



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

**TRABAJO FIN DE GRADO
LINDANO II- RECUPERACIÓN DE SUELOS
AFECTADOS POR LINDANO**

Autor: Yaiza Serrano Reyes

Fecha: Julio 2020

Tutor: María Inmaculada Valverde Asenjo

ÍNDICE

❖ Resumen. Palabras clave	3
❖ Introducción	3
○ Identidad del lindano.....	3
▪ Estructura química	3
▪ Características fisico-químicas	4
○ Problemática	4
▪ Toxicidad	5
▪ Repercusión en el medio ambiente.....	6
▪ Producción de lindano	7
❖ Objetivos	9
❖ Material y métodos.....	10
❖ Resultados y discusión	10
○ Técnicas de recuperación de suelos afectados por lindano.....	11
▪ Tipos de aplicaciones	11
▪ Tipos de tratamientos.....	11
○ Casos prácticos.....	15
▪ Argalarío (Bizkaia).....	15
▪ Sabiñánigo (Huesca).....	16
▪ O Porriño (Pontevedra).....	17
❖ Conclusiones.....	18
❖ Bibliografía.....	19

RESUMEN

El lindano es un plaguicida organoclorado utilizado durante muchos años como insecticida en diversas formulaciones, extendiéndose su presencia debido a su uso generalizado en tratamientos agrícolas, insecticidas domésticos, usos sanitarios y farmacológicos. Aunque actualmente su fabricación, comercio y empleo está prohibido, el auge en la fabricación y utilización de este compuesto desde la segunda mitad del siglo XX en nuestro país, entre otros, provocó una extensa contaminación de suelos y aguas (superficiales y subterráneas) con lindano, isómeros de HCH y otras sustancias tóxicas asociadas al proceso de producción del lindano, propiciando la generación de toneladas de residuos nocivos mal gestionados que hoy en día plantean un riesgo tanto medioambiental así como para la salud humana de gran importancia debido a su carácter carcinógeno, persistente, bioacumulable, disruptor endocrino y su potencial de transporte a largas distancias.

En este trabajo se abordan las diferentes técnicas existentes enfocadas en la inmovilización y/o reducción de la concentración del contaminante en las áreas afectadas sobre suelos contaminados por lindano, en los que su acumulación está relacionada en gran medida con el contenido orgánico del suelo, promoviendo su lenta degradación. Con el objetivo de revertir esta situación, se han propuesto diversos tratamientos de contención, confinamiento y descontaminación tanto de aplicación *in situ* como *ex situ*. Se hace especial referencia a la aplicación práctica de dichas técnicas en diferentes territorios de España.

Palabras clave: *lindano, hexaclorociclohexano, contaminante, recuperación, remediación.*

INTRODUCCIÓN

El lindano es el nombre común del isómero gamma del 1,2,3,4,5,6-hexaclorociclohexano (HCH), según la nomenclatura de la IUPAC, y pertenece a la familia química de los hidrocarburos clorados dentro del grupo de plaguicidas organoclorados (Vega et al., 2016).

Se ha utilizado como insecticida de amplio espectro, en combinación con otros insecticidas o fungicidas, con intenciones tanto agrícolas (tratamiento de las semillas y suelos) como no agrícolas (ectoparasiticida de uso veterinario y farmacéutico para el control de ácaros y piojos) (WHO, 1991; FAO, 2000).

En relación a las formulaciones en las que se comercializa dicho compuesto, se diferencian, principalmente, en función de la concentración de principio activo y su finalidad. Así, las presentaciones más relevantes en orden decreciente de concentración son: polvos humedecidos (hasta un 90%), concentrados en emulsión ($\leq 20\%$), disoluciones en disolventes orgánicos ($\leq 50\%$), polvos (0,5-2%) y suspensiones en agua (WHO, 1991; Calvelo-Pereira, 2008).

IDENTIDAD DEL LINDANO

ESTRUCTURA QUÍMICA

La estructura molecular del HCH se encuentra formada por un anillo de seis carbonos unidos cada uno de ellos a un cloro e hidrógeno adoptando en el espacio la configuración de silla (Figura 1), ya que es la más estable. En el proceso de fabricación se producen distintos isómeros del HCH siendo los más abundantes el α , β y γ (lindano), este último el único con características insecticidas (Vega et al., 2016). Asimismo, el descubrimiento de la actividad

insecticida del lindano, tuvo su origen en la búsqueda de compuestos químicos de síntesis para reemplazar a otros insecticidas naturales deseados de elevado coste, como piretro y rotenona (Ortiz Martínez, 1991).

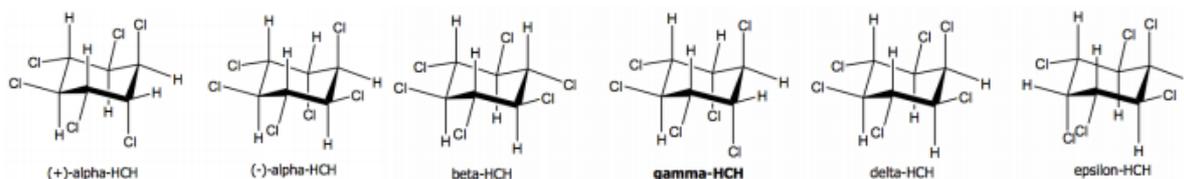


Figura 1. Estructura molecular de los diferentes isómeros del HCH- (Vega et al., 2016)

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Respecto a las características físico-químicas, el lindano es una molécula sólida cristalina, ligeramente volátil, de color blanco e inodora. Además, es estable en presencia de luz, aire, calor, dióxido de carbono (CO_2) y ácido fuerte; no obstante, ante la presencia de bases o la acción prolongada del calor, se produce la deshidrocloración del compuesto dando lugar a la formación de triclorobencenos y ácido clorhídrico (HCl). Por otra parte, no es compatible con bases fuertes, metales en estado sólido (hierro, zinc y aluminio) y agentes oxidantes (ozono) (WHO, 1991, MTERD, 2007).

Las propiedades físico-químicas de los isómeros se encuentran íntimamente relacionadas con la estructura molecular de cada uno de ellos. Así, el isómero gamma es el único con propiedades insecticidas; el β -HCH es una molécula de bajo volumen molecular y elevada densidad, debido a la posición de todos los átomos de cloro en posición ecuatorial, lo que le otorga elevada estabilidad tanto física como metabólica permitiendo acumularse más fácilmente en animales; sin embargo, tanto el α -HCH como el γ -HCH, al poseer átomos de cloro en posición axial, presentan una menor estabilidad predominando en suelo, agua y aire (Calvelo-Pereira, 2008). No obstante, todos los isómeros de hexaclorociclohexano son productos tóxicos para los organismos superiores aunque la acción de los isómeros del HCH difiere cuantitativa y cualitativamente con respecto a su actividad biológica (CECOP, 2007; Calvelo-Pereira, 2008).

PROBLEMÁTICA

La producción de lindano ha sido muy elevada, siendo ampliamente utilizado en todo el mundo desde 1940. Sin embargo, los impactos negativos en el medio ambiente y los efectos negativos en la salud humana, debido a su carácter carcinógeno, persistente, bioacumulable y disruptor endocrino, condujeron a su restricción y regulación sobre la producción y el consumo, muy controlado desde la década de los 70 en adelante (Calvelo-Pereira, 2008), quedando sujeto a acuerdos y tratados internacionales (PNA, 2004). Asimismo, estas medidas de control afectan del mismo modo al α -HCH y el β -HCH, puesto que se generan en la producción del lindano (CECOP, 2008).

En particular, los tres isómeros más relevantes del HCH (α , β y γ) fueron incluidos en 2009 en el artículo 6 del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), en cuyo anexo A se prohíbe directamente la producción intencional, comercialización y uso en los países

miembros del Convenio, con el objetivo de eliminar la liberación de estas sustancias al medio ambiente hasta donde sea posible (MAGRAMA, 2012).

Ya en 1979, la Unión Europea prohibió el uso de los productos fitosanitarios que contenían HCH en menos de un 99% del isómero gamma (Directiva 79/117/CEE del Consejo). Para llevar a efecto las disposiciones del Convenio¹ aprobó el Reglamento (CE) Nº 850/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre COPs, limitando al máximo su producción y uso para eliminarse definitivamente a finales de 2007 y quedando prohibida, desde 2011, su importación y/o exportación en los países miembros de la Unión Europea (Reglamento 214/2011 de la Comisión).

TOXICIDAD

Las vías de entrada del lindano en el organismo son fundamentalmente: vía inhalatoria, principalmente en las zonas de producción y aplicación; dérmica, por contacto o aplicación directa sobre la piel; y oral, por la ingestión de alimentos contaminados por el plaguicida (IARC, 2015). Si bien, actualmente su empleo está prohibido en numerosos países, el riesgo de exposición actual no ha desaparecido todavía debido al carácter persistente y estabilidad ambiental que presenta esta molécula, así como por su acumulación en los tejidos más grasos y transmisión vertical durante el embarazo y lactancia (Olea Serrano, 2015). En la actualidad, la existencia de niveles elevados de concentración en suelos sugiere un alto nivel de exposición durante décadas asociado a su uso agrícola, participación del llamado “Transporte a Larga Distancia” y, en gran medida, al depósito de residuos de su fabricación (Calvelo-Pereira, 2008).

Al tener carácter lipófilo (coeficiente de reparto octanol/agua: $\log Pow = 3.61-3.72$), presenta una buena absorción dérmica (IARC, 2015). La distribución es rápida a través de la circulación sistémica alcanzándose elevadas concentraciones especialmente en hígado (órgano más afectado [CE, 2005]), tejido adiposo, cerebro (fundamentalmente en materia blanca, tálamo, cerebro medio y médula espinal), placenta y leche materna (IARC, 2015; Sanfeliu et al., 1988; WHO, 1991). El metabolismo se produce principalmente en el hígado mediante cuatro reacciones (deshidrogenación a gamma-hexaclorociclohexeno y gamma-pentaclorociclohexeno, descloración a gamma tetraclorohexeno e hidroxilación a hexaclorociclohexanol). Sin embargo, los metabolitos no son tóxicos y son excretados por vía urinaria en forma libre o conjugados con ácido sulfúrico, ácido glucurónico o N-acetilcisteína (WHO, 1991).

La toxicidad de este compuesto adquiere especial relevancia en el Sistema Nervioso Central y Sistema Endocrino. Los síntomas más relevantes ante una exposición aguda incluyen afecciones cutáneas, cefaleas, náusas-vómitos, entre otros, pudiendo llegar a la muerte; mientras que ante una exposición crónica son relevantes las alteraciones hematológicas (CECOP, 2006; Vega et al., 2016). Además, el lindano ha sido clasificado dentro del Grupo 1 como “cancerígeno para humanos”, por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), la cual forma parte de la Organización Mundial de la Salud de las Naciones Unidas (IARC, 2015).

¹y del Protocolo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes adoptado en Aarhus (Dinamarca) en 1998, este último dentro del marco del Convenio sobre Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia.

Existen diferentes estudios de toxicidad aguda realizados sobre ratas que denotan valores de DL50_{Toxicidad oral} aguda similares a 60-250 mg/Kg pc y DL50_{Toxicidad dérmica} de 900 mg/Kg pc (WHO, 1991). Otros análisis relacionados con la toxicidad aguda /subcrónica en ratas denotan un NOAEL de 6-7 mg/kg pc/día (EFSA, 2005); sin embargo, en estudios crónicos se obtiene un NOAEL semejante a 4,8 m/kg pc/día (CE, 2005).

Por otro lado, 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/litro. Asimismo, la sustancia muestra una toxicidad aguda moderada tanto en aves como mamíferos y se han observado efectos a largo plazo en la reproducción y desarrollo de estos animales. Además, el lindano es muy tóxico para las abejas y se han detectado propiedades de alteración endocrina en muchos animales como aves, ranas y mamíferos (CECOP, 2006).

REPERCUSIÓN EN EL MEDIO AMBIENTE

La repercusión del lindano en el medio ambiente cobra gran importancia ya que se encuentra íntimamente ligado a la exposición humana al mismo.

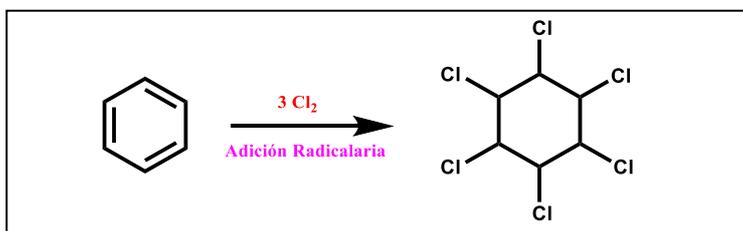
El γ -HCH puede considerarse un compuesto altamente persistente en el medio ambiente, ya que su degradación es lenta, debido a su naturaleza apolar y estabilidad ambiental, especialmente en el medio acuático. De este modo, presenta una semivida elevada: 96 días en el aire, 30-300 días en aguas superficiales e incluso 3 años en suelos. No obstante, hay que tener en cuenta que la vida media de este compuesto se ve influenciada por diversos factores (naturaleza y propiedades físico-químicas del suelo, clima o profundidad del mismo) (CECOP, 2006; WHO, 1991; Vega et al., 2008) y adquieren especial relevancia los procesos de degradación biótica y abiótica, llevada a cabo por diferentes microorganismos y hongos o bien catalizada por sustancias inorgánicas (Calvelo-Pereira, 2008). Por otra parte, este isómero se biodegrada rápidamente a otros isómeros en medios anaerobios, siendo la semivida de descomposición de aproximadamente unos 20-50 días (FAO, 2000; CECOP, 2006). Sin embargo, bajo la acción microbiana y en un medio aerobio, la degradación de este compuesto se produce de manera más lenta llegando a alcanzar una semivida de 980 días por lo que permanece un largo periodo de tiempo en el suelo produciendo diferentes alteraciones ambientales (CECOP, 2006; MTERD, 2007). Por otro lado, la adsorción a la fracción coloidal del suelo evita su degradación (Calvelo-Pereira, 2008). En este sentido, es importante resaltar la escasa movilidad del lindano en suelos ricos en materia orgánica; por el contrario, su movilidad es mayor en suelos con bajo contenido en materia orgánica lo que le permite difundir mediante los procesos de lixiviación y percolación a través del suelo (WHO, 1991; FAO, 2000). De esta manera, el compuesto queda menos adsorbido siendo capaz de dispersarse y contaminar amplias extensiones desencadenando graves repercusiones ambientales.

Por otra parte, el lindano puede bioacumularse y biomagnificarse ya que presenta elevada afinidad por los lípidos a los que se une que, junto con la difícil biodegradación, facilita su acumulación en la cadena trófica, bioconcentrándose con rapidez en microorganismos invertebrados, peces, aves y mamíferos, y elevándose su concentración en niveles tróficos superiores (IARC, 2015; WHO, 1991).

Se ha observado un elevado potencial de transporte atmosférico a larga distancia para el lindano. Particularmente para los isómeros α y γ del HCH, se han encontrado concentraciones relativamente altas en el aire en países con menores densidades de emisión que los países productores e incluso donde se han utilizado HCH técnico y lindano, explicándose por el transporte atmosférico desde los países con altas densidades de emisión (Funes Casalvázquez et al., 2017). Estas sustancias pueden volatilizarse en las bajas latitudes de climas cálidos y ser transportadas hacia elevadas latitudes, donde se acumulan y depositan, en un proceso denominado “destilación global”; así, numerosos estudios demuestran una mayor concentración en zonas geográficas con climas fríos (CECOP, 2006). Esto se explica por su carácter semivolátil que le permite adoptar la forma de vapor o adsorbidos a partículas atmosféricas, propagándose a largas distancias a través del aire, agua o acumuladas en especies migratorias antes de depositarse nuevamente (MAGRAMA, 2012). Cabe destacar que el proceso de evaporación tiene lugar de manera lenta debido a la baja presión de vapor ($4,2 \times 10^{-5}$ mmHg a 20°C) y elevada adsorción que presenta el compuesto (FAO, 2000; Vega et al., 2016). Por su persistencia, pueden ser depositadas y volver a volatilizarse en ciclos sucesivos en función de las temperaturas ambientales, produciéndose lo que se conoce como “efecto saltamontes” o “grasshopping” (MAGRAMA, 2012).

PRODUCCIÓN DEL LINDANO

El hexaclorociclohexano, fue descubierto en 1825 por Michael Faraday mediante la reacción de fotocloración del benceno (Figura 2); pero no fue hasta 1912, cuando Teunis Van der Linden consiguió aislar el isómero gamma puro (Vijgen, 2006; IARC, 2015).



MECANISMO:

Etapa 1 (Iniciación): El calor o la luz provocan la ruptura homolítica del enlace del cloro formándose 2 radicales libre de cloro.

En la mezcla, la energía aplicada, promueve un electrón al orbital antienlazante del cloro debilitando el enlace.

Ruptura homolítica

Radicales libres. Especies que poseen un electrón desapareado, inestables y por lo tanto, muy reactivos

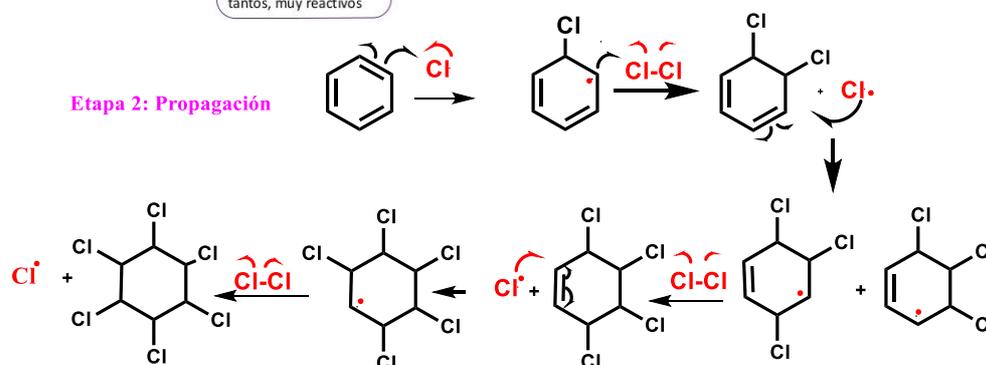


Figura 2. Proceso de fabricación del hexaclorociclohexano (HCH) mediante la reacción de fotocloración del benceno

En el proceso de fabricación (Figura 3) se producen diferentes tipos de hexaclorociclohexano:

- ❖ **HCH técnico.** Hace referencia a la mezcla de isómeros (α : 55-80%, β : 5-14%, γ : 8-15%, δ : 2-16% y ϵ : 3-5%) (Vijgen et al., 2019; Calvelo-Pereira, 2008; Vijgen et al., 2011). Se produce a partir de la cloración del benceno bajo condiciones específicas (benceno en exceso y luz ultravioleta intensa) evitando así la formación de productos indeseados y/o inestables (NaClO, BCl₃, clorobenzenos, etc.) que actuarían como activadores químicos (Vijgen, 2006; Calvelo-Pereira, 2008).
- ❖ **HCH enriquecido.** Corresponde con el isómero γ -HCH concentrado al 40%. Para ello, el HCH técnico se enfría de manera que los isómeros inactivos (especialmente α -HCH) cristalizan y son eliminados junto con el benceno en exceso (Vijgen, 2006; Calvelo-Pereira, 2008).
- ❖ **γ -HCH (Lindano).** Hace alusión a la obtención de un 99% del isómero γ -HCH a partir de la extracción con metanol a 15-25°C y posterior destilación con metanol a 80-100°C del HCH técnico. Esta solución concentrada se deja enfriar hasta obtener un sólido cristalino que corresponde con el isómero γ -HCH purificado. Cabe destacar, que el proceso de cristalización fraccionada se realiza teniendo en cuenta la solubilidad de los diversos isómeros ya que repercute en la velocidad de cristalización del procedimiento (Vijgen, 2006; Calvelo-Pereira, 2008).

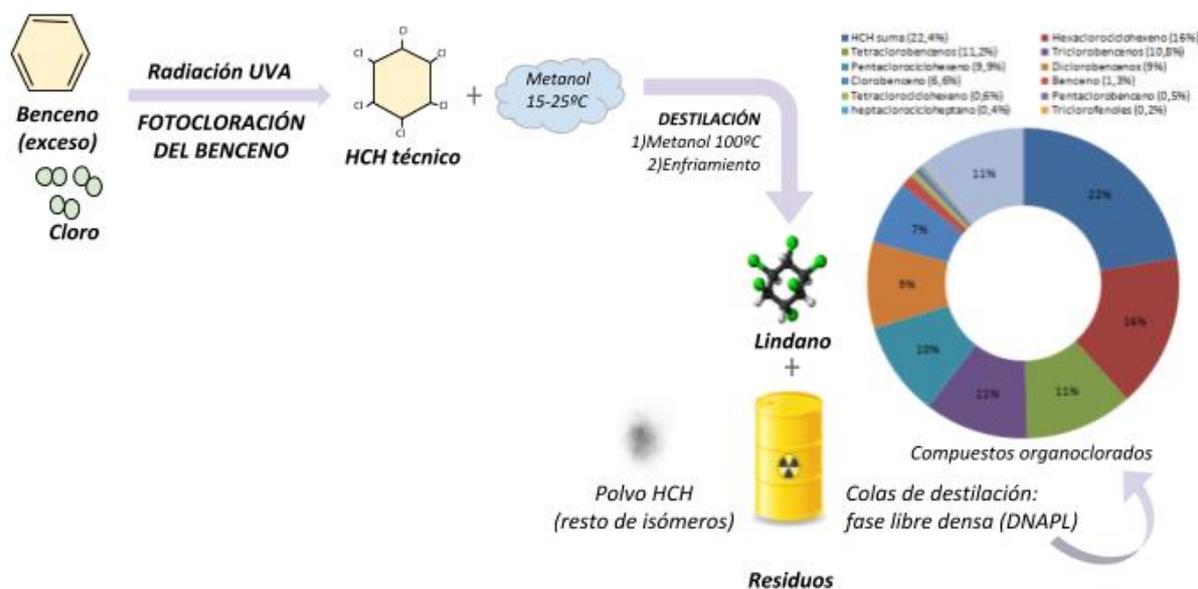


Figura 3. Proceso de fabricación de los diferentes tipos de HCH

En un principio, el HCH técnico fue usado como plaguicida debido a las propiedades insecticidas que le confería el isómero gamma. Posteriormente, se sustituyó por el lindano en el que la proporción del isómero gamma corresponde a un 99% (Calvelo-Pereira, 2008).

Sin embargo, para la producción de una tonelada de lindano se obtienen aproximadamente 8-12 toneladas de diferentes isómeros, con características contaminantes similares a las del lindano, y otros subproductos no deseados, entre los que se encuentran dioxinas, hidrocarburos policlorados pertenecientes al cuerpo de los compuestos orgánicos persistentes (COP), etc. (Vijgen et al., 2011; Vijgen, 2006). De este modo, los residuos de la fabricación del lindano han dejado una herencia ambiental de graves consecuencias, que

incorpora un riesgo representado por la exposición a una mezcla muy compleja de contaminantes cuyas características tóxicas no han sido investigados en cuanto a toxicidad individual o combinada (Olea-Serrano, 2015).

En la Figura 4 se recoge una estimación inicial de isómeros de residuos de HCH almacenados y/o depositados en distintos países realizadas a partir de la recopilación de información de los foros sobre HCH y pesticidas así como de la bibliografía. Se trata de una subestimación dada la existencia de sitios de producción y depósitos de residuos aún no identificados (Vijgen et al., 2011), aunque orienta sobre las zonas productoras. Gran cantidad de residuos generados en la obtención de lindano fueron depositados sin control en las cercanías de las zonas de producción, donde se produjo una utilización secundaria de los mismos (insecticida de baja eficacia mezclado con suelo), traslado de tierras y allanamiento durante la construcción de autovías, polígonos residenciales, etc. (Calvelo-Pereira, 2008). A día de hoy, se desconoce parte de su distribución espacial así como las cantidades, composición o transformación experimentada por los residuos o las condiciones en que se produjeron estos vertidos (Calvelo-Pereira, 2008; Vijgen et al., 2011).

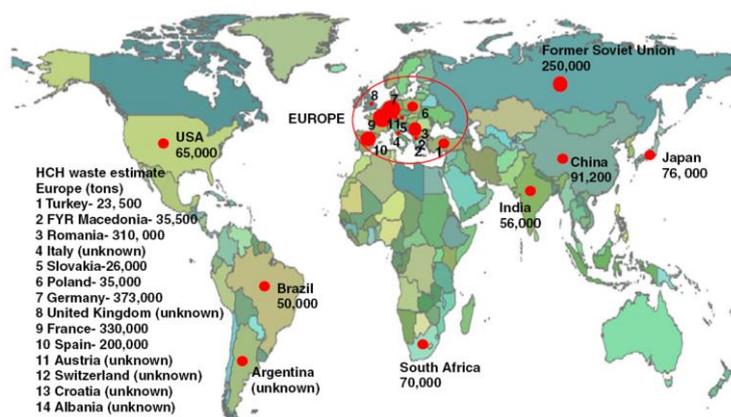


Figura 4. Estimación inicial de las cantidades de isómeros de los residuos de HCH almacenados / depositados en distintos países - (Vijgen et al., 2011)

En España funcionaron varias fábricas de lindano entre finales de los años cuarenta y principios de los noventa del siglo pasado localizadas en País Vasco, Pontevedra y Huesca (Fernández et al., 2013) las cuales han fabricado lindano o lo han utilizado en sus procesos de producción otras empresas situadas en Barcelona, Madrid, Tarragona y Vizcaya. Además, se han localizado otros puntos asociados al vertido ilegal en las localidades de Soria, Navarra, Álava o Palencia, entre otras (Funes-Casalvázquez et al., 2017). En contraposición, se han identificado algunas zonas próximas a las fábricas (País Vasco, Pontevedra y Huesca) en las que se han establecido o se están aplicando medidas correctoras y de control (MAGRAMA 2012).

OBJETIVOS

Los objetivos principales del trabajo se centran en los siguientes puntos:

- Abordar las diferentes técnicas existentes enfocadas a la recuperación de suelos contaminados por lindano.
- Conocer la aplicación práctica de estas técnicas en diferentes territorios de España.

MATERIAL Y MÉTODOS

Este trabajo se ha realizado a partir de la revisión bibliográfica de diversos artículos obtenidos a partir de bases de datos on-line como ELSEVIER, Pubmed, SciELO, Science Direct o Springer link así como la revista de divulgación científica *Edafología*. Además, se han consultado diferentes páginas web entre las que destacan: European Food Safety Authority (EFSA), International Agency for Research on Cancer (IARC), World Health Organization (WHO), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Agencia Española de Consumo, Seguridad Alimentaria y Nutrición (AECOSAN), entre otras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La legislación aplicable a suelos contaminados tiene como punto de partida la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados que establece, en el Título V, la obligatoriedad de realizar actuaciones de limpieza y recuperación del suelo que se ha declarado contaminado, en función de su presencia en el suelo y los riesgos que comporte para la salud humana y el medio ambiente.

El desarrollo de este Título V se realiza de acuerdo al 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, constituyendo el marco regulador específico para la gestión de los suelos contaminados. De este modo, establece unos límites de concentración en el suelo (Niveles Genéricos de Referencia), para los isómeros α , β y γ del HCH, asociados a un máximo de concentración aceptable para la salud humana (que se establecen en función del uso del suelo) y la protección de los ecosistemas. Por otra parte, prioriza las acciones orientadas a eliminar, en lo posible, focos de contaminación y a reducir la concentración de los contaminantes en el suelo (tratamientos *in situ* que eviten la generación, traslado y eliminación de residuos) frente a las soluciones de recuperación tendentes a reducir la exposición (contención o confinamiento).

En la práctica, las acciones asociadas al proceso de recuperación de suelos contaminados son técnicamente complejas y requieren de un gran esfuerzo en investigación e innovación, enfocándose principalmente en (PELICR, 2016):

- Investigación medioambiental del emplazamiento contaminado, a fin de caracterizar el problema.
- Seguimiento hidrogeológico del emplazamiento y entorno (incluye aguas superficiales y subterráneas) con el objetivo de controlar los riesgos ambientales.
- Realización de infraestructuras asociadas a la implementación de las acciones de recuperación y control tanto de aguas como lixiviados.
- Gestión de residuos.

A la hora de hablar de recuperación de suelos se pueden emplear términos como “restauración” o “remediación”, siendo este último una anglicismo (*remediation*). Es por ello, que lo correcto es emplear la palabra recuperación cuando se hace alusión a la eliminación o disminución de los niveles de contaminantes en suelo.

TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS AFECTADOS POR LINDANO

TIPOS DE APLICACIONES

A la hora de establecer un procedimiento para la recuperación del suelo contaminado, se diferencian dos tipos de aplicaciones (Figura 5): *“in situ”*, implican la actuación de recuperación en el área contaminada; y *“ex situ”*, precisan la excavación previa del suelo para su posterior tratamiento en un sitio alejado del contaminado (Sánchez et al., 2005). Una variante de este último tipo de aplicación es la denominada *“on site”* la cual se caracteriza por realizar el tratamiento en una zona limítrofe del área contaminada (Brutti et al., 2018)

	IN SITU	EX SITU
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> ■ No altera la estructura del suelo ■ Menor coste económico 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Menor tiempo de duración ■ Capacidad de homogenizar muestra ■ Fácil verificación de la eficacia
INCONVENIENTES	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mayor tiempo de ejecución ■ Dificultad para homogenizar muestra ■ Difícil verificación de la eficacia 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Altera la estructura del suelo (excavación) ■ Mayor coste económico

Figura 5. Ventajas e inconvenientes de los tipos de aplicación para la recuperación de suelos contaminados – (INEEC, 2007, modificado)

TIPOS DE TRATAMIENTOS

Los tipos de tratamiento de recuperación, se clasifican de acuerdo al objetivo que se desea conseguir a la hora de recuperar el suelo contaminado: contención, confinamiento y descontaminación. El objetivo principal se centra en la búsqueda de una técnica que disminuya la concentración de contaminante hasta alcanzar niveles de riesgo aceptables (Roqueta-Ibert, 2016). Las técnicas más relevantes empleadas en los suelos contaminados por lindano (Figura 6), de acuerdo con Ortiz-Bernad et al.,2007, son las siguientes:

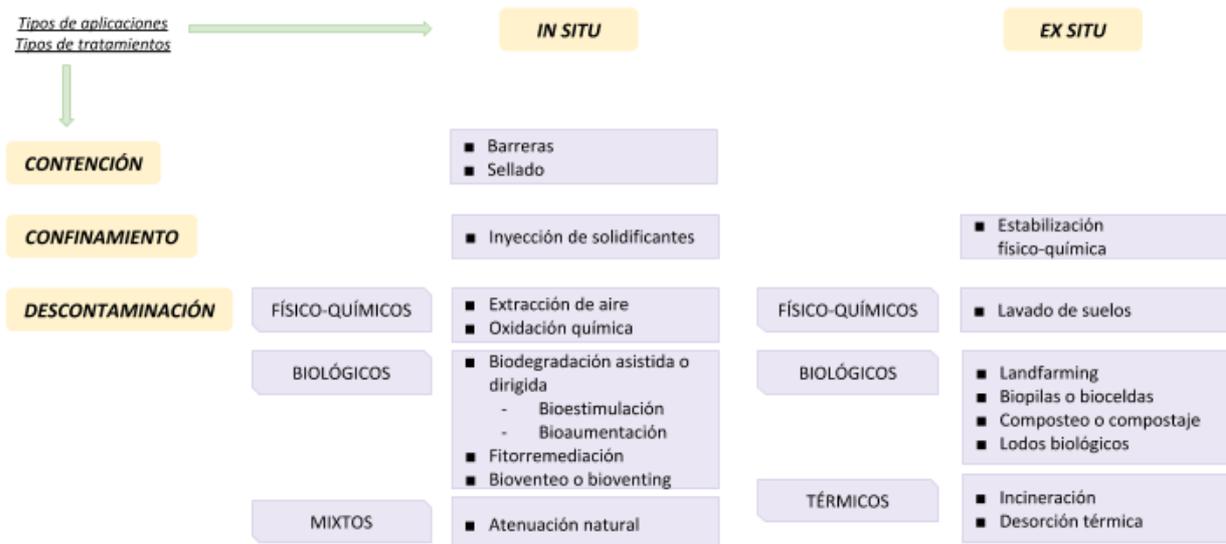


Figura 6. Técnicas usadas para la recuperación de suelos contaminados por lindano

- ❖ **Contención.** Se trata de un tratamiento *in situ* basado en el aislamiento del contaminante en el suelo con el objetivo de prevenir su migración a otras localizaciones. Consiste en una excavación profunda del terreno afectado y posterior relleno con material aislante (cemento, bentonita, hormigón, etc.) formando pilotes que componen la barrera subterránea. Normalmente, se combina con el sellado tanto superficial, con el uso de materiales impermeables (bentonita y/o material geotextil) que evitan la infiltración de agua de lluvia en el suelo además de controlar la volatilización del contaminante, como en profundidad mediante la inyección de materiales plastificantes en forma de lechada (bentonita, cemento, silicato sódico, etc.) que disminuyen la permeabilidad del suelo contaminado controlando la contaminación a ese nivel.
- ❖ **Confinamiento.** Se fundamenta en la reducción de la movilidad de los contaminantes haciendo uso de sus propiedades fisicoquímicas .
 - Estabilización físico-química: tratamiento de aplicación *ex situ* que consiste en la precipitación e inmovilización del compuesto mediante reacciones con agentes estabilizantes (cemento y/o fosfatos/alcalis) en un tanque con agua, aumentando el pH y reduciendo la solubilidad del contaminante en suelos y lixiviados. Además, permite la reutilización del suelo.
 - Inyección de solidificantes: consiste en la inyección *in situ* del agente estabilizante en el suelo contaminado quedando el contaminante retenido en una matriz impermeable al agua.
- ❖ **Descontaminación.** Consiste en la disminución de la concentración de contaminantes del suelo a partir de diversos tratamientos físico-químicos, biológicos, térmicos y mixtos.

Tratamientos físico-químicos: usan factores físico-químicos que ayudan a eliminar en gran medida el contaminante del suelo lo que supone un menor tiempo de efectividad en la práctica (García-Pereira, 2018).

- Extracción de aire: método *in situ* basado en la extracción de contaminantes adsorbidos al suelo mediante pozos de extracción que dirigen el aire cargado a la superficie, donde son sometidos a un tratamiento depurador. Es necesario que el suelo sea permeable y el contaminante presente cierta movilidad, como es el caso del lindano en suelos con bajo contenido en materia orgánica para favorecer la circulación del contaminante (Hurtado-Melo, 2010).
- Lavado de suelos: tratamiento *ex situ* donde se homogeniza el suelo excavado mediante la separación física (por tamizado, celda de flotación y/o hidrociclones) de las fracciones del suelo, posterior lavado con sustancias químicas adsorbentes, secado y deposición en el lugar original. La eficacia de esta técnica depende del grado de adsorción del contaminante ya que son las partículas más finas del suelo las que presentan mayor capacidad de adsorción de manera que el contaminante queda más retenido (García-Pereira, 2018; Hurtado-Melo, 2010; Brutti et al., 2018).
- Oxidación química: técnica *in situ* donde las perforaciones realizadas en el suelo contaminado son rellenas con una solución alcalina concentrada (normalmente hidróxido de sodio) y un agente oxidante (persulfato). Solamente se puede aplicar en estratos de roca sedimentaria detrítica (arenisca y/o carcarenitas) lo que supone un elevado coste (PELICR, 2016).

Tratamientos biológicos: se conocen por el nombre de “biorecuperación” o “biorremediación”. Usan organismos vivos naturales o modificados genéticamente (OMG) capaces de degradar, transformar o reducir de una manera más rápida los contaminantes presentes en el suelo. La falta de conocimiento acerca de las rutas de biodegradación comprometen la eficacia del tratamiento; sin embargo, supone un método más sencillo, económico y concienciado con la salud y medio ambiente (Volke-Sepúlveda et al., 2002; García-Pereira, 2018; Brutti et al., 2018). Estos tratamientos se resumen según el tipo de aplicación:

IN SITU

Estas técnicas utilizan diferentes suministros (aire, nutrientes, microorganismos y/o humedad) para potenciar el crecimiento microbiano (Volke-Sepúlveda et al., 2002).

- Biodegradación asistida o dirigida (Figura 7): se centra en la aceleración de las reacciones de biodegradación de los OMG haciendo uso de técnicas como la bioestimulación o bioaumentación. Para ello, se debe tener un control preciso de la tasa de degradación del contaminante ya que se encuentra influenciada por diversas variables dependientes del clima y suelo (Brutti et al., 2018).

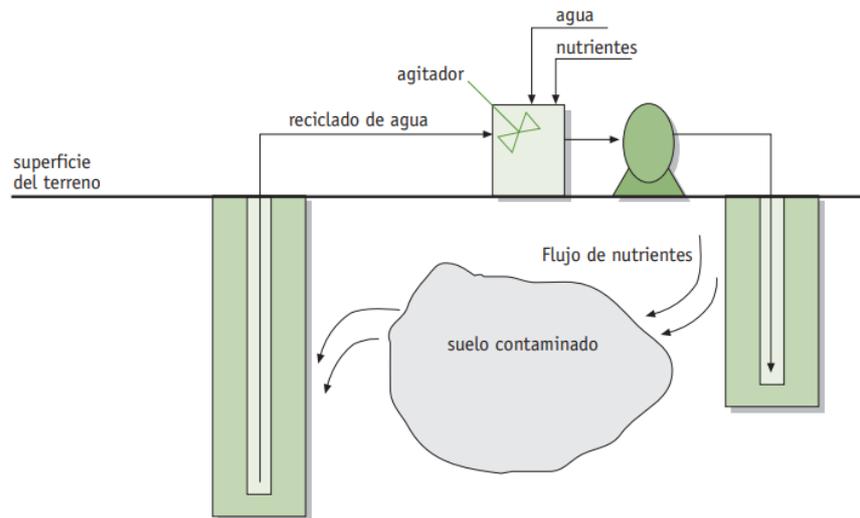


Figura 7. Esquema de la aplicación “biodegradación asistida o dirigida”- (Ortiz-Bernad et al., 2007)

- Bioestimulación: consiste en la estimulación de la actividad microbiana natural de los microorganismos autóctonos de la zona contaminada mediante sistemas de inyección (galerías de inyección o pozos) que permiten la infiltración de agua cargada de nutrientes o zonas de reacción a las que se le añadan los elementos esenciales.
- Bioaumentación: se basa en la incorporación de microorganismos con capacidad degradativa a un suelo cuya población microbiana autóctona no la presente.
- Fitorremediación: se emplean especies vegetales superiores capaces de acumular, transformar o degradar compuestos contaminantes mediante diferentes mecanismos de contención (fitoestabilización) o eliminación (fitodegradación, fitoextracción o fitoacumulación, fitovolatilización y rizofiltración). Es útil en áreas poco contaminadas y profundas (Volke-Sepúlveda et al., 2002; Brutti et al., 2018; García-Pereira, 2018).

- Bioventeo o bioventing: basado en la inyección de aire, oxígeno y/o nutrientes en el suelo contaminado mediante pozos que minimizan la volatilización del contaminante. Sólo es aplicable bajo condiciones aerobias ya que requiere la presencia de oxígeno (Volke-Sepúlveda et al., 2002).

EX SITU

Estas técnicas incluyen procesos de biodegradación a partir de suelos contaminados previamente excavados (Volke-Sepúlveda et al., 2002).

- Landfarming: consiste en la excavación y dispersión en capas del suelo contaminado a las que se le añaden elementos esenciales (nutrientes, minerales, agua, oxígeno y microorganismos [bacterias]) y mediante arado o labranza se airea para estimular la actividad microbiana de la zona. Precisa que el suelo se encuentre mezclado correctamente, para aumentar la superficie de contacto entre el contaminante y los microorganismos, y oxigenado, para que se produzca la degradación aeróbica. Resulta ser muy eficaz para la recuperación de suelos contaminados por lindano ya que reduce un 82% de la concentración inicial de éste (Rubinos et al., 2008).
- Biopilas o bioceldas: el suelo contaminado es excavado y amontonado en pilas donde se añaden los elementos necesarios y se airean mediante extracción o inyección forzada de aire permitiendo su circulación por los conductos perforados de la pila de material, la cual se encuentra recubierta por plástico para favorecer el calentamiento y evitar procesos como la escorrentía de lixiviados, volatilización y evaporación. Es apto en suelos permeables ya que mejora circulación de las sustancias esenciales (Rubinos et al., 2008; Volke-Sepúlveda et al., 2002).
- Composteo o compostaje: se trata de una técnica semejante a las anteriores pero, en este caso, el suelo contaminado se encuentra sometido a condiciones termófilas (12-18°C) al ser mezclado con sustancias orgánicas sólidas biodegradables (residuos de origen animal y/o vegetal) que elevan la temperatura hasta el cese de la degradación microbiana y, por tanto, del contaminante (Volke-Sepúlveda et al., 2002).
- Lodos biológicos: se centra en la excavación, tamizado y mezclado con elementos esenciales del suelo contaminado en biorreactores para ser separado del lodo desecado en lechos secantes, filtros o centrifugas. A pesar de ser útil en suelos heterogéneos y/o poco permeables, pueden aparecer durante el proceso subproductos más tóxicos que el producto original, lo que limita su uso (Volke-Sepúlveda et al., 2002).

Tratamientos térmicos: son técnicas *ex situ* que emplean el calor como suministro para la desintegración de sustancias contaminantes constituyendo un tipo de aplicación costosa y poco efectiva al destruir la estructura del suelo (Volke-Sepúlveda et al., 2002).

- Incineración: consiste en un tratamiento donde el suelo alcanza temperaturas muy elevadas (1000°C), por medio de la adición de combustibles, con el objetivo de volatilizar y oxidar los contaminantes. Durante el proceso, se liberan residuos (gases y cenizas) que deben ser tratados en sistemas de vacío para ser eliminados (Volke-Sepúlveda et al., 2002).
- Desorción térmica: método por el cual el suelo es sometido a temperaturas más bajas que consiguen la volatilización del contaminante a partir de la inyección de aire caliente a presión, vapor o calentamiento del suelo por radiofrecuencia. Se

distingue la desorción térmica de alta temperatura (320-560°C) y baja temperatura (90-320°C), manteniendo esta última la actividad biológica original del suelo al retener los componentes orgánicos y propiedades físicas. Asimismo, este método no es efectivo ante suelos muy contaminados, compactos o con escasa permabilidad ya que la temperatura que se alcanza es menor (Alonso-Riesco, 2012; Volke-Sepúlveda et al., 2002).

Tratamientos mixtos: tratamiento *in situ* que auna una serie de procesos naturales biológicos (biodegradación aerobia y anaerobia) y fisicoquímicos (dispersión, volatilización, estabilización físico-química o desintegración radioactiva) para la contención del contaminante. Puede emplearse en una amplia variedad de áreas contaminadas conservando la vegetación y horizonte superficial de la zona damnificada (Volke-Sepúlveda et al., 2002).

En resumen, atendiendo a los diferentes factores que afectan a un suelo contaminado, se hace uso de unos tratamientos u otros. Los métodos de confinamiento y descontaminación térmica han demostrado no ser efectivos a largo plazo ya que no garantizan la eliminación permanente del contaminante. Por otra parte, en la actualidad, la mayoría de los proyectos están orientados a tratamientos de descontaminación ya que los resultados perduran en el tiempo (Roqueta-Ibert, 2016).

CASOS PRÁCTICOS

Considerando la aplicación práctica de los diferentes tratamientos para la recuperación de suelos contaminados con lindano, son relevantes los siguientes casos.

ARGALARIO (BIZKAIA)

El emplazamiento de Argalario se localiza en el municipio de Barakaldo (Bizkaia, País Vasco) en la vertiente este del monte del Argalario. En la actualidad, su economía se basa en el sector servicio aunque en el siglo pasado, era la actividad industrial la que sustentaba la economía. Los primeros focos de contaminación surgieron en la década de 1990, cuando las empresas "Bilbao Chemicals" o "Nexana S.A.", dedicadas a la extracción de lindano a partir del HCH técnico, contribuyeron a la pérdida de superficies del suelos afectados por este compuesto (Alzola et al., 2015). Las autoridades del País Vasco, estiman la acumulación de aproximadamente 82.000 toneladas de residuos en las antiguas plantas de producción del lindano (Figura 8), desde donde se extendieron hacia los alrededores de la región (Vijgen, 2006).



Figura 8. Residuos acumulados en plantas de producción de lindano en País Vasco- (Vijgen, 2006).

Para la recuperación de estos suelos, se plantearon diferentes opciones (incineración, craqueo, tecnología blanda para la destrucción de compuestos organoclorados [BCD: dechloración catalítica en medio básico] o inertización) siendo la más conveniente la construcción de una celda de seguridad ya que contiene de manera física y segura los residuos de lindano y facilita su eliminación junto con otros compuestos como los residuos

de HCH. Antes de comenzar con la construcción de la celda de seguridad, se realizaron estudios preliminares, con el fin de observar el impacto ambiental que suponía el proyecto de recuperación en la zona contaminada, y se procedió a la desviación del cauce del arroyo Burtzako para evitar la infiltración de agua. La construcción de la celda (Figura 9), se realizó junto al vertedero tomando una forma bipiramidal truncada ajustada en las laderas de la vaguada. Primero, se construyó el vaso de la celda a partir de una pantalla vertical con varios pivotes de hormigón armado, separados entre sí para favorecer el drenaje de los lixiviados; a continuación se instalaron diferentes sistemas (red de aguas subsuperficiales en la parte inferior del sistema de sellado, sistema de ósmosis inversa para el tratamiento de los lixiviados y planta de tratamiento con depósito de homogenización), se reperfiló la superficie del vertedero y se selló la parte superficial del vaso para impedir la salida del contaminante al exterior y evitar la entrada de agua potenciando la producción de lixiviados (Alzola et al., 2015; Sancerni-Martínez, 2016). Finalmente, se procedió a la recuperación paisajística con la instalación de un tapiz herbáceo en el vertedero e hidrosiembra en la celda (IHOBE, 2018).



Figura 9. Celda de seguridad del emplazamiento de Argalario (antes y después) – (IHOBE, 2018)

En la actualidad, el empleo de la celda de seguridad se plantea como única solución factible; no obstante, se plantean como proyectos de futuro el empleo de técnicas biológicas (Sancerni-Martínez, 2016). Asimismo, tras la construcción de esta infraestructura se ha establecido un plan de control ambiental que incluye controles periódicos para garantizar la estabilidad de los residuos de lindano (Alzola et al., 2015).

SABIÑÁNIGO (HUESCA)

La problemática originada en el emplazamiento de Argalario se repitió de nuevo en Sabiñánigo (Huesca, Aragón), cuando la empresa “Bilbao Chemical S.A.” se expandió creando la compañía “Industrias Químicas del Noroeste S.A.” bajo el nombre conocido como “Inquinosa”, fábrica de mayor producción de lindano en Europa localizada a las orillas del río Gállego (Funes-Casalvázquez et al., 2017).

Durante décadas, la práctica de esta industria contribuyó a la liberación de residuos en el municipio lo que originó cuatro focos de contaminación: espacio industrial, embalse de Sabiñánigo, vertedero de Sardas y de Bailín, siendo estas dos últimas las áreas más afectadas al permitirse enterrar residuos tóxicos (Fernández et al., 2013). Estos residuos correspondían a la fase libre densa (DNAPL, *Dense non aqueous phase liquid*), formada por un 22,4% de lindano, y caracterizada por ser un compuesto líquido de elevada densidad e inmiscible en agua, lo que favorecía su depósito en zonas subterráneas e impermeables. Tras el cierre de Inquinosa, estos residuos químicos quedaron acumulados en el interior de la fábrica

contribuyendo a la contaminación de suelos y aguas cercanas (Figura 10). Así, en 2014, cuando la problemática parecía controlada, se detectaron elevadas concentraciones de lindano en las aguas de la orilla del río Gállego (7,05 miligramos) debido al traslado de este compuesto a la celda de seguridad construida cerca del vertedero de Bailín (Figura 11). De este modo, el Gobierno de Aragón no tuvo más remedio que prohibir el consumo de agua corriente a los ciudadanos de la zona, acto que desencadenó multitud de enfrentamientos por parte de diferentes organismos al denunciar como tardía la decisión (Brunat, 2019).



Figura 10. Acumulación de residuos tóxicos en los almacenes de Inquinosa – (Brunat, 2019)



Figura 11. Celda de seguridad próxima al vertedero de Bailín – (Brunat, 2019)

De acuerdo al “Plan estratégico de lucha intergal contra la contaminación de los residuos generados por la fabricación de lindano en Aragón” propuesto por el Gobierno de Aragón en el año 2016, el suelo contaminado se trasladaría hasta el vertedero de Bailín para aplicar la técnica denominada “ISCO”, tratamiento *in situ* basado en una oxidación química alcalina (PELICR, 2016). Para ello, se usa como sustancia oxidante el persulfato sódico y como agente activador el hidróxido sódico. Así, los resultados del empleo de esta técnica han revelado una disminución del 99% de los residuos de HCH y un 95-99% de restos de residuos (benceno y clorobenceno) (DREDDRS, 2016).

O PORRIÑO (PONTEVEDRA)

La aparición de los primeros vertidos de lindano en la zona del Polígono Industrial de Torneiros en O Porriño (Pontevedra, Galicia) data de los años 1947-1964 debido a la generación de elevados volúmenes de residuos tóxicos procedentes de la síntesis de lindano por parte de la empresa “Zeltia”, dedicada al uso de insecticidas en el ámbito industrial y doméstico. El problema se extendió al emplear estos residuos tóxicos como material de

construcción para el asfaltado de calles y edificación al confundirse con caolín (Calvelo-Pereira et al., 2008; Varela-Castejón et al., 2008).

Durante el periodo de actividad de la fábrica, los residuos eran acumulados en ella además de ser transportados y depositados en una escombrera municipal donde, años más tarde, se construyeron viviendas sociales. Tras el cierre de la empresa, el lindano no había sido tratado ni encapsulado, sino que había sido enterrado en diferentes localizaciones llegando a filtrarse en corrientas de aguas llevando a la Xunta de Galicia al cierre de pozos para evitar la intoxicación de la población (Funes-Casalvázquez et al., 2017; Calvelo-Pereira et al., 2008; Varela-Castejón et al., 2008). Los suelos de estudios eran tecnosoles úrbicos y/o regosoles técnicos derivados de sedimentos aluvio-coluviales donde la contaminación se distribuía de forma heterogénea como un sólido blanquecido de elevada consistencia y olor característico alcanzando valores de HCH totales superiores a $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Con el objetivo de controlar el foco de contaminación, se diseñó una celda de seguridad con una pantalla perimetral impermeable que evitaba la infiltración del agua de lluvia. La posibilidad de emplear otras técnicas (tratamientos biológicos *ex situ* [landfarming o biopilas] o biodegradación *in situ*) resultaba inviable debido al elevado volumen de material a tratar (Calvelo-Pereira et al., 2008; Varela-Castejón et al., 2008).

Actualmente, la posibilidad de encontrar restos de lindano (Figura 12) ante la apertura de zanjas para la construcción y restauración del municipio, como consecuencia de su uso como material de construcción, es elevada, lo que supone una gran preocupación para la población de la zona, llegando a decidir abandonar el municipio por el riesgo al que se encuentran expuestos (Funes-Casalvázquez et al., 2017).



Figura 12. Fragmentos de lindano en grava- (Pontevedra, 2018)

CONCLUSIONES

A pesar que el empleo de este compuesto esté prohibido desde hace años en numerosos países, el riesgo de exposición actual, atribuible al carácter ambiental que presenta la molécula así como al depósito de residuos de su fabricación, aún no ha desaparecido.

La acumulación de elevadas cantidades del isómero biológicamente activo del hexaclorociclohexano en diferentes localizaciones del país ha incentivado la puesta en marcha de diversos estudios centrados en la recuperación de los suelos contaminados.

Sin embargo, de todas las técnicas presentadas en este trabajo, solamente el caso de Argalario es el más avanzado mientras que el de O Porriño extremo, quedando el de Sabiñánigo en pleno proceso de recuperación.

En la actualidad no existe ninguna técnica que garantice la eliminación completa del lindano, poniendo de manifiesto la necesidad de investigación aplicada para encontrar soluciones viables para la descontaminación. Las últimas tendencias se enfocan en la combinación de técnicas de contención, como la celda de seguridad, con biorremediación al causar un menor impacto la estructura del suelo por ser más respetuosa con el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso-Riesco R. 2012. Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Proyecto Final de Carrera, Universidad Autónoma de Barcelona. 248p.
- Alzola A, Escolar L. 2015. Argalario, una solución para la recuperación de suelos contaminados por HCH. En: Cuaderno de campo, CONDREGRES VII Simposio Nacional sobre control de la degradación y restauración de suelos. Bilbao. p. 65-89.
- Brunat D. 2019. Pesticida en el agua aragonesa: el chernóbil español. España: Titania Compañía. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/espana/2016-01-27/sabinanigo-agua-contaminada-aragon-chernobil_1138180/. Consulta 26/06/2020.
- Brutti L, Beltrán M, García-de-Salamone I. 2018. Biorremediación de los Recursos Naturales. En: Ediciones INTA. Buenos Aires. 492p.
- Calvelo-Pereira R. 2008. Estudio del comportamiento del hexaclorociclohexano en el sistema suelo-planta para su aplicación en técnicas de fitocorrección. Tesis, Universidad de Santiago de Compostela, Departamento de Edafología y Química Agrícola (Facultad de Biología). 204p.
- Calvelo-Pereira R, Monterroso-Martínez C, Macías F. 2008. El hexaclorociclohexano en Galicia: algunos datos sobre producción, uso y contaminación. Edafología; 15 (1,2,3): 3-24.
- CE (Comisión Europea). 2005. Environmental Quality Standards (EQS), Substance Data Sheet "Hexachlorocyclohexanes (incl. Lindane)". En: Water Framework Directive. Brusells. 27 p.
- 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. Ginebra: UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 27p.
- 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 - Perfil de riesgos del beta-hexaclorociclohexano. Ginebra: UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 24p.
- CECOP (Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes). 2008. Informe del Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes sobre la labor realizada en su segunda reunión - Perfil de riesgos del alfa-hexaclorociclohexano. Ginebra: UNEP (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 20p.
- Concha-Graña E, Barriada-Pereira M, Turnes-Carou I, González-Castro M.J, Muniategui-Lorenzo S, López-Mahía P, Prada-Rodríguez D. 2008. Metodologías de análisis y caracterización de hexaclorociclohexano en el entorno del polígono industrial de Torneiros (Porriño-Pontevedra). Edafología; 15 (1,2,3): 169-192.
- Covelo E.F, Vega F.A, Andrade M.L. 2008. Efectos del manejo cortícola intensivo en los niveles, distribución y disipación de lindano en suelos y plantas de una región semiárida (Argentina). Edafología; 15 (1,2,3): 129-142.
- DREDDRS (Dossier de los resultados del ensayo ISCO elaborado por el Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad de Gobierno de Aragón). 2016. Gobierno de Aragón.
- Directiva 79/117/CEE del Consejo relativa a la prohibición de salida al mercado y de utilización de productos fitosanitarios que contengan determinadas sustancias activas. DOCE 21 de diciembre de 1978, N° L 33/36, 03 /Vol . 15.
- EFSA. 2005. Opinion of the Scientific Panel on contaminants in the food chain [CONTAM] related to gamma-HCH and other hexachlorocyclohexanes as undesirable substances in animal feed. EFSA journal; 3(7): 1-39.
- FAO. 2000. Evaluación de la contaminación del suelo. En: Hoja de datos sobre los plaguicidas. 24p.

- Fernández J, Arjol M.A, Cacho C. 2013. POP-contaminated sites from HCH production in Sabiñánigo, Spain. *Environ Sci Pollut Res*; 20: 1937-1950.
- Funes-Casalvázquez N, Martín-Barajas S, Martín-Sosa S, Polanco M, Vázquez-Velasco J, González-Briz E. 2017. Fabricación y uso del lindano: crónica de un envenenamiento persistente y silencioso. En: *Ecologistas en Acción. España*. 36p.
- García-Pereira D. 2018. Remediación de suelos mediante el uso de radiación microondas. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Vigo. 88p.
- Hurtado-Melo S. 2010. Diseño básico de una planta de desorción térmica para tratamiento de suelos contaminados. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. 145p.
- IARC. 2015. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: DDT, Lindane, and 2,4-D. Lyon (France). 513 p.
- IHOBE: Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco. 2018. La celda de seguridad de Argalarío. Bilbao: Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco. Disponible en: <https://www.ihobe.eus/suelos#infraestructuras>. Consulta: 21/5/2020.
- INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2007. SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html>. Consulta 14/25/2020.
- Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados. BOE nº 181 de 28 julio de 2011.
- Ley General del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. Diario Oficial de Federación, de 9 de enero de 2015.
- MAGRAMA (Ministerio De Agricultura, Alimentación Y Medio Ambiente). 2012. Introducción al conocimiento y prevención de los Contaminantes Orgánicos Persistentes. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. Madrid.63p.
- MTERD. Ministerio para la Transición Ecológica Y Reto Demográfico. 2007. Hexaclorociclohexano (HCH). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/Hexaclorociclohexano-HCH,15631,11,2007.html>. Consulta 14/5/2020.
- Olea Serrano N. 2015. La exposición humana a lindano en Sabiñánigo (Huesca). Ponencias presentadas en la IX Conferencia Nacional de Disruptores Endocrinos. *Rev. salud ambient.* 15(Espec. Congr.): 65-85.
- Ortiz-Bernad I, Sanz-García J, Dorado-Valiño M, Villar-Fernández S. 2007. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. En: *Círculo de Innovación en tecnologías Medioambientales y Energía (CITME)*. Madrid. 109 p.
- Ortiz Martínez A. 1991. Incidencia del lindano en el organismo animal. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- PELICR (Plan estratégico de lucha integral contra la contaminación de los residuos generados por la fabricación de lindano en Aragón). 2016. Gobierno de Aragón.
- Pontevedra S. 2018. El lindano envenena O Porriño. O Porriño. Disponible en: https://elpais.com/politica/2018/02/28/actualidad/1519845173_310974.html. Consulta 26/06/2020.
- PNA(Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo y el Reglamento 850/2004, sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes). 2004 Subdirección General de Calidad del Aire y Prevención de Riesgos del Ministerio del Medio Ambiente. 145 p.
- 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, número 15, de 18 de enero de 2005.
- Reglamento (CE) Nº 850/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre contaminantes orgánicos persistentes y por el que se modifica la Directiva 79/117/CE. DOCE de 29 de abril de 2014, L158/7.

- Reglamento (UE) nº 214/2011 de la Comisión por el que se modifican los anexos I y V del Reglamento (CE) n o 689/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a la exportación e importación de productos químicos peligrosos. DOCE de 3 de marzo de 2011, L 59/8.
- Roqueta-Ibert D. 2016. Estudio Bibliográfico de los Criterios Base para la Selección del Método de Recuperación de un Suelo Contaminado. Trabajo Final de Grado, Universidad Politécnica de Valencia. 47p.
- Rubinos D, Villasuso R, Barral M.T, Díaz-Fierros F. 2008. Biocorrección de suelos contaminados con isómeros de hexaclorociclohexano mediante técnicas de landfarming y biopilas. *Edafología*; 15 (1,2,3): 53-72.
- Sancerni-Martínez M. 2016. Saneamiento de suelos contaminados por lindano: el caso de Argalario. Trabajo Fin de Grado, Universidad Complutense de Madrid. 20p.
- Sánchez O, Peters E, Márquez-Huitzil R, Vega E, Portales G, Valdez M, Azuara D. 2005. Temas sobre restauración ecológica. México: Instituto Nacional de Ecología. Disponible en: https://books.google.es/books?id=7oZix0puXbgC&lpg=PA166&ots=ZRfer1Ps_N&dq=%C2%BFRecuperaci%C3%B3n%20y%20remediaci%C3%B3n%20significan%20lo%20mismo%3F&hl=es&pg=PA164#v=onepage&q=%C2%BFRecuperaci%C3%B3n%20y%20remediaci%C3%B3n%20significan%20lo%20mismo?&f=false. Consulta: 10/5/2020.
- Sanfeliu C, Camón L, Martínez E, Solá C, Artigas F, Rodríguez-Farré E. 1988. Regional distribution of lindane in rat brain. *Toxicology*. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0300483X88901928?via%3Dihubhttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0300483X88901928?via%3Dihub>. Consulta: 5/4/2020.
- Varela-Castejón C, Martínez-Lozano F. 2008. Antecedentes históricos sobre la contaminación por lindano en O Porriño (Pontevedra). *Edafología*; 15 (1,2,3): 25-32.
- Varela-Castejón C, Martínez-Lozano F, Blasco-Herguedas O. 2008. Investigación y confinamiento de suelos contaminados por hexaclorociclohexano en el polígono de Torneiro-O Porriño (Pontevedra). *Edafología*; 15 (1,2,3): 33-52.
- Vega F.A, Andrade M.L, Covelo E.F. 2008. Contenido, distribución y transporte de α , β , γ y δ -Hexaclorociclohexano en suelos afectados por vertidos de productos fitosanitarios. *Edafología*; 15 (1,2,3): 117-128.
- Vega M, Romano D, Uotila E. 2016. El lindano (contaminante orgánico persistente) en la UE. En: Departamento temático C: Derechos de los Ciudadanos y Asuntos Constitucionales. Bruselas. 98 p.
- Vijgen J. 2006. The Legacy of Lindane HCH Isomer Production. En: IHPA. 26 p.
- Vijgen J, Abhilash P, Fan-li Y, Lal R, Forter M, Torres J, Singh N, Yunus M, Tian C, Schäffer A, Weber R. 2011. Hexachlorocyclohexane (HCH) as new Stockholm Convention POPs—a global perspective on the management of Lindane and its waste isomers. *Environ Sci Pollut Res*; 18(2):152-162.
- Vijgen J, de Borst B, Weber R, Stobiecki T, Forter M. 2019. HCH and lindane contaminated sites: European and global need for a permanent solution for a long-time neglected issue. *Environmental Pollution*; 248: 696-705.
- Volke-Sepúlveda T, Velasco-Trejo J.A. 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. En: INE-SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología. México. 64p.
- World Health Organization. 1991. Lindane (Gamma-HCH): Health and safety guide. Geneva. <https://open.spotify.com/user/spotify/playlist/37i9dQZF1DX2V6snmOSTqZ>. 15 p.