



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

**TRABAJO FIN DE GRADO
SANEAMIENTO DE SUELOS
CONTAMINADOS POR LINDANO: EL CASO
DE ARGALARIO**

Autor: Marta Sancerni Martínez

Tutor: Concepción González Huecas

Convocatoria: Junio

RESUMEN

El lindano (γ -HCH) es un insecticida de amplio espectro muy utilizado durante el siglo XX, con gran eficacia y fabricación sencilla. Durante su producción se generaban una gran cantidad de residuos, considerados inofensivos, por lo que fueron esparcidos sin ningún control por el medio. No fue hasta la década de los 70 cuando se comprobaron los efectos tóxicos que estos residuos tenían sobre el medio ambiente y la salud humana. En este proyecto se abarca el estudio de un caso concreto localizado en el término municipal de Argalarío (Bilbao), donde se encontraban dos plantas productoras de lindano, responsables del vertido de alrededor de 100.000 Tm de HCH, que ocasionaron graves niveles de contaminación. Además, se trataba de una zona muy deteriorada por la presencia de un vertedero de residuos urbanos, por lo que se seleccionó como el lugar idóneo para establecer la celda de seguridad que contendría los residuos del pesticida. La construcción de una celda de seguridad se presentó como la única opción viable para la gestión de los residuos. Otras técnicas de descontaminación no pudieron aplicarse debido a la enorme cantidad de áreas afectadas, lo que suponía un gasto inasumible, además de un período de tiempo necesario para la eliminación del contaminante demasiado elevado.

INTRODUCCIÓN

El hexaclorociclohexano (HCH) es un pesticida organoclorado con actividad insecticida. Sus cualidades biocidas, unidas a un proceso de elaboración sencillo, resultaron en un elevado nivel de producción y utilización agrícola, forestal y doméstica en el siglo XX.

El HCH está formado por una mezcla heterogénea de diferentes isómeros: α , β , γ , δ , ϵ , η y θ -HCH, que responden a la fórmula molecular 1, 2, 3, 4, 5, 6-HCH. El principal isómero responsable de la actividad insecticida es el γ -HCH, conocido como lindano.

El HCH es una sustancia artificial, sintetizada por primera vez por Faraday en el siglo XIX, al hacer reaccionar benceno y cloro en presencia de luz. En 1936 Bender descubrió las propiedades insecticidas del HCH, pero no fue hasta la década de 1940 cuando comenzó a tener importancia su uso como fitosanitario.

Se introdujo rápidamente y a gran escala, principalmente debido a:

- Propiedades insecticidas universales.
- Efecto inicial muy rápido.

- Fácil obtención industrial.

Proceso de fabricación.

Tras la cloración del benceno se obtiene un sólido amorfo de color grisáceo-marrón, con olor a humedad y que comienza a fundirse a 65°C, conocido como HCH técnico.

El HCH técnico está constituido por una mezcla de isómeros de hexaclorociclohexano, heptaclorociclohexano y octoclorociclohexano. De esta mezcla puede aislarse el isómero γ -HCH (lindano), un sólido cristalino de gran densidad, muy estable ante la luz, el calor o la oxidación, debido a los enlaces C-C, C-H y C-Cl. El lindano puede aparecer en distintas formulaciones comerciales, líquidas, sólidas o gaseosas. Los niveles mundiales de producción de lindano fueron variando durante la segunda mitad del siglo XX (Tabla 1).

Tabla 1. Producción mundial de HCH¹⁰

Producción global de HCH técnico	Producción global de lindano
<p>- 1948 – 1997: utilizadas hasta 9,8 millones de toneladas a nivel mundial.</p> <p>- 1955 – 1972: producción creciente.</p> <p>- A partir de 1973: comienzan las prohibiciones en Japón. Descenso notable de producción, posteriormente se recupera.</p> <p>- A partir de 1983: prohibición en China. Disminución permanente de la producción hasta niveles muy bajos en 1995.</p> <p>La mayor producción histórica se produjo en China e India.</p>	<p>- Consumo global de 455 kilotoneladas con destino agrícola.</p> <p>- 1961 – 1964: mayores niveles de producción.</p> <p>- 1966 – 1972: aumentan los niveles de producción, coincidiendo con la prohibición del HCH técnico en algunos países.</p> <p>- 1979 – 1982: segundo pico de producción, coincide con la prohibición del HCH técnico en EEUU.</p> <p>- A partir de 1982: la producción desciende.</p>

Producción industrial.

Existen diversos métodos para la manufactura del HCH, basados en la reacción de cloro y benceno en presencia de luz UV, cuyo resultado es una mezcla de isómeros de HCH (C₆H₆Cl₆).

1. En primer lugar, el cloro se disuelve en benceno.
2. Se hace pasar la disolución por un tubo de iluminación (alto contenido en radiación UV), donde tiene lugar la verdadera reacción de síntesis. Se trata de un proceso exotérmico, por lo que es necesario un riguroso control de la temperatura.
3. El proceso finaliza cuando ha reaccionado la suficiente cantidad de cloro. Es importante evitar que la mezcla entre en contacto con materiales susceptibles de impedir la sustitución, como el hierro.
4. Se retira el disolvente en exceso, y se obtiene un producto más o menos solidificado, conocido como HCH técnico. Su composición es variable, constituido por una mezcla de diferentes isómeros.

El HCH técnico se purifica para obtener el isómero γ -HCH.

1. En primer lugar se obtiene HCH fundido con un 40% de isómero γ -HCH, llamado HCH enriquecido o BHC refinado (EEUU).
2. Se sigue purificando la mezcla, y finalmente se consigue un sólido constituido casi exclusivamente por γ -HCH, conocido como lindano (99% de γ -HCH).

La producción de lindano conlleva la formación de un 80% de material residual, constituido por una mezcla homogénea de isómeros más o menos contaminados por disolventes. (Figura 1)

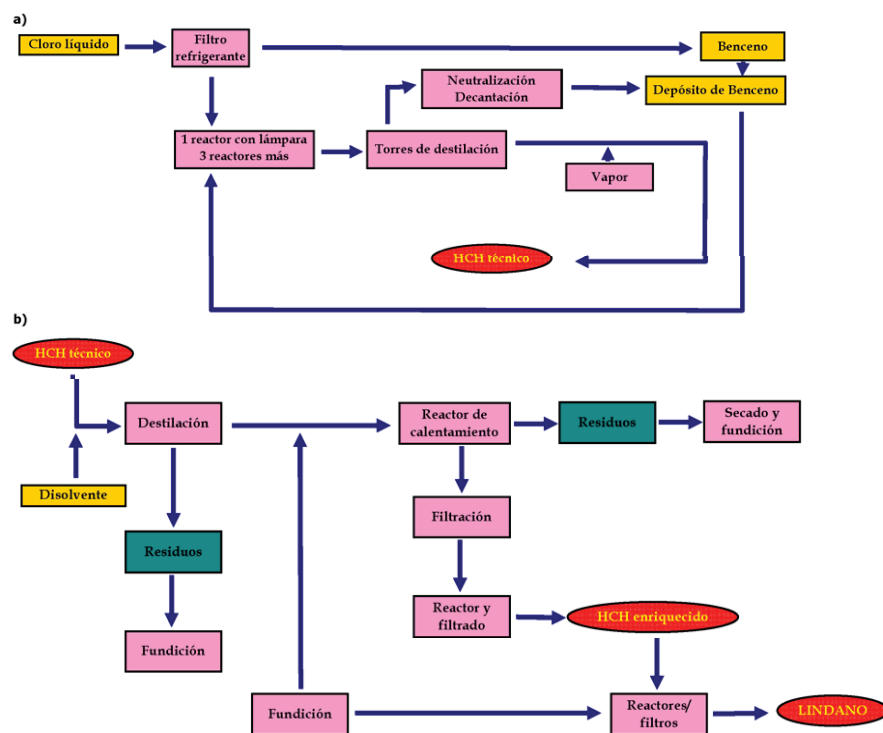


Figura 1. Esquema de la producción industrial de HCH técnico, HCH enriquecido y lindano.

Las diferencias en las propiedades químicas entre los diferentes isómeros, que se encuentran detalladas en la ficha internacional de seguridad química ¹¹ se relacionan con su estructura molecular, ¹⁰

A nivel mundial, la fabricación y el uso del lindano y el HCH técnico han sido legislados desde los años 70. En un principio se tendió a una restricción muy severa o incluso a una prohibición del uso de HCH técnico (Directiva 79/117/CEE). ¹ La legislación y las políticas sobre plaguicidas introducidas por primera vez en la Unión Europea en 1979, han evolucionando considerablemente con el paso de los años, culminando en dos directivas que obligan a que todos los plaguicidas se sometan a una evaluación y autorización para poder ser comercializados (91/414/CEE² ; 98/8/CE³).

En España, en 1998 se aprueba la Ley 10/98⁴, que impone una serie de obligaciones a la definición de criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. Para el cumplimiento de esta ley se promulgó el Real Decreto 9/2005⁵, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares que la Ley tiene en cuenta.

En el País Vasco existe una legislación particular sobre la contaminación del suelo. El Decreto 199/2006, de 10 de Octubre⁶, establece el sistema de acreditación de entidades de investigación y recuperación de la calidad del suelo, y se determina el contenido y alcance de las investigaciones de la calidad del suelo.

El Decreto 165/2008, de 30 de septiembre⁷, establece un inventario de suelos que soportan o han soportado actividades o instalaciones potencialmente contaminantes del suelo.

La Ley 1/2005 (vigente hasta el 3 de Julio de 2015)⁸, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo, completa el marco legislativo bajo el cual se llevó a cabo el proyecto de construcción de la celda de seguridad de Argalarío.

La Ley 1/2005 ha sido sustituida por la Ley 4/2015, de 25 de junio, publicada en el BOE N° 176 del Viernes 24 de Julio de 2015, Sec. I, Pág. 62274⁹.

Toxicidad.

El lindano es un insecticida de amplio espectro, que se absorbe bien por las vías de contacto: digestiva, cutánea y respiratoria. La dosis letal 50 (DL 50) en diferentes especies es de 25-600 mg/kg. Las dosis tóxicas humanas están alrededor de 50-100 mg/kg (para un adulto de 70 kg equivale a 3,5 g). En niños se han descrito casos con toxicidad aguda a dosis de 10 mg/kg (en un niño de 14 kg equivale a 150 mg). En

insectos provoca temblores, ataxia, espasmos, parálisis y, finalmente, parada respiratoria.

Los distintos isómeros del HCH suponen un riesgo para la salud, siendo las principales rutas de exposición:

- Inhalación: vapores contaminados con HCH.
- Oral: alimentos contaminados, ingestión accidental o intencionada.
- Dérmica: deposición de partículas contaminadas, sorción de vapores.

En casos de intoxicación aguda (accidental o intencionada) se producen diarreas fuertes y convulsiones, que pueden producir la muerte. No se han descrito intoxicaciones crónicas atribuibles a esta sustancia debido al contacto con ella a dosis bajas a largo plazo. Sin embargo, en obreros de fábricas de producción y en agricultores expuestos a estos compuestos se han descrito problemas relacionados con el sueño y el empeoramiento del estrés, vómitos frecuentes y sensibilización general. En las Tablas 2, 3, 4 y 5 se resumen algunos de los efectos mas importantes.

Tabla 2. Efectos mas destacables por intoxicación aguda. Efectos neurológicos.

Síntomas	
Humanos	Pérdida de sensibilidad facial y en las extremidades, dolor de cabeza, vértigo, patrón anormal del ECG, convulsiones y ataques.
Animales	Desórdenes del comportamiento, cambios neuroquímicos, convulsiones, ataques, coma.
Se alteran las propiedades electrofisiológicas y enzimáticas de las membranas plasmáticas de las células nerviosas, afectando a la cinética de intercambio de iones a través de la membrana	

Tabla 3. Efectos mas destacables por intoxicación aguda. Efectos hepáticos.

Síntomas	
Humanos y animales	Aumento de enzimas, especialmente el CYP P450, aumento de la actividad de los microsomas, del peso del hígado, necrosis de los tejidos, degeneración de las grasas, cáncer de hígado. Los efectos son más graves en animales.

Tabla 4. Efectos mas destacables por intoxicación aguda. Efectos inmunológicos.

Síntomas	
Humanos	Aumento significativo de IgM.
Animales	Inmunodepresión y reducción de los folículos linfoides, disminución de la población de linfocitos y del tamaño de los cordones medulares, necrosis de zonas de la médula.

Tabla 5. Efectos mas destacables por intoxicación aguda. Efectos reproductores.

Síntomas	
Humanos	Aumento de los niveles hormonales (hormona luteinizante), abortos, partos prematuros.
Animales	Disminución del recuento de esperma, atrofia de ovarios, aumento del ciclo estrogénico, disminución de la tasa de ovulación.

Pertenece al grupo 1 según la clasificación de carcinógenos de la IARC, y tiene efectos teratógenos. Respecto a las plantas tiene moderada toxicidad, produciendo efectos negativos en la germinación, crecimiento y desarrollo inicial de diferentes especies,-

En la biota se tiende a la acumulación en los tejidos grasos de los animales, por lo que una contaminación de bajo nivel en especies inferiores puede producir un efecto de magnificación en las superiores. ¹²

Comportamiento en el medio.

Los residuos de la producción industrial de lindano se consideraban inofensivos e insolubles en agua, y su vertido no necesitaba una autorización previa, por lo que se esparcieron de forma incontrolada en un gran número de emplazamientos de la geografía española.

Los residuos generados pueden sufrir dispersión en el medio (viento), infiltración hacia la capa freática, lavado con aguas de escorrentía y manipulaciones antrópicas. Además mediante contaminación directa por emisiones de la planta de producción o contaminación del agua utilizada en su fabricación, pueden causar graves problemas.

Estos compuestos al entrar en el suelo pueden tener un comportamiento diferente, volatilizarse y pasar a la atmósfera, descomponerse por acción de la luz solar, alcanzar las aguas superficiales o permanecer en el suelo, donde experimentan procesos de acumulación, transporte o degradación.

Los isómeros del HCH presentan una gran facilidad para movilizarse entre los diferentes compartimentos, lo que favorece su bioacumulación. Tienden a encontrarse más en disolución acuosa o en la fase gaseosa, y presentan una gran capacidad para adsorberse a partículas de suelos o sedimentos.

Degradación (Transformación) del HCH

Los compuestos orgánicos están expuestos a mecanismos de degradación, debido a la actuación de enzimas microbianas, fúngicas o vegetales.

Degradación biótica: Los isómeros del HCH pueden ser degradados por medio de diferentes procesos, como deshalogenación reductiva del HCH y sus compuestos derivados (proceso energéticamente favorable), dehidrohalogenación u oxidación.

- En condiciones aerobias se puede degradar completamente, formando O_2 , H_2O y HCl , mediante la acción de diversos microorganismos y hongos. Todos los isómeros son susceptibles de ser degradados, a diferentes velocidades.
- La degradación anaeróbica es más eficiente, al ser un proceso más favorable termodinámicamente, pero no se conoce exactamente el tipo de bacteria que lo realiza.
- En los insectos el HCH también puede ser degradado mediante enzimas como la glutatión transferasa.

Degradación abiótica: Puede producirse una descloración reductiva del HCH, en ambientes fuertemente reductores y con la presencia de catalizadores. En medios acuosos alcalinos puede producirse una hidrólisis del HCH.

Degradación química y fotodegradación: Se debe fundamentalmente a la radiación UV. En el caso del lindano se produce con relativa rapidez.

Estos mecanismos, en su conjunto, caracterizarán la vida media del contaminante en el suelo.

OBJETIVOS.

El presente trabajo se centra en conocer la problemática de Argalario (contaminación por lindano y presencia de un vertedero de residuos urbanos) y la construcción de la celda de seguridad para albergar los residuos del pesticida. Además, se estudiarán otras técnicas de descontaminación y se analizará la posible aplicación de las mismas en este caso.

METODOLOGÍA.

Esta revisión se centra en un caso de contaminación por pesticidas, ocurrido en Argalario durante los años 90, y en la construcción de una celda de seguridad, única opción viable que se encontró para solucionarlo.

Se ha realizado durante los meses de Marzo y Abril de 2016, buscando en bases de datos científicas como PubMed, Google Scholar, Science Direct o SECS, utilizando como palabras clave “*pesticida*”, “*lindano*”, “*soil contamination*” “*efectos tóxicos*”, “*celda seguridad*”, “*confinamiento*”, “*técnicas de descontaminación*”.

Los artículos utilizados para realizar la revisión tienen como objetivo principal la descripción del problema de Argalario y la construcción de la celda, además de aquellos referidos a otras posibles soluciones y su aplicación en este caso en concreto.

El criterio de selección se basó en primer lugar en el idioma, únicamente aquellos escritos en español y en inglés. En segundo lugar se dio preferencia a las publicaciones más recientes, ya que de esta manera se pretendía encontrar los resultados más novedosos y actuales; aunque en lo referido a la construcción de la celda se dio prioridad a los informes emitidos por la empresa constructora.

Se partió de 45 artículos, y tras aplicar los criterios de inclusión, se seleccionaron 30 artículos. De estos, 13 estaban relacionados con la contaminación de suelos y su remediación, 5 eran estudios relacionados con el lindano, 3 con la construcción de la celda de seguridad y 9 hacían referencia a la legislación vigente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

ARGALARIO: UN SUELO CONTAMINADO POR HCH. ^{13, 14}

Argalario se encuentra en el Término Municipal de Barakaldo, en la provincia de Bizkaia, situado en la vertiente Este del monte Argalario. El centro y Oeste del municipio se encuentran en una zona montañosa, muy afectada por explotaciones

mineras. La zona Este coincide con el fondo del valle. Se trata de una zona muy antropizada, ocupada por zonas residenciales, industriales y destinadas a otros usos.

Hasta el siglo XX, la economía de la zona se basaba en la industria, especialmente la relacionada con la siderurgia y el sector químico. Esta intensa actividad industrial supuso la pérdida de grandes superficies de espacios naturales y la contaminación química de gran parte de ellos. Entre 1950 y 1980 estuvo presente en Barakaldo la empresa Bilbao Chemicals, y en Erandio Nexana Celamerck, dedicadas a la fabricación de lindano. Estas empresas generaron alrededor de 100.000 Tm de HCH, cuyos residuos de producción se enviaron a vertederos o se depositaron en lugares cercanos.

Debido a la enorme cantidad de residuos generada durante los años de actividad, y a los riesgos que supone para la salud humana y el medio ambiente, fue necesaria la búsqueda de una solución para la gestión de los mismos. Se analizaron diferentes opciones, como craqueo, inertización o incineración, pero ninguna resultó viable. Por ello, desde el Gobierno Vasco se contactó con la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos, que había desarrollado una técnica conocida con BCD (Based Catalyzed Decomposition) o Decloración Catalítica en medio Básico, para la descomposición de compuestos organoclorados.

Esta tecnología puede aplicarse para eliminar el HCH en estado puro, pero no si aparece mezclado con suelo u otros residuos, por lo que sólo podría utilizarse para eliminar los residuos almacenados en las instalaciones de Bilbao Chemicals. La separación de los residuos de HCH depositados en otros lugares resultaba inviable, en consecuencia fue necesaria la búsqueda de otra solución. Los Foros Internacionales de HCH y las Agencias de Medio Ambiente Europea (AEMA) y Americana (EPA) llegaron a la conclusión de que, cuando se trataba de contaminación orgánica e inorgánica mezclada con suelo, la única solución era confinar el suelo contaminado en una celda de seguridad. Para este fin se construyó la celda de seguridad de Argalarío. El principal objetivo era delimitar y jerarquizar las alternativas de ubicación de la celda. Una celda de seguridad es una estructura que permite almacenar de manera estanca las sustancias o materiales peligrosos de acuerdo con sus características y peligros potenciales.

El primer paso del proyecto de construcción de la celda fue la realización de estudios preliminares de impacto ambiental (EPIA) para su ubicación. Las investigaciones se llevaron a cabo por la empresa IHOBE S.A..

La elección de Argalario se debió, además de a la presencia de una gran cantidad de residuos de lindano, a la existencia en esta ubicación de un antiguo vertedero de residuos urbanos. El área donde se encontraba el vertedero estaba totalmente degradada, lo que suponía un riesgo para la salud humana y los ecosistemas, por lo que una de las condiciones del proyecto de construcción de la celda fue la integración de la recuperación ambiental del vertedero.

El proyecto se dividió en dos fases, con diferentes objetivos:

1. Estabilización y recuperación del vertedero de residuos urbanos del monte Argalario.
2. Construcción de una celda de seguridad para el almacenamiento de tierras contaminadas por HCH y otros residuos en Argalario.

Fase 1: Recuperación del vertedero.

En primer lugar, se realizó un estudio y reposición de servicios afectados. Se construyó la plataforma para la ubicación de la logística de obra, además de dos accesos a la zona de obras y varios viales. Se acondicionó una segunda plataforma para instalar los depósitos de almacenamiento y la planta de tratamiento de lixiviados. Durante los dos años previos al inicio de la obra se realizaron campañas de control y seguimiento ambiental para conocer la calidad de las aguas, el suelo y el aire. En segundo lugar se realizó la canalización del arroyo Burtzako. Su cauce se desvió perimetralmente al vertedero, para evitar la infiltración de las aguas a través de los residuos.

Para estabilizar el vertedero se construyó una pantalla de pilotes de contención, favoreciendo el flujo vertical de los lixiviados y minimizando posibles cargas hidráulicas. Se instaló un sistema de drenaje de lixiviados y de aguas superficiales, y para la conducción de los lixiviados se construyó una galería de más de 270 metros de longitud. Los gases procedentes del vertedero se recogen a través de una red de pozos, y se eliminan mediante combustión, con un sistema de desgasificación. En un primer momento, el sistema se basó en una antorcha de combustión de alta temperatura, pero en el año 2012, para ajustarse a la calidad del metano generado por el vertedero ya en fase de agotamiento, se sustituyó la antorcha por un sistema de biofiltros.

Finalmente se realizó el sellado de la superficie del vertedero, con el fin de impedir la salida al exterior de materiales contaminantes y la entrada de aguas superficiales, reduciendo la producción de lixiviados. Para el tratamiento de los lixiviados, contaminados principalmente por residuos orgánicos, se optó por un sistema

biológico SBR. En este proceso las aguas residuales se homogenizan en un reactor, donde se mezclan con biomasa, que reduce el nitrógeno amoniacal. El efluente resultante es vertido a un colector. Una vez sellada la superficie del vertedero, y para la recogida de las aguas superficiales, se realizó un sistema de recogida formado por canales que abarcan todo el perímetro del vertedero, y que desaguan en el arroyo Burtzako. En este arroyo está instalada una arqueta para el control de calidad de estas aguas.

Toda la zona se integró en el paisaje con la instalación de una capa de tierra vegetal sobre la que se plantaron especies adecuadas para el entorno.

Fase 2: Construcción de la celda de seguridad.

La celda se construyó al pie del antiguo vertedero, con una capacidad final de 415.896 m³, encajada entre las laderas de la vaguada.

El primer paso para su construcción fue el acondicionamiento del terreno natural. Para ello, en el lado oeste se construyó un dique de contención, cerrando así el vaso de la celda en su parte más baja y estabilizando el relleno de la celda. A continuación se procedió al sellado de la parte inferior del vaso de la celda. El principal objetivo era impedir la afección de las tierras contaminadas a los suelos y aguas subterráneas. Bajo el sistema de sellado se dispuso una red de aguas sub-superficiales, que serviría de indicador de posibles ineficiencias del sistema. Sobre la red se instaló un paquete de materiales de sellado. En el punto más bajo de la celda, y sobre el sellado, se dispuso un sistema de recogida de lixiviados, que finalmente llegarían a la planta de tratamiento.

En este proyecto se sanearon 24 emplazamientos, contaminados principalmente por lindano. La recuperación de los emplazamientos contaminados se llevó a cabo en 3 fases:

1. Excavación de los vertidos y tierras contaminadas.
2. Excavación del suelo inferior afectado.
3. Reperfilado con cazo de limpieza del fondo de excavación.

Finalmente, se realizó una campaña de muestreo en cada uno de los emplazamientos, para comprobar la eficacia del proceso de saneamiento, además de medidas de recuperación paisajística.

En todos los emplazamientos se instalaron puntos de descontaminación de maquinaria y vestuarios blanco/negro para el personal, puntos de control de aguas

superficiales, subterráneas, suelos del entorno y aire. En las zonas más sensibles o con afluencia de público se dispusieron medidores en continuo de la calidad del aire.

El llenado de la celda consistió en el depósito de las tierras contaminadas por HCH procedentes de los 24 emplazamientos. Se estableció un procedimiento operativo para el transporte y depósito de las tierras, que se realizó de forma diferente en función de las características geotécnicas y el grado de contaminación. Se realizó un control riguroso de cada uno de los procesos llevados a cabo.

Finalmente se realizó el sellado de la totalidad de la celda, garantizando la estanqueidad de la misma. El sellado superficial cumple 3 funciones:

- Impedir la salida al exterior de elementos contaminantes.
- Evitar la entrada de agua, que incrementaría la producción de lixiviados.
- Servir de soporte a los elementos del paisaje.

Los sistemas de sellado fueron comprobados antes y después de su instalación, de forma que quedó asegurada su estabilidad y las condiciones adecuadas de colocación.

A pesar de que, por la naturaleza de los materiales depositados en la celda, no se esperaba la producción de gases, bajo el sellado se instaló una capa de drenaje de gases, compuesto por grava ofítica.

Para el tratamiento de los lixiviados se instaló un sistema de ósmosis inversa. La alta calidad de los lixiviados tratados permite que éstos sean vertidos directamente a cauce. Debido a la disminución del volumen de lixiviados que se produjo al sellar la celda, el sistema de ósmosis inversa se sustituyó por uno de filtrado mediante carbón activo.

Los trabajos de recuperación paisajística tuvieron una doble función, proteger el sellado y mejorar la calidad visual del emplazamiento. En el vertedero se instaló un tapiz herbáceo, y en los terrenos colindantes se regeneró el estrato arbóreo. En el caso de la celda se optó por la hidrosiembra.

Este proyecto se realizó con una serie de características singulares y elementos innovadores de carácter estratégico, técnico y social. Se realizó una búsqueda a nivel internacional de situaciones similares, entre las que destacan Holanda, Hochfelden (Alsacia) y la Comunidad Autónoma de Aragón, con el fin de encontrar la solución más adecuada para el problema. Se desarrolló un plan de comunicación, con el objetivo de facilitar toda la información acerca del proyecto. Se creó una “Comisión Mixta de Seguimiento”, integrada por el Ayuntamiento de Barakaldo, grupos ecologistas locales

y la asociación de vecinos del barrio Kareaga. Se realizaron reuniones periódicas para informar del estado y avance de la obra, además de los resultados de los controles realizados. También se puso en marcha una importante labor divulgativa, y como impulso a la política de integración, se ofreció trabajo a los parados del barrio de Kareaga.

Tras la finalización de la obra se puso en marcha un plan de seguimiento ambiental, con el fin de controlar los posibles efectos del vertedero y la celda de seguridad en la calidad del agua, aire y suelo. También se supervisa anualmente la gestión de la depuradora de los lixiviados. Se realizan de forma periódica una serie de controles ambientales, relativos a la calidad de las aguas subterráneas, las aguas superficiales, el drenaje de los lixiviados y el seguimiento del tratamiento de las plantas depuradoras. Además, se comprueba regularmente el tratamiento de las plantas depuradoras, la estabilidad de la estructura, la antorcha del vertedero, los niveles de lixiviados y el mantenimiento de la propia infraestructura.

Estos controles deberán prolongarse hasta, al menos, 30 años desde la fecha de clausura de la celda (año 2032).

La celda en cifras.

Los gastos de construcción y mantenimiento de la celda corresponden a los ejecutados de 2000 a 2002, periodo de construcción de la celda, y posteriormente hasta 2032, año en el que finalizará la realización de controles ambientales.

Presupuesto:

- Total: 36.060.000 €
- Subvención del fondo de cohesión europeo: 80%
- Coste total: 26.528.282,83 €
- Control y mantenimiento: 225.000 €/año.

Emplazamientos saneados: 24

Volumen:

- Vertedero: 610.000 m³ residuos.
- Celda (tierras trasladadas): 415.896 m³.

Fechas:

- Ejecución del proyecto: 36 meses.
- Control post-clausura: 30 años.

Instalaciones:

- Plantas depuradoras de lixiviados: 2
- Sistema de desgasificación del vertedero: 1

Puntos de control ambiental: 105

- Análisis de aguas: > 30.000

DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS: TÉCNICAS BIOLÓGICAS.^{15, 16}

Existen una serie de técnicas cuyo objetivo es estimular el crecimiento de microorganismos en suelos contaminados, con el fin de degradar o extraer los contaminantes mediante sus actividades metabólicas. Actualmente, la aplicación de estas técnicas es inviable en Argalario, debido al volumen de tierra contaminada, sin embargo, constituyen una posible solución para la eliminación de los residuos en un futuro.

Se distinguen técnicas *in situ* y *ex situ*, con una serie de ventajas e inconvenientes. En la Tabla 6 se resumen algunas de las características más importantes.

Tabla 6. Técnicas biológicas de descontaminación de suelos, según el lugar de su aplicación.

	In situ: Bioventing, biorremediación, bioaumentación, fitorremediación	Ex situ: Biopilas, compostaje, landfarming, lodos.
Alteración estructura suelo	No	Sí
Costes económicos	Bajos	Altos
Tiempo de ejecución	Alto	Bajo
Uniformidad de tratamiento	Dudosa	Sí
Verificación de su eficacia	Difícil	Fácil

No todas las técnicas pueden ser utilizadas para todos los contaminantes, debido a las características físico-químicas de los mismos, además, presentan una serie de limitaciones que en algunos casos pueden disminuir o incluso impedir la degradación del contaminante. En ocasiones se acompañan de otras técnicas físicas y químicas para completar el proceso de limpieza. Entre las técnicas biológicas que podrían ser útiles para la recuperación de suelos contaminados con lindano encontramos:

Bioventing.

Se trata de la inyección (o extracción) forzada de aire para incrementar la concentración de oxígeno y estimular la biodegradación. Es una técnica con efectos a medio – largo plazo (meses – años). Puede aplicarse en suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo, disolventes no clorados, algunos plaguicidas y otros orgánicos (fuels), y favorece la de COVs por la lenta migración hacia zonas biológicamente activas del suelo.

Esta técnica presenta una serie de limitaciones, como:

- No puede utilizarse en zonas saturadas o de baja permeabilidad en el suelo.
- Posible emisión de vapores (control y monitoreo).
- En compuestos clorados es necesario inducir un ciclo anaerobio.
- Una baja humedad implica un baja actividad biológica, y por tanto, una baja biodegradación.
- Bajas temperaturas ralentizan la remediación.

El coste de la técnica es medio – alto (30 – 60 € por m³ de suelo), en función del tipo y concentración del contaminante, permeabilidad del suelo, número de pozos, tratamiento de los gases emitidos.

Bioaumentación.

Consiste en la introducción en el suelo de organismos seleccionados, adaptados o genéticamente modificados para degradar contaminantes específicos, con efectos a medio largo plazo (meses – años). Puede ser aplicada en suelos contaminados por Lindano, PCP, DDT... degrada contaminantes orgánicos e inmoviliza los inorgánicos. Los organismos más utilizados para llevarla a cabo son hongos (*Fusarium oxysporium* y *Phanerochaete chrysosporium*) y bacterias (*Pseudomonas cepacia* y *Pseudomonas putida*). Los costes varían desde 20 a 80 € por m³ de suelo, en función de las propiedades del suelo y del contaminante.

Presenta una serie de limitaciones, como:

- Riesgo de contaminación de aguas superficiales por infiltración.
- Texturas finas o suelos heterogéneos limitan el contacto entre los microorganismos y el contaminante.
- Altas concentraciones de contaminantes producen toxicidad en los microorganismos.

Biopilas.

Es una técnica basada en la mezcla de suelos contaminados y suelos remediados, y su confinamiento en montones estáticos sometidos a aireación (inyección o vacío), y recogida de gases y lixiviados para su tratamiento.

Es efectiva para suelos contaminados por COVs, combustibles y plaguicidas. Se incrementa la biodegradación favoreciendo las condiciones de humedad, temperatura, nutrientes, oxígeno y pH. El coste varía desde 50 - 100 € por m³ de suelo.

La excavación del suelo aumenta el riesgo de liberación de COVs, además, son necesarios test previos de biodegradación del contaminante.

Es poco efectiva en compuestos halogenados y explosivos, y la uniformidad del proceso es cuestionable, ya que se trata de un proceso estático, no se realiza una mezcla periódica.

Landfarming.

Esta técnica consiste en la disposición del suelo contaminado en capas lineales y remoción periódica para favorecer la aireación, también se mejoran las condiciones para estimular la biodegradación (humedad, nutrientes...). Es aplicable para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos del petróleo (no COVs), combustibles, PCP y algunos plaguicidas. Degrada, transforma e inmoviliza contaminantes, pero es necesaria la recogida y tratamiento de escurrientías y lixiviados.

El coste aproximado de la técnica es de 30 - 60 € por m³ de suelo, además, requiere espacios grandes para su aplicación, la excavación del suelo puede liberar COVs, y se produce un incremento importante de volumen, por los materiales enmendantes añadidos.

Lodos.

Se trata de la mezcla de suelos contaminados con lodos, agua y aditivos, para favorecer la biodegradación al incrementar el contacto entre los microorganismos y el contaminante, dentro de un "bioreactor". Es aplicable para suelos contaminados por explosivos, PAHs, plaguicidas (primer tratamiento de COVs y SCOVs al excavar un suelo). La técnica se realiza en varias etapas: en primer lugar es necesario tamizar el suelo, para posteriormente mezclarlo con agua, arena y lodo. A continuación se añaden oxígeno y nutrientes, a veces también microorganismos, y finalmente se realiza el filtrado y secado del suelo y el tratamiento de los residuos.

El coste varía de 140 a 220 € por m³ de suelo, además es necesario un tamizado previo y un filtrado y secado del suelo y tratamiento posterior de los residuos, lo que incrementa el coste del proceso.

Recientemente se ha realizado un estudio sobre la posible aplicación de **nanopartículas de hierro** en casos de contaminación por lindano, confirmando la hipótesis de la alta reactividad de las nanopartículas de hierro para degradar el lindano. Únicamente se ha demostrado su eficacia a escalas de laboratorio, pero este descubrimiento proporciona una información importante para su futura aplicación como técnica de descontaminación en casos de contaminación reales.¹⁷

CONCLUSIONES.

Con los resultados obtenidos en este estudio podemos concluir que la construcción de la celda de seguridad es la única solución viable actualmente para la gestión de los residuos de Argalarrio. Se trata de un enorme volumen de tierra contaminada, además del impacto ambiental que supuso el vertedero de residuos urbanos ubicado en la zona, por lo que la aplicación de otras técnicas de descontaminación resulta imposible, tanto por el coste como por el tiempo necesario que supondría.

El proceso de construcción de la celda permitió la recuperación del espacio, además de generar empleo para los habitantes de la zona, y el proceso de comunicación establecido entre la constructora, el Gobierno Vasco y la población facilitó la aceptación del proyecto. A pesar de que actualmente los residuos se encuentran bajo control y la zona no sigue deteriorándose, es necesario el estudio y desarrollo de técnicas de descontaminación que en un futuro permitan la recuperación total del espacio.

BIBLIOGRAFÍA

¹ Directiva 79/117/CEE del Consejo, de 21 de diciembre de 1978, relativa a la prohibición de salida al mercado y de utilización de productos fitosanitarios que contengan determinadas sustancias activas.

² Directiva 91/414/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1991, relativa a la comercialización de productos fitosanitarios.

³ Directiva 98/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de febrero de 1998, relativa a la comercialización de biocidas.

⁴ Ley 10/98, de 21 de abril, de Residuos.

⁵ 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.

⁶ Decreto 199/2006, de 10 de octubre, por el que se establece el sistema de acreditación de entidades de investigación y recuperación de la calidad del suelo y se determina el contenido y alcance de las investigaciones de la calidad del suelo a realizar por dichas entidades.

⁷ Decreto 165/2008, de 30 de septiembre, de inventario de suelos que soportan o han soportado actividades o instalaciones potencialmente contaminantes del suelo

⁸ Ley 4/2015, de 25 de junio, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo

⁹ Ley 4/2015, de 25 de junio, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo.

^{10, 12} Calvelo Pereira, R. Estudio del comportamiento del hexaclorociclohexano en el sistema suelo-planta para su aplicación en técnicas de fitocorrección [tesis doctoral]. Santiago de Compostela, Mayo 2008.

¹¹ Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [sede Web]. Madrid: Ministerio de Empleo y Seguridad Social, Gobierno de España; abril 2007 [acceso abril 2016]. Disponible en:

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/0a100/nspn0053.pdf>

¹³ Libro de la Construcción de Argalarío.

¹⁴ Ihobe, Sociedad pública de gestión ambiental [Internet]. Bilbao: Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial, Gobierno Vasco. [acceso abril de 2016]. Celda de seguridad de Argalarío. Disponible en:

<http://www.ihobe.eus/Paginas/Ficha.aspx?IdMenu=178e2d59-bda8-4fbe-88b9254cad4473b7&Idioma=es-ES>

¹⁵ Edafología.net [Internet]. Granada: Francisco Martín Peinado, Departamento de Edafología y Química Agrícola, UGR [acceso abril de 2016]. Disponible en: www.edafologia.net/desconta/Bioremediacion.ppt

¹⁶ M^a Jesús Kaifer Brasero, Alfonso Aguilar Peña, Encarnación Arana Jiménez, Cristina Balseiro Bonillo, Irene Torá Mouvet, José M^a Caleyá Sánchez et al. Guía de tecnologías de recuperación de suelos contaminados. Plan regional de actuaciones en materia de suelos contaminados de la Comunidad de Madrid, 2001 – 2006. Dirección general de promoción y disciplina ambiental, 2004.

¹⁷ I. San Román, M.L. Alonso, L. Bartolomé, A. Galdames, E. Goiti, M. Ocejo et al. Relevance study of bare and coated zero valent iron nanoparticles for lindane degradation from its by-product monitorization. Chemosphere; Volume 93, Issue 7, October 2013; 1324 – 1332.

18. Organización de las Naciones Unidas, Informe del Comité de Examen de los Contaminantes Orgánicos Persistentes sobre la labor realizada en su segunda reunión, Perfil de Riesgos del Lindano. Noviembre de 2006 [acceso abril de 2016]. UNEP/POPS/POPRC.2/17/Add.4

19. Maribel Martínez. Gobierno Vasco, Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial. La experiencia del País Vasco en la recuperación de suelos contaminados. Junio de 2015 [acceso marzo de 2016]. Disponible en: <http://www.condegres2015.com/wp-content/uploads/2015/08/Inaugural-Maribel-Martinez.pdf>

20. Instituto Nacional de Ecología [sede Web]. México: Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales; 2007 [acceso marzo 2016]. Tecnologías de remediación. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/372/tecnolog.html>

21. M^a del Carmen Sabroso González Ana Pastor Eixarch. Guía sobre suelos contaminados. Zaragoza: Departamento de Economía, Hacienda y Empleo, Gobierno de Aragón; 2004.
22. Arturo Hortas. Discovering Lindane, el legado del HCH, Documental [video]. Gobierno de Aragón, Diciembre de 2015.
23. Tecnum, Escuela de Ingenieros [sede Web]. San Sebastián: Universidad de Navarra; [acceso marzo 2016]. Libro electrónico: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Disponible en: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/13Residu/121Lindan.htm>
24. El Escarabajo Verde. Lindano maldito [video]. RTVE, Abril de 2015.
25. BYCAM, Servicios Edificios e Infraestructuras [sede Web]. Bilbao: BYCAM [acceso marzo 2016]. Celda de Seguridad para tierras contaminadas en el Monte Argalarío. Disponible en: <http://www.bycam.eus/saneamiento-y-medio-ambiente/celda-de-seguridad-para-tierras-contaminadas-en-el-monte-argalarío>
26. FENACORE, Federación Nacional de Comunidades Regantes de España [sede Web]. Madrid, Mayo de 2001 [acceso marzo de 2016]. Todo preparado para el traslado de tierras contaminadas con HCH a la Celda de Argalarío. Disponible en: <http://www.fenacore.org/topicos/noticias.cgi?topico=med&idnoticias=3966>
27. Irene Ortiz Bernad, Juana Sanz García, Miriam Dorado Valiño, Susana Villar Fernández. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Madrid: Universidad de Alcalá, Dirección General de Universidades e Investigación.
28. Instituto Geológico y Minero de España. Lucha contra la contaminación por plaguicidas. En: Las aguas subterráneas y los plaguicidas, Madrid, 1992; 90 – 100.
29. Edafología.net [sede Web]. Granada: Carlos Dorronsoro Fernández, Dpto. de Edafología y química Agrícola [acceso abril de 2016]. Máster en Ingeniería del medio ambiente, módulo suelos. Disponible en: <http://www.edafologia.net/desconta/anulacion4.pdf>
30. FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [sede Web]. Roma, Italia: FAO [acceso marzo 2016]. La FAO proporciona soluciones para la descontaminación del suelo. Disponible en: http://www.fao.org/agriculture/crops/noticias-eventos-boletines/detail/es/item/40460/icode/2/?no_cache=1