y plantas medicinales (p. ej. *Withania somnifera*) conocidas por acumular lindano (Lunney et al., 2004) del suelo.

La rizodegradación, que se basa en la interacción entre las plantas y sus microbios simbióticos, se ha revelado como un método prometedor para descomponer numerosos contaminantes orgánicos del suelo. La densidad y la actividad microbianas en la rizoesfera (suelo que rodea las raíces de las plantas) mejoran con la presencia de raíces de plantas, puesto que estas liberan exudados (por ejemplo, azúcares, alcoholes y ácidos) que

proporcionan alimento y nutrientes a los microbios. También ayuda a la degradación microbiana la forma en que las plantas ahuecan el suelo y transportan agua a la zona. Además, los exudados de las raíces también pueden contener enzimas extracelulares, que pueden inducir directamente la degradación de los contaminantes (véase la revisión de Wiszniewska et al. 2016). Por otro lado, en varios estudios se ha demostrado que el crecimiento y la supervivencia de las plantas aumentan en presencia de microbios rizosféricos (revisión de Mendes et al., 2013). Por lo tanto, parece que el uso combinado de microbios y especies de plantas es una estrategia mejor que la rehabilitación mediante microbios o mediante plantas por sí sola.

Se ha informado de que la degradación del lindano y HCH es más rápida en la rizosfera en comparación con el suelo no plantado. Por ejemplo, Abhilash et al. (2011) demostraron los efectos beneficiosos del potencial de rizadorrehabilitación combinado de la *Staphylococcus cohnii* en presencia de la planta tolerante *Withania somnifera* que crece en suelos contaminados por lindano. La *Withania* se cultivó en suelo de jardín contaminado con 20 mg/kg de lindano e inoculado con 100 ml de cultivo microbiano al aire libre. La inoculación de microbios rizosféricos dio lugar a un crecimiento mejorado de las plantas de ensayo y una mayor disipación del lindano en el suelo (del 43 % al 76 %). En otro estudio de Abhilash et al. (2013) se demostró que la planta de biodiésel *Jatropha curcas* aumenta la disipación de lindano en suelo contaminado. Después de 300 días de cultivo, la concentración residual de lindano se redujo entre el 70 % y el 90 % dependiendo de la concentración inicial, mientras que en el caso de los experimentos sin vegetación, la tasa de disipación fue de entre el 40 % y el 50 %. Además, la mayor tasa de disipación en los experimentos con vegetación estaba positivamente correlacionada con su carga de biomasa microbiana rizosférica. Becerra-Castro et al. (2013) constataron que los sustratos donde se plantó la leguminosa *Cytisus striatus* y se inocularon las bacterias *Rhodococcus erythropolis* y *Sphingomonas* sp. mostraban una mayor disipación de isómeros del HCH que los sustratos donde solo se habían inoculado las dos bacterias. Böltner et al. (2008) también informaron de que el crecimiento de las bacterias *Sphingomonas* y la eliminación de lindano eran mayores en los suelos con raíces de maíz que en los suelos sin plantación.

También hay algunos estudios disponibles sobre la fitoextracción de lindano y HCH, aunque este método de rehabilitación se utiliza con mayor frecuencia para los contaminantes metálicos. Por ejemplo, Dubey et al. (2014) estudiaron la fitoextracción y la disipación de lindano con espinaca (*Spinacia oleracea* L) cultivada con distintas concentraciones de lindano (5, 10, 15 y 20 mg/kg). Las concentraciones de lindano en la raíz y la hoja de la espinaca cultivada con cuatro concentraciones diferentes llegaron a 3,5, 5,4, 7,6 y 12,3 mg/kg y 1,8, 2,2, 3 y 4,9 mg/kg respectivamente. El lindano residual en las cuatro concentraciones de ensayo se redujo al 81 %, el 76 %, el 69 % y el 61 % respectivamente. Además, había una diferencia significativa en la disipación de lindano en el suelo con vegetación y sin vegetación. En el estudio de Abhilash et al. (2013) también se midió la acumulación de lindano en *Jatropha curcas* cultivadas en suelos con concentraciones de lindano de 5, 10, 15 y 20 mg/kg. La concentración en la planta alcanzó hasta 5,42, 10,83, 15,95 y 20,85 µg/g de materia seca vegetal respectivamente. La acumulación máxima se produjo en las raíces, seguidas por el tallo y las hojas.

También existe información sobre nuevas patentes de plantas transgénicas, que pueden degradar HCH en 1,2,4-triclorobenceno (CSIC, 2016). Este uso potencial de plantas transgénicas que se liberarán en el medio ambiente requerirá una evaluación de riesgo ambiental antes de utilizarlas en el medio ambiente de conformidad con la legislación de la UE.

La fitorrehabilitación es un método ecológico y barato que puede tratar varios contaminantes. Sin embargo, una de las limitaciones de estos métodos es la duración relativamente larga del tratamiento debido a la tasa de crecimiento y el período vegetativo de las plantas. Además, por lo general solo funcionan eficazmente en aguas y suelos poco profundos y únicamente con concentraciones relativamente bajas de contaminantes que no sean tóxicos para las plantas. Se necesitan más estudios de campo de la fitorrehabilitación para evaluar mejor su eficacia en la eliminación de contaminantes del medio ambiente. También es necesario investigar más el uso de distintas modificaciones orgánicas e inorgánicas para mejorar la eficiencia de los métodos.

### 3.5. Actividades de reciclado

En diferentes plantas se han llevado a cabo actividades de reciclado de lindano (Vijgen 2006; Verber y Varbelo, 2013, Wycisk et al, 2013; IHOBE, 2016, Fernández et al. 2013). También se espera que se produzcan situaciones similares en varios lugares contaminados en distintos países. Se calcula que durante los 60 años de producción de lindano se produjeron y descartaron entre 4 y 7 millones de toneladas de residuos que contienen COP en todo el planeta (Vijgen et al. 2011). Por lo tanto, la evaluación de los lugares contaminados o la demolición de edificios a nivel mundial deben abordarse en el marco de aplicación del Convenio de Estocolmo, puesto que las experiencias previas en este ámbito pueden ser aplicables a otros lugares con plantas de producción contaminadas similares.

En el caso de la mayoría de tecnologías de destrucción de residuos no hay opción de convertir el HCH en HCl o NaCl. En concreto, el reciclado de HCH en HCl es un planteamiento relevante que debe considerarse. Se aplica a varias incineradoras de residuos industriales peligrosos y tecnologías de dechloración catalizada por bases, reducción química en fase gaseosa y plasma. Esta posibilidad debería considerarse y seguir investigándose. El reciclado del HCH (70 % de contenido en cloro) podría ser un negocio rentable y sostenible para la industria, especialmente porque existen cantidades considerables de residuos de HCH a escala mundial. Alrededor de 40 procesos de producción generan HCl como subproducto (técnico)<sup>7</sup>.

La industria química puede poner una parte de su capacidad a disposición del HCH en la UE. Evidentemente, debe realizarse un análisis económico, pero pueden citarse dos empresas como ejemplos de este planteamiento:

- AKZO ha estado convirtiendo contaminantes halogenados en HCl en los Países Bajos;
- Indaver, de Bélgica, tiene intención de abrir una nueva fábrica «IndaChlor» en Loon-Plage/Dunkerque para reciclar residuos de producción y productos que contienen cloro residual<sup>8</sup>. La nueva planta tendrá una capacidad de 40 000 toneladas al año. En Dunkerque (Francia) se está construyendo otra planta.

<sup>7</sup> [https://www.akzonobel.com/ic/products/hydrochloric\\_acid/](https://www.akzonobel.com/ic/products/hydrochloric_acid/)

<sup>8</sup> <http://www.dunkerque-port.fr/en/press/news/2016-05-26-setting-up-of-a-factory-from-indaver-to-dunkirk-en-45063.html>

## 4. MEJORES PRÁCTICAS

### PRINCIPALES CONCLUSIONES

- Los enfoques multidisciplinares y colaborativos dan lugar a mejores herramientas de gestión y toma de decisiones.
- Los lugares donde se ha depositado lindano requerirán actividades continuas de vigilancia a largo plazo, bombeo y tratamiento de lixiviados y mantenimiento durante décadas. La fracción de líquidos densos en fase no acuosa también debería considerarse como extremo específico que debe vigilarse.
- Sobre la base de la experiencia actual, las existencias y los vertederos de residuos de HCH pueden considerarse fuentes de contaminación del suelo y el agua superficial y subterránea debido a la lixiviación y diseminación de los contaminantes. Las prácticas de destrucción de COP en los residuos contaminados y rehabilitación de emplazamientos deben considerarse mejores prácticas en lugar del almacenamiento en vertederos.
- La contaminación por lindano (clasificado como COP) debería considerarse un problema no solo a nivel europeo, sino también mundial. Las experiencias relacionadas con la evaluación y rehabilitación de lugares contaminados por lindano (técnicas de demolición de edificios, restauración de lugares contaminados, desarrollo de orientaciones/herramientas) pueden ser aplicables a otros lugares con plantas de producción contaminadas en distintos países. Esta es una de las principales razones por las que estas cuestiones deberían abordarse con un enfoque mundial en el marco del Convenio de Estocolmo sobre COP.
- De acuerdo con las consideraciones y requisitos del Convenio de Estocolmo relacionados con las soluciones para los residuos de HCH, se indica que: «se eliminen de un modo tal que el contenido del contaminante orgánico persistente se destruya o se transforme en forma irreversible de manera que no presenten las características de contaminante orgánico persistente o, de no ser así, se eliminen en forma ambientalmente racional cuando la destrucción o la transformación irreversible no represente la opción preferible desde el punto de vista del medio ambiente o su contenido de contaminante orgánico persistente sea bajo». Los lugares con residuos de HCH son normalmente megaemplazamientos con enormes costes económicos en términos de gestión y restauración. Debido a estas desventajas, solo se han encontrado soluciones idóneas para los residuos de HCH en algunos casos e incluso entonces a menudo no cumplen la mayoría de los requisitos del Convenio de Estocolmo. Seleccionar la «opción de encapsulación» más barata parecería que infringe los requisitos del Convenio.
- Además, los problemas de numerosos lugares con residuos de HCH se han dejado desatendidos durante más de 30 o 40 años. Por lo tanto, el alcance original del problema y los costes conexos de limpieza de vertederos adicionales han crecido debido a la lixiviación y la diseminación de contaminantes (véase el caso de Aragón, pero también el caso eslovaco, donde ahora están muy contaminados varios millones de metros cúbicos de aguas subterráneas). La inacción debería considerarse la peor práctica, puesto que ocasiona problemas medioambientales y el aumento de los costes económicos de la solución.

#### **4.1. Transparencia: Construcción del vertedero de seguridad de Argalarío en el País Vasco (España)**

En 1995, el Gobierno del País Vasco decidió construir en Argalarío (Barakaldo) un vertedero de seguridad para almacenar los residuos de HCH de más de 40 lugares contaminados. Esta decisión suscitó una enorme indignación pública entre los vecinos, ecologistas y varios partidos políticos del ayuntamiento (Barakaldo Digital, 2011).

Las dos fábricas de producción de lindano se demolieron selectivamente. Los residuos de esta demolición que estaba contaminados por HCH se almacenaron en un depósito construido para la contención de tierras contaminadas por HCH (la celda de seguridad de Argalarío). Esto también se hizo en los suelos contaminados donde se situaban ambas fábricas. La construcción de la celda de seguridad se planificó de acuerdo con las mejores tecnologías disponibles y se sometió a consulta pública previa.

Para facilitar toda la información sobre el proyecto, tanto durante la construcción como durante el mantenimiento, se creó un «comité de vigilancia» con la participación de representantes del municipio de Barakaldo, grupos ecologistas locales y asociaciones de vecinos. También participaron en el comité representantes y técnicos de las autoridades de salud pública y medio ambiente del País Vasco. Se celebraron reuniones periódicas para informar sobre los avances en la construcción, los resultados de las actividades de seguimiento y otra información solicitada antes de cada reunión.

En uno de los edificios situados en el vertedero se estableció un centro de educación medioambiental. Este centro respondía a las solicitudes de información de todo tipo de organizaciones, como grupos de investigación, universidades, empresas, estudiantes de secundaria, asociaciones de mujeres, grupos ecologistas y administraciones públicas. La página web de la IHOBE también publicó los datos de los controles medioambientales llevados a cabo durante la construcción del vertedero. Se respondieron personalmente las demandas y dudas planteadas por los vecinos respecto a la proximidad del vertedero a sus viviendas. En paralelo, se mantuvo informados a todos los departamentos competentes de las distintas administraciones durante cada una de las fases del proyecto (Escolar, 2015; IHOBE, 2016; Barakaldo Digital, 2011).

#### **4.2. Participación de las partes interesadas y Centro Técnico de Coordinación (Sabiñánigo)**

Para garantizar la coordinación de los distintos grupos que participan en la búsqueda de soluciones para la gestión de los residuos de HCH y la descontaminación de lugares contaminados en la zona de Sabiñánigo (véase la sección 2.14), el Gobierno de Aragón decidió en 2015 crear tres comités distintos de partes interesadas:

##### **Comité Institucional**

Su principal cometido consiste en facilitar la coordinación entre las distintas administraciones e instituciones involucradas en la gestión de residuos de HCH, lugares contaminados por HCH y sus consecuencias. Está compuesto por representantes de los municipios de la zona afectada, la Confederación Hidrográfica del Ebro, la Comunidad de Regantes del Alto Aragón, el Servicio de Protección de la Naturaleza de la Guardia Civil y el Gobierno de Aragón.

### Comité Social

Su objetivo es posibilitar el flujo de comunicación y la transparencia en la gestión de residuos de HCH de una manera ordenada. Está compuesto por ONG, organizaciones empresariales, sindicatos y partidos políticos. Por ejemplo, tras la constitución del comité, todos los datos sobre muestreo de aguas se publicaron en la página web del departamento de medio ambiente de Aragón, lo que permitió a todas las partes interesadas tener información en tiempo real sobre la calidad química del agua (Aragón Hoy, 2016a; Aragón Hoy, 2016b; GA, 2016b).

### Comité Científico

Su principal tarea consiste en asesorar al Gobierno de Aragón sobre las decisiones que han de tomarse respecto a la gestión de los residuos de HCH y los lugares contaminados. Este comité debe ayudar a definir el plan de trabajo de descontaminación del gobierno y a desarrollar un foro para atender las necesidades de I+D+I. Está compuesto por un grupo interdisciplinar de siete científicos de prestigio nacional e internacional de los ámbitos de hidrogeología, química, edafología, ingeniería química y medicina.

## **4.3. Participación de partes interesadas: PNA de España**

Esta sección se refiere a la elaboración del Plan Nacional de Aplicación (PNA) de España en virtud de las obligaciones establecidas en el Reglamento n.º 850/2004 como ejemplo de proceso colaborativo multidisciplinar (ilustración 3).

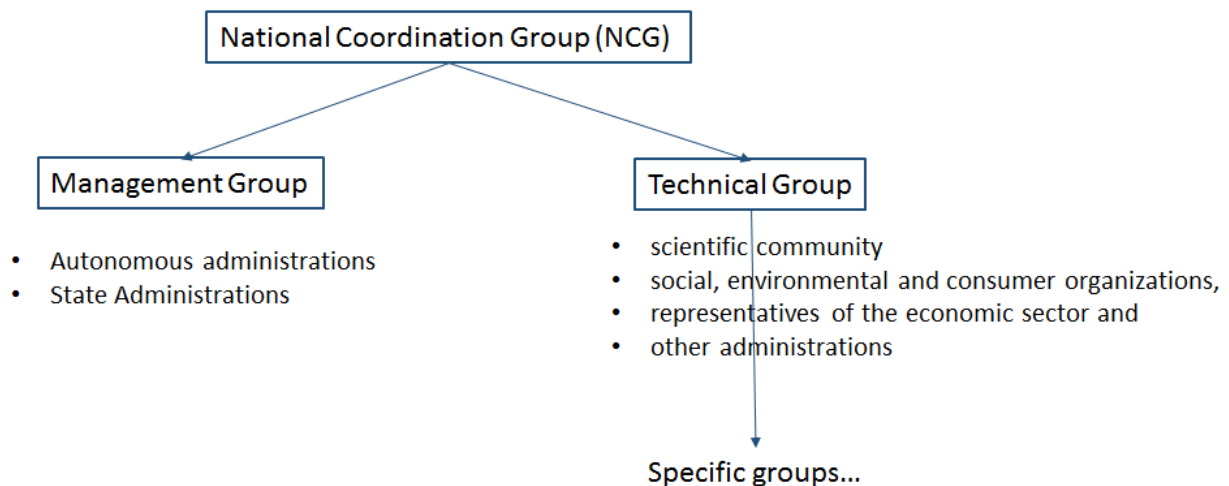
El proceso de elaboración de este Plan Nacional de Acción se inició en enero de 2005 con la celebración de la primera reunión general, en la que estuvieron representados todos los potenciales interesados para crear un grupo específico que dirigiese este proceso. El 15 de abril de 2005 tuvo lugar la primera reunión del «Grupo Nacional de Coordinación» (GNC) sobre COP en la que se aprobó su constitución, estructura y grupos que lo integran, reglas de procedimiento, programa de trabajo y el cronograma de reuniones hasta 2006.

El GNC está compuesto por un Grupo Director (unidad ejecutiva formada por las Administraciones Autonómica y Estatal) y un Grupo Técnico (formado por todos los actores interesados: la comunidad científica, las organizaciones sociales, ambientales y de consumidores, representantes del sector económico y de las Administraciones). Este Grupo Técnico incluye seis Grupos de Trabajo específicos:

1. Inventarios
2. Sustitución
3. Mejores Técnicas Disponibles / Mejores Prácticas Ambientales (MTD/MPA)
4. Vigilancia de niveles de COP
5. Información y Sensibilización
6. Coordinación, Cooperación y Asuntos Financieros

El PNA es un plan consensuado en el que han participado unos 200 expertos/as de todos los sectores implicados, cuyas iniciativas o comentarios han sido considerados desde el inicio y a lo largo de todo su proceso de elaboración.

### Ilustración 3. Representación esquemática del Grupo Nacional de Coordinación sobre COP



Este Grupo Técnico sobre COP sigue en activo; por ejemplo, trabajó en la actualización del PNA de España en 2013. En abril de 2016 se celebró la última reunión del Grupo Técnico. El orden del día incluía un tema que aparecía en el primer PNA: la contaminación por lindano. Durante esta reunión se presentaron tres perspectivas de la contaminación por lindano: de la Comunidad Autónoma de Aragón, de una empresa pública (EMGRISA) que está desarrollando uno de los proyectos en la zona afectada y de ONG ecologistas (Ecologistas en Acción).

#### 4.4. Descontaminación de fábricas: Hamburg-Moorfleet

Verber y Varbelow (2013) describieron las tecnologías de desmantelamiento y demolición, el aseguramiento del lugar y la evaluación ambiental de una planta de producción de lindano en Hamburgo. Debido a la baja eficiencia de la producción, en la mayoría de las plantas de producción se reciclaron residuos de HCH, generando desechos con elevados niveles de dibenzodioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCDD / PCDF), entre otros compuestos organoclorados.

El principal enfoque consiste en las fases de a) exploración, b) rehabilitación y c) contención. Estas actividades comenzaron en 1984 y finalizaron en 1989 y se acordó una fase de evaluación a diez años.

##### A. Exploración

###### a.1. Datos de vigilancia ambiental:

- o Se analizaron los PCDD/PCDF y los compuestos organohalogenados extraíbles y muestras de aguas subterráneas y suelo. Se utilizaron protocolos normalizados;
- o se realizaron 196 perforaciones en el lugar de producción y alrededor de él;
- o se llevaron a cabo 21 000 mediciones con análisis individuales de los principales parámetros de contaminantes de muestras de diferentes profundidades;
- o Se calculó la cantidad total del inventario de organoclorados para el suelo y el agua subterránea, incluidos los líquidos densos en fase no acuosa, debajo del lugar de producción; y
- o también se modelizó el gradiente de flujo de líquido denso en fase no acuosa de la pluma de contaminación.

a.2. También se hizo un seguimiento *in situ* de los contaminantes para los trabajadores.

## **B. Rehabilitación**

### **b.1. Rehabilitación medioambiental**

- o A través de la limpieza de suelo muy contaminado mediante excavación e incineración *in situ* de 25 000 m<sup>3</sup> de suelo muy contaminado y 10 000 m<sup>3</sup> de las partes de los edificios más contaminadas. Sin embargo, el método de incineración *in situ* falló debido a los problemas de corrosión y otras dificultades técnicas y se interrumpió después de varios meses.
- o El agua subterránea se bombeó, se limpió con carbón activo y se bombeó otra vez al suelo, que se había mejorado con oxígeno y nutrientes para aumentar la biodegradación de contaminantes mediante microorganismos ya presentes en el agua.
- o La biorrehabilitación *in-situ*, que había mostrado un buen rendimiento de degradación en laboratorio (Zetter, 1996), no mostró los resultados esperados en campo y, por lo tanto, se interrumpió.

En la primera fase de rehabilitación se gastaron aproximadamente 75 millones EUR sin efectos significativos.

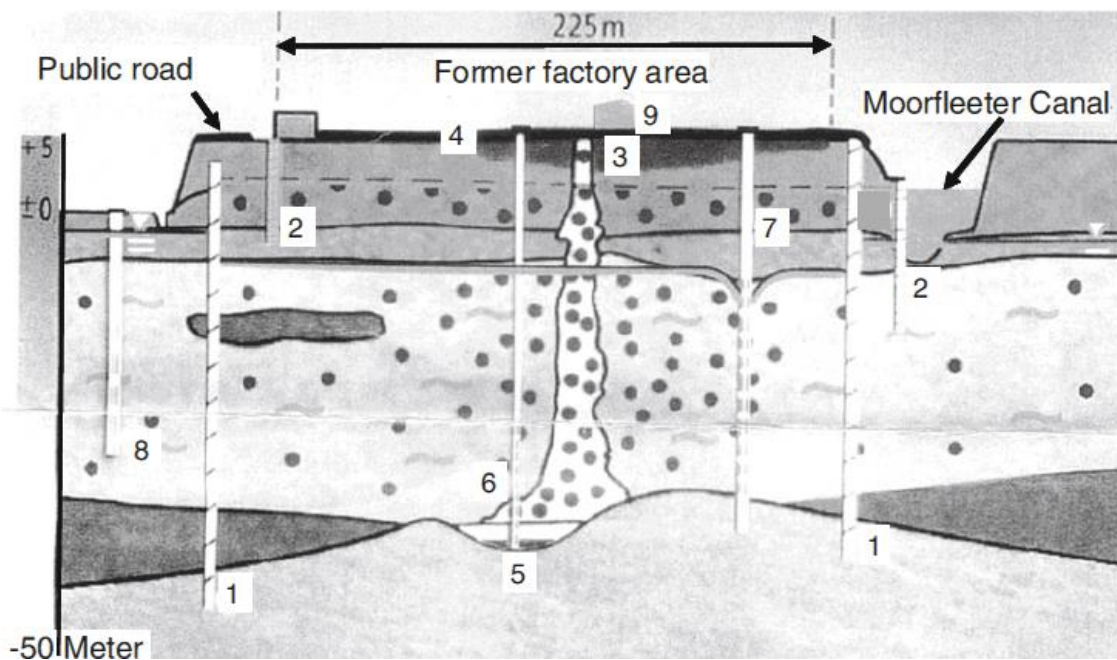
### **b.2. Rehabilitación de los edificios**

- o Entre los contaminantes que debían repararse estaban los PCDD/PCDF que se generaron involuntariamente durante la síntesis de 2,4,5-T derivada de las actividades de reciclado de HCH.
- o Se desarrollaron técnicas especiales de demolición para evitar la liberación de polvo y contaminantes, reduciendo los riesgos y la exposición del personal. Se aplicó una estrategia de demolición escalonada:
  - o Los edificios muy contaminados se demolieron bajo una cubierta de protección total y las operaciones de descomposición se realizaron bajo una fina película de agua pulverizada. El agua pulverizada se muestreó y limpió con carbón activo.
  - o Los edificios con contaminación únicamente superficial se demolieron después de eliminar los materiales contaminados (yeso, ladrillo, pintura...).
  - o Los edificios sin contaminación específica se desempolvaron con aspiradores industriales.
- o Se creó una hoja de datos para cada edificio con el fin de registrar la documentación completa de contaminantes.

## **C. Contención**

### **c.1. Estrategia de aseguramiento del lugar (ilustración 4):**

- o Construcción de un muro de contención que cubría todo el área de producción hasta una profundidad de aproximadamente 46 m, llegando a 2 m en la capa de agua y solvente/líquido denso en fase acuosa.
- o Rehabilitación de la pluma de contaminación fuera del área: se desarrolló un concepto de bombeo y tratamiento para establecer un gradiente de presión para el flujo de agua hacia el lugar.
- o El agua subterránea procedente de la pluma contaminada que había migrado fuera de la zona de contención se bombeó para reducir la contaminación.
- o Toda la zona se recubrió con hormigón asfáltico tras la demolición de los edificios.

**Ilustración 4. Esquema de las medidas de aseguramiento en el subsuelo**

**Fuente:** Weber y Varbelow, 2013; 1 Muros de contención, 2 mamparo, 3 capa edáfica muy contaminada, 4 recubrimiento superficial de asfalto, 5 líquido denso en fase no acuosa, 6 pozo de líquido denso en fase no acuosa, 7 pozo para la disminución del nivel freático, 8 pozo para la purificación de aguas subterráneas fuera de la contención, 9 tratamiento de las aguas subterráneas

El coste total de las actividades de rehabilitación y contención solo en el lugar de producción ascendieron a alrededor de 110 millones EUR. El coste del bombeo y tratamiento del lugar fue de aproximadamente 1 millón EUR al año.

**Situación actual (2013)**

El muro de aseguramiento sigue funcionando plenamente. La contaminación en la pluma fuera del área se ha reducido como resultado de los pozos de bombeo fuera de la zona de construcción. De las cerca de 830 toneladas de organoclorados que están bajo tierra, se han bombeado y destruido entre 10 y 30 toneladas.

Las actividades de bombeo y tratamiento y vigilancia siguen en curso y tendrán que continuar en el futuro. No se ha fijado un límite de tiempo específico.

**4.5. Vigilancia de aguas subterráneas: Bitterfeld-Wolfen**

Wycisk et al. (2013) reflejan una metodología integrada para evaluar la situación actual de la contaminación de aguas subterráneas a gran escala en el megaemplazamiento de Bitterfeld/Wolfen. La contaminación de las aguas subterráneas regionales de Bitterfeld/Wolfen ha estado influida por varios efectos medioambientales, entre ellos varios procesos de producción química, los múltiples vertederos de residuos resultantes y la minería extensiva de lignito a cielo abierto durante más de un siglo. La situación hidroquímica se caracteriza por una compleja mezcla de compuestos orgánicos (hidrocarburos alifáticos y aromáticos clorados), que comprende una gran diversidad de sustancias orgánicas individuales, así como una alta variabilidad regional de estos contaminantes. Los patrones de distribución regional explican las diferencias entre los niveles de presencia de HCH en los dos sistemas de acuíferos locales.

El enfoque para evaluar la situación consiste en una metodología integrada que incluye: a) múltiples campañas de muestreo de campo, b) técnicas geoestadísticas para la regionalización de datos analíticos a fin de crear un modelo conceptual de patrones de distribución de contaminantes en aguas superficiales y aguas subterráneas regionales y c) la verificación de la concepción del modelo de distribución de contaminantes mediante la modelización 3D de las geometrías de acuíferos.

#### **A. Campañas de muestreo de campo**

Puesto que los vertederos industriales no están completamente sellados, las aguas subterráneas se vieron/ven considerablemente afectadas por el inventario químico de hidrocarburos alifáticos y aromáticos clorados de los depósitos y antiguas emisiones de los procesos de producción. La vigilancia regional a largo plazo de aguas subterráneas tiene en cuenta aproximadamente 180 sustancias orgánicas individuales con cerca de 60 contaminantes prioritarios.

Se han analizado datos regionales de vigilancia de las aguas subterráneas de hace aproximadamente diez años, que contienen aproximadamente 3 500 muestras y hasta 180 parámetros orgánicos individuales de casi 250 pozos de observación. Durante un período de dieciocho meses se realizaron mediciones de escurrimiento y se extrajeron muestras de agua cada dos semanas. Los datos de vigilancia a largo plazo ofrecen mucha más información sobre las características de contaminación que un único estudio y eliminan la sobrestimación y subestimación del sistema contaminado.

Para caracterizar la dimensión espacial de la contaminación de las aguas subterráneas regionales y señalar determinadas sustancias que deberían investigarse con mayor detalle, los compuestos orgánicos se clasificaron según su potencial de riesgo. Asimismo, se tuvo en cuenta la posible removilización de sedimentos fluviales de una zona colindante de 60 km<sup>2</sup>.

#### **B. Modelo conceptual para la regionalización de datos analíticos**

El vertido prolongado de contaminantes de HCH tuvo su origen en el depósito de suelos contaminados en el acuífero superior (Cuaternario) e inferior (Terciario) y se propagó debido a la dinámica regional dominante de flujo de aguas subterráneas.

Así, la emisión prolongada de contaminantes de depósitos y zonas de producción locales se vio influida por varios cambios en el sistema hidráulico relacionados con la minería y formó los patrones de distribución de contaminantes que se observan actualmente con toda su complejidad. Las múltiples fuentes de HCH dieron lugar a patrones de distribución muy complejos a escala regional que no son comparables a geometrías de pluma de una sola fuente. Por lo tanto, la localización clara de las fuentes es complicada y comprende varias hipótesis probables.

La clasificación mediante el SIG de la regionalización del alfa-HCH permite realizar una estimación cuantitativa de la zona global afectada de la región. Según el análisis del acuífero del Cuaternario, está afectada un área total de alrededor de 38 km<sup>2</sup>.

Se ha utilizado el sistema de software GSI3D© (antiguo Geo-Object) para generar un modelo geológico 3D de alta resolución de 45 km<sup>2</sup> de toda la región industrial de Bitterfeld/Wolfen y el área circundante aguas abajo. Este modelo geométrico se ha incorporado posteriormente a un modelo numérico de aguas subterráneas. Utilizando el modelo de elementos finitos FEFLOW© para simular el flujo de aguas subterráneas y los procesos de transporte de solutos, el alcance de todo el modelo regional de flujo/transporte llega a 330 km<sup>2</sup> y se estructura en trece subformaciones hidrogeológicas individuales.

### Modelización 3D de geometrías de acuíferos

Estos datos, pretratados y almacenados en el sistema SIG, se aplicaron en el modelo numérico 3D para representar el flujo regional y la dinámica de transporte de solutos antes y después de las inundaciones que se produjeron en agosto de 2002. El éxito del proceso de calibración del modelo garantizó una simulación representativa de la dinámica piezométrica local.

Se ha establecido un modelo numérico de elementos finitos que tiene los siguientes objetivos:

1. Una generación transitoria de líneas de trayecto para identificar las posibles vías de contaminación que tienen su origen en las zonas de producción y la identificación de pozos de observación o masas de aguas superficiales contaminados después del fin de la minería activa de lignito; y
2. cálculos predictivos de la situación hidráulica, que ha cambiado desde entonces, durante y después de las inundaciones del lago Goitzsche en agosto de 2002.

De esta forma, se ha llevado a cabo con éxito un proceso de integración plena de los datos geológicos de campo, la geología 3D de alta resolución, la modelización del flujo y el transporte y las hipótesis futuras de destino de los contaminantes.

Vijgen (2006) y Vijgen et al. (2010) afirman, con respecto a los numerosos vertidos de residuos de HCH existentes en todo el mundo, que, para aplicar con éxito el Convenio de Estocolmo, es necesario investigar detalladamente los depósitos de residuos de HCH/COP y sus emisiones de contaminantes para gestionar de forma adecuada los efectos en la salud humana y la integridad de los ecosistemas.

### **4.6. Identificación de lugares contaminados por HCH: Twente, Países Bajos**

En la ciudad de Twente (Países Bajos) se produjo HCH entre 1948 y 1952. En los años 70, las autoridades descubrieron, por primera vez, lugares de vertido de HCH fuera de las instalaciones de las empresas, a hasta 20 km de distancia de la fábrica. Con la entrada en vigor de la Ley Provisional sobre Limpieza del Suelo en 1983, se llevó a cabo la identificación sistemática de los suelos contaminados por HCH.

Se utilizaron las siguientes vías para identificar estos lugares contaminados:

- Se hizo un llamamiento en la prensa local para preguntar por personas que tuvieran conocimiento del transporte y depósito de residuos o suelos de la empresa en la zona.
- Conductores de las empresas de transporte que habían tenido relación con el fabricante de HCH, AKZO, reaccionaron al llamamiento y fueron entrevistados.
- Se investigaron los archivos de los propietarios de los terrenos de las empresas, así como los archivos sobre licencias medioambientales.
- Se tomaron fotografías aéreas, primero para intentar localizar el lugar contaminado, y segundo para buscar sitios con desviaciones en el perfil de suelo, como rellenos de arena o arcilla, actividades de excavación, etc.
- Se llevó a cabo una verificación aproximada de campo y análisis químicos de dos muestras mixtas por hectárea.
- Se realizó un control de calidad de la leche de las vacas, puesto que muchos lugares se utilizaron como pasto.

En total, se sospechaba que 132 lugares estaban contaminados por HCH. Tras realizar una verificación aproximada de campo y un análisis químico, se ha demostrado que 62 lugares están limpios. Después de llevar a cabo nuevas investigaciones, también se ha demostrado que otros 28 lugares están limpios. Por último, se identificaron 42 lugares contaminados (Grinwis y de Jong,1992).

## 5. INFORMACIÓN SOBRE EL LINDANO

### PRINCIPALES CONCLUSIONES

- La mayoría de los países proporcionan información relativa a las sustancias químicas peligrosas y los COP, pero no siempre se incluye información sobre el lindano.
- Las regiones con megaemplazamientos contaminados por lindano, normalmente miles de toneladas de suelos y aguas contaminados, suelen publicar páginas web con información relativa a la situación y los métodos de rehabilitación puestos en práctica. Este tipo de información suele ser resultado de la presión ciudadana.

Esta sección tiene como objetivo evaluar la transparencia y el nivel de información proporcionada a los ciudadanos. La información de esta sección se ha compilado a partir de las respuestas facilitadas en los cuestionarios. Todos los cuestionarios recibidos indicaron la existencia de una página web oficial que ofrece información sobre sustancias químicas peligrosas, pero la información sobre el problema del lindano no estaba tan clara. Se encontró información sobre el lindano específicamente en lugares en los que se han identificado emplazamientos contaminados por HCH, dando lugar a una gran preocupación entre la población.

**Cuadro 19. Información de distintas autoridades y organizaciones para los ciudadanos**

Temas	Estados miembros								Organizaciones	
	CZ	DE	DK*	ES*	HU	LV	RO	NL*	GP	BC
Riesgos sanitarios o medioambientales	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	-	Sí	Sí	Sí	-
Lugares contaminados	Sí	Sí	Sí	Sí	-	Sí	-	Sí	Sí	Sí
Exposición a través de artículos o alimentos u otras fuentes	Sí	Sí	Sí	Sí	-	-	-	Sí	Sí	-
Datos de vigilancia medioambiental y humana	Sí	Sí	Sí	-	-	Sí	-	Sí	Sí	Sí
Recomendaciones para reducir la exposición	Sí	Sí	Sí	-	Sí	-	Sí	Sí	Sí	Sí
Normativas y políticas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Enlaces a otras páginas web	Sí	Sí	Sí	Sí	-	Sí	-	Sí	Sí	Sí

- **No específicamente sobre el lindano;**

**Cuadro 20. Páginas web con información sobre sustancias químicas**

Páginas web de Estados miembros y organizaciones	
República Checa	<a href="http://www.recetox.muni.cz/nc/index-en.php">http://www.recetox.muni.cz/nc/index-en.php</a> <a href="http://www.genasis.cz/index-en.php">http://www.genasis.cz/index-en.php</a> <a href="http://www.irz.cz">http://www.irz.cz</a> <a href="http://arnika.org/lindan-gama-hch">http://arnika.org/lindan-gama-hch</a> (NNO)
Alemania	<p>En principio hay información disponible sobre contaminación por HCH en numerosas páginas web diferentes.</p> <p>No existe una página web específica que resuma toda la información sobre el HCH.</p>
Dinamarca	<p>Puede encontrarse información sobre sustancias químicas peligrosas en diferentes páginas web. No existe una página web específica sobre el lindano.</p>
España	<p>Puede encontrarse información sobre sustancias químicas peligrosas en diferentes páginas web. No existe una página web específica sobre el lindano.</p> <p><a href="http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/">http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/</a>  <a href="http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/contaminantes-organicos-persistentes-cop/">http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/contaminantes-organicos-persistentes-cop/</a></p>
Hungría	<p><a href="http://okbi.hu/page.php?trid=6">http://okbi.hu/page.php?trid=6;</a>  <a href="http://www.greenpeace.org/hungary/hu/">http://www.greenpeace.org/hungary/hu/</a>  <a href="http://reflexegyesulet.hu/index.php/nulla-hulladek">http://reflexegyesulet.hu/index.php/nulla-hulladek</a>  <a href="http://www.ecotox.hu/ecotox2/index.php">http://www.ecotox.hu/ecotox2/index.php</a></p>
Letonia	<p>La información se encuentra en la página web del Ministerio de Medio Ambiente, Geología y Meteorología de Letonia:  <a href="http://www.lvqmc.lv/lapas/vide/vide?id=1134&amp;nid=320">http://www.lvqmc.lv/lapas/vide/vide?id=1134&amp;nid=320</a></p>
Rumanía	<p>Página web del Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Bosques:  <a href="http://www.mmediu.ro/categorie/pop-s/58">http://www.mmediu.ro/categorie/pop-s/58</a>          Página web de la Agencia Nacional de Protección del Medio Ambiente:  <a href="http://www.anpm.ro/poluanti-organici-persistenti-pops-">http://www.anpm.ro/poluanti-organici-persistenti-pops-</a></p>
Países Bajos	<p>No específicamente sobre lindano, pero sí sobre sustancias químicas peligrosas:  <a href="http://www.rivm.nl/en/">http://www.rivm.nl/en/</a>  <a href="https://www.government.nl/topics/hazardous-substances">https://www.government.nl/topics/hazardous-substances</a>  <a href="https://www.government.nl/ministries/ministry-of-infrastructure-and-theenvironment">https://www.government.nl/ministries/ministry-of-infrastructure-and-theenvironment</a></p>
Greenpeace	<p>Greenpeace informa a menudo a la ciudadanía: <a href="http://www.greenpeace.hu">www.greenpeace.hu</a>, <a href="http://greenpeace.blog.hu">greenpeace.blog.hu</a> también un blog <a href="http://vegyi.blog.hu">vegyi.blog.hu</a> y varios grupos de Facebook</p>
Suiza	<p><a href="http://www.bafu.admin.ch">www.bafu.admin.ch</a></p>

Páginas web de Estados miembros y organizaciones	
Gobierno del País Vasco	Se facilita información sobre el lindano: Plan de suelos contaminados del País Vasco 2007-2012 <a href="http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/r49-orokorra/es/contenidos/plan/suelos_contaminados/es_plan/adjuntos/plan_suelos_contaminados.pdf">http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/r49-orokorra/es/contenidos/plan/suelos_contaminados/es_plan/adjuntos/plan_suelos_contaminados.pdf</a>
	Información sobre la construcción de celdas de seguridad: <a href="http://www.ihobe.eus/Publicaciones/Ficha.aspx?IdMenu=750e07f4-11a4-40da-840c-0590b91bc032&amp;Cod=ef1f5a8a-683d-4a18-84c5-84aa9cf5fe3d&amp;Idioma=es-ES&amp;IdGrupo=PUB&amp;IdAno=2002&amp;IdTitulo=001">http://www.ihobe.eus/Publicaciones/Ficha.aspx?IdMenu=750e07f4-11a4-40da-840c-0590b91bc032&amp;Cod=ef1f5a8a-683d-4a18-84c5-84aa9cf5fe3d&amp;Idioma=es-ES&amp;IdGrupo=PUB&amp;IdAno=2002&amp;IdTitulo=001</a>
	Información sobre la evolución de las concentraciones de HCH en el embalse de Oiola: <a href="http://www.uragentzia.euskadi.eus/informe_estudio/evolucion-de-las-concentraciones-de-hexaclorociclohexano-en-el-embalse-oiola-valle-de-trapaga-trapaqaran/u81-0003771/es/">http://www.uragentzia.euskadi.eus/informe_estudio/evolucion-de-las-concentraciones-de-hexaclorociclohexano-en-el-embalse-oiola-valle-de-trapaga-trapaqaran/u81-0003771/es/</a>
	Información sobre la evolución del estado químico en el río Zadorra (red de vigilancia del País Vasco): <a href="http://www.uragentzia.euskadi.eus/informacion/ultimos-informes/u81-0003342/es/">http://www.uragentzia.euskadi.eus/informacion/ultimos-informes/u81-0003342/es/</a>
	Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental: <a href="http://www.uragentzia.euskadi.eus/informacion/plan-hidrologico-de-la-demarcacion-hidrografica-del-cantabrico-oriental-2015-2021/u81-0003333/es/">http://www.uragentzia.euskadi.eus/informacion/plan-hidrologico-de-la-demarcacion-hidrografica-del-cantabrico-oriental-2015-2021/u81-0003333/es/</a>
Gobierno de Aragón	Toda la información relacionada con la contaminación por lindano se publica en la página web <a href="http://www.aragon.es/lindano">http://www.aragon.es/lindano</a> .
Forter, M.	Científico independiente para municipios, residentes y organizaciones medioambientales Suiza (y Francia) <a href="http://www.martinforter.ch">http://www.martinforter.ch</a>
Asociación Internacional de HCH y Plaguicidas (IHPA)	En la biblioteca de la IHPA, en <a href="http://www.ihpa.info/resources/library">http://www.ihpa.info/resources/library</a> , puede encontrarse toda la información desde 1993 de publicaciones sobre cuestiones relacionadas con el lindano y el HCH en los once libros del Foro sobre HCH y Plaguicidas publicados de los doce Foros (el primer y el segundo Foro se han compilado en un único libro), que pueden descargarse de forma gratuita Además, en la biblioteca hay varias versiones de las fichas informativas sobre tecnologías para COP

## 6. REFERENCIAS

- Abhilash, P.C., Srivastava, S., Srivastava, P., Singh, B., Jafri, A. y Singh, N. (2011). «Influence of rhizospheric microbial inoculation and tolerant plant species on the rhizoremediation of lindane». *Environmental and Experimental Botany*, 74:127–130.
- Abhilash, P.C., Singh, B., Srivastava, P., Schaeffer, A. y Singh, N. (2013). «Remediation of lindane by *Jatropha curcas* L: Utilization of multipurpose species for rhizoremediation». *Biomass and Bioenergy*, 51: 189-193.
- Agassi, E., Krijger, P., Vis, P. (1998). «Thermal desorption, a definite solution for the elimination of HCH». *Procedimientos del quinto Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas*, Bilbao, España, junio de 1998, IHOBE, pp. 145-151.
- AI (Ayuntamiento de Iguzquiza), (2016). «Residuos de lindano». <http://www.ayuntamientodeiguzquiza.es/index.php/actualidad/noticias/item/235-residuos-de-lindano>. Consultado el 15 de octubre de 2016.
- Aken, B.V., Correa, P.A., Schnoor, J.L. (2010). «Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: new trends and promises». *Environ. Sci. Technol.* 2010;44:2767-2776.
- AMAP (2002). «Arctic Pollution-Human Health». Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo 2002. <http://www.amap.no/documents/doc/arctic-pollution-2002/69>
- Amarante, D. (2000). «Applying In Situ Chemical Oxidation, several oxidizers provide an effective first step in groundwater and soil remediation». *Pollution Engineering*. Cahners Business Information. *Pollution Engineering*, 32 (2): 40-42.
- Anitescu, G. y Tavlarides, L.L. (2005). «Oxidation of biphenyl in supercritical water: reaction kinetics, key pathways, and main products». *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44: 1226–1232.
- Anupama, K.S. y Paul, S. (2009). «Ex situ and in situ biodegradation of lindane by *Azotobacter chroococcum*». *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 45 (1): 58-66.
- Aragón Hoy (2016a). «Los comités institucional y social conocen de primera mano los avances del Ejecutivo para la descontaminación de lindano». <http://aragonhoy.aragon.es/index.php/mod.noticias/mem.detalle/area.1341/id.184116>
- Aragón Hoy (2016b). «El Comité Científico para la descontaminación de lindano elogia la mejora de los sistemas de control para la detención de HCH en la cuenca del Gállego». <http://aragonhoy.aragon.es/index.php/mod.noticias/mem.detalle/re/menu.47/id.183968>
- Araújo, M. M., Ignatius, S. G., Oliveira, A. O., Oliveira, S. S., Fertonani, F. L. y Paste, I. A. (2016). «Thermal desorption of HCH Temperature and time effects». *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123 (2): 1019-1029.
- ASDEN (comunicación personal). «Seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en el entorno de la mina de Gandalia en T.M. de Borobia (Soria)». Informe y respuesta de la Confederación Hidrográfica del Ebro- MAGRAMA a ASDEN.
- ASDEN, (2015). «Encontrado Lindano en una mina de Borobia». <http://www.ecologistasenaccion.org/article30108.html>

- Atlántico (17 de febrero de 2012). «El lindano en Torneiros supera en cinco veces lo autorizado». <http://www.atlantico.net/articulo/area-metropolitana/lindano-torneiros-supera-veces-autorizado/20120218084843166871.html>
- ATSDR (2005). «Toxicological profile for hexachlorocyclohexanes». U.S. Department of Health & Human Services. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Agosto de 2005. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp43.html>
- Aufwändige Grundwassersanierung geplant (2016). Página web de Ludwigshafen am Rhein: <http://www.ludwigshafen.de/presse/detail/news/2016/06/21/aufwaendige-grundwassersanierung-geplant/>. Consultado el 15 de octubre de 2016.
- AV (Ayuntamiento de Viana), 1990. Carta del municipio de Viana a las autoridades medioambientales de Navarra informando sobre el vertido de residuos de HCH por parte de Inquinosa.
- Babel, S. y Kurniawan, T.A. (2003). «Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review». *J. Hazard Mater.*, 28; 97(1-3): 219-43.
- Barakaldo Digital (3.1.2011). «Ihobe destina 300.000 euros a vigilar el depósito de residuos contaminantes y lindane de Argalarío». <http://barakaldodigital.blogspot.com.es/2011/01/ihobe-destina-300000-euros-vigilar-el.html>. Consultado el 4 de noviembre de 2016.
- Becerra-Castro, C., Prieto-Fernández, A., Kidd, P. S., Weyens, N., Rodríguez-Garrido, B. Touceda-González, M., Acea, M. J. y Vangronsveld, J. (2013). «Improving performance of *Cytisus striatus* on substrates contaminated with hexachlorocyclohexane (HCH) isomers using bacterial inoculants: developing a phytoremediation strategy». *Plant Soil* 362:247–260.
- Benimeli, C.S., González, A.J., Chaile, A.P., Amoroso, M.J. (2007). «Temperature and pH effect on lindane removal by *Streptomyces* sp. M7 in soil extract». *J. Basic Microbiol.*, 47, 468–473.
- Benimeli, C.S., Fuentes, M.S., Abate, C.M., Amoroso, M.J. (2008). «Bioremediation of lindane-contaminated soil by *Streptomyces* sp. M7 and its effects on *Zea mays* growth». *International Biodeterioration & Biodegradation* 61: 233-239.
- Beránek, M. y Havel, M. (2006). «Lindane in the Czech Republic». *International POPs Elimination Project – IPEP*. República Checa, abril de 2006.
- Betenzos (comunicación personal). Respuestas al cuestionario. Véase el anexo II de este documento.
- Böltner, D., Godoy, P., Muñoz-Rojas, J., Duque, E., Moreno-Morillas, S., Sánchez, L. y Luis Ramos, J. (2008). «Rhizoremediation of lindane by root-colonizing *Sphingomonas*». *Microbial Biotechnology* 1(1): 87-93.
- Börner, H. (2012). «Pesticides in Ground and Surface Water». Springer Science & Business Media Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1993) Stoffbericht HCH. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- Bouwknecht (comunicación personal). Respuestas al cuestionario. Véase el anexo II de este documento.
- Buser H. y Muller, M.D. (1995). «Isomer and enantioselective degradation of hexachlorocyclohexane isomers in sewage sludge under anaerobic conditions». *Environ. Sci. Technol.* 29, 664–672.

- CAN, (2009). «Lindane Risk Assessment». Health Canada Pest Management Regulatory Agency, REV2009-08. <http://publications.gc.ca/site/eng/355281/publication.html>
- Carlon, C. (Ed.) (2007). «Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization». Comisión Europea, Centro Común de Investigación, Ispra, EUR 22805-EN, 306 pp.
- CHE (Confederación Hidrográfica del Ebro) (2010). «Análisis ambiental de los sedimentos y del entorno del embalse de Sabiñánigo (Huesca) y evaluación de riesgos». DOCUMENTO n.º 2. Caracterización medioambiental. [http://195.55.247.234/webcalidad/estudios/otroestudios/2010\\_analisis\\_embalse\\_sabi/02\\_caracterizacion\\_ambiental.pdf](http://195.55.247.234/webcalidad/estudios/otroestudios/2010_analisis_embalse_sabi/02_caracterizacion_ambiental.pdf)
- Cheremisinoff, P.N. y Ellerbush, F. (1979). *Carbon adsorption hand book*. Michigan: Ann Arbor Science Publishers.
- Cherian, S. y Oliveira, M. (2005). «Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities». *Environ. Sci. Technol.* 39: 9377-90.
- Cobouw (1994). «Alders geeft startsein bodemsanering Handelskade».
- <http://www.cobouw.nl/artikel/116556-alders-geeft-startsein-bodemsanering-handelskade>
- CPEO, (2010). «Clean Technology descriptions». Centre for Public Environmental Oversight. <http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/plarctech.htm>
- Crespo, N., (2001). «HCH-polluted soils in highly populated areas in "O Porriño" (Galicia, Northwest Spain)». Libro del Sexto Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas. [http://www.hchforum.com/6th/forum\\_book/index.htm](http://www.hchforum.com/6th/forum_book/index.htm)
- Cuyten, J. 1999. «Soil Treatment technologies II: Physical and Chemical methods. Cleaning of soil contaminated with HCH, from laboratory test to commercial practical application». Procedimientos del quinto Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas, Bilbao, España, junio de 1998, IHOBE.
- Dashtban, M., Schraft, H., Syed, T.A. y Qin, W. (2010). «Fungal biodegradation and enzymatic modification of lignin». *Int. J. Biochem. Mol. Biol.*, 1(1): 36-50.
- del Moral, J.A. (2012). «¿Qué fue del lindane?» Página web del municipio de Barakaldo. <http://www.ezagutubarakaldo.net/es/que-fue-del-lindane/>. Consultado el 1 de noviembre de 2016.
- Dubey, R.K., Tripathi, V., Singh, N., Abhilash, P.C. (2014). «Phytoextraction and dissipation of lindane by *Spinacia oleracea* L.». *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 109:22-6.
- CE (Comisión Europea) (2005). Environmental quality standards (EQS). Substance datasheet: «Hexachlorocyclohexanes (incl lindane)». CAS nº: 608-73-1; EC nº: 58-89-9. [https://circabc.europa.eu/sd/a/e7304cd5-1a9b-49a9-9a22-54bcc8e5510a/18\\_HCHs-combined\\_EQSdatasheet\\_310705.pdf](https://circabc.europa.eu/sd/a/e7304cd5-1a9b-49a9-9a22-54bcc8e5510a/18_HCHs-combined_EQSdatasheet_310705.pdf)
- CE (Comisión Europea) (2016). «Soil». Comisión Europea (Medio Ambiente). [http://ec.europa.eu/environment/soil/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm)
- Ehemaliges Metrogelände Saniert (2014). Página web de Ludwigshafen am Rhein: <http://www.ludwigshafen.de/presse/detail/news/2014/12/12/ehemaliges-metrogelaende-saniert/> Consultado el 1 de noviembre de 2016.

- El-Kady, A.A., Carleer, R., Yperman, J. y Farah, J.Y. (2013). «Optimum Conditions for Adsorption of Lindane by Activated Carbon Derived from Date Stones». *World Applied Sciences Journal*, 27 (2): 269-279.
- Elliott, D., Lien, H., y Zhang, W. (2009). «Degradation of Lindane by Zero-Valent Iron Nanoparticles». *J. Environ. Eng.*, 135(5): 317-324.
- El País (14 de octubre de 2001). «La planta de Barakaldo terminará de eliminar el lindane en un mes». [http://elpais.com/diario/2001/10/15/paisvasco/1003174813\\_850215.html](http://elpais.com/diario/2001/10/15/paisvasco/1003174813_850215.html)
- Escolar, L. (2015). «HCH: a problem solved in the Basque Country». Presentación en el 13.º Foro sobre HCH y Plaguicidas. [http://www.hchforum.com/presentations/pdf/Block01\\_Spanish%20Experiences/1.1\\_HCH\\_Basque\\_Country.pdf](http://www.hchforum.com/presentations/pdf/Block01_Spanish%20Experiences/1.1_HCH_Basque_Country.pdf)
- Fahlberg-List (2016). Wikipedia <https://de.wikipedia.org/wiki/Fahlberg-List#Lindan>. Consultado el 2 de noviembre de 2016.
- Fernández, J., Arjol, M.A. y Cancho, C. (2013). «POP-contaminated sites from HCH production in Sabiñánigo, Spain». *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 20 (4):1937-1950.
- Ficko, S.A., Rutter, A., Zeeb, B.A. (2010). «Potential for phytoextraction of PCBs from contaminated soils using weeds». *Sci. Total Environ.*, 408:3469-76.
- Faro de Vigo, El (10 de noviembre de 2010). «La Xunta concluye el proceso de realojo de los afectados por el parque de lindano». <http://www.farodevigo.es/comarcas/2010/11/10/xunta-concluye-proceso-realojo-afectados-parque-lindano/489469.html>.
- Foo, K.Y. y Hameed, B.H. (2009). «Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves». *Adv. Colloid Interface Sci.*, 149: 19-27.
- Forter, M. (2015). «The production of Lindane by Ugine Kuhlmann Huningue (France) and the consequences for the city of Basel (Switzerland)». Presentación en el 13.º Foro sobre HCH y Plaguicidas, Zaragoza (España).
- [http://www.martinforter.ch/images/news/2013\\_09\\_25/Forter-Lindane\\_by\\_UgineKuhlmannn.pdf](http://www.martinforter.ch/images/news/2013_09_25/Forter-Lindane_by_UgineKuhlmannn.pdf).
- Fuentes, M.S., Benimeli, C.S., Cuozzo, S.A., Amoroso, M.J. (2010). «Isolation of pesticide-degrading actinomycetes from a contaminated site: Bacterial growth, removal and dechlorination of organochlorine pesticides». *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 64: 434-441.
- Fuscoletti, V., Achene, L., Gismondi, F., Lamarra, D., Lucentini, L., Spina, S., Veschetti, E. y Turrio-Baldassarri, L. (2015). «Presence of Epsilon HCH Together with Four Other HCH Isomers in Drinking Water, Groundwater and Soil in a Former Lindane Production Site». *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 95 (1): 108-115.
- GA (Gobierno de Aragón) (2016a). Página web del proyecto DISCOVERED LIFE. <http://www.lifediscovered.es/> Consultado el 2 de noviembre de 2016.
- GA (Gobierno de Aragón) (2016b). «Jornada de trabajo en Sabiñánigo de la comisión científica de apoyo a las actuaciones de descontaminación de los espacios afectados por la contaminación derivada de la actividad de la empresa INQUINOSA». 3 de febrero de 2016.

[https://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/AgriculturaGanaderiaMedioAmbiente/TEMAS\\_MEDIO\\_AMBIENTE/AREAS/LINDANO/COMITES\\_HCH/ACTA\\_COMITE\\_CIENTIFICO\\_20160203.pdf](https://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/AgriculturaGanaderiaMedioAmbiente/TEMAS_MEDIO_AMBIENTE/AREAS/LINDANO/COMITES_HCH/ACTA_COMITE_CIENTIFICO_20160203.pdf)

- GA (Gobierno de Aragón) (2016c). «Comités HCH». [http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Departamentos/DesarrolloRuralSostenibilidad/AreasTematicas/Lindano/ci.COMITES\\_HCH.detalleDepartamento?channelSelected=0](http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Departamentos/DesarrolloRuralSostenibilidad/AreasTematicas/Lindano/ci.COMITES_HCH.detalleDepartamento?channelSelected=0). Consultado el 4 de noviembre de 2016.
- García, A. (comunicación personal). Respuestas al cuestionario. Véase el anexo II de este documento.
- Götz, R., Sollolek, V. y Weber, R. (2013). «The dioxin/POPs legacy of pesticide production in Hamburg: Part 2—waste deposits and remediation of Georgswerder landfill». *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20:1925-1936.
- Gravesen (comunicación personal). Respuestas al cuestionario. Véase el anexo II de este documento.
- Greenpeace (2016). «Success: All toxic waste removed from Illatos Rd site of former Budapest Chemical Works». [http://greenpeace.blog.hu/2016/01/15/success\\_all\\_toxic\\_waste\\_removed\\_from\\_illatos\\_rd\\_site\\_of\\_former\\_budapest\\_chemical\\_works](http://greenpeace.blog.hu/2016/01/15/success_all_toxic_waste_removed_from_illatos_rd_site_of_former_budapest_chemical_works).
- Grinwis, A. (1992). «"Deventer Handelsakade" Project. Technical interpretation of the choice of a hydrogeological isolation option with supplementary measures to facilitate building development». Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas Halogenados. Compilación del libro del primer y segundo Foro sobre HCH.
- Grinwis, A. y de Jong, G. (1992). «Ten years of soil clean up in the HCH-Project in Twente, The Netherlands». Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas Halogenados. Compilación del libro del primer y segundo Foro sobre HCH.
- Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Chandra, S., Agarwal, S. (2002). «Removal of lindane and malathion from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste». *Water Res.* 36: 2483-2490.
- Hassan, A.M., El-Moteleb, M.A. y Ismael, A.M. (2009). «Removal of lindane and malathion from wastewater by activated carbon prepared from apricot stone». *Ass. Univ. Bull. Environ. Res.* 12 (2): 1-8.
- Hauzenberger, I., Perthen-Palmisalo, B. y Herrmann, R. (2004). «Reports on substances scheduled for re- assessments under the UNECE POPs Protocol, Technical Review Report on Lindane, Austria». <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/TaskForce/popsxg/2000-2003/lindane.pdf>
- Heinisch, E., Jonas, K. y Klein, S. (1993). «HCH isomers in soil and vegetation from the surroundings of an industrial landfill of the former GDR, 1971-1989». *The Science of the Total Environment, Supplement 1993*: 151-159.
- Heinisch, E. Kettrup, A., Bergheim, W. y Wenzel, S. (2005). «Persistent Chlorinated Hydrocarbons (PCHC), source oriented monitoring in aquatic media 3. The isomers of Hexachlorocyclohexane». *Fresenius Environmental Bulletin*, 14 (6): 444-462.
- Hennebel, T., Simoen, H., Verhagen, P., De Windt, W., Dick, J., Weise, C. Pietschner, F., Boon, N. y Verstraete W. (2011). «Biocatalytic dechlorination of hexachlorocyclohexane

- by immobilized bio-Pd in a pilot scale fluidized bed reactor». *Environ. Chem. Lett.* 9:417–422.
- Hirth, T., Heck, L., Jahnke, S. et al., (1998). «Supercritical water oxidation–waste destruction and synthesis». En: *Koatsuryoku no Kagaku to Gijutsu 7* (Procedimientos de la Conferencia Internacional AIRAPT-16 y HPCJ-38 sobre la Ciencia y Tecnología de Altas Presiones, 1997). 1375.
- Holoubek, E., Klánová, J., Vijgen, J. (2009). «Global, regional and local fate of HCHs and other pesticides – problems, risks, challenges». Décimo Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas, Brno, República Checa, 2009.
- Holoubek, I., Klánová J., Cupr, P., Sánka, M. (2011). « $\delta$ -Hexachlorocyclohexane – Potential marker of unknown environmental processes?». Procedimientos del 11.º Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas, Gabala, Azerbaiyán, septiembre de 2011, IHPA y PNUMA, pp. 108-112.
- HSDB, (2006). Hazardous Substances Data Bank. Bethesda (MD): National Library of Medicine (US); 2006 (fecha de la última revisión: 20 de diciembre de 2006; citado el 26 de septiembre de 2016). Lindane; Hazardous Substances Databank Number: 646. <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>. Consultado el 15 de octubre de 2016.
- IARC, (2016). «Carcinogenicity of lindane, DDT, and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid». Volumen 113 de IARC Monographs. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol113/index.php>
- ICIS News, (17 de febrero de 2004). «Dutch envt ministry pursues HCH-pollution case against Akzo». <http://www.icis.com/resources/news/2004/02/17/558741/dutch-envt-ministry-pursues-hch-pollution-case-against-akzo/>
- IETU NEWS (2012). «FOKS (Focus On Key Sources of Environmental Risks)». [http://projectfoks.zuova.cz/wp-content/uploads/2009/07/foks\\_newsletter\\_vol6.pdf](http://projectfoks.zuova.cz/wp-content/uploads/2009/07/foks_newsletter_vol6.pdf); [http://www.ietu.katowice.pl/eng/News/ns/ietu\\_news\\_8\\_2012\\_www.pdf](http://www.ietu.katowice.pl/eng/News/ns/ietu_news_8_2012_www.pdf)
- IHOBE. «Aspectos innovadores». <http://www.ihobe.eus/Paginas/Ficha.aspx?IdMenu=af182443-7f60-4c7e-a87f-7566f410bacf&Idioma=es-ES>. Consultado el 4 de noviembre de 2016.
- IHPA, (2009a). *Provisional POPs Technology Specification and Data Sheets for the Secretariat of the Basel Convention*. [http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/SBC\\_LogoGCPDEF\\_190109.pdf](http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/SBC_LogoGCPDEF_190109.pdf)
- IHPA, (2009b). *New POPs technology, specification and data sheets*. «Gas-Phase Chemical Reduction (GPCR)». [http://www.ihpa.info/docs/library/reports/nato/NATO\\_EcologFactSh&Annex3.pdf](http://www.ihpa.info/docs/library/reports/nato/NATO_EcologFactSh&Annex3.pdf)
- IHPA, (2009c). *New POPs technology, specification and data sheets*. «Super Critical Water Oxidation (SCWO)». [http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/SBC\\_Logo\\_SCWO\\_Prov\(1090109\)MTKUsedBurningIssue08June09.pdf](http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/SBC_Logo_SCWO_Prov(1090109)MTKUsedBurningIssue08June09.pdf)
- IHPA, (2009d). *New POPs technology, specification and data sheets*. «Plasma Arc». [http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/SBCPLASCONSBCLogoDEFCLEANVERSION\\_190109.pdf](http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/SBCPLASCONSBCLogoDEFCLEANVERSION_190109.pdf)
- IHPA (2009e). «Base Catalyzed Decomposition (BCD)». Ficha informativa elaborada por John Vijgen, Asociación Internacional de HCH y Plaguicidas, y el Dr. Ir. Ron

McDowall, Auckland (Nueva Zelanda), para la Secretaría del Convenio de Basilea. [http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/BCDSBCLoMainSheetDEFCLEANVERSION\\_190109 .pdf](http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/BCDSBCLoMainSheetDEFCLEANVERSION_190109.pdf)

- IHPA (2016). «International HCH & Pesticide Association (IHPA) comments on the draft EU-UIP (Union Implementation Plan) in the frame of the Stockholm Convention».
- Jacobs P. y Schaffranka, E. (2014). «Sediment-bound organic pollutants from historical industrial sources in the Spittelwasser creek and their impact on surface water and sediments in the Elbe river basin». Procedimientos del cuarto Simposio Internacional sobre Gestión de Sedimentos.
- Jagnow, G., Haider, K. y Ellwardt, P. (1977). «Anaerobic dechlorination and degradation of hexachlorocyclohexane isomers by anaerobic and facultative anaerobic bacteria». Arch. Microbiol. 115, 285–292.
- Joo, S.H., Zhao, D. (2008). «Destruction of lindane and atrazine using stabilized iron nanoparticles under aerobic and anaerobic conditions: effects of catalyst and stabilizer». Chemosphere, 70(3):418-25.
- Ju, Y.H., Chen, T.C. y Liu, J.C.A. (1997). «Study on the biosorption of lindane». Colloids Surf B Biointerfaces, 9: 187-196.
- Kabra, K., Chaudhary, R. y Sawhney, R.L. (2004). «Treatment of Hazardous Organic and Inorganic Compounds through Aqueous-Phase Photocatalysis: A Review». Ind. Eng. Chem. Res., 43: 7683-7696.
- Karstensen, KH. (2013). «Experiences from other international processes; Basel and Stockholm convention». En: *Launching of Cement Industry Sector Partnership under the UNEP Global Mercury Partnership*. <http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Dr%20Karstensen%20-%20Final%20Basel%20&%20Stockholm%20%2021%20June%2013.pdf>
- Kips, Ph.A., Stobiecki, S., Bouwknegt, M. y Fokke, B. (2009). «Fostering Rudna Landfill in Poland to create possibilities for cost-effective and sustainable rehabilitation». Procedimientos del 10.º Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas, Brno, República Checa, septiembre de 2009, Masarykova univerzita, Brno, pp. 78-83..
- Kouras, A., Zouboulis, A., Samara, C. y Kouimtzi, T. (1998): «Removal of pesticides from aqueous solutions by combined physicochemical processes--the behaviour of lindane». Environmental Pollution 103 (2-3): 193-202.
- Krüger, (2016). Página web sobre la desorción térmica *in situ*. <http://www.kruger.dk/en/municipalities/insiturement/>. Consultado el 14 de noviembre de 2016.
- Kuritz, T. y Wolk C.P. (1995). «Use of Filamentous Cyanobacteria for Biodegradation of Organic Pollutants». Applied and Environmental Microbiology, 61 (1): 234-238.
- Lal R., Pandey, G., Sharma, P., Kumari, K., Malhotra, S., Pandey, R., Raina, V., Kohler, H.P. E., Holliger, C., Jackson, C. y Oakeshott J.G. (2010). «Biochemistry of Microbial Degradation of Hexachlorocyclohexane and Prospects for Bioremediation». Microbiology and Molecular Biology Reviews, mar. 2010, p. 58–80.
- Langenhoff, A., Staps, S., Pijls, C., Alphenaar, A., Zwiép, G. y Rijnaarts, H. (2001). «Intrinsic and stimulated *in situ* biodegradation of Hexachlorocyclohexane (HCH)». Procedimientos del sexto Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas, Poznan, Polonia, marzo de 2001, Plant Protection Institute Poznan e IHPA, pp. 181-186.

- Langenhoff A.A.M., Staps S.J.M., Pijls C., Rijnaarts H.H.M. (2013). «Stimulation of Hexachlorocyclohexane (HCH) Biodegradation in a Full Scale In Situ Bioscreen». *Environ. Sci. Technol.* 2013, 47, 11182–11188.
- LIFE (1994). «Base catalyzed dehydrodechlorination of HCH at low temperature».
- LIFE94 ENV/E/001271.
- [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\\_proj\\_id=966&docType=pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=966&docType=pdf)
- LIFE (2012). «DISCOVERED LIFE - Lab to field, soil remediation demonstrative project: New ISCO application to DNAPL multicomponent environmental problem» LIFE12 ENV/ES/000761. <http://www.lifediscovered.es/isco-que-es.html>; <http://en.lifediscovered.es/index.php>
- Página web de Ludwigshafen am Rhein (12 de diciembre de 2014). «Ehemaliges Metrogelände saniert». 12.12.2014.
- <http://www.ludwigshafen.de/presse/detail/news/2014/12/12/ehemaliges-metrogelaende-saniert/>
- Página web de Ludwigshafen am Rhein (21 de junio de 2016). «Aufwändige Grundwassersanierung geplant». 21.06.2016. <http://www.ludwigshafen.de/presse/detail/news/2016/06/21/aufwaendige-grundwassersanierung-geplant/>
- Lunney, A.I., Zeeb, B.A. y Reimer K.J. (2004). «Uptake of weathered DDT in vascular plants: potential for phytoremediation». *Environ. Sci. Technol.*, 38:6147-54.
- Machlica, A. y Chovanec, J. (2015). «Chzjd Landfill in Vrakuňa the Sleeping Load of Bratislava». *Procedimientos de la Conferencia Internacional sobre Lugares Contaminados*. Bratislava, 2015.
- MacRae, I.C., Raghu, K. y Bautista, E.M. (1969). «Anaerobic degradation of the insecticide lindane by *Clostridium* sp.». *Nature* 221: 859-860.
- Manickam, N., Mau, M. y Schlomann, M. (2006). «Characterization of the novel HCH-degrading strain, *Microbacterium* sp. ITRC1». *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 69, 580–588.
- Manickam, N., Misra, R. y Mayilraj, S. (2007). «A novel pathway for the biodegradation of  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane by a *Xanthomonas* sp. strain ICH12» *J. Appl. Microbiol.*, 102: 1468-1478.
- Martínez, M. (2016). «The Inquinosa Case (Sabiñánigo, Aragón, Spain). Turning an Environmental disaster into opportunities. Management of agro-chemicals: Elimination of "black spots" and creation of "white spots"». *Parlamento Europeo*, 29 de septiembre de 2016.
- Mattson, J.S. y Mark, I.I.B. (1971). *Activated carbon surface chemistry and adsorption from aqueous solution*. Nueva York: Marcel Dekker.
- Mendes, R., Garbeva, P. y Raaijmakers, J.M. (2013). «The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms». *FEMS Microbiology Reviews*, 37 (5): 634-663.
- Merck (2009). *Corporate Responsibility Bericht 2009*. [http://www.merck.de/company.merck.de/de/images/Merck\\_CR\\_Report\\_2009\\_DE\\_tcm1613\\_72012.pdf?Version=&\\_ga=1.161353789.1236854330.1474971390](http://www.merck.de/company.merck.de/de/images/Merck_CR_Report_2009_DE_tcm1613_72012.pdf?Version=&_ga=1.161353789.1236854330.1474971390)

- Merck (2016). «Alle Mitteilungen zum Umbau Rheinparkplatz». Página web de Merck.
- [http://www.merck.de/de/unternehmen/merck\\_in\\_deutschland/standort\\_gernsheim/umbau\\_rheinparkplatz/alle\\_mitteilungen/alle\\_mitteilungen.html?qa=1.267677838.1236854330.1474971390](http://www.merck.de/de/unternehmen/merck_in_deutschland/standort_gernsheim/umbau_rheinparkplatz/alle_mitteilungen/alle_mitteilungen.html?qa=1.267677838.1236854330.1474971390). Consultado el 11 de noviembre de 2016.
- Mertens, B., Blothe, C., Windey, K., De Windt, W., Verstraete W. (2007). «Biocatalytic dechlorination of lindane by nano-scale particles of Pd(0) deposited on *Shewanella oneidensis*». Chemosphere 66: 99-105.
- Middeldorp, P. J. M., Jasper, M., Zehender, A. J. B., y Schraa, J. (1996). «Bio-transformation of  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$  - and  $\delta$ -hexachlorocyclohexane under methanogenic conditions». Environ. Sci. Technol., 30, 2345–2349.
- Ministerio de Medio Ambiente y Bosques de Rumanía (2010). *2007-2009 Triannual Report on the data and information under Article 12 of Regulation (EC) No 850/2004 on persistent organic pollutants*.  
[http://cdr.eionet.europa.eu/ro/eu/colscvky/envskrka/EN\\_Questionnaire\\_Reg.850-2004\\_18.05.10.pdf](http://cdr.eionet.europa.eu/ro/eu/colscvky/envskrka/EN_Questionnaire_Reg.850-2004_18.05.10.pdf)
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Rumanía (2008). *2004-2006 Triannual Report on the data and information under Article 12 of Regulation (EC) No 850/2004 on persistent organic pollutants*. Disponible en [https://cdr.eionet.europa.eu/ro/eu/colscvky/envscvlpw/Regulation\\_850-2004\\_en.doc/manage\\_document](https://cdr.eionet.europa.eu/ro/eu/colscvky/envscvlpw/Regulation_850-2004_en.doc/manage_document)
- Modell, M. (1990). «Treatment of pulp mill sludges by supercritical water oxidation». Final Report, DOE Contract No. FG05-90CE40914.
- Mogos, A. (2016). «Romania, a contaminated country». Contaminated future. <http://contaminatedfuture.org/romania-a-contaminated-country>. Consultado el 8 de septiembre de 2016.
- Mohapatra, S. y Pandey, M. (2015). «Biodegradation of Hexachlorocyclohexane (HCH) Isomers by White Rot Fungus, *Pleurotus florida*». J. Bioremed Biodeg, 6(2).
- Mohn, W.W., Mertens, B., Neufeld, J.D., Verstraete, W. y de Lorenzo, V. (2006). «Distribution and phylogeny of hexachlorocyclohexane degrading bacteria in soils from Spain». Environ. Microbiol., 8: 60-68.
- Mougín, C., Pericaud, C. y Dubroca, J. (1997). «Enhanced mineralization of lindane in soils supplemented with the white rot basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*». Soil Biology Biochemistry, 29: 1321-1324.
- Mueller, N.C. y Nowack, B. (2009). «Nanotechnology Developments for the Environment Sector - Report of the ObservatoryNANO EU FP7 project». Junio de 2009. [www.observatorynano.eu](http://www.observatorynano.eu)
- Municipio de Turda (n.d). «Transforming a polluted site into a green area. Rehabilitation of the Historically Polluted Site - Hazardous Waste Deposit UCT - Poșta Rât (Municipality of Turda)»: <http://postaratturda.ro/?idpage=1>. Consultado el 8 de septiembre de 2016.
- Nagata, Y., Miyauchi, K. y Takagi, M. (1999). «Complete analysis of genes and enzymes for  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane degradation in *Sphingomonas paucimobilis* UT26». J. Ind. Microbiol. Biotechnol., 23: 380-390.

- Nagpal, V., Srinivasan, M.C. y Paknikar, K.M. (2008). «Biodegradation of I3-hexachlorocyclohexane (Lindane) by a non-white rot fungus conidiobolus 03-1- 56 isolated from litter». *Indian J. Microbiol.*, 48: 134-141.
- Nagpal, V., Bokare, A.D., Chikate, R.C., Rode, C.V. y Paknikar, K.M. (2010). «Reductive dechlorination of  $\gamma$ -hexachlorocyclohexane using Fe-Pd bimetallic nanoparticles». *Journal of Hazardous Materials* 175: 680-687.
- Nawab, A., Aleem, A. y Malik, A. (2003). «Determination of organochlorine pesticides in agricultural soil with special reference to  $\gamma$ -HCH degradation by *Pseudomonas* strains». *Bioresour. Technol.*, 88: 41-46.
- Noticias de Álava (17 de agosto de 2016a). «El Zadorra arrastra residuos de lindano desde hace tres años». <http://www.noticiasdealava.com/2016/08/17/araba/el-zadorra-arrastra-residuos-de-lindano-desde-hace-tres-anos>
- Noticias de Álava (21 de septiembre de 2016b). «A vueltas con el lindano». <http://www.noticiasdealava.com/2016/09/21/araba/a-vueltas-con-el-lindano>
- NRC, (1996). *Review and Evaluation of Alternative Chemical Disposal Technologies*. Panel on Review and Evaluation of Alternative Chemical Disposal Technologies, Edited by the National Research Council. <https://www.nap.edu/read/5274/chapter/8>
- Ocelka, T., Pekarek, V. y Nikl, S. (2009). «Application of Copper Mediated Destruction for pilot remediation for Jaworzno site». [http://projectfoks.zuova.cz/wp-content/uploads/2009/07/7\\_t\\_ocelka\\_application\\_of\\_copper\\_mediated\\_destruction\\_for\\_pilot\\_remediation\\_for\\_jaworzno\\_site.pdf](http://projectfoks.zuova.cz/wp-content/uploads/2009/07/7_t_ocelka_application_of_copper_mediated_destruction_for_pilot_remediation_for_jaworzno_site.pdf)
- Okeke, B.C., Siddique, T., Arbestain, M.C., y Frankenberger, W.T. (2002). «Biodegradation of gamma-hexachlorocyclohexane (lindane) and alpha-hexachlorocyclohexane in water and a soil slurry by a *Pandora* species». *J. Agric. Food Chem.*, 50, 2548–2555.
- Oltchim, S.A. (2007). History. Oltchim SA: <http://www.oltchim.ro/en/index.php?name=about-us/history>. Consultado el 7 de septiembre de 2016.
- Ortega, S. (2016). «Megashite as burden and challenge for Regional Government of Aragon. Management of agro-chemicals: Elimination of "black spots" and creation of "white spots"». Parlamento Europeo, 29 de septiembre de 2016.
- OSPAR. (2002). «Lindane», *Hazardous Substances Series*. Comisión OSPAR. <http://www.ospar.org/documents?v=6951>
- Osterhuis, F. y Browver, R. (2015). «Benchmark development for the proportionality assessment of PBT and vPvB substances». IVM Institute for environmental Studies. [https://echa.europa.eu/documents/10162/13647/R15\\_11\\_pbt\\_benchmark\\_report\\_en.pdf](https://echa.europa.eu/documents/10162/13647/R15_11_pbt_benchmark_report_en.pdf)
- Otani, T., y Seike, N. (2006). «Comparative effects of rootstock and scion on dieldrin and endrin uptake by grafted cucumber (*Cumis sativus*)». *J. Pestic. Sci.*, 31: 316-21.
- Ozola (comunicación personal). Respuestas al cuestionario. Véase el anexo II de este documento.
- Pál, J. y Simon, G. (2006). «Lindane in Hungary». International POPs Elimination project: Hungary, 2006.

- Paun, MC. (comunicación personal). Respuestas al cuestionario. Véase el anexo II de este documento.
- Pethö, A. y Ocskó, Z. (2003). «POP Hatóanyagot Tartalmazó Növényvédőszeresek Hazai Felhasználása 1950-2000». Budapest, 2003.
- Pethö, A. (comunicación personal). Respuestas al cuestionario. Véase el anexo II de este documento.
- Phillips, T.M., Seech, A.G., Lee, H. y Trevors, J.T. (2005). «Biodegradation of hexachlorocyclohexane (HCH) by microorganisms». *Biodegradation* 16: 363-392.
- Pillard, S.J.T, Fowler, G.D., Sollars, C.J. y Perry, R. (1992). «Low Cost adsorbents for waste and wastewater treatment». *Sci. Total Environ.*, 116: 31-52.
- CECOP (Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes) (2006). «Informe del Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes sobre la labor realizada en su segunda reunión - Perfil de riesgos del lindano» (UNEP/POPS/POPRC.2/17/Add.4). Segunda reunión.
- <http://chm.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC2/POPRC2documents/tabid/106/Default.aspx>
- CECOP (Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes) (2007). «Informe del Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes sobre la labor realizada en su tercera reunión - Evaluación de la gestión de riesgos del lindano» (UNEP/POPS/POPRC.3/20/Add.4). Tercera reunión.
- <http://chm.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Meetings/POPRC3/POPRC3documents/tabid/77/Default.aspx>
- Ratola, N., Botelho, C. y Alves, A. (2003). «The use of pine bark as a natural adsorbent for persistent organic pollutants—study of lindane and heptachlor adsorption». *J Chem. Technol. Biotechnol.*, 8: 347-351.
- Rodríguez, B. (2009). *Movilidad, biodisponibilidad y degradación inducida de isómeros de Hexaclorociclohexano (HCH) en suelos contaminados*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Real Decreto (2005). *Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados*. Boletín Oficial del Estado 15/2005, 1833-1843.
- Ruzzenenti, M. (2013). «Valle del Sacco». *Industria e Ambiente*: [http://www.industriaeambiente.it/schede/valle\\_del\\_sacco/](http://www.industriaeambiente.it/schede/valle_del_sacco/). Consultado el 6 de septiembre de 2016.
- Salam, JA. y Das, N. (2012). «Remediation of lindane from environment – An overview». *International Journal of Advanced Biological Research*, 2(1): 9-15.
- Salam, JA. y Das, N. (2013). «Biosorptive removal of lindane using pretreated dried yeast *Cintractia sorghi* VITJZN02 – equilibrium and kinetics studies». *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 5(3): 987-993.
- Salas, O., Gascón, J.A., Susaeta, I. 1999. «Treatability studies on solvent extraction technologies: Bench scale evaluation». *Procedimientos del quinto Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas*, Bilbao, España, junio de 1998, IHOBE , pp. 153-158.

- SE (Suez Environment). (2006). «SPOLANA, Setting the example for depollution in the Czech Republic». <http://www.suez-environnement.fr/wp-content/uploads/2008/07/eec6386e0276f61088ec3b9750f7b664.pdf>
- Senthilnathan, J. y Philip, L. (2010). «Photocatalytic degradation of lindane under UV and visible light using N-doped TiO<sub>2</sub>». Chemical Engineering Journal, 161: 83-92.
- Shelton, D.R., Khader, S., Karns, J.S. y Pogell, B.M., (1996). «Metabolism of twelve herbicides by Streptomyces». Biodegradation 7, 129–136.
- Siddique, T., Okeke, B.C., Arshad, M. y Frankenberger, W.T. Jr. (2002). «Temperature and pH effects on biodegradation of hexachlorocyclohexane isomers in water and soil slurry». J. Agric. Food Chem., 50:5070–5076.
- Simon, G. (comunicación personal). Respuestas al cuestionario y comunicación personal. Véase el anexo II de este documento.
- Sineli, P. E., Tortella, G., Da'vila Costa, J. S., Benimeli, C. S., Cuozzo S. A. (2016). «Evidence of  $\alpha$ -,  $\beta$ - and  $\gamma$ -HCH mixture aerobic degradation by the native actinobacteria Streptomyces sp. M7». World J. Microbiol. Biotechnol. 32:81.
- Singh, B.K. y Kuhad, R.C. (1999). «Biodegradation of lindane (gamma-hexachlorocyclohexane) by the white-rot fungus *Trametes hirsutus*». Lett. Appl. Microbiol., 28:238–241.
- Singh, R., Singh, A., Misra, V., Singh R.P. (2011). «Degradation of lindane contaminated soil using zero-valent iron nanoparticles». J. Biomed. Nanotechnol., 7(1):175-6.
- Slovak Spectator, the (2016). «Solving an unpleasant legacy at last». <http://spectator.sme.sk/c/20087696/solving-an-unpleasant-legacy-at-last.html>. Consultado el 2 de noviembre de 2016.
- SOC. 1993. Shell Oil Company. *In-situ thermal desorption of contaminated surface soil*. Patente: US 5193934 A. <http://www.google.com/patents/US5193934>
- Song, H. y Carraway, E. (2005). «Reduction of chlorinated ethanes by nanosized zero-valent iron: Kinetics, pathways, and effects of reaction conditions». Environmental Science & Technology 39(16).
- Tribunal Supremo de España (1993). *Delito contra el medio ambiente*. <http://www.camarazaragoza.com/medioambiente/docs/jurisprudencia/jurisprudencia14.pdf>
- Steith (2012). «Démantèlement et Réhabilitation de la Station de Traitement des Eaux Industrielles de Huningue». [http://sanierung-steih.ch/wp-content/uploads/2013/10/1206\\_Huningue\\_STEIH\\_Reunion\\_Publique\\_25Jun12.pdf](http://sanierung-steih.ch/wp-content/uploads/2013/10/1206_Huningue_STEIH_Reunion_Publique_25Jun12.pdf) Consultado el 12 de septiembre de 2016.
- Steith (2016). Página web sobre la rehabilitación de ARA STEIH. <http://sanierung-steih.ch/en/>. Consultado el 4 de noviembre de 2016.
- Stobiecki, S., Waleczek, K., Stobiecki, T. y Stadniczuk, M. (2009). «The biggest POP clean up problem in Poland—"Rudna Gora" industrial landfill for hazardous waste». Procedimientos del 10.º Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas, Brno, República Checa, septiembre de 2009, Masarykova univerzita, Brno, pp. 72-77.
- Stobiecki, T. y Sobiecki, S. (2011). «"Rudna Gora" landfill in Jaworzno the present legal and organizational situation». Procedimientos del 11.º Foro Internacional sobre

HCH y Plaguicidas, Gabala, Azerbaiyán, septiembre de 2011, IHPA y PNUMA, pp. 259-263.

- Stobiecki, T. (2013). «Case Study: Rudna Góra, Jawarżno, Poland». Taller: «Breaking the Infinite Assessment Cycle of POP Pesticides Dumpsites». 12.º Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas, Kiev, Ucrania, noviembre de 2013.
- Thomason, T.B., Hong, G.T., Swallow, K.C. et al., (1990). «The MODAR supercritical water oxidation process». En: *Innovative hazardous waste treatment technology series*
- (Freeman H.M., ed.). Lancaster, PA: Technomic Publishing. Volume I: Thermal Processes.
- Ecologistas en Acción (comunicación personal): «Informe sobre dioxinas y furanos en los residuos de Inquinosa». Técnicas de Protección Ambiental 1991.
- Tsezos, M. y Bell, JP. (1989). «Comparison of the biosorption and desorption of hazardous organic pollutants by live and dead biomass». *Water Res*, 23: 561-568.
- Tsitonaki, A., Petri, B., Crimi, M., Mosbaek, H, Siegrist, R. L. y Bjerg, P. L. (2010). «In situ chemical oxidation of contaminated soil and groundwater using persulfate: a review». *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40 (55).
- Ucer, A., Uyanik, A. y Aygun, S.F. (2006). «Adsorption of Cu (II), Cd (II), Zn (II), Mn (II) and Fe (III) ions by tannic acid immobilised activated carbon», *Sep. and Pur. Tech.*, 47: 113-118.
- van Hasselt, H.J., Costerus, A., Rulkens, W.H. (1998). «Developments and operating experience in soil cleaning: Thermal treatment of soils contaminated with HCH's, and solvent extraction of soil contaminated with HCH's». Procedimientos del quinto Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas, Bilbao, España, junio de 1998, IHOBE , pp. 131-143.
- Varela-Castejón, C. y Martínez, F. (2008). «Antecedentes históricos sobre la contaminación por lindano en O Porriño (Pontevedra)». *Edafología*, 15 (1-3): 25-32. <http://edafologia.ugr.es/Revista/tomo15/articulo25.pdf>
- Veriansyah, B. y Kim, J-D. (2007). «Supercritical water oxidation for the destruction of toxic organic wastewaters: a review». *Journal of Environmental Sciences* 19: 513-522.
- Vidal, A. (1998). «Developments in solar photocatalysis for solar purification». *Chemosphere* 36: 2593-2606.
- Vijgen J. (2006). «The Legacy of Lindane HCH Isomer Production. Main Report. A Global Overview of Residue Management, Formulation and Disposal». Asociación Internacional de HCH y Plaguicidas.
- Vijgen J. (2016). «Large contaminations at two former Lindane production plants». IHPA: <http://www.iHPA.info/info/2016/06/08/large-contaminations-at-two-former-lindane-production-plants/>. Consultado el 14 de septiembre de 2016.
- Vijgen, J. y MacDowall, R. (2009). «Base Catalyzed Decomposition - Provisional POPs Technology Specification and Data Sheets for the Secretariat of the Basel Convention». [http://www.iHPA.info/docs/library/reports/Pops/June2009/BCDSBCLogoMainSheetDEFCLEANVERSION\\_190109\\_.pdf](http://www.iHPA.info/docs/library/reports/Pops/June2009/BCDSBCLogoMainSheetDEFCLEANVERSION_190109_.pdf)

- Vijgen, J., Abhilash, P.C., Li, Y.F., Lal, R., Forter, M., Torres, J., Singh, N., Yunus, M., Tian, C., Schäffer, A. y Weber, R. (2010). «HCH isomers as new Stockholm Convention POPs—are we on the way to manage lindane ( $\gamma$ -HCH), and waste HCH isomer ( $\alpha$ - and  $\beta$ -HCH) pollution around the world?» *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 5:363–393.
- Vijgen, J., Abhilash, P. C., Li Y.F., Lal, R., Forter, M., Torres, J., Singh, N., Yunus, M., Tian, G. y Schäffer, A. (2011). «Hexachlorocyclohexane (HCH) as new Stockholm Convention POPs—a global perspective on the management of Lindane and its waste isomers» *Environmental Science and Pollution Research Vol.* 18(2), 152-162
- Violeta, S.C. y Dobrin, M. (2010). «Remediation Measures for Poșta Râ t Contaminated Site (Turda)». *ProEnvironment Promediu*, 3(5): 37-43.
- Vytopilova (comunicación personal). Ministerio de Medio Ambiente. República Checa. Respuestas al cuestionario. Véase el anexo II de este documento.
- Wallbaum, E. y Fuchs, W. (1993). «Environmental pollution as a consequence of HCH production in Sachsen Anhalt. A situation report». *Foro Internacional sobre HCH y Plaguicidas Halogenados. Compilación del primer Foro, 1991, Zwolle (Países Bajos) y el segundo Foro, 1992, Madgeburgo (Alemania).*
- Weber, R. (2004). «Relevance of PCDD/PCDF Formation for the Evaluation of POPs Destruction Technologies. – Necessity and Current Status». *Organohalogen Compounds – Volumen 66: 1273-1280.* [http://www.coprochem.com/documents/weberr-2004\\_popsdestr-pcddf-form.pdf](http://www.coprochem.com/documents/weberr-2004_popsdestr-pcddf-form.pdf)
- Weber, R. y Varbelow, H.G. (2013). «Dioxin/POPs legacy of pesticide production in Hamburg:Part 1—securing of the production area». *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20:1918–1924.
- Westcott, N.D. y Worobey, B.L. (1985). «Novel solvent extraction of lindane from soil». *J. Agric. Food Chem.*, 33 (1): 58-60.
- Whitfield Aslund, M.L., Lunney, A.I., Rutter, A. y Zeeb, B.A. (2010). «Effects of amendments on the uptake and distribution of DDT in *Cucurbita pepo* ssp *pepo* plants». *Environ. Pollut.*, 158: 508-13.
- OMS (1991). Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas. «Health and Safety Guide No. 54 Lindane ( $\gamma$ -HCH) health and safety guide». Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Organización Internacional del Trabajo. Organización Mundial de la Salud. Ginebra, 1991. <http://www.inchem.org/documents/hsg/hsg/hsg054.htm>
- Wiszniewska, A., Hanus-Fajerska, E., Muszynska, E. y Ciarkowska, K. (2016). «Natural Organic Amendments for Improved Phytoremediation of Polluted Soils: A Review of Recent Progress». *Pedosphere*, 26(1): 1-12.
- Wycisk, P., Stollberg, R., Neumann, C., Gossel, W., Weiss, H. y Weber, R. (2013). «Integrated methodology for assessing the HCH groundwater pollution at the multi-source contaminated mega-site Bitterfeld/Wolfen». *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20:1907–1917.
- Zaleska, A., Hupka, J., Wiergowski, M. y Biziuk, M. (2000). «Photocatalytic degradation of lindane, *p,p'*-DDT and methoxychlor in an aqueous environment». *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 135 (2–3): 213-220.

- Zhao, X., Quan, X., Chen, S., Zhao, H.M. y Liu Y (2007). «Photocatalytic remediation of gamma-hexachlorocyclohexane contaminated soils using TiO<sub>2</sub> and montmorillonite composite photocatalyst». *J. Environ. Sci. (China)*, 19(3):358-61.
- Zheng, G., Selvam, A., Wong, J.W.C. (2011). «Rapid degradation of lindane (gamma-hexachlorocyclohexane) at low temperature by *Sphingobium* strains». *International Biodeterioration & Biodegradation* 65: 612-618.
- Abhilash, P.C., Srivastava, S., Srivastava, P., Singh, B., Jafri, A. y Singh, N. (2011). «Influence of rhizospheric microbial inoculation and tolerant plant species on the rhizoremediation of lindane». *Environmental and Experimental Botany*, 74:127-130.

DIRECCIÓN GENERAL DE POLÍTICAS INTERIORES

## DEPARTAMENTO TEMÁTICO

### DERECHOS DE LOS CIUDADANOS Y ASUNTOS CONSTITUCIONALES

#### Cometido

Los departamentos temáticos son unidades de análisis que prestan asesoramiento especializado a comités, delegaciones interparlamentarias y otros órganos parlamentarios.

#### Áreas temáticas

- Asuntos Constitucionales
- Justicia, Libertad y Seguridad
- Igualdad de Género
- Asuntos Jurídicos y Parlamentarios
- Peticiones

#### Publicaciones

Visite la web del Parlamento Europeo:  
<http://www.europarl.europa.eu/supporting-analyses>

CRÉDITOS DE LAS FOTOGRAFÍAS: iStock International Inc.



ISBN 978-92-846-0574-3 (paper)  
ISBN 978-92-846-0575-0 (pdf)

doi:10.2861/236299 (paper)  
doi:10.2861/14496 (pdf)



Oficina de Publicaciones