



MASTER EN INGENIERÍA Y GESTIÓN  
MEDIOAMBIENTAL

DEPÓSITO DE RESIDUOS EN  
VERTEDERO

DOCUMENTACIÓN ELABORADA POR:

IVÁN BOTAMINO GARCÍA

## INDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	3
1.1.	MECANISMOS DE DISPERSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN.....	4
1.2.	CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO DE UN DEPÓSITO CONTROLADO.....	5
2.	MARCO NORMATIVO .....	8
2.1.	LEGISLACIÓN BÁSICA APLICABLE .....	8
2.2.	NORMATIVA APLICABLE A VERTEDEROS.....	10
3.	CLASIFICACIÓN DE LOS VERTEDEROS.....	16
3.1.	VERTEDEROS DE RESIDUOS INERTES.....	16
3.2.	VERTEDEROS DE RESIDUOS NO PELIGROSOS.....	17
3.3.	VERTEDEROS DE RESIDUOS PELIGROSOS.....	18
3.4.	COMPARATIVA DE VALORES LÍMITE PARA CADA TIPO DE VERTEDERO.....	19
4.	UBICACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	21
4.1.	SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO.....	21
4.2.	ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO.....	26
4.3.	PROTECCIÓN DEL SUELO Y DE LAS AGUAS.....	29
4.4.	MATERIALES GEOSINTÉTICOS.....	31
4.5.	DESARROLLO DEL PERFIL TIPO CONSTRUCTIVO.....	36
4.6.	INSTALACIONES AUXILIARES.....	39
5.	LIXIVIADOS.....	40
5.1.	GENERACIÓN DE LIXIVIADOS.....	40
5.2.	COMPOSICIÓN.....	42
5.3.	RECOGIDA.....	45
5.4.	TRATAMIENTO DEL LIXIVIADOS.....	48
6.	BIOGÁS.....	51
6.1.	GENERACIÓN.....	51
6.2.	COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS.....	52
6.3.	DESGASIFICACIÓN.....	53
6.4.	TRATAMIENTO Y UTILIZACIÓN.....	56
7.	EXPLOTACIÓN, CONTROL Y VIGILANCIA.....	59
7.1.	PLAN DE EXPLOTACIÓN.....	59
7.2.	PROCEDIMIENTO DE CONTROL Y VIGILANCIA.....	63
8.	CLAUSURA DEL VASO DE VERTIDO. CONTROL Y VIGILANCIA POSTCLAUSURA.....	65
8.1.	CLAUSURA DEL VASO DE VERTIDO.....	65
8.2.	PROGRAMA DE CONTROL Y VIGILANCIA POSTCLAUSURA.....	67
9.	DOCUMENTACIÓN RECOMENDADA.....	68
9.1.	BIBLIOGRAFÍA.....	68
9.2.	INTERNET.....	68

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la estrategia global de gestión de residuos, la prioridad de tratamiento se suele establecer según la siguiente secuencia: prevención, minimización, reutilización, reciclaje, valorización y eliminación. El vertido siempre se considera como última alternativa, debido a los problemas que plantea de disponibilidad de terreno y riesgo de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas.

A pesar de ello, las instalaciones de eliminación por vertido representan un elemento indispensable dentro de una planificación global de residuos, debido a lo siguiente:

- Las técnicas de reducción en origen (minimización, reciclado, valorización, etc.) no garantizan por sí solas la desaparición de los residuos.
- Algunas tecnologías de tratamiento de residuos generan a su vez nuevos residuos (como los lodos de tratamiento físico-químico, fangos de tratamiento biológico, cenizas de destrucción térmica, etc.) cuya única alternativa de gestión actual consiste en su almacenamiento controlado.

Un **Vertedero o depósito controlado** es una instalación para almacenamiento de residuos en superficie o subterráneo por tiempo indefinido en condiciones de total seguridad para el medio ambiente, provisto de las medidas constructivas y de control oportunas para garantizar que no se produzca la contaminación del medio.

Así, los criterios específicos de diseño para la construcción y explotación de un depósito controlado estarán encaminados a minimizar y controlar la posibilidad de contacto entre la carga contaminante contenida en los residuos y el entorno circundante. En el caso que nos ocupa, y tal y como se describe en el presente texto, se trata de residuos sólidos, cuyo riesgo fundamental para el medio consiste en la generación de lixiviados, con la consecuente movilización y transporte de sus elementos contaminantes.

Es muy importante señalar que la percepción social de este tipo de instalaciones, basada fundamentalmente a su desarrollo histórico, y la existencia en el pasado de una cantidad considerable de vertederos incontrolados, está muy alejada de la auténtica naturaleza de un depósito controlado, que es fundamentalmente una **instalación de tratamiento de residuos**, con normativa y tecnología específicas,

diseñada para un flujo acotado y bien definido de residuos, y cuyas exigencias a nivel de ingeniería son equivalentes a la de cualquier obra de infraestructura o instalación industrial.

### 1.1. MECANISMOS DE DISPERSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Si consideramos un almacenamiento superficial de residuos sobre el terreno, se denominan vectores de dispersión a los agentes, naturales o de origen humano, que son capaces de liberar los contaminantes de los residuos depositados, posibilitando su propagación en el medio.

La importancia de dichos vectores de dispersión está relacionada con el riesgo que suponen, para la salud humana y del medio, los contaminantes que se puedan liberar de los residuos. Este riesgo viene determinado, en cada caso, por las condiciones del emplazamiento y por la presencia e intensidad de los vectores de dispersión.

Los principales vectores de dispersión son los siguientes:

#### AGUA

- Producción de lixiviados por percolación de las aguas de lluvia a través de los residuos y de infiltración de aguas superficiales.
- Arrastre de residuos por escorrentía de aguas superficiales.
- Dispersión de lixiviados por aguas superficiales.
- Dispersión de lixiviados por aguas subterráneas.

#### AIRE

- Dispersión aérea de residuos: emisión e inmisión de residuos.
- Producción de gases y olores.
- Dispersión aérea de suelos contaminados.

#### ARRASTRE MECÁNICO

- Dispersión mecánica por arrastres de maquinaria.
- Deslizamiento de terreno.

- Rotura de diques de contención.
- Fenómenos sísmicos.

Como se ha mencionado, el vector de dispersión más importante es el agua, tanto aguas subterráneas como superficiales que, en contacto con los residuos, disuelven o arrastran la contaminación, afectando a la calidad del aire, aguas y suelo.

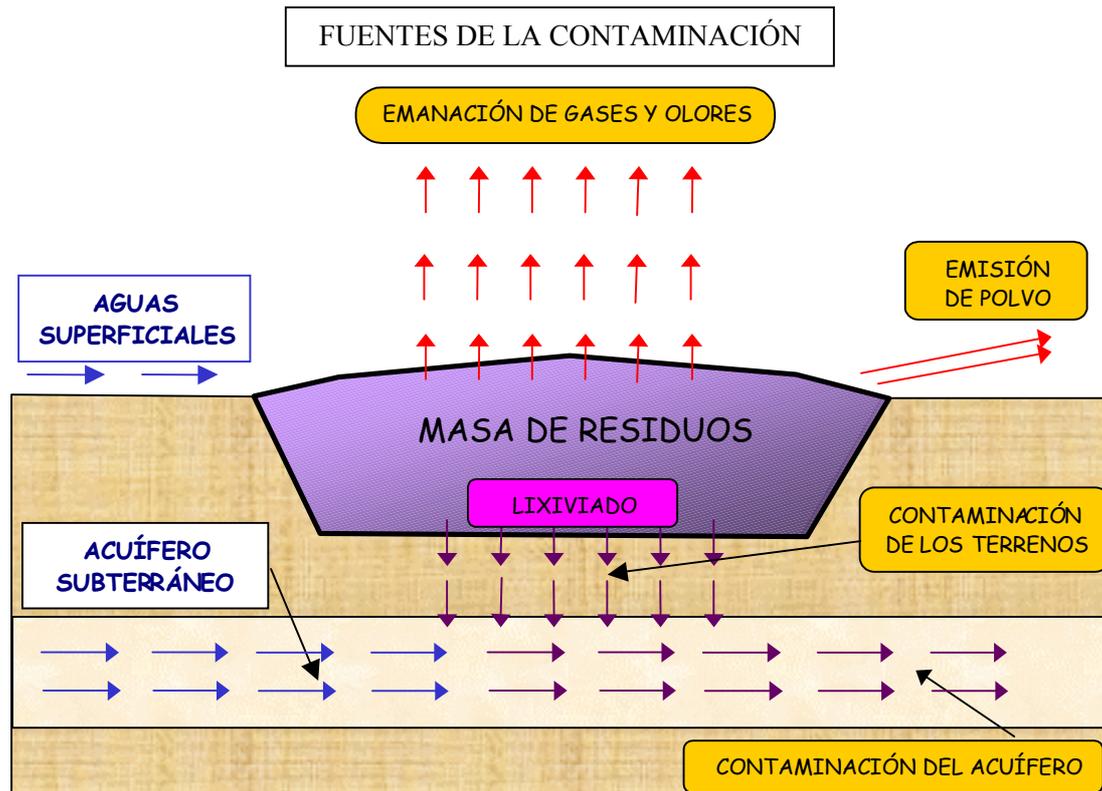


Fig.1.1: Mecanismos de contaminación del medio

Para evitar estos efectos, un depósito controlado deberá estar dotado de medidas constructivas, operativas y vigilancia que controlen y minimicen el contacto de los vertidos con esos vectores de dispersión.

## 1.2. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO DE UN DEPÓSITO CONTROLADO.

Según lo anteriormente expuesto, el criterio fundamental de diseño y explotación de un depósito controlado consistirá en lograr el aislamiento efectivo de los residuos de forma permanente, evitando su interacción con el medio circundante. A modo de resumen, se recogen las características básicas del desarrollo de un vertedero

controlado, en las distintas fases de diseño previo y construcción, explotación, sellado y clausura, que se desarrollarán de forma más amplia en los capítulos siguientes.

### **1.2.1. Estudios previos, diseño y construcción**

La primera fase para la construcción de un depósito controlado de residuos comienza con la selección de un emplazamiento adecuado para su ubicación. El criterio fundamental de evaluación estará basado en la búsqueda de la máxima impermeabilidad de los materiales existentes y la ausencia de niveles subterráneos permanentes. Los materiales del sustrato actuarán como barrera frente a una posible dispersión de contaminantes (baja permeabilidad) y se asegurará que no existen vías preferenciales de evacuación (ausencia de acuíferos).

Posteriormente, se proveerá al emplazamiento de medidas constructivas de impermeabilización artificial de refuerzo (geosintéticos), así como de las infraestructuras de operación (drenaje de lixiviados, cunetas perimetrales, balsas de almacenamiento, etc.) y control y vigilancia (piezómetros de control de aguas subterráneas, instrumentación geotécnica, etc.). Durante la fase de construcción es fundamental establecer los controles de calidad adecuados para asegurar una correcta ejecución de las infraestructuras proyectadas.

### **1.2.2. Explotación, control y vigilancia.**

Durante la fase de explotación del depósito controlado se observarán los siguientes criterios generales:

- Control de la admisión de residuos, según los criterios establecidos en el R.D. 1481/2001 y la Decisión del Consejo 2003/33/CE, que se describen más adelante. De esta forma se asegura que los residuos vertidos son compatibles con las infraestructuras de almacenamiento construidas y los procedimientos operativos de diseño.
- Explotación del vertedero según criterios de reducción de la generación de lixiviado (cobertura diaria de los residuos, minimización del frente de vertido), segregación de residuos incompatibles (ausencia de reacción entre residuos, aumento de lixivabilidad de los metales por variación de pH, etc.), y trazabilidad de los residuos depositados (ubicación dentro del vertedero).

- Gestión adecuada de los residuos producidos, fundamentalmente el lixiviado del vertedero.
- Control y vigilancia periódica de las variables ambientales de referencia (calidad aguas superficiales, subterráneas, variables meteorológicas, topografía, emisión de gases y ruidos, etc.).

Conviene mencionar un aspecto que a veces no se tiene en cuenta, y es el hecho de que las medidas de explotación, control de admisión y vigilancia ambiental son elementos de protección activa, cuya importancia no es en ningún caso inferior a las condiciones iniciales de impermeabilidad natural y constructiva. Es decir, que unas condiciones excepcionales de impermeabilidad natural y construcción no aseguran por sí mismas la no afección del medio, si no se lleva a cabo una correcta explotación del vertedero durante su fase de actividad.

### **1.2.3. Sellado, control y vigilancia postclausura.**

Una vez finalizada la vida útil del vertedero, se procederá a su clausura efectiva, según el perfil de sellado de diseño. Con ello, se consigue el confinamiento efectivo de la masa de residuos dentro de la envolvente completa que constituye la impermeabilización. Durante esta fase es fundamental asegurar la ejecución correcta de dicha impermeabilización superficial y restauración superficial de los terrenos, mediante procedimientos concretos de control de calidad.

Una vez sellado, se llevará a cabo el Plan de Control y Vigilancia postclausura previsto, durante un período de 30 años, consistente en el control de las variables ambientales de referencia, restauración de la cubierta vegetal, gestión de lixiviado (cuya producción tenderá a desaparecer tras el sellado) y biogás producidos, y control de la estabilidad de la masa de los residuos.

## 2. MARCO NORMATIVO

En el siguiente capítulo se describen los aspectos fundamentales de la legislación aplicable para las operaciones de construcción y explotación de un depósito controlado de residuos.

### 2.1. LEGISLACIÓN BÁSICA APLICABLE

En este apartado se recogen las normas que regulan de forma genérica a todos los residuos e instalaciones de tratamiento:

- **Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.** Esta Ley tiene carácter de norma común para todo tipo de residuos, (exceptuando las emisiones a la atmósfera, los residuos radiactivos y los vertidos de efluentes líquidos a las aguas continentales y los vertidos desde la tierra al mar). El objetivo fundamental de esta norma es prevenir la producción de residuos, estableciendo el régimen jurídico de su producción y gestión. Además involucra a todos los agentes económicos que intervienen en la actividad productiva, estableciendo como objetivo fundamental la minimización, reciclaje, reutilización, compostaje y valorización energética de los residuos.

Se establece la definición legal de residuo, así como de sus diferentes tipologías y alternativas de tratamiento (reutilización, reciclado, valorización y eliminación). Según el artículo 3.a) de la Ley, tendrán la consideración de residuos los que figuren en el Catálogo Europeo de Residuos (CER), aprobado por las Instituciones Comunitarias mediante la Decisión 94/3/CE, de la Comisión, de 20 de diciembre de 1993.

Asimismo, la nueva norma respeta el reparto constitucional de competencias entre el Estado y las Comunidades Autónomas, al tiempo que garantiza las competencias que tradicionalmente han venido ejerciendo las Entidades Locales en materia de residuos sólidos urbanos. Como hecho importante, la Ley atribuye de forma genérica a las Entidades Locales como servicio obligatorio, la responsabilidad de la recogida, transporte y eliminación de los residuos urbanos (antes de su aprobación solo existía esta obligación para los municipios de más de 5.000 habitantes). Además, a estos últimos se les obliga a implantar un sistema de recogida de residuos a partir de 2001, que posibiliten el reciclado de los RSU y otras formas de valorización.

- **Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, sobre Residuos Peligrosos**, que modifica el **Real Decreto 833/1988** (por el que se aprobaba el Reglamento de la Ley 20/1986, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos). Dicha norma incluye en su Anejo 2 la lista comunitaria de residuos peligrosos, aprobada por la Decisión 94/904/CE, del Consejo, de 22 de diciembre (de acuerdo con la Directiva 91/689/CEE) desagregando los que tienen tal carácter de la lista general de residuos previamente aprobada mediante la Decisión 94/3/CE, de la Comisión, de 20 de diciembre (modificada posteriormente por la Decisión de la Comisión 2000/532/CE).

- **Orden MAM/304/2002**, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos (anejo 1) y la **LISTA EUROPEA DE RESIDUOS (anejo 2)**, en la que los residuos peligrosos figuran con un asterisco. Esta lista se corresponde con la última modificación (Decisión 2001/118/CE, de 16 de enero de 2001 que contiene la lista aplicada en la actualidad). Dado que las Decisiones 94/3/CE y 94/904/CE han quedado sin efecto, ha ocurrido lo mismo con la lista de residuos peligrosos del Real Decreto 952/1997 y con la Resolución de 17 de noviembre de 1998, por la que se publicaba el Código CER, que ha sido expresamente derogada en la Orden MAM/304/2002.

- **Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación**, resultante de la incorporación al ordenamiento interno español de la **Directiva 96/61/CE**, cuyo objeto es evitar o, cuando ello no sea posible, reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente en su conjunto.

Uno de los pilares esenciales sobre los que descansa la estructura de esta Ley, en la medida en que regula el régimen jurídico de la **autorización ambiental integrada**, es la nueva figura autonómica de intervención ambiental que se crea para la protección del medio ambiente en su conjunto y que sustituye a las autorizaciones ambientales existentes hasta el momento, circunstancia que le atribuye un valor añadido, en beneficio de los particulares, por su condición de mecanismo de simplificación administrativa.

En la Ley se establece que en la autorización ambiental integrada, se deberán fijar los valores límite de emisión de las sustancias contaminantes (enumeradas en

el anejo 3), teniendo en cuenta las mejores técnicas disponibles para cada actividad (pero sin prescribir una tecnología concreta), las características técnicas de la instalación y su localización geográfica.

Complementariamente se establecen los mecanismos de intercambio de información entre el Ministerio de Medio Ambiente y las Comunidades Autónomas sobre las principales emisiones contaminantes y sus focos, con la finalidad de elaborar un inventario estatal de emisiones que tendrá que enviarse a la Comisión Europea de conformidad con lo establecido en la normativa comunitaria (Decisión 200/479/CE relativa a la realización de un inventario europeo de emisiones - **EPER**).

En el caso que nos ocupa, esta Ley resulta de aplicación para vertederos (Anexo 1, punto 5.4) de todo tipo de residuos que reciban más de 10 toneladas por día o que tengan una capacidad total de más de 25.000 toneladas con exclusión de los vertederos de residuos inertes, lo que corresponde a la mayor parte de los vertederos existentes.

## 2.2. *NORMATIVA APLICABLE A VERTEDEROS*

### 2.2.1. *Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999*

Ante la ausencia de una normativa específica de ámbito europeo en materia de vertederos, el Consejo de Gobierno de la Unión Europea encargó a una comisión de expertos presentar una propuesta de directiva, lo que efectivamente hizo el 18 de septiembre de 1996, modificada posteriormente, en diciembre del mismo año y materializada, por fin, como la **Directiva 1999/31/CE de 26 de abril de 1999, que regula el vertido de residuos** en la Unión Europea.

Esta Directiva persigue reducir y prevenir en la medida de lo posible los efectos negativos sobre el medio ambiente de los vertidos de residuos, tanto peligrosos como no peligrosos, durante todo el ciclo de vida del vertedero.

### 2.2.2. *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre de 2001*

La transposición al derecho interno español de la Directiva 1999/31/CE se ha efectuado mediante el **Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre de 2001, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero**.

Dicho Real Decreto se establece como la norma fundamental para el diseño, explotación y control de los vertederos. Debido a ello, en el presente documento se desarrolla gran parte de su contenido, por lo que en este apartado tan solo se mencionan sus características fundamentales.

Como aspectos principales, se recogen los siguientes:

- Establece una clasificación de los vertederos en tres tipologías: para residuos inertes, no peligrosos y peligrosos.
- De acuerdo con lo establecido en la Directiva 1999/31/CE, la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas deberán elaborar un programa conjunto de actuaciones para la reducción de la cantidad total de residuos biodegradables destinados a vertedero, mediante el fomento del reciclaje, compostaje y otras formas de valorización. Se considera una reducción progresiva, hasta el objetivo final de que los RSU biodegradables con destino a vertedero no superen el 35% de la cantidad total de los RSU generados en 1995, siendo la fecha límite de aplicación el 16 de julio de 2016.
- Define que tipos de residuos son admisibles y no admisibles, para todos y cada uno de los vertederos según su tipología. En particular, destaca el hecho de que solo se consideran admisibles aquellos residuos que hayan sido objeto de tratamiento previo, bien para reducir su volumen o peligrosidad, facilitar su manejo o impulsar su recuperación.
- Respecto a la Autorización, se establece el contenido del Proyecto justificativo de la **Solicitud de Autorización**, así como las **condiciones** (constitución de seguro de responsabilidad civil, depósito de fianza, etc.); y **contenido** de la misma, en caso de resultar favorable la solicitud de vertedero propuesta.
- Impone que los costes de vertido cubran los costos de construcción y operación, incluyendo su clausura y mantenimiento durante 30 años de la instalación.
- Se desarrollan los procedimientos de adecuación de los vertederos existentes a la nueva normativa, previendo el cese de su actividad en caso contrario, como muy tarde el 16 de julio de 2009.
- En el **Anexo I**, se definen los requisitos generales de ubicación, diseño, construcción y operación que deben cumplir los vertederos.

- En el **Anexo II**, se establecen los criterios y procedimientos para la admisión de residuos, desarrollados posteriormente en la Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002.
- En el **Anexo III**, se desarrollan los procedimientos de control y vigilancia en las fases de explotación y mantenimiento posterior.

En su desarrollo, el Real Decreto define unas **directrices generales** de actuación, a la vista de las cuales cabe realizar las siguientes observaciones:

- Se establecen normas técnicas a escala comunitaria, evitando disparidades que favorezcan el transporte innecesariamente largo de los residuos por causas de diferencias económicas y asegurar así los principios de proximidad y autosuficiencia.
- Fomenta la prevención, el reciclado y el aprovechamiento de los residuos, así como la utilización de los materiales y de la energía recuperados, con el fin de no malgastar los recursos naturales y de economizar en la utilización de los suelos.
- Se propugna la reducción de los residuos biodegradables en los vertederos, fijando plazos y porcentajes de reducción del vertido para los residuos municipales de forma que se favorezca el reciclado mediante compostaje, biogasificación o valorización de materiales / energía.
- Debe combatirse la producción de gases que favorezcan el calentamiento global, limitando el vertido de residuos biodegradables que puedan producir metano, así como su control y valorización en los vertederos, aún los que estén ya clausurados.
- Parece previsible que a medio plazo no se permita el vertido de residuos que no hayan sufrido tratamiento previo. En particular, el esquema de gestión debería incluir siempre los siguientes procesos: selección, tratamiento, estabilización y vertido.
- Prohíbe expresamente la mezcla o dilución de residuos únicamente para cumplir los criterios de admisión de residuos.

### **2.2.3. Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002.**

Con posterioridad a la publicación del R.D 1481/2001, se publicó la **Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con**

arreglo al artículo 16 y al Anexo II de la Directiva 1999/31/CEE. Esta Decisión entró en vigor el 16 de julio de 2004, siendo de aplicación lo que en ella se establece a partir del 16 de julio de 2005.

Se complementa el procedimiento de admisión de residuos en vertedero definido en el R.D. 1481/2001, desarrollando los siguientes aspectos fundamentales:

- Procedimiento general para determinar la admisibilidad de residuos en los vertederos (Caracterización básica, Pruebas de conformidad y Verificación *in situ*).
- Métodos que deben utilizarse para la toma de muestras y la prueba de residuos.
- Criterios de admisión para cada tipo de vertedero, basados en valores límite de lixiviación y de contenido total. Los vertederos solo podrán admitir residuos que cumplan los criterios de admisión de la clase pertinente.

#### A) Procedimiento general de admisión de residuos

La Decisión propone un procedimiento de control basado en la metodología siguiente:

- *Caracterización básica. Aceptación de residuos*

Los productores de residuos deberán enviar una muestra representativa del residuo, así como la información que permita la correcta caracterización del mismo. Los objetivos fundamentales de esta caracterización consisten en obtener información básica sobre el residuo (composición, lixiviabilidad, opciones de tratamiento y comportamiento en el vertedero), evaluación respecto a los valores límite y determinación de los parámetros principales a verificar en las pruebas de conformidad.

La caracterización básica deberá incluir, entre otra, la siguiente información: fuente y origen del residuo; información sobre el proceso de producción del residuo (materias primas y productos), así como la descripción del tratamiento aplicado; datos sobre la composición del residuo y su comportamiento de lixiviación; codificación conforme a la Lista Europea de Residuos; clase de vertedero en la que puede admitirse el residuo.

Con los resultados obtenidos a partir de la caracterización básica, y cuando el residuo resulte admisible, se elaborará el Documento de Aceptación, donde se establecerán

los parámetros de admisión y las pruebas de conformidad a que se someterá periódicamente el residuo, así como el Número de Aceptación que lo identifica de forma unívoca. De igual forma, se indicará la cantidad y forma de entrega, datos del productor y gestor, identificación del residuo código LER según Orden MAM/304/2002, así como las condiciones generales.

- *Pruebas de conformidad*

La función de las pruebas de conformidad es comprobar periódicamente que los residuos admitidos se ajustan a los resultados obtenidos en la caracterización básica y cumplen los criterios de admisión de acuerdo a la Decisión 2003/33/CE y R.D. 1481/2001.

Los parámetros a comprobar en cada residuo se establecerán de la caracterización básica y serán aquellos parámetros críticos en cuanto a la existencia de valores límite, consistiendo en al menos un ensayo de lixiviación.

La prueba de conformidad, se realizará como mínimo una vez al año, debiendo garantizarse su ejecución según la periodicidad establecida en la caracterización básica.

- *Verificación in situ. Control de admisión*

La “verificación in situ” consiste en confirmar que los envíos de residuos que llegan a la instalación se ajustan a los parámetros establecidos, mediante una inspección visual antes y después de la descarga en el vertedero.

## B) Métodos que deben utilizarse para la toma de muestras y la prueba de residuos

La toma de muestras, pruebas de caracterización básica y pruebas de conformidad podrán ser realizadas por los productores de residuos y operadores siempre que dispongan de un sistema apropiado de garantía de calidad, combinado con comprobaciones periódicas independientes.

En el texto se recogen, dentro de la normativa europea, los diferentes procedimientos de muestreo y análisis en función de los parámetros a evaluar. Por su especial

importancia, cabe resaltar la prueba EN 12457/1-4 (prueba de conformidad de lixiviación de los materiales granulares), cuyo resultados se utilizan para la verificar la potencial admisibilidad de los residuos en alguna de las tipologías de vertederos existentes mediante comparación con las tablas de valores límite de admisión definidos para cada tipo de vertedero.

### 3. CLASIFICACIÓN DE LOS VERTEDEROS

Como se ha mencionado, la Decisión del Consejo 2003/33/CE define los procedimientos y valores límites de admisión en cada tipo de vertedero, cuya tipología y características se describen en el presente apartado.

#### 3.1. VERTEDEROS DE RESIDUOS INERTES

Los residuos admisibles son conformes con la definición de “residuo inerte” establecida en el artículo 2. B) del R.D. 1481/2001. Se establece una lista de residuos (según LER) exentos de la realización pruebas de caracterización básica, que corresponden fundamentalmente a los Residuos de Construcción y Demolición (RCD's).

CER	Descripción	Restricciones
1011 03	Residuos de materiales de fibra de vidrio	Solamente sin aglutinantes orgánicos
1501 07	Envases de vidrio	
1701 01	Hormigón	Solamente residuos seleccionados de construcción y demolición (*)
1701 02	Ladrillos	Solamente residuos seleccionados de construcción y demolición (*)
1701 03	Tejas y materiales cerámicos	Solamente residuos seleccionados de construcción y demolición (*)
1701 07	Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos	Solamente residuos seleccionados de construcción y demolición (*)
1702 02	Vidrio	
1705 04	Tierra y piedras	Excluidas la tierra vegetal, la turba y la tierra y las piedras de terrenos contaminados
1912 05	Vidrio	
2001 02	Vidrio	Solamente el vidrio procedente de la recogida selectiva
2002 02	Tierra y piedras	Solamente de residuos de parques y jardines. Excluidas la tierra vegetal y la turba

*Tabla 3.1 - Lista de residuos admisibles sin realización previa de pruebas en vertederos para residuos inertes*

El residuo deberá ser un material que constituya un flujo único (de una única fuente). Así, los residuos que figuran en la lista podrán ser admitidos conjuntamente siempre que procedan de la misma fuente.

Para el resto de los residuos, deberá verificarse que cumplen los criterios generales de admisión para este tipo de vertedero. Los residuos inertes podrán eliminarse en vertederos de residuos no peligrosos, siempre y cuando dichos residuos cumplan los criterios apropiados.

### 3.2. VERTEDEROS DE RESIDUOS NO PELIGROSOS

Se prevén tres subcategorías de vertederos de residuos no peligrosos:

- Vertederos para residuos inorgánicos con un contenido bajo en componentes orgánicos biodegradables.
- Vertederos para residuos orgánicos.
- Vertederos para residuos mixtos no peligrosos con un contenido sustancial de materiales orgánicos biodegradables y de materiales inorgánicos.

Los vertederos de la primera categoría corresponden a residuos industriales con un bajo contenido en materia biodegradable. En relación a esta tipología de vertederos, la normativa incorpora una novedad importantísima, posibilitando la eliminación conjunta (en una misma celda de vertido) de los siguientes tipos de residuos:

- Residuos no peligrosos inorgánicos no biodegradables, que cumplan los valores límite establecidos en la Decisión (2.2.2.).
- Residuos peligrosos no reactivos estables, siempre y cuando cumplan los valores límite establecidos en la Decisión (2.3.1).
- Residuos no peligrosos a base de yeso.
- Residuos de amianto, siempre y cuando verifique una serie de requisitos de forma de entrega, manipulación y explotación.

Solo se establecen los valores límites para aquellos residuos no peligrosos que pueden eliminarse de forma conjunta con residuos peligrosos estables no reactivos. El resto de los residuos no peligrosos no están sujetos a pruebas de caracterización y cumplimiento.

Teniendo en cuenta esta circunstancia, esta categoría puede subdividirse en vertederos para residuos no peligrosos que no cumplen los criterios para eliminación conjunta, y en vertederos para residuos que cumplen los criterios establecidos en relación con los residuos inorgánicos no peligrosos que pueden eliminarse juntamente con residuos peligrosos no reactivos.

Como puede observarse de lo anteriormente expuesto, la Directiva potencia la actividad de los vertederos de residuos no peligrosos, ampliando su espectro de residuos admisibles. En particular destaca el hecho de que permite la eliminación de un residuo peligroso dentro de un vertedero de residuos no peligrosos, si bien establece unas condiciones rigurosas de obligado cumplimiento para que este vertido pueda realizarse. Parece lógico pensar, que los tratamientos de estabilización estarán orientados a lograr este objetivo, ya que disminuye el coste de vertido (que suele ser más económico en un vertedero de residuos no peligrosos) y el riesgo de liberación de las sustancias contaminantes, ya que el criterio de admisión está basado en un criterio de valores límite de lixiviación.

Además, se prevé la admisión en vertederos de residuos no peligrosos de residuos de amianto (que hasta la fecha solía gestionarse en vertederos de residuos peligrosos) e incluso, en algunos casos, residuos inertes.

La segunda clase de vertederos corresponde a los residuos municipales, con arreglo a la definición establecida en el artículo 2.b) de la Directiva, y clasificados como no peligrosos en el capítulo 20 del LER. Estos residuos serán admisibles sin realización previa de pruebas de caracterización y seguimiento. Nunca podrán ser vertidos en aquellas celdas donde se viertan residuos peligrosos no reactivos estables, descrita anteriormente.

Estos vertederos pueden subdividirse, por ejemplo, en vertederos biorreactores y en vertederos de residuos menos reactivos tratados biológicamente.

### 3.3. VERTEDEROS DE RESIDUOS PELIGROSOS

Si un residuo es peligroso, según lo establecido en la lista actual de residuos, y cumple los criterios de admisión en un vertedero de residuos peligrosos, podrá eliminarse en un vertedero de residuos peligrosos. Si los criterios de admisión no se cumplen, el

residuo podrá someterse a un tratamiento adicional y de nuevo a las pruebas correspondientes para determinar su cumplimiento de los requisitos.

### 3.4. COMPARATIVA DE VALORES LÍMITE PARA CADA TIPO DE VERTEDERO

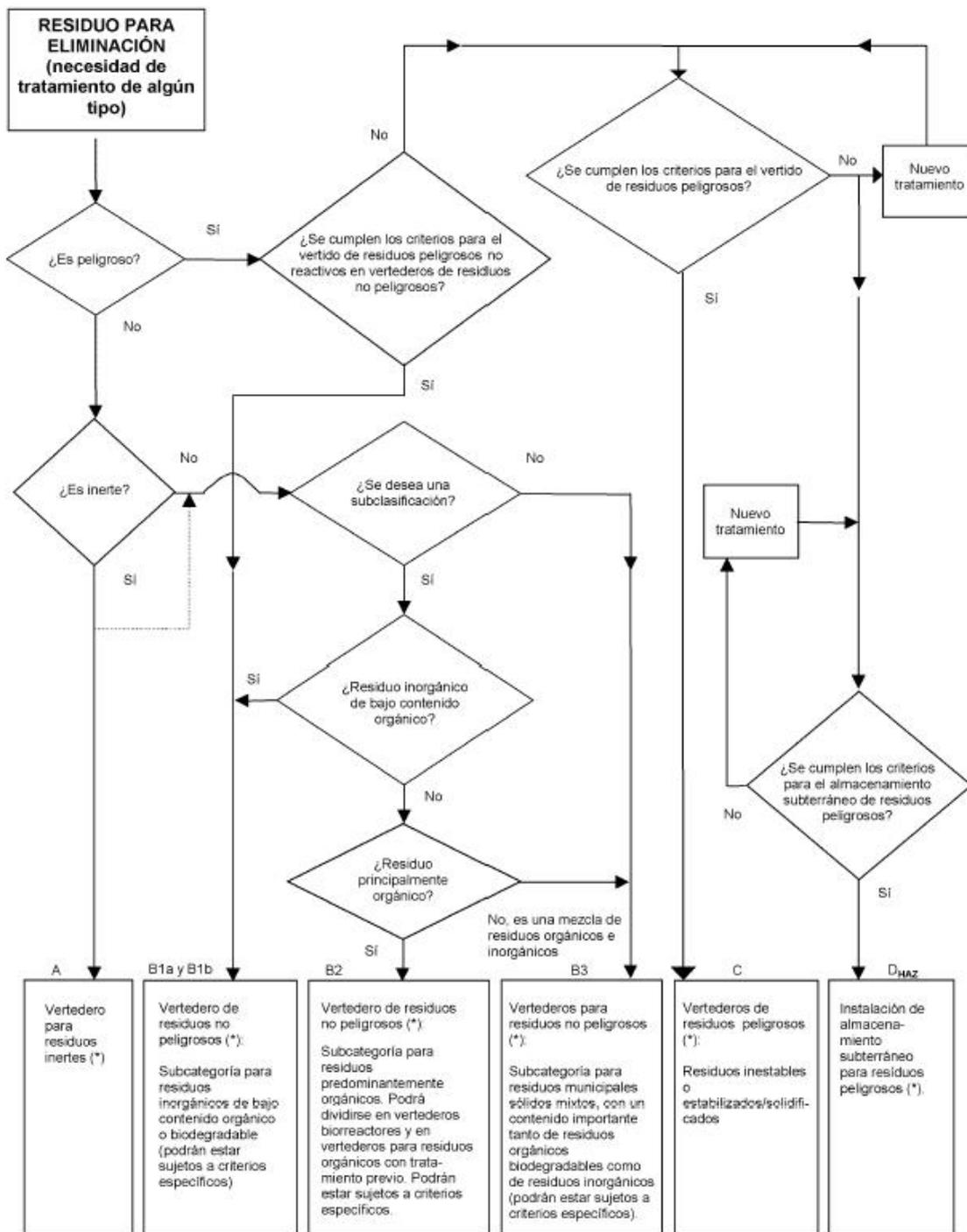
A modo de ejemplo, en la tabla siguiente se recogen los valores límites de admisibilidad de algunos parámetros para los distintos tipos de vertedero descritos. Se ha tomado como referencia los valores correspondientes al ensayo con una proporción entre líquido y sólido de 10 l/Kg expresados en mg/kg.

COMPONENTE (L/S = 10 l/kg)	RESIDUOS INERTES	RESIDUOS NO PELIGROSOS	RESIDUOS PELIGROSOS
<b>As</b>	0,5 mg/kg	2 mg/kg	25 mg/kg
<b>Ba</b>	20 mg/kg	100 mg/kg	300 mg/kg
<b>Cd</b>	0,04 mg/kg	1 mg/kg	5 mg/kg
<b>Hg</b>	0,01 mg/kg	0,2 mg/kg	2 mg/kg
<b>Pb</b>	0,5 mg/kg	10 mg/kg	50 mg/kg
<b>Cloruros</b>	800 mg/kg	15.000 mg/kg	25.000 mg/kg
<b>Sulfatos</b>	1.000 mg/kg	20.000 mg/kg	50.000 mg/kg
<b>COT</b>	30.000 mg/kg	5 %	6 %

La normativa recoge que en ciertas circunstancias, la autoridad competente podrá admitir para algunos parámetros determinados, y siempre y cuando que las emisiones del vertedero no presenten riesgos adicionales para el medio ambiente, valores hasta tres veces superiores a los definidos en la Decisión del consejo.

En la siguiente figura se recogen todas las posibilidades en materia de vertido de residuos previstas por la Directiva vertidos, junto con algunos ejemplos de subcategorías de las principales clases de vertederos. El punto inicial (esquina superior izquierda) corresponde al residuo que debe eliminarse en un vertedero

Diagrama de las opciones de vertido previstas por la Directiva



(\*) En principio, el almacenamiento subterráneo es también posible para los residuos inertes y no peligrosos.

Figura 3.1: Opciones de vertido de residuos previstas en la Directiva sobre vertidos

## 4. UBICACIÓN. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

### 4.1. SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

En el Anexo I del R.D. 1481/2001, se establece con carácter muy general las condiciones mínimas exigibles a un emplazamiento para la ubicación de un vertedero:

#### *“1. Ubicación*

*... deberán tomarse en consideración los requisitos siguientes:*

- a) Las distancias entre el límite del vertedero y las zonas residenciales y recreativas, vías fluviales, masas de agua y otras zonas agrícolas o urbanas.*
- b) La existencia de aguas subterráneas, aguas costeras o reservas naturales de la zona.*
- c) Las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona.*
- d) El riesgo de inundaciones, hundimientos, corrimientos de tierras o aludes en el emplazamiento del vertedero.*
- e) La protección del patrimonio natural o cultural de la zona.* “

Como puede observarse el procedimiento de selección de un emplazamiento adecuado para la ubicación de un vertedero es siempre en un proceso de decisión multicriterio, por lo que suelen emplearse modelos GIS para la obtención de las zonas aptas para la implantación del vertedero.

#### **4.1.1. Descripción general de método de selección de emplazamientos**

Existen múltiples metodologías para la selección de los emplazamientos, si bien todas ellas poseen la característica común de combinar un conjunto de exclusiones y restricciones mínimas para la obtención del resultado final.

En el presente texto se describe una metodología general basada en el desarrollo de un modelo GIS, desarrollada de forma conjunta por la Universidad de Cork (Irlanda) y la Nueva Universidad de Lisboa (Portugal) dentro del Programa INTERREG-IIC del Espacio Atlántico.

El método contempla la siguiente secuencia en su desarrollo:

- Análisis conjunto del medio y del proyecto específico que se pretende realizar.
- Aplicación de los criterios de exclusión (restricciones) para el emplazamiento de vertederos, y obtención de las zonas aptas.
- Valoración y ponderación de las zonas resultantes (áreas residuales).

#### 4.1.2. Criterios de exclusión

Las **áreas de exclusión** son zonas donde los vertederos no pueden ser ubicados debido a que ello representaría un riesgo para el medio ambiente, la salud humana o un coste excesivo.

Inicialmente, se procede a recopilar toda la información disponible, y conversión a un formato digital común para construcción del modelo GIS (ajustes de formato, digitalización de información analógica, etc.). Se trata de un proceso laborioso y no automático, que requiere una participación activa por parte del usuario.

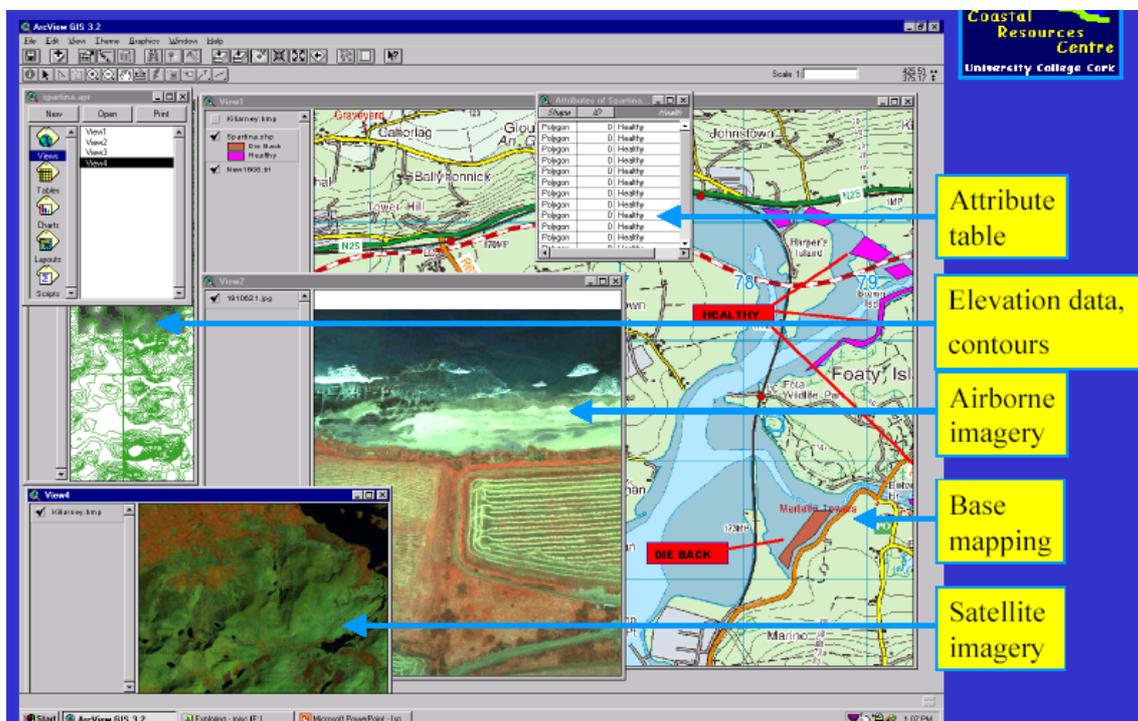


Fig. 4.1 Construcción del modelo GIS

El procedimiento de exclusión se basa en la eliminación de zonas del terreno mediante la aplicación de una distancia mínima (buffer de exclusión) para cada uno de las categorías del modelo considerado.

Seguidamente se describen las principales categorías empleadas.

#### A) AREAS EDIFICADAS

El vertedero debe ubicarse siempre fuera de zonas densamente habitadas. Como criterio general puede establecerse una distancia de exclusión:

VERTEDERO DE RESIDUOS INERTES	500 m
VERTEDERO DE RESIDUOS NO PELIGROSOS	1000 m
VERTEDERO DE RESIDUOS PELIGROSOS	2000 m

Deben evitarse zonas con fuerte actividad industrial (cuyo perímetro de seguridad dependerá de la actividad de la industria considerada), así como cualquier posible afección a las infraestructuras existentes (autopistas y autovías, carreteras nacionales, vía de ferrocarril, aeropuertos, etc.).

No debe situarse el vertedero en las proximidades de lugares relacionados con el suministro de agua, tales como embalses, pozos, etc. Para los embalses, se tendrá en cuenta si el vertedero se encuentra aguas arriba o aguas abajo del mismo. Así, para el caso de un vertedero de residuos no peligrosos la distancia de exclusión varía entre 500 m (Aguas abajo) y 1000 m (Aguas arriba).

#### B) AREAS CLASIFICADAS

El vertedero no podrá situarse dentro de los terrenos de un espacio natural protegido de cualquiera de los siguientes tipos: Parques Naturales, Reservas y Monumentos Naturales, Zonas Especial Protección para las Aves, Zonas de especial conservación de LIC's, Zonas húmedas recogidas en el Inventario de Humedales y Zonas de especial protección pertenecientes a la Red Natura 2000. En todos los casos, puede aplicarse como distancia mínima de seguridad 1000 m (no peligrosos) y 2000 m (peligrosos).

#### C) HIDROLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

No podrá construirse un vertedero en los terrenos pertenecientes al Dominio Público Hidráulico, incluyendo corrientes naturales continuas, manantiales, lagos y lagunas,

charcas, embalses y canales. Deberá evitarse el emplazamiento en zonas con riesgo de inundación, estimadas para la avenida correspondiente a un período de retorno de 100 años.

#### D) GEOLOGÍA

Deben evitarse aquellas zonas donde se haya detectado evidencia de inestabilidad geotécnica asociada a deslizamientos, movimientos de tierras, o desprendimiento de bloques. Igualmente, no debe ubicarse el vertedero en zonas afectadas por procesos cársticos de desarrollo vertical u horizontal. Puede establecerse una distancia mínima de exclusión de 100 metros respecto al límite de los mismos en ambos casos.

La permeabilidad del terreno es una característica fundamental, ya que es el único parámetro definido de forma explícita en el R.D. 1481/2001. Así, deben evitarse terrenos de media o alta permeabilidad. Como la normativa permite mejorar las condiciones naturales del terreno mediante la construcción de capas de refuerzo, puede establecerse un valor límite de exclusión más alto para la permeabilidad natural del terreno, ya que el valor reglamentario podrá ser obtenido constructivamente. Por ello, las zonas resultantes se evaluarán en función de su permeabilidad en la fase de valoración ponderada posterior.

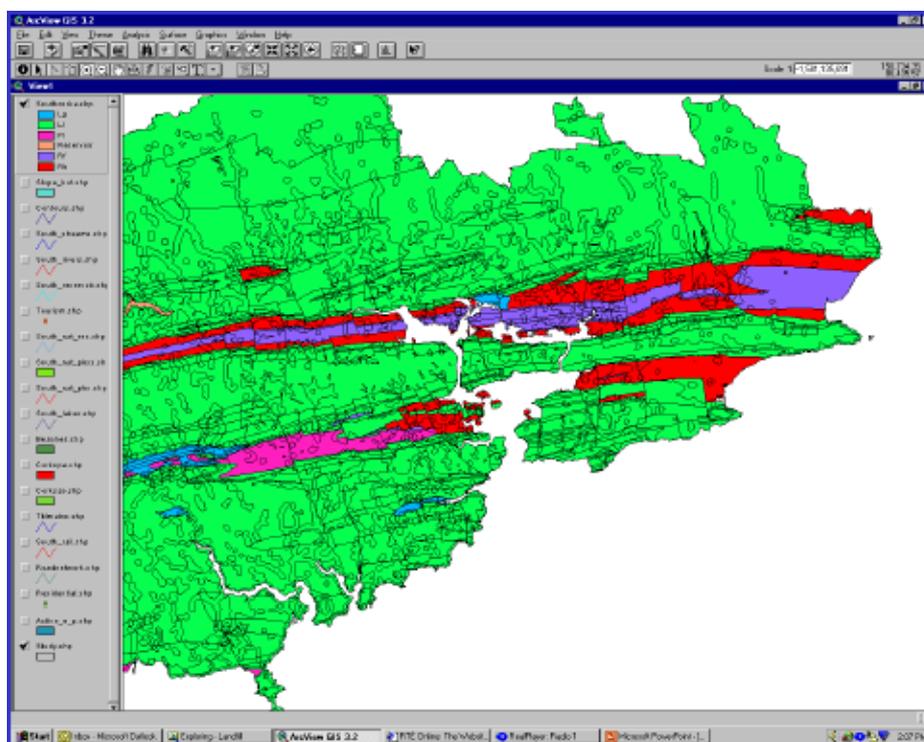


Fig. 4.2. Ejemplo de implementación GIS del modelo geológico de una zona de estudio

#### 4.1.3. Valoración de las áreas residuales

Las **áreas residuales** son aquellas zonas aptas para la ubicación de un vertedero que se obtienen tras la aplicación del proceso de exclusión (buffering). Estas zonas aptas son sometidas a un proceso de valoración ponderado, de acuerdo con los siguientes criterios:

- **Susceptibilidad a los riesgos naturales:** Movimientos del terreno, procesos de erosión, actividad volcánica, sismicidad y riesgo de inundación.
- **Nivel de protección de acuíferos:** Importancia local, vulnerabilidad y zonas de recarga de acuíferos.
- **Capacidad de uso del terreno:** como recurso agrícola, ecológico y geológico.
- **Ingeniería geoambiental:** Barrera natural (capas, permeabilidad y espesor del sustrato), excavabilidad, condiciones de estabilidad del terreno y taludes, y capacidad potencial para remediación del terreno (ej. Empleo de canteras abandonadas para su restauración, etc.).

Todos estos criterios admiten tres posibles valores: alto, moderado y bajo. Posteriormente se asigna a cada criterio un peso en función de su importancia estimada. En la tabla siguiente pueden observarse un ejemplo de asignación de pesos para alguno de los criterios mencionados.

Categories	Weights
Mass Movements	0.01
Active Erosion Processes	0.02
Volcanic Activity	0.01
Seismicity	0.01
Flood Prone Areas	0.14
Areas of Local Importance (aquifers)	0.17
Vulnerability (aquifers)	0.17
Recharge Areas (aquifers)	0.17
Agriculture/Silviculture	0.05
Ecology (natural)	0.07
Geological Resources	0.04
Natural Barriers	0.06
Foundation Workability	0.02
Foundation Stability	0.02
Slope Stability	0.02
Potential for Land Remediation	0.03

Fig. 4.3. Asignación de pesos a los criterios de ponderación

El índice de valoración de cada zona se obtiene combinando la ponderación y los valores de los criterios mediante la aplicación de la fórmula  $te = \left( \sum_{i=1}^n C_i \cdot a_i \right)$ , siendo  $C_i$  el valor del criterio y  $a_i$  su peso. En la figura se recoge gráficamente el proceso de ponderación descrito este apartado.



Fig. 4.4: Representación gráfica del modelo de ponderación de áreas residuales

## 4.2. ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

### 4.2.1. Climatología. Topografía. Hidrología superficial

Deberá realizarse un estudio climatológico del emplazamiento, en particular de las variables siguientes: precipitación, temperatura, rosa de frecuencia y potencia de vientos (dirección predominante y su variación mensual) y evapotranspiración

(potencial y real). El Real Decreto 1481/2001 exige un completo estudio climatológico para poder dimensionar la capacidad de almacenamiento de la balsa de lixiviados y el caudal de referencia para el sistema de tratamiento.

Igualmente, deberá realizarse una descripción completa del modelo de hidrología superficial, que incluirá la evaluación y cartografía a escala adecuada de la red de drenaje y cuencas afectadas por la ubicación.

Los resultados obtenidos en los estudios anteriores, se confeccionará el **balance hídrico del emplazamiento**, herramienta fundamental para el diseño constructivo y operativo del vertedero, ya que cuantifica el porcentaje de agua de infiltración, evapotranspiración y lluvia útil.

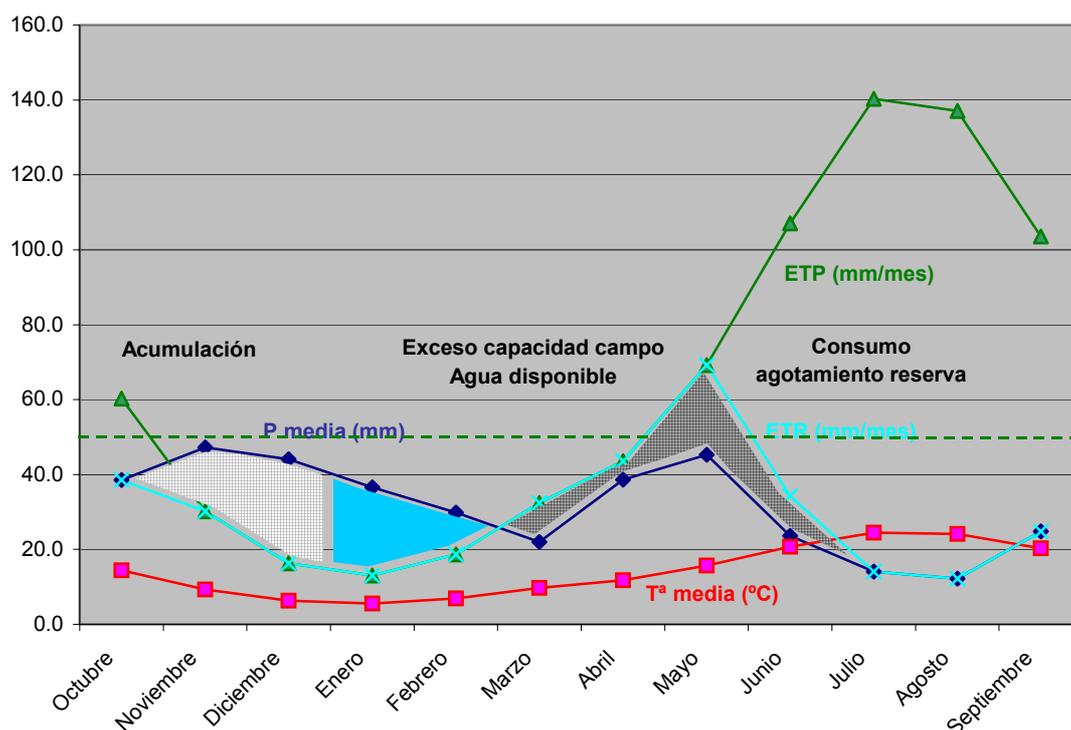


Fig. 4.5: Ejemplo de balance hídrico de un emplazamiento

Asimismo, se calculará la **precipitación máxima en 24 horas** y el **caudal de referencia** (según la instrucción de carreteras 5.2-IC "Drenaje superficial", en el tiempo de retorno que fije el proyecto (no inferior a 25 años), para el cálculo de secciones de canalización y volúmenes de almacenamiento.

#### 4.2.2. Estudio geológico, hidrogeológico y geotécnico

Se efectuará un estudio completo de la geología, hidrogeología y características geotécnicas de los materiales existentes en el emplazamiento, en el que se determinarán:

- Geología regional: unidades litológicas, estratigrafía, tectónica regional y principales rasgos estructurales.
- Caracterización litológica del emplazamiento, estableciendo como variable fundamental la **permeabilidad** de los estratos subyacentes, así como el espesor de los mismos.
- Modelo hidrogeológico. Descripción del espesor, extensión lateral, dirección de flujo y gradiente, conductividad hidráulica y capacidad de retardo de las unidades localizadas entre la unidad litológica propuesta para servir de barrera geológica natural o formación geológica base del vertedero y la unidad acuífera más próxima.
- Caracterización geotécnica de los materiales existente:
  - Condiciones de excavabilidad de los materiales y estabilidad de los taludes de excavación a corto y largo plazo.
  - Aprovechamiento de los materiales de excavación. Condiciones operativas de formación de diques de contención. Estabilidad de los taludes a corto y largo plazo.
- Capacidad portante de la explanada para el apoyo de la carga de tierras.

El estudio incluirá habitualmente la realización de los siguientes trabajos:

- Reconocimiento de campo (visual y calicatas manuales o mecánicas).
- Realización de sondeos de reconocimiento que incluirán ensayos de permeabilidad in situ (Lefranc, Lugeon, etc.), ensayos SPT, y toma de muestras inalteradas.
- Caracterización de los materiales en el laboratorio: permeabilidad (en célula triaxial) y parámetros geotécnicos (granulometría, plasticidad, compactibilidad (ensayo Proctor), compresibilidad, cohesión y ángulo de rozamiento interno, etc.).

Ciertas propiedades físicas y químicas del suelo aportan seguridad adicional frente a fenómenos mediante absorción y adsorción de los contaminantes en los lixiviados. Así, materiales arcillosos como las esmectitas (montmorillonitas), bentonitas, etc., son

capaces de fijar metales pesados, autodepurando los lixiviados del vertedero, en base a su poder de intercambio iónico.

#### 4.3. PROTECCIÓN DEL SUELO Y DE LAS AGUAS

Según se establece en el R.D. 1481/2001, el criterio fundamental para garantizar la impermeabilidad del emplazamiento se basa en la existencia de una barrera geológica natural (en fondo y taludes del vaso de vertido) que tenga unas condiciones de permeabilidad y espesor cuyo efecto combinado sea equivalente como mínimo al siguiente:

Vertederos para residuos inertes	$k = 1,0 \times 10^{-7}$ m/s en un espesor de 1 m
Vertederos para residuos no peligrosos	$k = 1,0 \times 10^{-9}$ m/s en un espesor de 1 m
Vertederos para residuos peligrosos	$k = 1,0 \times 10^{-9}$ m/s en un espesor de 5 m

siendo k el coeficiente de permeabilidad (en metros/segundo). Cuando la barrera geológica natural no cumpla las condiciones antes mencionadas, podrá complementarse mediante una barrera geológica artificial, que consistirá en una capa mineral de un espesor no inferior a 0,5 metros.

Como elemento de protección adicional, en los vertederos de residuos no peligrosos y de residuos peligrosos, se instalará un geosintético de impermeabilización. A modo de ejemplo, la figura siguiente recoge la **solución de referencia** que establece el R.D. 1481/2001, para la impermeabilización de la base y laterales de un vertedero de residuos peligrosos (en el caso de vertederos de residuos no peligrosos el perfil es el mismo, exigiendo solamente 1 m de espesor a la capa impermeable natural de base).

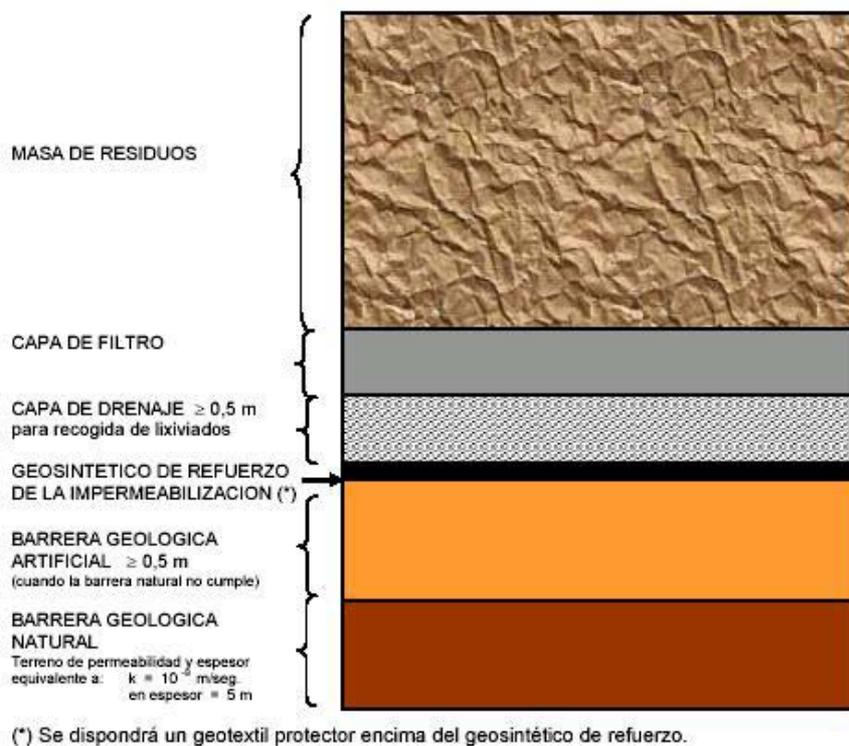


Fig. 4.6.: Solución de referencia para vertederos de residuos peligrosos

En la tabla siguiente se recogen algunas de las soluciones de referencia para la impermeabilización de la base del vaso de vertido correspondientes a diversos países.

COUNTRY	BOTTOM LINER	WASTE TYPE
EEC Directive (Europe)	1 m clay* (k=10 <sup>-9</sup> m/s) + artificial sealing layer	Municipal solid waste
	5 m clay* (k=10 <sup>-9</sup> m/s) + artificial sealing layer	Hazardous waste
Austria	5 m (k=10 <sup>-7</sup> m/s) or 3m (k=10 <sup>-8</sup> m/s natural subsoil or equivalent artificial mineral barrier + 0.75 m mineral liner (k=10 <sup>-9</sup> m/s)+ GM (2.5 mm thick) plus protective geotextile (1200 g/m <sup>2</sup> )	Municipal solid waste
France	5 m in-situ clay* + GM	Industrial, hazardous, municipal solid waste
Germany	Natural (geological) barrier or compacted soil subgrade + 0.75 m mineral liner* (k=10 <sup>-10</sup> m/s) + GM (2.5 mm thick) plus protective layer	Municipal solid waste
	3 m compacted soil subgrade + 1.5 m mineral liner*+ GM (2.5 mm thick) plus protective layer	Hazardous waste
Sweden	Compacted clay or GCL or HDPE geomembrane or LDPE geomembrane (thickness > 1 mm)	Municipal solid waste
Switzerland	0.5 m compacted clay + Geomembrane or asphalt layer (thickness > 0.07 m and porosity <3% + geomembrane, subsoil thickness ≥10 m	Municipal solid waste
United Kingdom	1.5 m compacted clay* + GM (thickness > 2mm)	Municipal solid waste
USA (EPA)	Composite liner: 0.6 m compacted clay* + GM	Municipal solid waste
	Double liner : 0.9 m compacted clay* + GM, and GM separated by blanket drain	Hazardous waste
Canada	Ontario: Double liner: 0.75 m compacted clay* + GM, 1 m soil subgrade	Municipal solid waste
	Quebec: 0.6 m compacted clay* + double GM separated by a leak detection layer, 0.6 m subsoil	Municipal solid waste
Australia	0.9 m compacted clay* + GM	Municipal solid or

		hazardous waste
New Zealand	0.6 m low permeability soils or compacted clay* + GM	Municipal solid waste
South Africa	Compacted clay (thickness ns) + leak detection + GT + compacted clay (thickness ns)	MSW (leachate generating landfills)
	Compacted clay (thickness ns) + dessication protection layer	MSW (dry areas)
Japan	Low permeability soil or GCL, sand-cement-bentonite mix, asphalt layer, double geomembrane	Municipal solid waste (fly ash)

\*minimum thickness ns= non specified // GM: Geomembrane

Tabla 4.1.: Requerimientos típicos de la barrera en diferentes países (fuente: Rowe & Bouazza 2000).

#### 4.4. MATERIALES GEOSINTÉTICOS

##### 4.4.1. Introducción

Los geosintéticos son materiales ampliamente empleados en la construcción de vertederos, con las siguientes funciones:

- Separación: instalado entre dos capas diferentes, mantiene la integridad y funcionamiento de las mismas.
- Refuerzo: El material proporciona resistencia a tracción en materiales con poca resistencia mecánica.
- Filtro: El material permite el flujo perpendicular a través del mismo, reteniendo las partículas finas en su cara superior.
- Drenaje: El material permite el flujo dentro del plano de su estructura.
- Barrera hidráulica / gas: El material impide el paso de líquidos y gases.
- Protección: El material proporciona protección frente a roturas por punzonamiento durante la instalación de otras capas más frágiles.

En la tabla siguiente se recogen las diferentes aplicaciones de los geosintéticos en función de su tipología:

Table 2. Types and functions of various geosynthetics. ✓ main function; ★ secondary function

Geosynthetic types	Function					
	Separation	Drainage	Filtration	Reinforcement	Hydraulic/gas barrier	Protection
Non woven geotextile	✓	★	✓		✓	✓
Woven geotextile	✓		★	✓		
Geogrids				✓		
Geomembranes					✓	
Geocells	✓			✓		
Geosynthetic clay liners					✓	★
Geocomposites	★	✓	★	★	✓	✓
Geonet		✓				
Geopipe		✓				

l=asphalt-saturated geotextiles

Tabla 4.2: Tipos y funciones de los geosintéticos empleados en vertederos

El proceso de instalación de todos los geosintéticos deberá estar sometido a un estricto control de calidad de los materiales y su puesta en obra, mediante un consultor externo de garantía de calidad, que certificará la correcta ejecución de la impermeabilización. Su labor comprende: aceptación de los materiales en obra, verificación de los procesos de trabajo y soldadura, realización de ensayos in situ y laboratorio, etc.

A continuación se describen las características fundamentales de los geosintéticos empleados en la construcción, explotación y sellado de vertederos.

#### **4.4.2. Geomembranas**

Las geomembranas son láminas sintéticas (poliméricas) de muy baja permeabilidad, empleadas como barreras para difusión de líquidos y gases. El polímero base empleado suele ser **polietileno de alta densidad (PEAD)**, aunque se pueden emplear otros como el polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC) y polietileno de baja densidad (LDPE). El polietileno se degrada por la acción de los rayos UV, por lo que debe poseer un contenido mínimo en negro de humo (2-3%) para su protección.

Las características principales que debe verificar la geomembrana son:

- La capacidad de carga (límite elástico) de la membrana será suficiente para soportar su propio peso en los taludes y la carga que ejerce el residuo a medida que aumenta la altura de apilado.
- Deberá ser resistente químicamente a los residuos que se ha previsto depositar.
- El espesor habitual instalado en los vertederos en funcionamiento oscila entre 1,5 y 2 mm, aunque la tendencia actual es instalar únicamente láminas de 2 mm, para todos los tipos de vertederos que requieren impermeabilización artificial.

La instalación de la geomembrana comienza mediante el despliegue de los paneles de material (cuya forma de entrega son rollos de unos 100 metros de longitud y entre 5 y 6 m de ancho). La geomembrana se coloca directamente sobre la capa de arcilla, que tendrá el acabado adecuado para evitar que se produzcan desperfectos en la lámina de PEAD.

La unión entre los paneles se realiza habitualmente por soldadura doble con canal intermedio de comprobación, con un solape mínimo de 10 cm, según se observa en la figura, lo que permite verificar la estanqueidad de las soldaduras realizadas (mediante la introducción de aire a presión en el canal central).

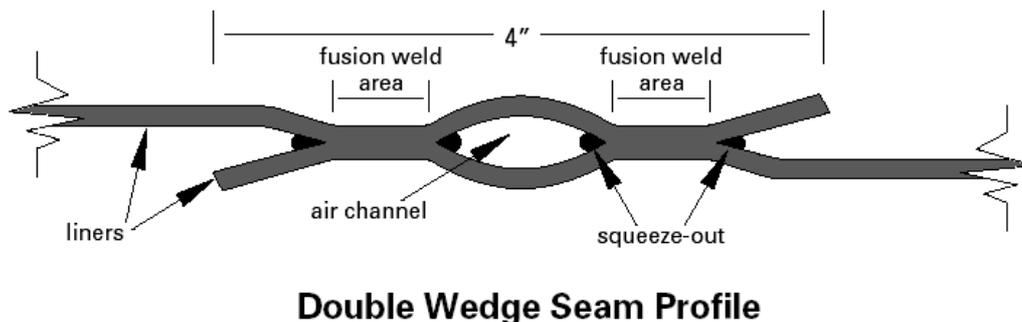


Figura 4.7: Soldadura doble lateral de los paneles de geomembrana PEAD

La geomembrana deberá anclarse en los taludes mediante zanja de anclaje (situada en la berma superior del talud), con un ancho y profundidad superiores a 0,5 m, relleno con la propia tierra de excavación.

#### 4.4.3. Geotextiles

Los geotextiles son materiales textiles, planos, permeables, poliméricos (sintético o natural) que se emplean en obra civil en diferentes aplicaciones. Se distinguen dos tipos:

- Geotextiles tejidos: Son fabricados con fibras o filamentos entrecruzados en direcciones perpendiculares.
- Geotextiles no tejidos: Las fibras o filamentos se encuentran aleatoriamente dispuestas, de modo que no existe una dirección de flujo definida.

En el caso que nos ocupa, las funciones que deben cumplir los geotextiles empleados son las siguientes:

- Como elemento de protección antipunzonamiento de la geomembrana. El parámetro de diseño es la resistencia CBR a punzonamiento mecánico.
- Como elemento de separación filtro, sobre el nivel drenante de lixiviados, para evitar su colmatación. El parámetro de diseño es la porometría  $O_{95}$ , que deberá

determinarse atendiendo a los criterios de **retención** (asegurando que el filtro retiene las partículas del suelo o residuos), **permeabilidad** (el tamaño de poro permite el flujo libre del lixiviado) y **porosidad** (debe mantenerse a lo largo del tiempo, reduciendo la posibilidad de obstrucción).

En ambos casos, se emplearán geotextiles no tejidos, fundamentalmente de PP o PEAD. La instalación se ejecuta mediante solape de paneles (mínimo 75 mm) y unión por termofusión, realizando una soldadura por puntos.

#### 4.4.4. Geocompuesto de bentonita

Las mantas de bentonita (GCL) son geosintéticos compuestos por una capa de bentonita, en polvo o grano, encapsulada entre 2 geotextiles, portante y de cubrición, cuya utilización será la de barreras hidráulicas como refuerzo de la impermeabilización base y durante las labores de sellado en vertederos de todo tipo de residuos.

La mayor parte de los GCL llevan bentonitas sódicas, fundamentalmente montmorillonita sódica o esmectita, con una muy baja permeabilidad. Su instalación se realiza mediante solape (mínimo de 150 mm) de los paneles, recibando los bordes con bentonita sódica en polvo.

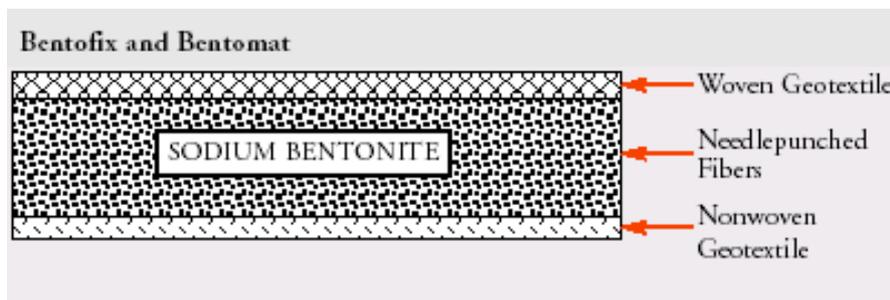


Figura 4.8: Estructura general de un GCL

#### 4.4.5. Geocompuesto drenantes (geocomposites)

Se trata de geocompuestos utilizados como medios filtrantes y conducción de líquidos limpios (agua) o lixiviados en sistemas de impermeabilización de vertederos.

Existen múltiples combinaciones de este material dependiendo de la naturaleza y geometría de malla, tipo de geotextiles, secuencia de materiales que constituyen el

geocompuesto, etc. El modelo más empleado está formado por: un geotextil portante de PP tejido en la base, un núcleo biplanar o triplanar de geomalla de PEAD para drenaje, y un geotextil filtro de PP no tejido en la parte superior.

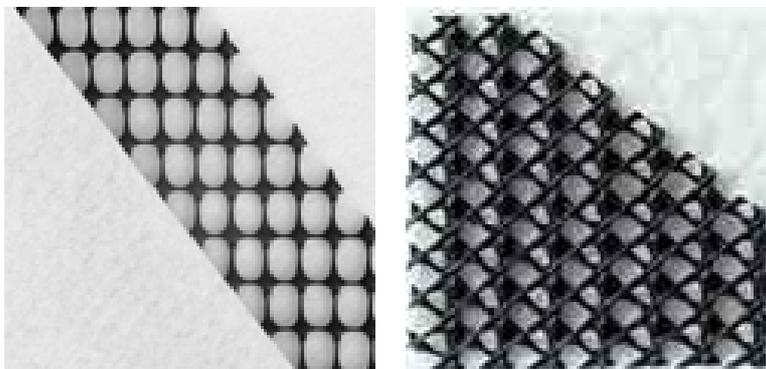


Figura 4.9: Ejemplos de geodrenes biplanares y triplanares

#### 4.4.6. Geomallas y geoceldas

Son geosintéticos empleados para control de erosión y refuerzo, sobre todo en las operaciones de sellado. Las geoceldas son estructuras en forma de panel de PE o poliéster, creando durante la instalación una serie de celdas hidráulicamente interconectadas. Una vez expandidos se rellenan de suelo o grava, proporcionando un confinamiento efectivo para suelos no consolidados y previniendo su movimiento aun en taludes pronunciados, o bien ante fuerzas de erosión tales como las ocasionadas por corrientes hidráulicas.

Las geomallas (mono-orientadas o bi-orientadas) son elementos de refuerzo del terreno. El suelo y el agregado traban en las aberturas de la geomallas, lo que confina el material y limita sus desplazamientos laterales aumentando la resistencia al corte. La capacidad de la geomalla para absorber esfuerzos y distribuirlos aumenta la resistencia de la masa reforzada a cargas estáticas y dinámicas.



Figura 4.10: Ejemplos de geoceldas y geomallas

#### 4.5. DESARROLLO DEL PERFIL TIPO CONSTRUCTIVO

Como se ha mencionado, el R.D. 1481/2001 establece una solución de referencia para la impermeabilización de la base y laterales de los distintos tipos de vertederos. Se trata de una definición de requisitos mínimos, que puede mejorarse tanto a nivel de seguridad como operativo. En este apartado se describen los distintos elementos que es conveniente incluir en el perfil constructivo del vertedero.

El inicio de las labores de construcción de un vaso de vertido comienza con el  **acondicionamiento y conformación de su forma básica** , mediante desmonte, terraplenado, habilitando las pendientes de bombeo longitudinal y transversal necesarias para la recogida de lixiviados.

En el caso de que el terreno natural no cumpla los requisitos mínimos de impermeabilidad para el tipo de vertedero proyectado, se procederá a su impermeabilización artificial, bien mediante la formación de una capa mineral de baja permeabilidad (arcilla), de 0,5 metros de espesor mínimo, de o mediante la instalación de un geocompuesto de bentonita (GCL).

Antes de colocar la geomembrana, se suele instalar un  **sistema de detección de fugas**  (drenaje de seguridad) que podrá estar formado por un nivel de gravas (con sus correspondientes geotextiles de filtro y separación) o por un geocompuesto drenante. Esta capa estará conectada a una arqueta de inspección. Presenta la ventaja de que se trata de un elemento de protección activo, permitiendo el bombeo y la evacuación de lixiviados en caso de rotura de la lámina de PEAD.

Otros sistemas para el control de fugas en las geomembranas se basan sus propiedades aislantes, detectando alteraciones de flujo correspondientes a la existencia de fugas. Un sistema muy utilizado es el conocido como método de la red de electrodos, consistente en la instalación de una malla de sensores pasivos en posiciones topográficamente fijadas electrodos bajo la geomembrana, durante la fase de construcción del vertedero.

Durante el proceso de control se activan los electrodos, de forma que la geomembrana actúa como barrera de los flujos eléctricos, de polo a polo, de forma que en el caso de no existir anomalías, no debe alterarse la densidad de flujo. En el gráfico adjunto se recoge el principio básico de funcionamiento.

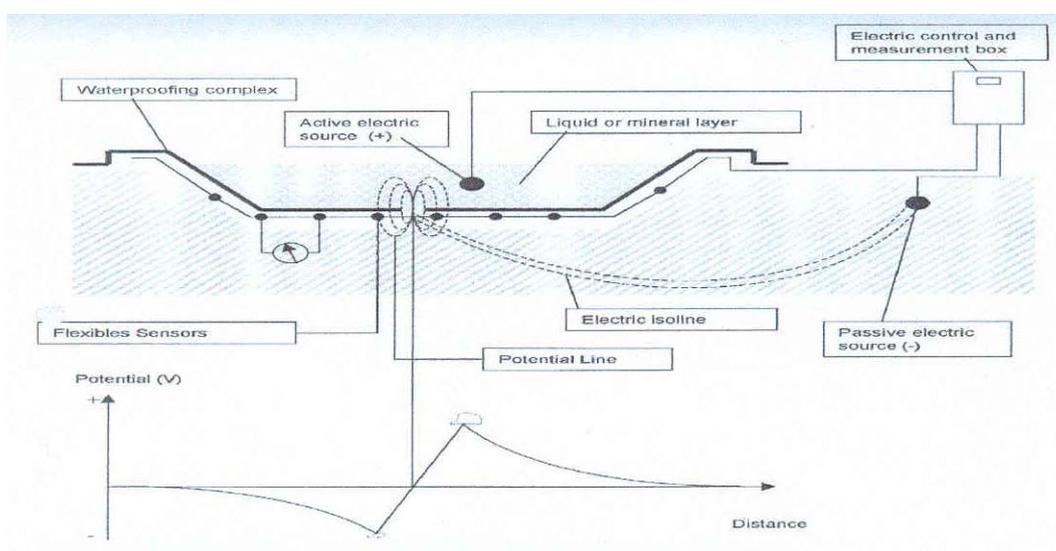


Fig. 4.11: Control eléctrico de fugas en la impermeabilización

Cuando se interrumpe la integridad de la geomembrana, los sensores posicionados cerca de la zona dañada medirán la variación más extensiva de la densidad de flujo de la corriente eléctrica. Mediante el software adecuado se interpretan los valores que emiten los sensores pasivos próximos a la zona alterada y los convierte en puntos gráficos, lo que permite identificar la posición exacta de la discontinuidad.

En ocasiones, y cuando las características particularmente especiales del emplazamiento lo requieren, puede instalarse una geomembrana de PEAD antes del drenaje de seguridad, quedando este confinado entre las dos láminas (sistema de doble membrana), aumentando aún más la seguridad ante una posible fuga de lixiviados.

Sobre el drenaje de seguridad, se procede a la instalación de la **geomembrana de PEAD**, que se protegerá de posibles roturas durante la fase de construcción (debido al tránsito de maquinaria) colocando sobre ella un **geotextil de protección** de gramaje adecuado.

Sobre esta capa se construye la **capa de drenaje de lixiviados**, que estará necesariamente formada por un nivel de gravas (graduadas) con alta permeabilidad, así como de la red de tuberías de recogida y de evacuación de lixiviados hasta la balsa de almacenamiento (balsa de lixiviados).

Sobre la capa de gravas se instalará un geotextil filtro para evitar que pueda obstruirse debido a la acción de los finos contenidos en los residuos y en el material de cobertura. La construcción de la base finaliza con el extendido de una capa de rodadura no compactada de protección inicial frente al tránsito de vehículos.

En la figura siguiente se recoge un ejemplo de un perfil base para un vertedero real, que incluye la estructura anteriormente comentada.

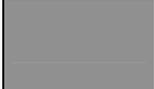
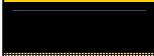
		Residuos
	0,2-0,4 m	Capa de rodadura (habitualmente con material procedente de la excavación)
		Geotextil Filtro (300 gr/m <sup>2</sup> )
	0,5 metros	Drenaje de lixiviados (grava silícea 20/40)
		Geotextil de protección (500 gr/m <sup>2</sup> )
	2 mm	Lámina de PEAD
		Geocompuesto drenante (drenaje de seguridad)
		Sustrato margo-arcilloso impermeable

Figura 4.12: Perfil tipo constructivo de un vertedero

#### 4.6. INSTALACIONES AUXILIARES.

El vertedero debe estar provisto de una serie de infraestructuras auxiliares, necesarias para un correcto funcionamiento:

- Control de accesos y zona de espera, situados a la entrada de la instalación.
- Báscula, para el control de la cantidad de residuos recibidos.
- Laboratorio, con dotación necesaria para el control de aceptación y admisión.
- Edificios auxiliares: vestuario, oficina, comedor, taller, etc.
- Instalaciones de servicio: suministro eléctrico, abastecimiento de agua potable y saneamiento, telefónica, etc.
- Instalación y equipamiento contra incendios.
- Balsa de almacenamiento de lixiviados, para almacenamiento temporal de los lixiviados producidos. Estará impermeabilizada con geomembrana de PEAD.
- Balsas de recogida de pluviales.
- Vallado perimetral del vertedero.
- Infraestructuras de control y vigilancia: piezómetros, cunetas perimetrales, registros, etc.
- Lavarruedas, para evitar que los residuos adheridos a las ruedas de los vehículos puedan ser trasladados al exterior.

Habitualmente, y sobre todo en los de reciente creación, el vertedero contará con una planta propia para el tratamiento de los lixiviados producidos. En caso contrario, estos deberán ser gestionados mediante gestor autorizado.

## 5. LIXIVIADOS

### 5.1. GENERACIÓN DE LIXIVIADOS

El **lixiviado** es generado fundamentalmente por la percolación del agua a través de la masa de residuos, lo que produce su contaminación debido al arrastre y solubilización de los contaminantes contenidos en los residuos o subproductos de la degradación de los mismos.

El lixiviado debe ser controlado dentro del vertedero con los siguientes objetivos:

- Minimizar la interacción entre el lixiviados y el sistema de impermeabilización, reduciendo el riesgo de fugas a través de la base o lados del vertedero a través de fugas que pudieran existir.
- Prevenir el riesgo de desbordamiento por ascenso del nivel en el interior del vaso de vertido, provocando de derrames incontrolados.
- Controlar su influencia en los procesos de formación de biogás, y estabilización química y biológica del vertedero.
- Asegurar la estabilidad mecánica del vertedero.

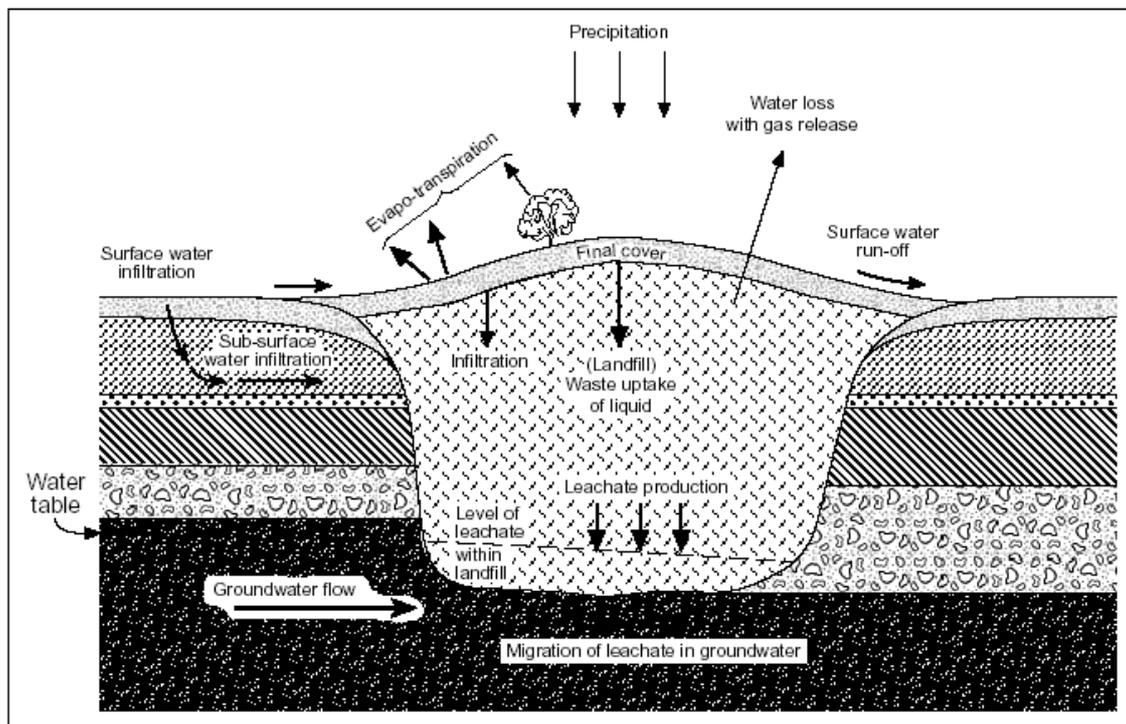


Fig. 5.1: Balance hídrico de un vertedero

Los principales factores que afectan a la generación del lixiviado son los siguientes:

- Clima: El clima influye significativamente en la tasa de producción de lixiviados, considerando que el principal aporte para su formación proviene de la lluvia útil.
- Topografía: La topografía condiciona la hidrología superficial del emplazamiento. El vertedero deberá ser diseñado para limitar el aporte a la generación de lixiviados desde áreas periféricas mediante la construcción de una red perimetral de recogida de aguas superficiales.
- Cobertura diaria: La cobertura diaria del vertedero promueve la escorrentía interior y reduce la infiltración. Es importante la naturaleza del material empleado para la cobertura, ya que cuanto menor es la permeabilidad del mismo, menor es la producción de lixiviados.
- Vegetación: La vegetación juega una parte fundamental en el control de lixiviados. Limita la infiltración interceptando la precipitación directamente (aumentando la evaporación superficial) y tomando humedad del suelo y transpirándola de nuevo a la atmósfera. Un vertedero con pobre cobertura vegetal puede sufrir efectos de erosión que eliminen las capas de sellado y permita la precipitación directa sobre los residuos almacenados.
- Tipo de residuos: El tipo de residuos, el agua contenida en los mismos, su capacidad de absorción, la forma en que son almacenados (a granel, bidones, etc.), y su composición afectan a la cantidad y calidad del lixiviado generado.

### BALANCE HÍDRICO

Durante el diseño previo del vertedero, debe realizarse una estimación del volumen de lixiviado que se producirá, mediante un balance hídrico. La estimación del volumen de lixiviados es fundamental para el diseño de la infraestructura de recogida y tamaño de las celdas empleadas, y dimensionamiento del sistema de tratamiento.

Este balance se ajusta a la siguiente ecuación:

$$L_o = [ER (A) + LW + IRCA + REC] - [cc W]$$

Donde:

$L_o$  (m<sup>3</sup>)      Cantidad de lixiviado producido

ER (m)	Lluvia efectiva
A (m <sup>2</sup> )	Área de vertido
LW (m <sup>3</sup> )	Agua contenida en los residuos
IRCA (m <sup>3</sup> )	Agua que infiltra a través de las zonas selladas y restauradas
REC (m <sup>3</sup> )	Volumen de lixiviado recirculado al vertedero (en su caso)
cc (m <sup>2</sup> )	Capacidad de campo de los residuos (m <sup>3</sup> /t)
W	Peso de residuo depositado (t/a)

La **lluvia efectiva** (ER) se define como la precipitación total menos la evapotranspiración real. Los datos de **precipitación** son estimados a partir de los datos meteorológicos registrados mediante modelos de predicción, que tienen en cuenta las posibles puntas de precipitación para diferentes períodos de retorno. La **evaporación** potencial es calculada a través de modelos matemáticos (Thornthwaite, Turc, etc.) y ajustada mediante datos reales.

El **agua contenida en los residuos** (LW) y el **agua que infiltra a través de zonas selladas y restauradas** (IRCA), representan aportes poco significativos, debido a que los residuos líquidos no son admisibles en vertederos, y el contenido máximo de humedad de los mismos suele estar limitado a un porcentaje máximo (habitualmente el 65%).

El **volumen de lixiviado recirculado** (REC) solo se considera en caso de que el vertedero incorpore este tipo de tratamiento. Solo se aplica en vertederos de residuos sólidos urbanos.

La **capacidad de absorción de los residuos** (cc) depende del tipo de residuos, su humedad inicial y densidad. Así, un residuo sólido urbano con una densidad de 0,65 t/m<sup>3</sup> es capaz de absorber 0,1 m<sup>3</sup> de agua por tonelada de residuo depositado. Esta capacidad se reduce a 0,025 m<sup>3</sup> para una densidad de residuo de 1 t/m<sup>3</sup>. Para su aplicación en el balance es necesario conocer la cantidad anual de residuos prevista.

## 5.2. COMPOSICIÓN

Las características de la composición del lixiviado dependen fundamentalmente del balance hídrico del vertedero, de la tipología y edad de residuos depositados, así

como de los diversos procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en su interior.

En los vertederos que admiten residuos inorgánicos los procesos de degradación biológica son poco importantes, con lo que la composición de los lixiviados depende directamente de la lixivabilidad de los residuos vertidos. La Decisión del Consejo establece dicha lixivabilidad como criterio fundamental de admisión, asegurando que no se superen ciertos valores máximos para la carga contaminante, lo que acota superiormente la composición final del lixiviado.

En aquellos vertederos que reciben residuos biodegradables (fundamentalmente de RSU, tipo B2), la materia orgánica experimenta un proceso de biodegradación por acción de los microorganismos. Esta evolución tiene lugar de acuerdo con las fases siguientes:

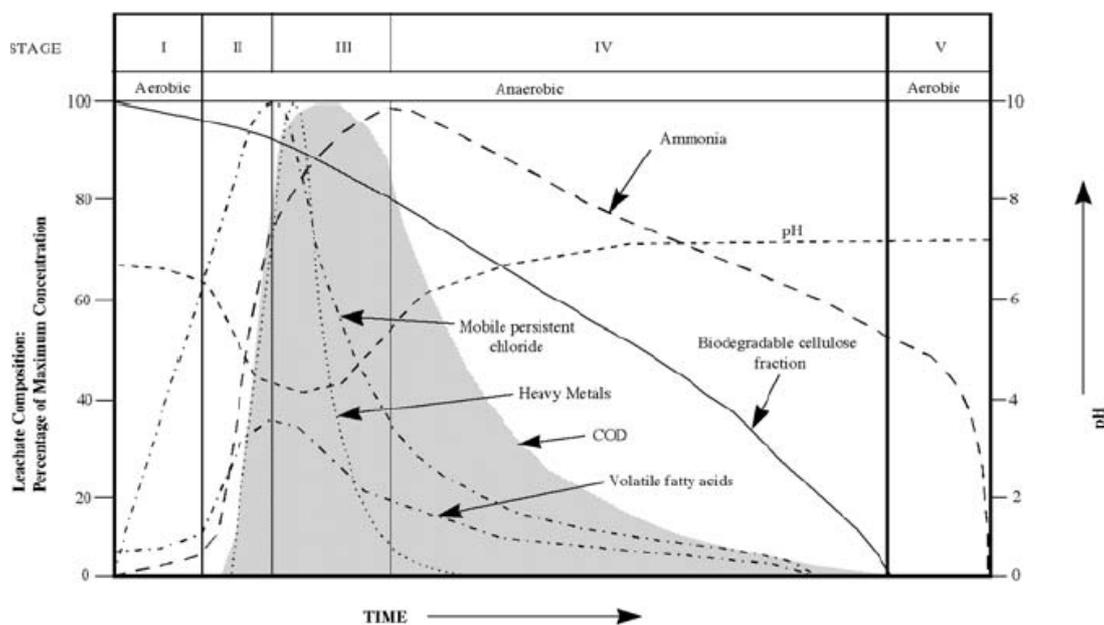


Fig. 5.2: Fases de estabilización de la materia orgánica biodegradable. Evolución de la composición del lixiviado del vertedero

- Fase I: Degradación Aeróbica. Los residuos biodegradables son atacados por los microorganismos aeróbicos, con producción de compuestos orgánicos, dióxido de carbono y agua. También se produce generación de calor, que favorece la multiplicación de los microorganismos.

- Fase II: Hidrólisis y fermentación. Comienza a reducirse el oxígeno y empiezan a desarrollarse las condiciones anaeróbicas. El nitrato y el sulfato son reducidos a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. Comienza el proceso de hidrólisis de los compuestos orgánicos complejos en ácidos orgánicos y productos intermedios.
- Fase III: Ácida. Los compuestos hidrolizados se transforman en ácidos grasos. Debido a ello, el pH de los lixiviados baja hasta 5,5 – 6,5, aumentando la movilidad de los metales pesados. El lixiviado se caracteriza por una carga orgánica muy elevada.
- Fase IV: Metanogénica. Los ácidos grasos son transformados en dióxido de carbono y metano. El pH aumenta hasta 7,5 – 9. Se producen reacciones de formación de complejos y precipitación de los metales. Debido a ello, la carga contaminante del lixiviado desciende notablemente.
- Fase V: Maduración final. Al consumirse todos los nutrientes disponibles, finaliza la producción de gases, lo que favorece una lenta reaparición del oxígeno, hasta restablecerse las condiciones naturales del entorno.

Diferentes zonas de un mismo vertedero pueden encontrarse en distintas fases de evolución, pudiendo coexistir una fase ácida y otra metanogénica.

Los principales componentes del lixiviado pueden agruparse en:

- Elementos principales como el calcio, magnesio, hierro, sodio, amoníaco, carbonatos, sulfatos y cloruros.
- Metales traza, como el manganeso, cromo, níquel, plomo y cadmio.
- Amplia variedad de compuestos orgánicos, evaluados generalmente mediante el carbono orgánico total (COT), demanda química de oxígeno (DQO) o demanda biológica de oxígeno (DBO).
- Gases disueltos, tales como metano, dióxido de carbono e hidrógeno.

En la siguiente tabla se recoge las variaciones en la composición del lixiviado en diferentes fases de evolución del vertedero.

Parameters with differences between acetic and methanogenic phase			Parameters for which no differences between phases could be observed		
Acetic phase	Average	Range		Average	Range
PH	6.1	4.5-7.5	Cl (mg/l)	2100	100-5000
BOD <sub>5</sub> (mg/l)	13000	4000-40000	Na (mg/l)	1350	50-4000
COD (mg/l)	22000	6000-60000	K (mg/l)	1100	10-2500
BOD <sub>5</sub> /COD	0.58	-	Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /l)	6700	300-11500
SO <sub>4</sub> (mg/l)	500	70-1750	NH <sub>4</sub> (mg N/l)	750	30-3000
Ca (mg/l)	1200	10-2500	OrgN (mg N/l)	600	10-4250
Mg (mg/l)	470	50-1150	Total N (mg N/l)	1250	50-5000
Fe (mg/l)	780	20-2100	NO <sub>3</sub> (mg N/l)	3	0.1-50
Mn (mg/l)	25	0.3-65	NO <sub>2</sub> (mg N/l)	0.5	0-25
Zn (mg/l)	5	0.1-120	Total P (mg P.l)	6	0.1-30
<b>Methanogenic phase</b>			AOX (ug/Cl/l)*	2000	320-3500
pH	8	7.5-9	As (ug/l)	160	5-1600
BOD <sub>5</sub> (mg/l)	180	20-550	Cd (ug/l)	6	.5-140
COD (mg/l)	3000	500-4500	Co (ug/l)	55	4-950
BOD <sub>5</sub> /COD	0.06	-	Ni (ug/l)	200	20-2050
SO <sub>4</sub> (mg/l)	80	10-420	Pb (ug/l)	90	8-1020
Ca (mg/l)	60	20-600	Cr (ug/l)	300	30-1600
Mg (mg/l)	180	40-350	Cu (ug/l)	80	4-1400
Fe (mg/l)	15	3-280	Hg (ug/l)	10	0.2-50
Mn (mg/l)	0.7	0.03-45	* adsorbable organic halogen		
Zn (mg/l)	0.6	0.03-4			

Table 4.1: Changes in leachate composition in different stages of a landfill  
(Source: Ehrig, H. J., "Water and Element Balances of Landfills" in Lecture Notes in Earth Sciences: The Landfill, 1989)

### 5.3. RECOGIDA

El sistema de recogida y evacuación del lixiviado es una infraestructura básica en el funcionamiento del vertedero. Su función principal es la recogida y conducción de los lixiviados al exterior del vaso de vertido, minimizando el tiempo de contacto con los residuos, así como su nivel respecto al fondo del vertedero.

Un diseño básico del drenaje de lixiviados debería contener los siguientes elementos:

#### A) Capa de drenaje

Nivel drenante de elevada permeabilidad, construido con material granular. Según el R.D. 1481/2001, debe tener un espesor mínimo de 0,5 metros. Para facilitar la recogida, se dotará a la plataforma inferior sobre la que se construye este nivel con una pendiente longitudinal y transversal adecuada hacia la red de tuberías.

B) Capa filtro

Uno de los problemas fundamentales de este nivel drenante es que a lo largo de la vida del vertedero tiende a obstruirse (“clogging”), lo que redunda en una disminución de su permeabilidad y con ello, su capacidad de captación.

Esta obstrucción puede ser de tipo físico, debido a los finos (para evitarlo se instala sobre el nivel drenante un geotextil filtro); tipo biológico, debido al crecimiento intersticial de los microorganismos, y precipitación química, debido a modificaciones en el pH (fundamentalmente carbonato cálcico).

C) Red de tuberías de recogida

Consiste en una red de tuberías perforadas situadas en el interior del nivel drenante para recogida y conducción de los lixiviados hasta el punto de evacuación. Su diseño tendrá en cuenta, en función de las pendientes, la cobertura de toda la superficie de fondo del vertedero, minimizando la distancia que debe recorrer el lixiviado en el interior de la capa drenante y controlando la altura máxima del lixiviado en el interior de este nivel.

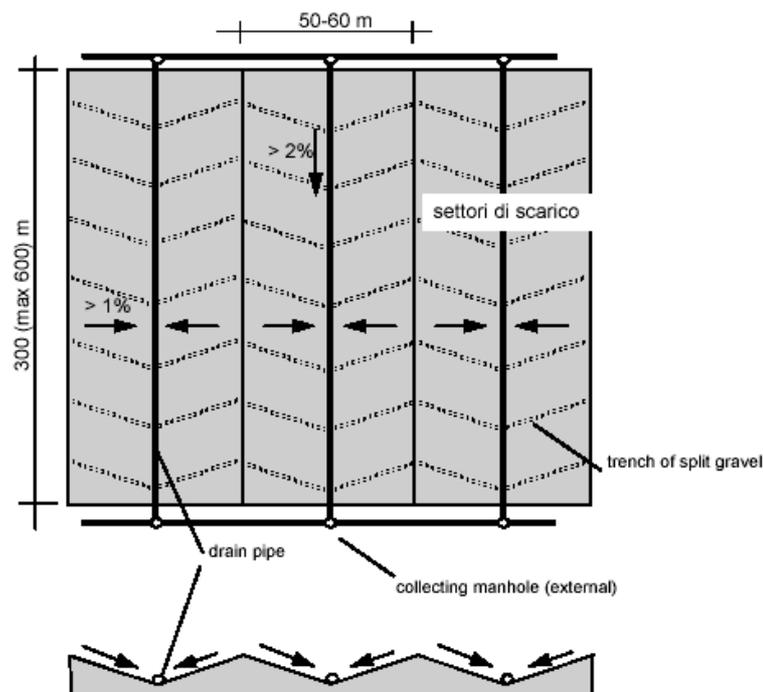


Fig. 5.3: Diseño básico de una red de recogida de lixiviados

#### D) Registros interiores de control

Habitualmente se instalan una serie de pozos, conectados con el nivel drenante inferior, que son recreados conforme aumenta el relleno del vertedero. Su función es controlar el nivel de lixiviado en el interior del vaso, y en caso de obstrucción del sistema principal, permitir el bombeo desde los mismos.

#### E) Pozo de bombeo

El lixiviado se recoge en el punto más bajo de la plataforma inferior. Desde este punto puede ser conducido al exterior bien por gravedad o por bombeo (en el caso de que el vertedero se encuentre bajo rasante).

#### F) Balsa de almacenamiento

Habitualmente los lixiviados son recogidos en una balsa de almacenamiento temporal hasta su tratamiento. Esta balsa debe estar igualmente impermeabilizada con geomembrana PEAD. En ocasiones cuenta con sistema propio de captación de fugas.

### RECIRCULACIÓN DEL LIXIVIADO

Una practica habitual en los vertederos de residuos sólidos urbanos es la recirculación del lixiviado, con el fin de uniformizar los ratios de biodegradación. Las ventajas potenciales que se obtienen mediante este procedimiento son las siguientes:

- Incrementar la cantidad y calidad de la producción del gas metano.
- Reducción del coste de la infraestructura de recogida y almacenamiento.
- Mejora del asentamiento del vertedero.
- Acelerar el proceso de estabilización de los residuos, con el fin de reducir el tiempo y coste de mantenimiento postclausura.

El empleo de esta técnica debe ser contemplado durante la fase de diseño para evitar los problemas específicos asociados a la recirculación tales como asentamientos diferenciales (estabilidad de la masa de residuos), incremento de la altura del nivel de líquido en el interior del vertedero, filtraciones a través de los taludes laterales y aumento inicial de la carga contaminante del lixiviado.

La descarga se lleva a cabo mediante una tubería perforada ubicada en el interior de una zanja, a escasa profundidad respecto a la superficie del vertedero y lo más alejada del sistema de recogida, con el fin de aumentar la distancia de percolación.

#### 5.4. TRATAMIENTO DEL LIXIVIADOS

La selección de la sistema para el tratamiento del lixiviado depende por un lado, de su volumen y composición; y por otro, del medio donde se realizará su vertido (cauce público, alcantarillado público, depuradora), fijándose en caso unos parámetros límite que deben cumplirse de forma previa al vertido.

Seguidamente, se describen las técnicas principales para tratamiento de lixiviados. Es muy frecuente el empleo de varias técnicas para obtener los parámetros de vertido requeridos.

##### 5.4.1. Tratamientos biológicos

###### A) Depuración anaerobia

Se basa en la degradación de la materia orgánica por acción de los microorganismos,, con producción de metano, al igual que ocurre en el interior del vertedero. Los metales son eliminados parcialmente en base a la formación de complejos y por precipitación, incorporándose a los lodos.

###### B) Depuración aerobia

La degradación de la materia orgánica se produce en presencia de oxígeno, produciéndose CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Debido a la necesidad de oxígeno, los lixiviados deben ser aireados continuamente. Este sistema es más estable frente a las variaciones que el anterior.

Algunas de los tratamientos basados en esta técnica son:

- Lodos activados (activated sludge)
- Sequencing batch reactors.
- Lagunas de aireación.

Existe una tecnología de depuración aerobia que incorpora un proceso de nitrificación-denitrificación para la eliminación del amoníaco. Así, durante la nitrificación, el amoníaco es convertido a nitrato en condiciones aeróbicas. Durante la denitrificación el nitrato es convertido a nitrógeno en condiciones de ausencia de oxígeno.

#### 5.4.2. Tratamientos físico - químicos

##### A) Coagulación – Flotación - Precipitación

Es un tratamiento físico-químico en la adición de reactivos que producen:

- Floculación y flotación de compuestos dispersos y emulsionados, con posterior retirada superficial de las espumas sobrenadantes.
- Precipitación en forma de lodos del carbonato cálcico y metales tóxicos.

##### B) Ósmosis inversa

Este sistema consiste en el uso de membranas semipermeables basándose en el principio de la ósmosis inversa, y separando los lixiviados en dos fracciones: un filtrado relativamente limpio y un concentrado, que deberá ser objeto de tratamiento posterior. Es un sistema relativamente costoso, debido a la corta duración de los filtros.

##### C) Oxidación química

Este tratamiento es utilizado para la destrucción de los cianuros, fenoles y otros orgánicos, así como para la precipitación de algunos metales. El agente oxidante puede ser gaseoso (ozono), líquido (peróxido de hidrógeno) o sólido (permanganato potásico).

##### D) Evaporación

Es un proceso consistente en la concentración de los contaminantes mediante evaporación y destilación. El lixiviado es pretratado mediante un ajuste de pH para convertir el amoníaco en sales solubles de amonio.

El lixiviado es evaporado usando un fuente de calor de escasa magnitud, obteniéndose un destilado, libre de contaminantes, aunque podría contener algún

elemento volátil que requiriera tratamiento posterior; y un concentrado, que debe ser gestionado.

#### E) Adsorción en carbón activo

La adsorción en carbón activo es una tecnología de separación utilizada para eliminar orgánicos disueltos y algunos inorgánicos. El material utilizado es carbón activado granular, que se caracteriza por una elevada relación entre su superficie específica y su volumen. Esta tecnología es particularmente efectiva en la eliminación de compuestos orgánicos peligrosos, trazas de AOX y COT residual refractario. Con los pretratamientos adecuados, es capaz de eliminar hasta el 99% de los componentes orgánicos del lixiviado. Su principal inconveniente es su coste de instalación y mantenimiento, que es muy elevado.

#### F) Arrastre por aire (“Air Stripping”)

El arrastre por aire es un proceso que emplea la fuerza del aire para eliminar componentes no deseados de una fase líquida. Habitualmente se emplea como pretratamiento para la eliminación del metano disuelto en el lixiviado.

Es muy frecuente su empleo para la eliminación del amoníaco en el lixiviado, que debe ser convertido desde su fase disuelta (amonio) a su fase gaseosa ( $\text{NH}_3$ ) para su eliminación. Para ello, se suele realizar de forma previa al stripping un ajuste de pH.

#### 5.4.3. *Gestión de los residuos producidos*

El problema más importante del tratamiento de lixiviados es la gestión y tratamiento de residuos generados. Si bien dependen de la tecnología empleada, los más habituales son:

- Lodos de sólidos en suspensión procedentes de la precipitación/flotación.
- Soluciones concentradas de los procesos de ósmosis inversa.
- Carbón activo agotado.
- Lodos de tratamiento biológico.

Todos estos residuos deben ser objeto de tratamiento y gestión específica de forma previa a su vertido final.

## 6. BIOGÁS

### 6.1. GENERACIÓN

El biogás es el resultado de los procesos de biodegradación anaeróbica de la materia orgánica contenida en los residuos. Como se ha mencionado, este hecho solamente es significativo en el caso de los vertederos de residuos sólidos urbanos.

La generación de biogás está relacionada con la evolución de la materia orgánica en el interior del vertedero, de acuerdo con las fases anteriormente descritas. En la figura se recoge la evolución de la producción de los diferentes gases para cada una de las fases del vertedero.

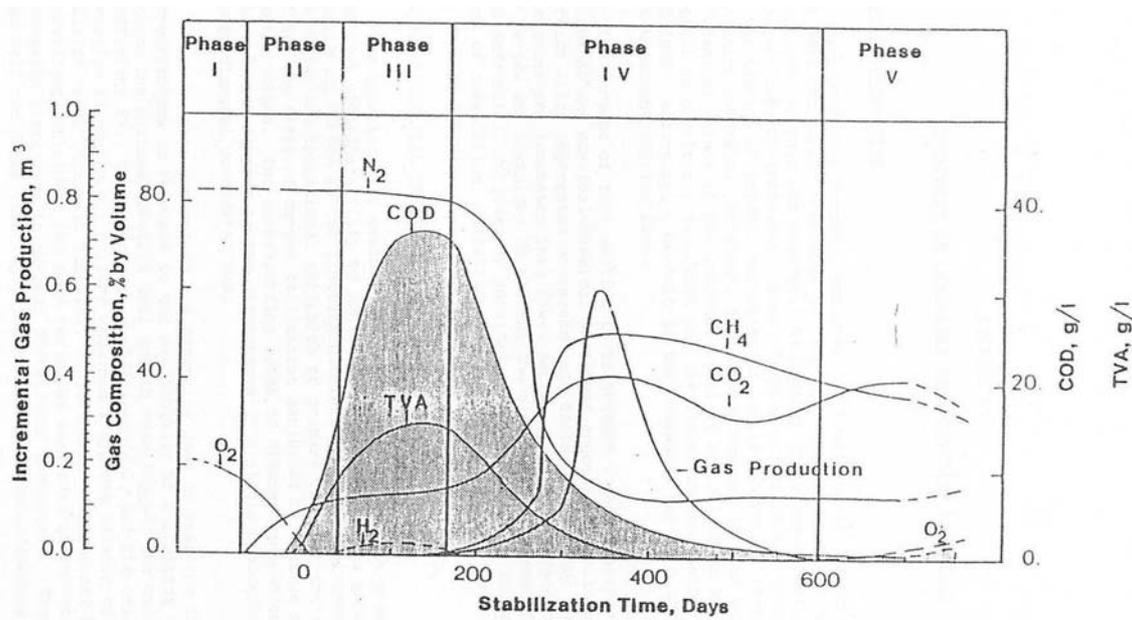


Fig. 6.1: Evolución de la producción de gas en un vertedero

Durante la fase ácida (III) el gas está formado principalmente por CO<sub>2</sub>. En la fase metanogénica (IV), la degradación de los ácidos grasos produce la formación metano y dióxido de carbono.

Los gases producido en el vertedero deben ser extraídos y tratados con los siguientes objetivos:

- Minimizar el impacto sobre la calidad del aire y reducir la contribución al efecto invernadero que provocan dichos gases.
- Minimizar el riesgo de incendios y explosiones, debido a acumulaciones.
- Evitar la degradación de la vegetación del entorno del vertedero.
- Aprovechamiento energético efectivo de los mismos.

La producción de biogás de un vertedero es un proceso dinámico. Así, debido a cambios en los vertidos, su naturaleza y edad, con el tiempo varían tanto la composición como la cantidad del gas producido. Esta producción se inicia poco tiempo después del inicio de vertido de los residuos y puede alargarse durante varios años.

## 6.2. COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

La composición de biogás es sumamente variable, ya que depende de diversos factores como el tipo de materia orgánica presente en el vertedero, condiciones interiores para la vida de los microorganismos (pH, nutrientes, temperatura) y la homogeneidad del vertedero

De modo orientativo puede considerarse la composición recogida en la tabla siguiente:

COMPUESTO	PORCENTAJE
Metano	56-65 %
Dióxido de carbono	30-40 %
Nitrógeno	Máx 6%
Oxígeno	Máx 0,3 %
Sulfuros y mercaptanos	Máx 50 mg/m <sup>3</sup>
Aromáticos	100 ppm
Alifáticos	50 ppm
Hidrocarburos halogenados	40 ppm
Amoniaco	10 mg/m <sup>3</sup>
Agua	saturada

Tabla 6.1: Composición de biogás de vertedero

Una medida para estimar la producción de biogás es la velocidad específica de producción de gas, que corresponde a la cantidad de gas (Kg) producida por año y tonelada de residuo. Esta velocidad alcanza su máximo un poco después del inicio de la fase metanogénica, reduciéndose progresivamente con el paso del tiempo.

En la fase de diseño, se utilizan modelos matemáticos para predecir la producción de gas prevista, basados en la velocidad de fermentación de los diferentes tipos de materia orgánica.

Un valor estimativo la producción máxima teórica de metano por tonelada de materia orgánica (DQO) puede establecerse entre 300 Nm<sup>3</sup> y 500 Nm<sup>3</sup> (mediana y alta biodegradabilidad respectivamente). Este cálculo incluye un error por exceso ya que no toda la materia orgánica es biodegradable. Puede considerarse que en un vertedero se produce realmente entre un 40 y un 50% del valor teórico. A este hecho debe añadirse que en el mejor de los casos la recuperación por parte del sistema de captación es del 70% de gas generado.

Referido a tonelada de RSU, los datos de previsión oscilan mucho según los diferentes autores, aunque de forma general puede considerarse un producción entre **80 - 250 Nm<sup>3</sup>/ t** (al 50% de CH<sub>4</sub>) en 10-15 años. Su PCI aproximado puede establecerse entre **3,5 – 5 kWh / Nm<sup>3</sup>**

### 6.3. DESGASIFICACIÓN

El gas puede migrar en el interior del vertedero por difusión (desde áreas de mayor a menor concentración), convección (desde áreas de mayor a menor presión) o disuelto en el agua. Las principales técnicas para el control del gas de vertedero son las barreras, sistemas de extracción pasivos y sistemas de control activos.

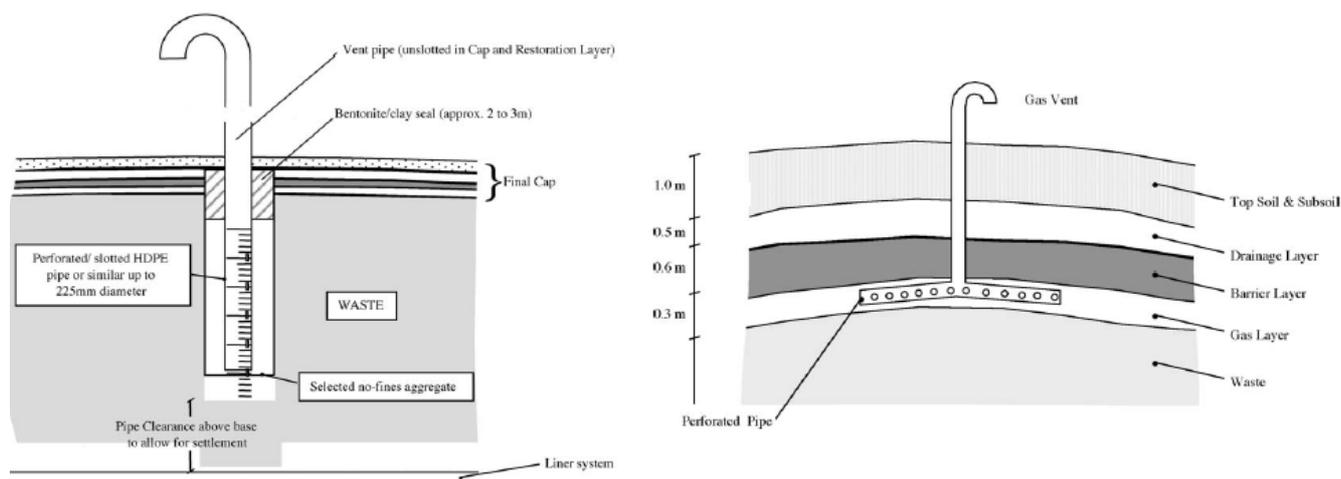
#### 6.3.1. Barreras

Pueden emplearse barreras físicas para controlar la migración del biogás. Estas barreras pueden ser verticales u horizontales. Un ejemplo típico de barrera vertical son las pantallas de cemento-bentonita (en ocasiones reforzada con la instalación de una geomembrana). Una barrera horizontal puede ser construida, por ejemplo, mediante “jet grouting”.

### 6.3.2. Sistemas de extracción pasivos (gas venting)

Estos sistemas suelen utilizarse cuando la calidad del gas es demasiado baja para permitir su combustión posterior. Deben ser diseñados de forma que eviten la entrada de agua en su interior.

Los chimeneas de extracción se instalan en el interior del vertedero y son recrecidas durante el relleno. Habitualmente, su metodología constructiva permite su conexión a un sistema de extracción activo. Estas chimeneas deben extenderse atravesando el sistema de sellado, de forma que pueda mantenerse la monitorización. Si se instala una capa de recogida de gases en el sellado, deben instalarse tuberías de ventilación, tal y como se indica en la figura b).



Figs. 6.2: (a) extracción pasiva en el interior de los residuos.  
(b) extracción pasiva desde la capa de drenaje de gases del sellado.

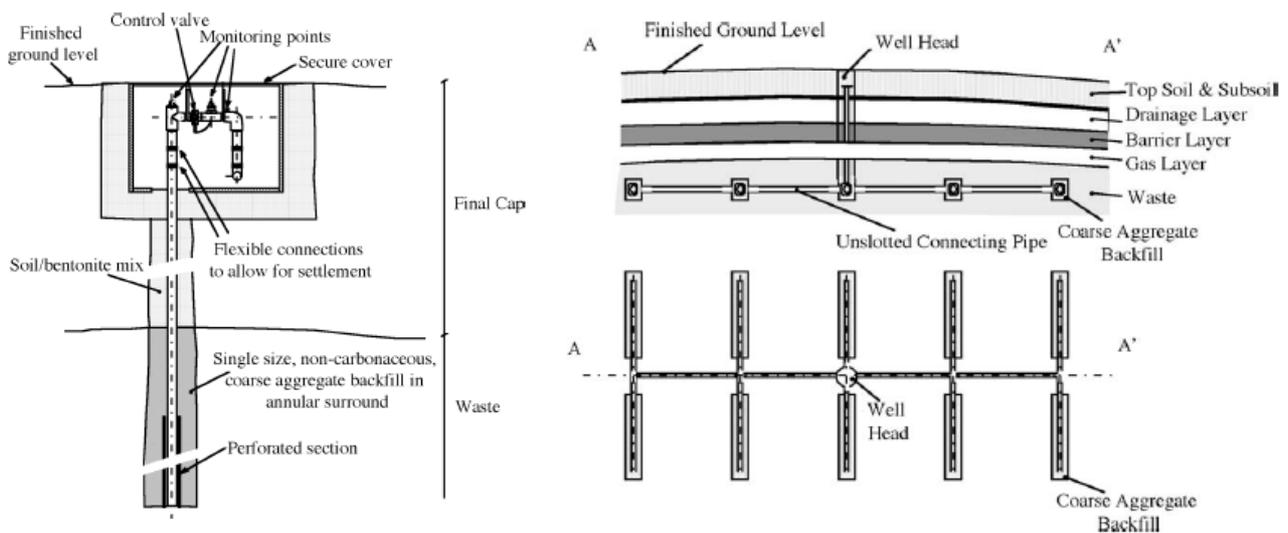
### 6.3.3. Sistemas de extracción activos

Los sistemas de extracción activos son utilizados en la recogida del biogás para su eliminación por combustión o aprovechamiento energético. Habitualmente están formados por una red de pozos, cabezales y tuberías de recogida.

La extracción se lleva a cabo generando una depresión en el sistema de extracción, lo que provoca el desplazamiento del gas. Para ello se emplean soplantes.

El rendimiento en la extracción depende de la calidad de la cobertura y sellado, de la succión aplicada, del nivel de lixiviados en el interior del vertedero y del tipo de pozo utilizado.

Los **pozos de extracción** pueden ser construidos durante el relleno del vertedero o posteriormente mediante sondeos. Los pozos pueden ser verticales u horizontales, y generalmente consisten en una tubería ranurada de polietileno, envuelta en grava. En el caso de los pozos verticales, el espaciado horizontal suele ser de unos 40 metros. En su parte superficial, los pozos se sellan con bentonita.



Figs. 6.3: (a) Pozo de extracción vertical. (b) Pozo de extracción horizontal.

Los **cabezales** son instalados en la parte superior de los pozos para controlar la extracción del biogás. Permiten la regulación del flujo de biogás extraído, así como su monitorización y muestreo.

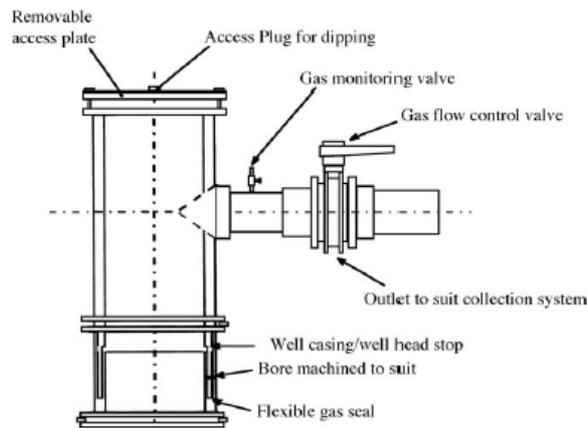


Fig. 6.4: Cabezal de pozo de extracción de biogás.

Las tuberías de conducción, se emplean para conducir el gas desde los pozos hasta el punto de destrucción térmica o recuperación energética. Construidas habitualmente en polietileno, deben estar dotadas de una ligera pendiente (1:30) para permitir el drenaje de los condensados. Este condensado puede contener orgánicos volátiles y ser corrosivo para la infraestructura de recogida de biogás. Por ello, se instalan elementos de purga en la red de tuberías para su eliminación.

Las soplantes utilizadas son compresores centrífugos, con caudales que oscilan entre 150 y 3000 m<sup>3</sup>/h.

#### 6.4. TRATAMIENTO Y UTILIZACIÓN

El biogás debe ser purificado para mejorar su calidad antes de su posterior utilización. La purificación implica en la eliminación del vapor de agua, partículas, dióxido de carbono y trazas de gases .

##### 6.4.1. Utilización del biogás

El uso principal biogás es como combustible, cuya viabilidad depende de su contenido en metano, y fundamentalmente en su PCI. Así, el biogás tratado puede ser utilizado directamente en hornos industriales, cementeras, combustible para vehículos, etc.

Su aplicación más habitual es la generación de energía eléctrica. Se considera el límite inferior para hacer viable económicamente un proyecto de generación eléctrica es de la menos 200.000 toneladas de residuo biodegradable.

La potencia habitual en este tipo de proyectos oscila entre 1 y 5 MW. Normalmente, para la generación de 1 MW de electricidad son necesarios 600-700 m<sup>3</sup> de gas (con un contenido mínimo de 50% de CH<sub>4</sub>). La generación de electricidad es técnicamente viable para concentraciones de metano desde 28 hasta el 65%. La producción de electricidad se obtiene mediante el empleo de generadores.



Fig. 6.5 :Instalación de generación eléctrica de biogás

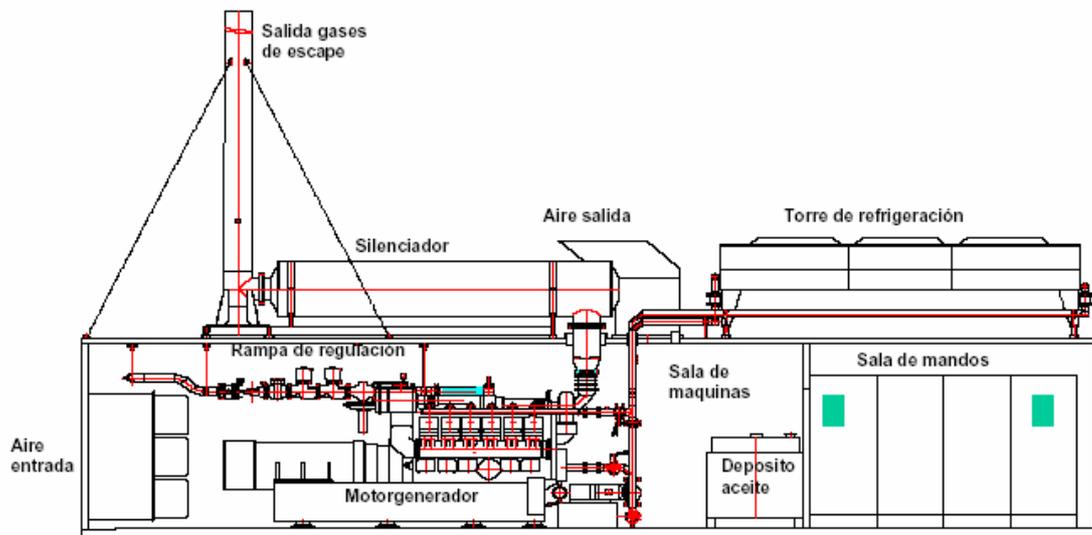


Fig. 6.6:Planta de cogeneración con motor de biogás

### 6.4.2. Destrucción térmica

Cuando la calidad del gas es demasiado baja para su utilización como combustible se procede a su destrucción térmica mediante una antorcha. Esta combustión controlada reduce el riesgo de explosiones y emisiones incontroladas. La temperatura de combustión del gas oscila entre 1000 y 1200 °C, con tiempos de residencia entre 0,3-0,6 segundos.

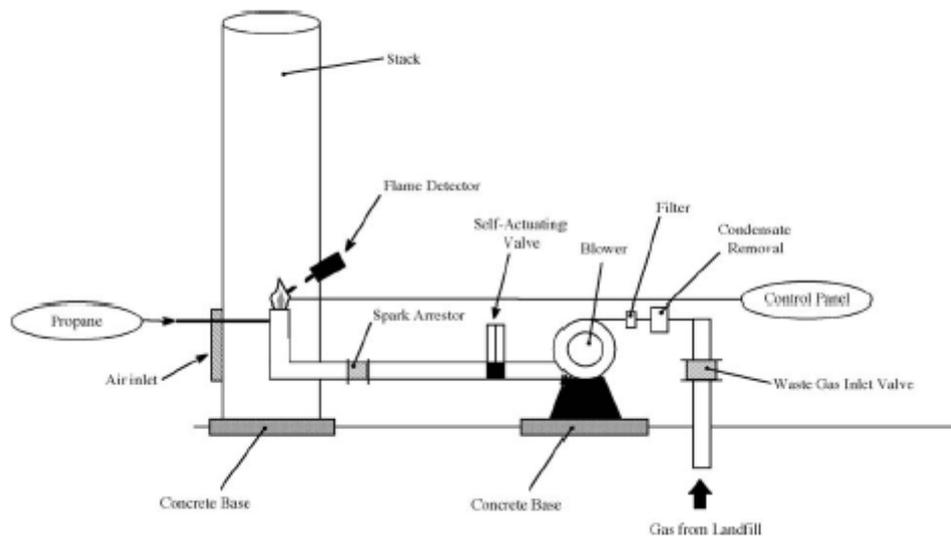


Fig. 6.7: Esquema básico de antorcha de combustión de biogás

Los productos de combustión de la antorcha deben ser monitorizados periódicamente para verificar su rendimiento, y que no superan los límites de emisión autorizados.

## 7. EXPLOTACIÓN, CONTROL Y VIGILANCIA

### 7.1. PLAN DE EXPLOTACIÓN

Todos los vertederos deben contar con un Plan de explotación, en el que se definen:

- Residuos admisibles y no admisibles.
- Procedimiento general de control de admisión de los residuos en la instalación.
- Metodología de explotación del vertedero: frentes de vertido, ampliaciones, cobertura, segregación, etc.
- Modelo de gestión de los residuos producidos.

#### 7.1.1. Residuos no admisibles

Según establece en el R.D. 1481/2001 se considerarán **residuos no admisibles** los siguientes:

- Residuos líquidos.
- Residuos que en condiciones de vertido sean explosivos, corrosivos, oxidantes, fácilmente inflamables o inflamables.
- Materiales radioactivos.
- Gases comprimidos.
- Residuos infecciosos con arreglo a la característica H9 del RD 833/1988.
- Neumáticos enteros usados, con exclusión de los utilizados como elemento de protección del vertedero.
- Cualquier otro residuo que no cumpla los criterios de admisión establecidos en el Anexo II del R.D. 1481/2001 y en el anexo de la Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2002.

#### 7.1.2. Procedimiento general de control de admisión

Seguidamente se describe la secuencia de recepción de residuos en el vertedero, de aplicación para todos y cada uno de los envíos recibidos:

- 1) Una vez los residuos llegan a la instalación se comprueba la documentación que acompaña al vehículo, verificando que la carga es conforme a la misma.

- 2) Se comprueba mediante inspección visual que el residuo verifica los parámetros de admisión en el vaso de vertido recogidos en su Documento de Aceptación.
- 3) Si el residuo es admisible, se permite su acceso al vaso de vertido donde se procederá a su descarga en la zona correspondiente del frente de vertido con el propio vehículo de transporte del residuo.
- 4) El vehículo regresa a la zona de recepción situándose sobre la báscula para obtener el peso neto de residuo vertido.
- 5) Se gestor del vertedero emite un albarán de entrega donde figurará la siguiente información: Fecha, NIF, nombre productor, nº aceptación, descripción del residuo y toneladas recepcionadas.
- 6) Si el residuo resulta no admisible, no se permite su acceso al vertedero siendo devuelto al productor.

La metodología aplicada en desarrollo del procedimiento de control de admisión cumple estrictamente los requisitos establecidos en la legislación vigente sobre residuos y además, asegura en todo momento la trazabilidad de los residuos recibidos.

### **7.1.3. Modelo de explotación**

Como criterio general, el conjunto formado por los residuos y el material de cubrición suele disponerse en capas (entre 2 y 2,5 metros de altura), lo que corresponderá a un nivel de explotación, definido por sus cotas medias inferior y superior.

Los residuos se cubren diariamente con una capa de material de cobertura de suficiente espesor, que generalmente procede de la propia explotación. Se persigue reducir la extensión del frente de vertido, minimizando la producción de lixiviado.

En ocasiones, se procede a segregar determinadas clases de residuos dentro del vertedero, habitualmente para evitar la interacción entre residuos. Para ello, suele construirse una celda independiente, revestida de material mineral impermeable.

La maquinaria empleada en la explotación de un vertedero es similar a la utilizada en obra civil, es decir: palas cargadoras, de ruedas o de cadenas; retroexcavadoras giratorias o mixtas; camiones volquete; compactadores; máquinas telescópicas para descarga de bidones, etc.

La instalación deberá estar vallada en su totalidad, estando el paso controlado y restringido a los usuarios, al personal del vertedero, y aquellos usuarios debidamente autorizados.

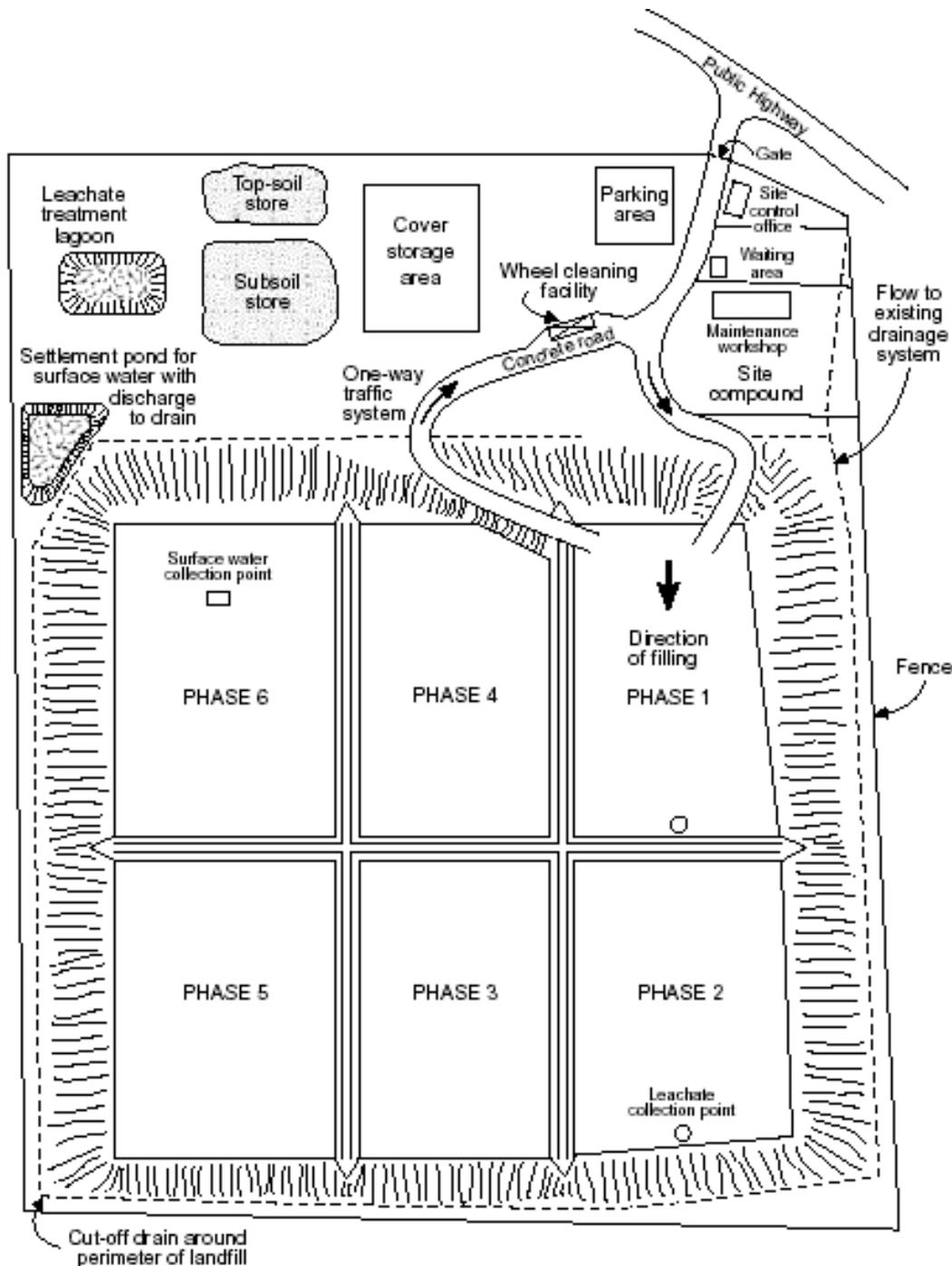


Fig. 7.1: Elementos básicos de un vertedero

#### **7.1.4. Modelo de gestión medioambiental**

Durante la explotación del depósito de seguridad se generarán los siguientes residuos:

- El lixiviado, se recoge en la balsa de almacenamiento, desde la que se procede, bien a su tratamiento o a su gestión externa mediante gestor autorizado.
- Residuos peligrosos generados en las operaciones de mantenimiento (aceites usados, filtros de hidrocarburos, etc.), deben gestionarse a través de gestores autorizados.

La mayoría de los vertederos cuentan un sistema certificado de control de calidad y gestión medioambiental. Dada la naturaleza de las operaciones realizadas, es de especial importancia el estricto cumplimiento del Sistema de Prevención de Riesgos Laborales específico para estas instalaciones (empleo de los EPI, respeto a las medidas de prevención operativas, certificación de la maquinaria a emplear, etc.).

#### **7.1.5. Estabilidad del vertedero**

En todo momento debe asegurarse la estabilidad mecánica de los residuos depositados. Para ello, se seleccionará un perfil de relleno adecuado. Habitualmente se considera estable un relleno con una pendiente inferior a 3H:1V (para residuos sólidos urbanos).

Los problemas asociados a inestabilidad en los vertederos son especialmente complejos habida cuenta de que puede producirse la movilización de una gran cantidad de residuos de forma espontánea, lo que su recogida y saneado del talud resultante suele implicar elevados movimientos de terreno, y por ello, resultando muy costosa.

La estabilidad del vertedero puede mejorarse mediante la adopción de las siguientes medidas:

- Compactación elevada de los residuos, previamente extendidos en capas de poco espesor.
- Limitación del contenido en humedad y mantenimiento de los sistemas de drenaje.

- Compactar los materiales de baja densidad mezclándolos con otros residuos de forma previa a su vertido.

## 7.2. PROCEDIMIENTO DE CONTROL Y VIGILANCIA

Seguidamente se desarrolla el procedimiento de control y vigilancia para protección del medio ambiente, que deberán verificar todos los vertederos tanto en fase de explotación como durante postclausura, consistente en el seguimiento periódico de una serie de variables de referencia e inspección.

### 7.2.1. Control meteorológico

Deberán registrarse las siguientes variables meteorológicas:

VARIABLE	EXPLOTACIÓN	POSTCLAUSURA
Volumen de precipitación	A diario	Diariamente, mas los valores mensuales
Temperatura máx., mín. 14:00 h HCE	A diario	Media mensual
Dirección y fuerza del viento dominante	A diario	No se exige
Evaporación	A diario	Diariamente, mas los valores mensuales
Humedad atmosférica 14 h HCE	A diario	Media mensual

### 7.2.2. Datos de emisión

Deberán realizarse los controles que se recogen en la tabla siguiente. Tras la clausura, cabe esperar que el volumen de lixiviados disminuya hasta desaparecer.

VARIABLE	EXPLOTACIÓN	POSTCLAUSURA
Volumen de lixiviados generado	Mensual	Semestral
Composición de los lixiviados	Trimestral	Semestral
Volumen y composición de las aguas superficiales	Trimestral	Semestral
Emisiones potenciales de gas y presión atmosférica (C <sub>H4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> , ...)	Mensual	Semestral

El R.D. 1481/2001 no establece los parámetros a analizar para conocer la composición del lixiviado, aunque suelen definirse en la autorización del vertedero.

### **7.2.3. Aguas subterráneas**

Según el Anexo III del R.D. 1481/2001, las mediciones para controlar la posible afección del vertido de residuos a las aguas subterráneas se realizarán en, al menos, un punto situado aguas arriba del vertedero en la dirección del flujo de aguas subterráneas entrante y en, al menos, dos puntos situados aguas abajo del vertedero en la dirección del flujo saliente.

La frecuencia se establecerá en función de los estudios hidrogeológicos, y será específica para cada emplazamiento concreto. Los parámetros recomendados para el control de aguas subterráneas según el Real Decreto 1481/2001 son: pH, conductividad, COT, fenoles, metales pesados (Zn, Fe, Pb, Cu, Ni, Cr, Mn, Cd), As, F y TPH's.

### **7.2.4. Topografía**

Según esta normativa, deberá realizarse un seguimiento topográfico de la evolución masa de residuos, mediante un levantamiento topográfico anual en el que se determinará superficie ocupada por los residuos, volumen de los mismos, cálculo de la capacidad restante de depósito y vida útil del mismo. Este control no es necesario durante la fase postclausura.

En ambas fases se realizará un seguimiento anual del comportamiento de asentamiento del nivel del vaso de vertido.

## 8. CLAUSURA DEL VASO DE VERTIDO. CONTROL Y VIGILANCIA POSTCLAUSURA

### 8.1. CLAUSURA DEL VASO DE VERTIDO

Según se expresa en el Real Decreto 1481/2001, se considera definitivamente clausurado un vertedero después de que la Autoridad Competente, tras la verificación in situ y evaluación de informes correspondientes, comunique oficialmente tal situación. El proyecto de sellado debe asegurar la recuperación del terreno, tanto ambiental, paisajística y, en su caso de usos, como el control periódico de la instalación clausurada.

Los principales objetivos del sellado son:

- Minimizar el contacto del agua con los residuos, transformando toda la precipitación en escorrentía superficial.
- Controlar la producción y migración del gas del vertedero.
- Proporcionar una separación física entre el residuos y la vida animal y vegetal.

#### 8.1.1. Componentes del sistema de sellado

En el presente apartado se describen los diferentes niveles que integran el sistema de sellado de un vertedero (“*capping system*”):

- **Capa de regularización**, situada inmediatamente sobre los residuos, formada normalmente con material procedente de la propia construcción del vertedero, cuya función es habilitar las pendientes de evacuación final del sistema de sellado.
- **Capa de recogida de gas** (solamente en caso de vertedero con materia orgánica biodegradable), formada por un nivel drenante, constituido por material granular o un geocompuesto, para la recogida y captación del biogás que sigue produciéndose en el vertedero tras su clausura.
- **Capa barrera**, consiste en un nivel mineral de baja permeabilidad, una geomembrana o ambos. Su función es el aislamiento efectivo de la masa de residuos del contacto con el agua.

- **Capa drenante**, para drenaje de las aguas de lluvia que infiltren a través de la capa superior y la vegetación. Puede estar formada por una capa granular (0,5 m) o un geocompuesto drenante. Estarán dotados de una pendiente longitudinal mínima para facilitar la evacuación por gravedad.
- **Capa vegetal**, cuya función es facilitar las labores de restauración vegetal del vertedero. Habitualmente se puede dividir en dos capas: una soporte, en la parte inferior, habitualmente de 0,5 metros de espesor; y una superior, formada por tierra vegetal, enriquecida en materia orgánica. Siempre que sea posible, se reutilizará la tierra procedente del desbroce inicial.

A modo de ejemplo, en la figura se recoge un perfil tipo de sellado para un vertedero de residuos peligrosos.

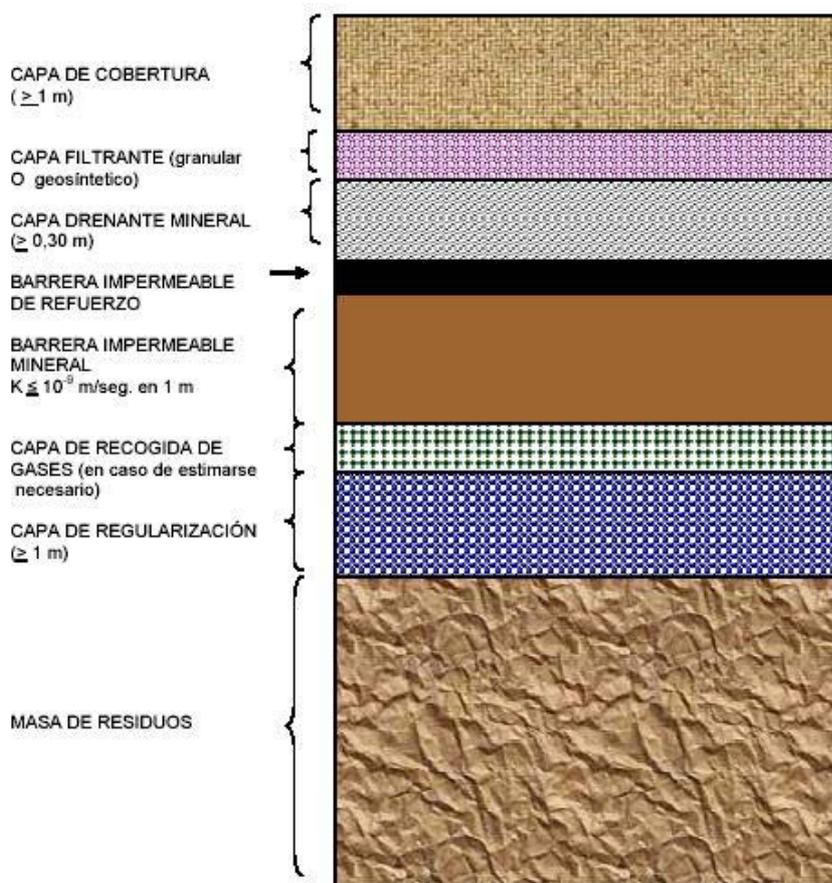


Fig. 8.1.: Perfil tipo de sellado de un vertedero de residuos peligrosos

Cabe mencionar que durante las labores de sellado es habitual el empleo de geosintéticos en sustitución de las capas minerales debido a que ofrece las siguientes ventajas:

- Existen numerosas experiencias de aplicación de geosintéticos en el sellado.
- La capa de sellado equivalente con geosintéticos posee menor espesor, lo que maximiza el volumen útil disponible y reduce peso sobre la masa de residuos.
- La puesta en obra de los materiales geosintéticos es más sencilla y susceptible de control que los materiales naturales.
- La solución de los geosintéticos suele resultar, en general, más económica.

Para favorecer la integración paisajística del vertedero y reducir los efectos de la erosión superficial, deben restaurarse las superficies finales con especies adecuadas.

Para ello, la tierra vegetal será extendida sobre la capa de drenaje utilizando una maquinaria que efectúe una mínima compactación. En caso necesario, se añaden los nutrientes y materia orgánica necesarios.

Deben seleccionarse especies de tipo herbáceo y arbustivo, para evitar el riesgo de que las raíces puedan dañar la impermeabilización.

## **8.2. PROGRAMA DE CONTROL Y VIGILANCIA POSTCLAUSURA**

Una vez clausurada el depósito de seguridad, se establecerá el procedimiento de control y vigilancia postclausura, que tendrá una duración de **30 años**.

Los parámetros y periodicidad de los controles serán los descritos en el epígrafe 7.2.

## 9. DOCUMENTACIÓN RECOMENDADA

### 9.1. BIBLIOGRAFÍA

- “Ingeniería Geológica” (2002), Luis I. González de Vallejo. Ed. Prentice Hall.
- “Residuos tóxicos y peligrosos: tratamiento y eliminación” (1989) MOPT.
- “Landfill manuals. Landfill Site Design”, Ireland Environmental Protection Agency.
- “Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: Design and Evaluation” (1994), H.Sarma y S.Lewis, Ed. John Wiley and Sons Ltd.
- “Solid Waste Landfill Design Manual”, Washington State Department of Ecology.
- “Landfilling of waste”, Danish Environmental Protection agency.
- “Designing with geosynthetics” Robert M. Koerner (2005). Ed. Prentice Hall.
- “Critical review and summary of leachate and gas production form landfills”, U.S. Environmental Protection Agency.

### 9.2. INTERNET

<b>edafologia.ugr.es</b>	Dpto. de Edafología y Química Agrícola Universidad de Granada
<b>www.cedex.es/lg/principal.html</b>	CEDEX - Laboratorio de Geotecnia
<b>europa.eu.int/comm/environment/index_es.htm</b>	EUROPA - La Comisión Europea - Medio Ambiente
<b>www.epa.gov</b>	Environment Protection Agency (U.S.A.)
<b>www.landfilldesign.com</b>	landfilldesign.com - Research, Design, Interact, and Select Material for Landfills and Landfill Applications
<b>www.gfredlee.com</b>	Surface and Groundwater Quality Evaluation and Management and Municipal Solid & Industrial Hazardous Waste Landfills
<b>www.geosynthetica.net</b>	GEOSYNTHETICA
<b>www.geosyn.org</b>	GEOSYN ORG
<b>www.vinci-quality.com</b>	Control de calidad en geosintéticos
<b>www.tenax.net/</b>	TENAX geosintéticos
<b>www.cetco.com/</b>	CETCO Bentonite Clay Producers
<b>www.sustainablelandfillfoundation.eu</b>	Dutch Sustainable Landfill Foundation