

ALTERNATIVAS EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE VERTEDERO

A.M. Hidalgo^(*); M.D. Murcia; M. Gómez; A.J. López

Departamento de Ingeniería Química, Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Químicos, Bioquímicos y de Membrana, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo, 30071 Murcia, Spain

Tel. +34 868 88 7355; Fax +34 868 88 4148; email: ahidalgo@um.es

Área temática: Calidad ambiental, Agua, Tecnología e innovación

Resumen

En la actualidad, a pesar de las medidas de control y gestión que cada día se llevan a cabo, además de la concienciación ambiental que se va adquiriendo con el paso de las generaciones, hoy día más del 50 % de los residuos generados en todo el mundo acaban en un vertedero para su eliminación definitiva, esto conlleva un grave problema tanto a nivel ambiental como para la salud humana, ya que en estos vertederos se generan productos no deseados debido a la degradación de los residuos depositados, como son los gases de vertedero y los lixiviados como contaminantes principales, entre otros, como vectores de enfermedades o malos olores.

En este estudio se ha realizado una revisión bibliográfica para abordar los diferentes tratamientos aplicables a los lixiviados generados en los vertederos. Para ello, en un primer lugar se ha realizado una búsqueda de la información analizando el concepto de "lixiviado" y "lixiviado de vertedero". También se han recopilado datos de la generación de residuos y cantidades de éstos que finalmente son destinados a vertedero, para poder tener una idea de la magnitud del problema actual. Además, se ha estudiado la información sobre el origen y producción de lixiviados, las características y su composición, su gestión en el propio vertedero y la normativa que hasta el momento regula su gestión.

Finalmente, se han revisado los distintos tratamientos y tecnologías alternativas que pueden ser aplicables a los lixiviados. Además se muestran algunos ejemplos de las tecnologías de membranas más actuales puestas en práctica, para la eliminación de algunos de los contaminantes que aparecen en la composición de los lixiviados (como metales pesados, compuestos orgánicos persistentes, etc.) y que representan un grave problema ambiental.

1. Antecedentes

1.1. Definición

Según el Real Decreto 1481/2001 de 27 de Diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, se entiende como lixiviado a *“cualquier líquido que percole a través de los residuos depositados y que rezume desde o esté contenido en un vertedero”*, esta definición aparece por primera vez en la Directiva 1999/31/CE, del Consejo, del 26 de abril, relativa al vertido de residuos, que establece un régimen concreto para la eliminación de los residuos mediante su depósito en vertederos.

Por otro lado el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), los clasifica de dos formas distintas, en el caso concreto de los residuos los define como, *“Al proceso de degradación biológica, que puede resultar en un líquido con contaminantes orgánicos, minerales y metálicos por extracción de compuestos solubles de la materia.”* [1]. Y aplicado el concepto al depósito en vertedero lo define de la misma manera que lo hace la Directiva 1999/31/CE.

Según la Real Academia Española (RAE), lixiviado se entiende por *“Líquido residual, generalmente tóxico, que se filtra en un vertedero por percolación”* [2].

Otra definición de lixiviado es la que encontramos en los apuntes de la asignatura de Gestión de Residuos de Ciencias Ambientales que dice así *“Es el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión”* [3].

Del mismo modo encontramos definiciones similares en otras fuentes como son, Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado de Buenos Aires, Argentina. (CEAMSE), [4] o el Observatorio de la Salud y medio ambiente de Andalucía (OSMAN) [5], además de páginas web como, el BLOGECOLOGISTA [6], o Wikipedia [7].

Cabe destacar que en su Anexo III, la Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos contaminados, clasifica dichos lixiviados, como un residuo peligroso por sus características específicas. Además la Decisión del 18 de Diciembre de 2014, que modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista Europea de residuos (LER), de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, incluye las operaciones de valorización y eliminación de residuos y cataloga los lixiviados de vertedero como residuos, por ello les corresponde los siguientes códigos L.E.R, según si están clasificados por contener sustancias peligrosas 19 07 02*, o si no las contienen 19 07 03.

Los lixiviados son los líquidos que se forman como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica e inorgánica procedente de los Residuo Sólidos Urbanos (RSU)¹ destinados al vertedero, y que se infiltra a través de las capas más profundas de éste. El agua que llega a formar parte de los lixiviados es un factor importante en la producción de

¹ La nueva normativa ya no los define como Residuos Sólidos Urbanos (RSU), sino como Residuos Domésticos (RD). (Fuente extraída de, la Ley 22/2011 de julio, de residuos y suelos contaminados.)

éstos, y depende de la climatología e hidrología de la zona, pudiendo ocasionar un problema el agua de escorrentía provocada por las precipitaciones ya que puede infiltrarse tanto de forma superficial como subterránea, provocando un problema mayor. Otros de los factores importantes en cuanto al volumen y cantidad generados de lixiviado, es la situación, edad, construcción y explotación del propio vertedero.

Finalmente en la producción de lixiviados de vertedero, se establece una clasificación de éstos atendiendo a su edad en el vertedero, se considera como lixiviado joven, intermedio y estable o maduro [8]. Esta clasificación no dispone de unos parámetros definidos por la comunidad científica, variando de forma significativa dependiendo de quién realice el estudio de la edad del lixiviado, los datos encontrados en algunos trabajos los clasifican como:

- Lixiviado joven entre: 1-2 años [9], <1 año [8], o <2 años [10]. Y lixiviados maduros el que proviene de un vertedero con más de 3 años de edad [9], >5 años [8] o >10 años [10].

Se debe tener en cuenta que un vertedero tras su clausura puede seguir produciendo lixiviado hasta 50 años después del cese de su actividad y explotación, por eso es importante implantar y mantener medidas de gestión integral post-clausura de un vertedero [8].

1.2. Magnitud

Una vez estudiado el concepto de lixiviado, para conocer la magnitud del problema sobre la gestión de los lixiviados, es necesario conocer de qué manera se generan y a que escala lo hacen. Para ser más específicos, se hace necesario clasificar a distintos niveles espaciales que serán global, europeo, estatal y regional (Murcia).

- **Ámbito global**

A nivel mundial, en la bibliografía consultada no se recogen datos sobre las cantidades anuales producidas de lixiviado, esto es debido a que no tenemos datos de la cantidad de vertederos controlados que existen en muchos países, como tampoco, datos de las cantidades de residuos generados en muchos de ellos. En cambio, sí se encuentran datos que pueden ser de interés a nivel global de la cantidad de residuos generados, dependiendo de los diferentes países y sus niveles económicos.

En el mundo se estima que se generan unos 1,3 billones de toneladas anuales de residuos sólidos urbanos [11]. De esas cantidades varía considerablemente el porcentaje que se genera en cada país del mundo como se puede observar en la figura 1 (a), ya que dependiendo del nivel de desarrollo económico se generan más o menos residuos, siendo normalmente mayor la cantidad generada en países más desarrollados e industrializados. Los mayores productores de RSU en este momento son EEUU en cabeza con unas 621.000 toneladas al día, y les sigue China con unos 521.000, además de Brasil, la India y Méjico [11]. Como se puede ver cuatro de los cinco mayores productores de RSU son países en desarrollo, esto se debe a las grandes poblaciones urbanas que poseen estos países, además de que se encuentran prosperando y esto genera la adopción de alternativas de vida de alto consumo.

Por otro lado, de esta cantidad mundial, unas 340 millones de toneladas anuales son destinadas a vertederos [12], aunque las proporciones por naciones son muy variables dependiendo del lugar de donde provengan, ya que, claramente se puede ver que los países más desarrollados destinan un porcentaje mucho menor a vertedero de lo que lo hacen países subdesarrollados como se muestra en la figura 1 (b). Por ejemplo, países como Suiza envía menos del 0,5 % de sus residuos generados a vertedero, mientras que otros como, Turquía o Bosnia y Herzegovina destinan el 100 % [13].

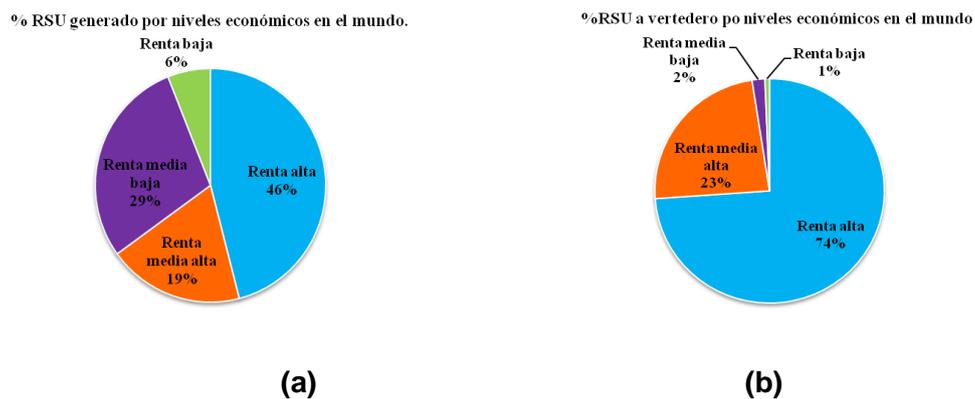


Figura 1.- (a) Porcentaje de RSU generado en el mundo, por niveles económicos, **(b)** Porcentaje de RSU enviado a vertedero en el mundo, por niveles económicos. (WorldBank).

El control de la producción de lixiviados en los países menos desarrollados se hace imposible ya que no se toman medidas en el propio vertedero, pero en los lugares donde existe una regulación para el vertido y la contaminación sí que se calcula la producción de lixiviado mediante un balance hídrico que se describirá en el siguiente punto, dónde se tiene en cuenta la zona donde se ubica el vertedero, su edad y explotación, así como, la climatología y el tipo de residuo generado. Por ello en cada lugar del mundo se genera un lixiviado con condiciones y volúmenes muy diferentes.

- **Ámbito europeo**

A nivel europeo igualmente se encuentran datos sobre la cantidad y producción de RSU y el porcentaje de éstos que va a parar a vertedero. En el Libro Verde se encuentran datos relativamente recientes, referidos a un estudio realizado en 2015 a 28 países de la comisión europea, en el estudio se habla de que generamos una media de RSU de 445 kg/habitante y año, de los cuales, el porcentaje que va a parar a vertedero es muy diferente dependiendo de cada país, siendo Alemania, Holanda, Suecia y Bélgica del 1 %, Suiza <0,5 %, mientras que en países como España todavía enviamos más del 50 % de nuestros residuos a vertedero [14].

Estas diferencias son debidas a que en gran parte de los países del norte de Europa, existe una mayor conciencia ambiental sobre los residuos, realizando una mejor gestión de éstos mediante un mayor reciclado y aprovechamiento energético, mientras que en países del mediterráneo y el este de Europa seguimos utilizando en mayor medida el vertedero como sistema de eliminación de residuos, como podemos ver en las figuras 2 y 3 según los datos extraídos de Eurostat de un estudio realizado en el año 2014.

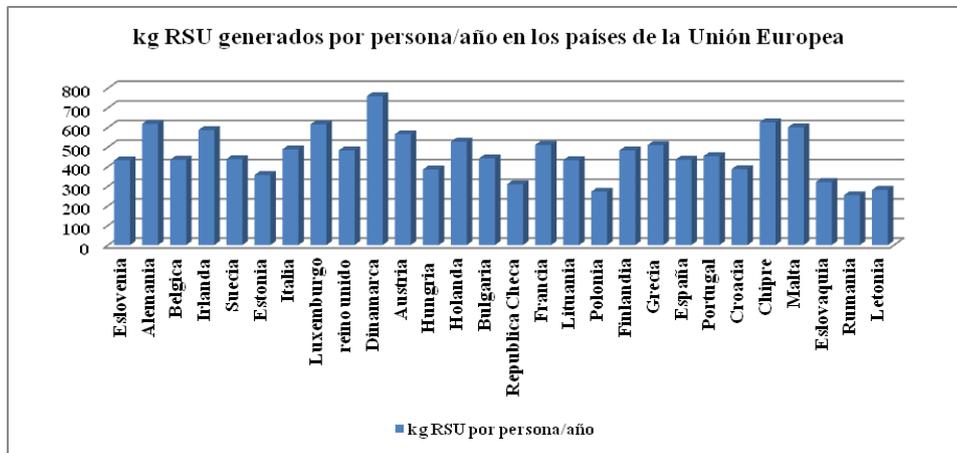


Figura 2.- Cantidad de RSU (kg) generados por persona/año en los países de la Unión Europea. Datos extraídos de Eurostat. (Elaboración propia).

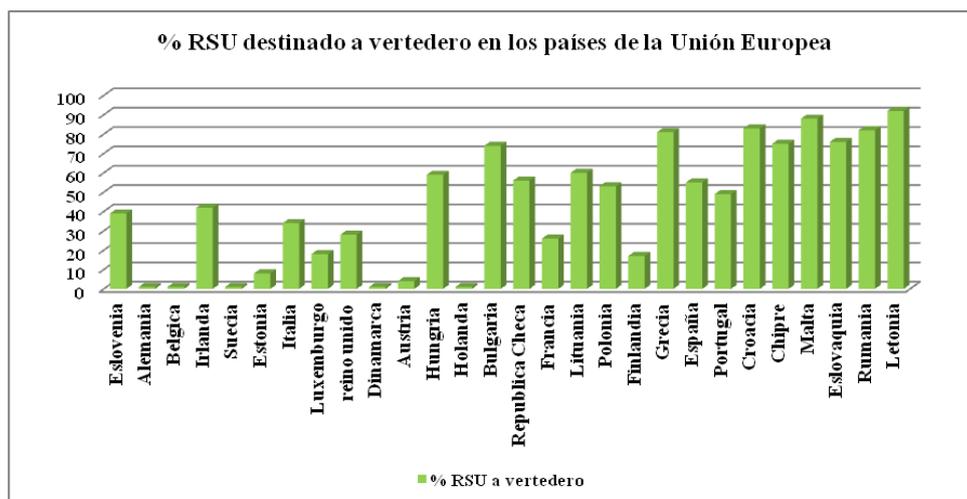


Figura 3.- Porcentaje de RSU que acaba en vertedero en los países de la Unión Europea. Datos extraídos de Eurostat. (Elaboración propia).

En cuanto a la generación de lixiviado varía dependiendo del tipo de residuo generado en cada país y de la edad del vertedero, al igual que por su climatología e hidrología, por ello no se tienen datos de la generación exacta de estos líquidos producidos en vertedero a nivel europeo, pero sí existe una forma de calcular la cantidad producida de lixiviado en un vertedero, según unos parámetros establecidos su expresión matemática es la siguiente [15]:

$$L = PE + (Is + Iss + Ie) - ETP - Af - (AMr + Ars)$$

Donde:

L= Cantidad de lixiviados producidos.

PE= Pluviometría útil a efectos de percolación: P-E.
Is= Infiltración de aguas subterráneas procedentes de flujos locales.
Iss= Infiltración de aguas subterráneas procedentes de flujos regionales.
le= Infiltración de aguas procedentes de escorrentías de zonas limítrofes al vertedero.
ETP= Evapotranspiración potencial: E + T.
Af= Agua de fermentación.
AMr= Absorción de la capa de materiales de cobertura.
Ars= Absorción de la masa de residuos vertidos.

Esta fórmula trata de un balance hídrico que considera el proceso del vertedero como un sistema en el que a través de sus variables y en función del diseño del vertedero, podemos hacer un cálculo en unidades de litro por metro cúbico de todos los aportes, consumos y salidas de agua del vertedero para, teniendo en cuenta la capacidad de retención de los residuos, hallar la cantidad correspondiente de lixiviado en un período de tiempo determinado (normalmente un mes), y así poder estudiar la mejor alternativa para minimizar la cantidad de lixiviado producido.

- **Ámbito estatal (España)**

A nivel nacional encontramos datos sobre los vertederos que existen en España por comunidades autónomas, así como de la cantidad de RSU que va destinado a vertedero.

En nuestro país se generan unas 21,9 millones de toneladas de residuos al año, lo que supone unos 463 kg por persona y año. Según el estudio realizado en 2012 por el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR 2016-2022), España cuenta con unas 420 instalaciones de vertido controlado en total, que separados por tipo de vertido son, 18 de residuos peligrosos, 212 de residuos no peligrosos y 194 de residuos inertes [16]. En la tabla 1 se encuentran datos de las cantidades de vertederos desglosados por comunidades autónomas y clasificación de vertido.

En diciembre de 2013 se estimó que la capacidad aproximada de vertido de estas instalaciones era de, 5.129,000 toneladas para residuos peligrosos, 124.167,000 toneladas para residuos no peligrosos y de 105.254,000 toneladas para residuos inertes [16].

Tabla 1.- Cantidad y tipos de vertederos controlados por comunidades autónomas. (PEMAR 2016-2022).

Comunidad Autónoma	Vertederos de residuos peligrosos	Vertederos de residuos no peligrosos	Vertederos de residuos inertes
ANDALUCÍA	2	28	54
ARAGÓN	2	11	4
ASTURIAS	4	9	3
BALEARES	1	4	0
CANARIAS	0	8	1
CANTABRIA	0	2	1
CASTILLA Y LEÓN	3	15	0
CASTILLA-LA MANCHA	0	9	12
CATALUÑA	1	40	55
CEUTA	0	2	1
EXTREMADURA	0	7	0
GALICIA	2	17	2
LA RIOJA	0	5	0
MADRID	2	5	4
MELILLA	0	0	1
MURCIA	1	6	22
NAVARRA	0	7	6
PAIS VASCO	0	19	3
VALENCIA	0	18	25
Total	18	212	194

Todavía se envía a vertedero en nuestro país más del 50 % de los residuos generados, de los que aproximadamente la mitad, son procedentes de los vertidos de residuos sin tratamiento que van directos a vertedero, y la otra mitad, proceden de los vertidos de rechazos de las plantas de tratamiento previo [16]. En la figura 4, podemos ver la situación de los RSU en 2012 en España.

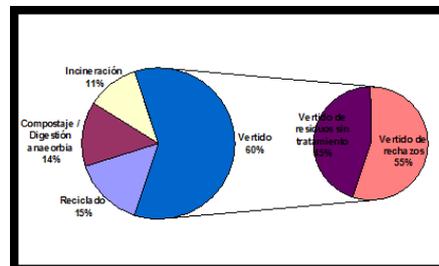


Figura 4.- Situación de los RSU en 2012 en España. (PEMAR 2016-2022).

Para cuantificar la producción de lixiviado en cada uno de los vertederos existentes es importante saber el tipo de residuo que se elimina. En España en general presentan, un alto porcentaje en materia orgánica y bajo en materias combustibles. En las zonas más rurales el tipo de residuos lo componen los vertidos procedentes de la agricultura y la ganadería, siendo residuos formados por restos vegetales, gran variedad de materias orgánicas, sólidas y líquidas, procedentes de la actividad biológica de los animales [17], mientras que en las zonas urbanas varía mucho el tipo de residuo ya que depende de lo industrializada que esté la zona y el tipo de actividad que en ella se genere.

La cantidad y peligrosidad del lixiviado generado en los vertederos de nuestro país, varía según la zona donde se sitúe el vertedero por su climatología, clase de residuos, así como también en el tipo de vertedero al que vaya destinado, peligroso, no peligroso o de residuos inertes.

- **Ámbito regional (Región de Murcia)**

comunidades autónomas la elaboración de los planes y programas de gestión y prevención de sus residuos.

1.3. Aspectos ambientales

1.3.1. Normativa

Hasta el momento, ha ido apareciendo normativa relacionada con los lixiviados como son algunas leyes, planes y programas, ordenes y directivas, ya sean aplicables a su definición, su gestión, o al cálculo de producción en el propio vertedero. Además de otro tipo de legislación relacionada con la problemática ambiental que causan y la eliminación de residuos en vertedero, mediante la que implican el cumplimiento de determinados objetivos. Para una mayor claridad se ha estudiado la normativa a distintos niveles, europea, estatal y autonómica, esta última para la Región de Murcia, que se ha recogido en la tabla 3.2. Cabe destacar que se ha recopilado la información más actual, descartando los documentos ya derogados y que no se encuentran en vigor.

A continuación se describe alguna pincelada de los aspectos más importantes recogidos en la normativa que se expone en la tabla 2, relacionada con los lixiviados de vertedero.

EUROPEA

- La principal normativa a nivel europeo es la mencionada **Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre, de 2008 de Residuos**, que dispone en su artículo III que los lixiviados de vertedero contienen características que permite calificarlos como peligrosos, asignándole un código HP, concretamente el HP 15, que lo define como:

“HP 15 Residuos susceptibles, después de su eliminación, de dar lugar a otra sustancia por un medio cualquiera, por ejemplo, un lixiviado que posee alguna de las características antes enumeradas.”

- Esta Directiva además, dispone de una Decisión relativamente reciente del año 2014, la **Decisión 2014/955, de 18 de diciembre de 2014**, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, que modifica el anexo III sobre la Lista Europea de Residuos (LER) al que se refiere el artículo VII de la Directiva 2008/98/CE, que como objetivo dispone en el apartado de EVALUACIÓN Y CLASIFICACIÓN, que lo califica como una sustancia peligrosa por sus características de peligrosidad como se menciona en el apartado anterior, por lo que debe aplicársele una evaluación y clasificación, tras este proceso dispone que: *“Una vez evaluadas las características de peligrosidad de un residuo de acuerdo con este método, se le atribuirá la entrada adecuada de la lista de residuos, correspondiente a residuos peligrosos o a residuos no peligrosos.”*

Concretamente a los lixiviados de vertedero les pertenece el código LER 19 07: *“19 07 Lixiviados de vertedero: 19 07 02* Lixiviados de vertedero que contienen sustancias peligrosas, 19 07 03 Lixiviados de vertedero distintos de los especificados en el código 19 07 02”*

Tabla 2.- Normativa recogida a nivel europeo, estatal y regional, referida a lixiviados de vertedero. (Elaboración propia).

EUROPEA	DIRECTIVAS	Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre, de 2008 de Residuos.
	DECISIONES	<p>Decisión 2014/955, de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE.</p> <p>Decisión 2003/33/CE del Consejo de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos.</p>
ESTATAL	LEYES	<p>Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.</p> <p>Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación, modificada por la actual Ley 5/2013 de 11 de junio.</p>
	REALES DECRETOS	Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre , por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. La Orden aaa 661/2013 , modifica los anexo I, II y III del Real Decreto 1481/2001.
	PLANES	Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.
REGIONAL (Región de Murcia)	DECRETOS	Decreto 48/2003, de 23 de mayo , por el que se aprueba el Plan de Residuos de la Región de Murcia.
	PLANES	Plan de Residuos de la Región de Murcia 2015-2020.

- **Decisión 2003/33/CE del Consejo de 19 de diciembre de 2002**, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos. Como bien dice el título de esta normativa, en ella se establecen los criterios de admisión de los residuos a vertedero. Con respecto a la gestión y control de los lixiviados marca unos objetivos a cumplir por la empresa explotadora, entre ellos unos valores límites de emisión para cada uno de los compuestos que se puedan dar en estos residuos por lixiviación.

ESTATAL

- La **Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados**. En esta ley se traslada a nuestra normativa lo mencionado en la Directiva 2008/98/CE, sobre las características que permiten calificar a los residuos como peligrosos.
- **Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación modificada por la actual Ley 5/2013 de 11 de junio**. En esta ley se dispone la Autorización Ambiental Integrada (AAI), que es una resolución que autoriza bajo determinadas condiciones, la explotación parcial o total de cualquier empresa pública o privada que realice una actividad que perjudique tanto a la salud humana como al medio ambiente. En nuestro caso un vertedero debe solicitar la AAI de producción y gestión de residuos entre otras.
- Quizá a nivel estatal y en materia de lixiviado, el más importante sobre gestión y regulación sea el **Real Decreto (RD) 1481/2001, de 27 de diciembre** por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, de acuerdo con la Decisión 2003/33/CE. En este Real Decreto en su artículo 14 se dispone el procedimiento a seguir en la clausura y mantenimiento post-clausura de un vertedero, y de conformidad con lo que se fije en la autorización dispone de unos objetivos y obligaciones a cumplir por la empresa explotadora. Además en su ANEXO I, se disponen unos requisitos generales para toda las clases de vertederos, en concreto para lixiviados, para su control, gestión y protección para el suelo y las aguas tanto subterráneas como superficiales. Otra característica de este (RD) es que en él se establecen unos valores límites de emisión para los componentes que se encuentran en los lixiviados generados en el vertedero.
- **Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022**. En el Plan Marco se establecen unos objetivos frente a la protección de la calidad de las aguas. Por esto requieren especial atención determinadas actividades relacionadas con la gestión de los residuos que pueden afectar a la contaminación de las aguas.

REGIONAL (Región de Murcia)

- **Decreto 48/2003, de 23 de mayo**, por el que se aprueba el Plan de Residuos de la Región de Murcia. Que dicta todos los requisitos y apartados que se deben establecer en la redacción de dicho plan, conforme se dispone a nuestro ordenamiento por la normativa europea.
- **Plan de Residuos de la Región de Murcia 2015-2020**. En este plan se establecen los criterios básicos para la instalación y adecuación de un vertedero, y con ello evitar una mala gestión de sus residuos, como son sus lixiviados [18].
- Cabe destacar que es de aplicación la normativa citada a nivel estatal, debiendo cumplimentar lo dispuesto en ellas por cada comunidad autónoma, como son la obtención de la AAI o los criterios de gestión y administración de residuos en vertedero.

1.3.2. Sistemas para la gestión y recogida de lixiviado en vertedero

Para una buena gestión de lixiviado en un vertedero controlado se ha de tener en cuenta unos requisitos para la recogida de los lixiviados producidos en los vasos donde se

depositan los residuos, para ello se instalan sistemas de recogida de lixiviados. Para el diseño de estos sistemas de recogida en el vertedero implica los siguientes pasos [19]:

1. La selección del sistema de aislamiento: En este paso se tendrán en cuenta las características geológicas e hidrológicas de la zona donde se va a instalar el sistema de recogida. Para preparar el terrero se emplearán capas de drenajes apropiadas a las características del suelo y aislamientos de arcilla o geomembranas [19].

2. Desarrollo de un plan gradual que incluya la puesta en obra de los canales para el drenaje y para la recogida del lixiviado y tuberías para canalizarlo. En esta segunda etapa se va a seleccionar el diseño para la separación *in situ* del lixiviado, las instalaciones más comunes son las terrazas inclinadas y los fondos con tuberías.

- Terrazas inclinadas. El objetivo principal de estas instalaciones es impedir que el lixiviado se acumule en el fondo del vertedero. Este sistema como se muestra en la figura 6 (b), consiste en una serie de inclinaciones en el fondo del vaso del vertedero, de tal manera que el lixiviado drena hasta unos canales de recogida situados en la intersección de cada terraza. Estos canales constan de unas tuberías perforadas que conducen al lixiviado a una localización central [19].
- Fondos con tuberías. Este sistema de recogida de lixiviado consiste como se observa en la figura 6 (a), en la instalación en el fondo del vaso del vertedero una serie de tiras rectangulares con barreras de arcillas que corresponden con una celda de vertido, en ellas se instalan una tubería de forma longitudinal encima de la geomembrana. Se suele utilizar un sistema múltiple para la rápida separación del lixiviado en el vertedero [19].

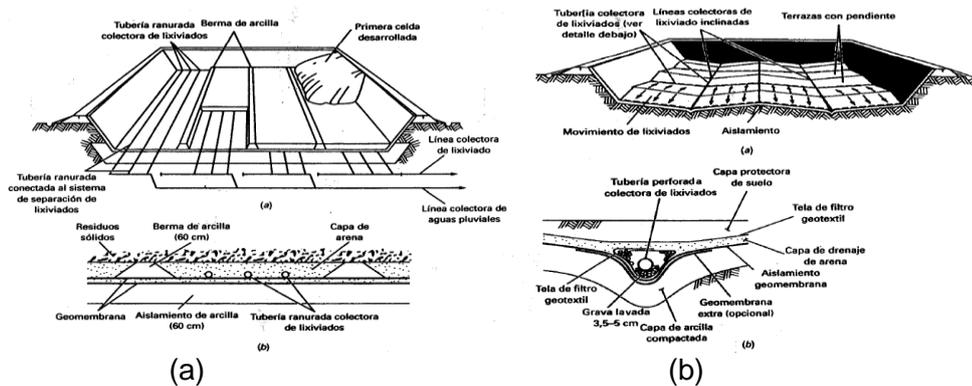


Figura 6.- (a) Fondo con tuberías en el vaso del vertedero y tuberías longitudinales. (b) Terrazas inclinadas en el fondo del vertedero y sección transversal de un canal de recogida con tubería perforada.

3. Trazado y diseño de instalaciones para canalizar, recoger y almacenar el lixiviado. Para el almacenamiento y canalización del lixiviado recogido en el fondo del vertedero se utilizan depósitos diseñados para la retención de éstos durante el periodo de máxima producción, las instalaciones más comunes en un vertedero son pozos colectores o alcantarillas. La capacidad de la instalación dependerá del tipo de instalación disponible y

de la tasa de descarga máxima permitida [19]. Estas instalaciones tienen como objetivo principal el almacenamiento y separación de los lixiviados para su tratamiento posterior.

1.4. Problemática ambiental

La generación de lixiviado mediante el arrastre de sustancias tóxicas producidas en el vertedero puede provocar graves problemas para el medio ambiente y la salud humana. Uno de los problemas más frecuentes en un vertedero no controlado es la infiltración de estos lixiviados a las aguas subterráneas, contaminando de esta manera los suelos y los acuíferos por ciertas sustancias generadas como son las organocloradas entre otras, que son bioacumulativas y persistentes en todos los eslabones de la cadena trófica. Además, algunos de los compuestos que podemos encontrar en el lixiviado contienen sustancias cancerígenas como por ejemplo el arsénico u otros metales pesados [10].

La contaminación de las aguas subterráneas de los acuíferos y pozos, tiene consecuencias perjudiciales, así como la escorrentía superficial que va parar a los ríos o se infiltra a través del suelo. Algunos de los efectos negativos que se dan con frecuencia por la lixiviación en las aguas superficiales son la muerte de peces, cambio en la flora de la zona y una clara pérdida de valor paisajístico, mientras que en las aguas subterráneas el problema puede resultar mayor ya que la contaminación persiste por largos periodos de tiempo y puede permanecer sin detectarse hasta que se extrae dicha agua para ciertos usos posteriores [10, 20].

Por otro lado como se puede ver en la figura 7, existen varias fuentes contaminantes producidas por la acumulación de residuos en un vertedero, no sólo el arrastre de los compuestos se convierte en un problema sino que la emanación de gases y malos olores también contienen efectos negativos [20, 10].

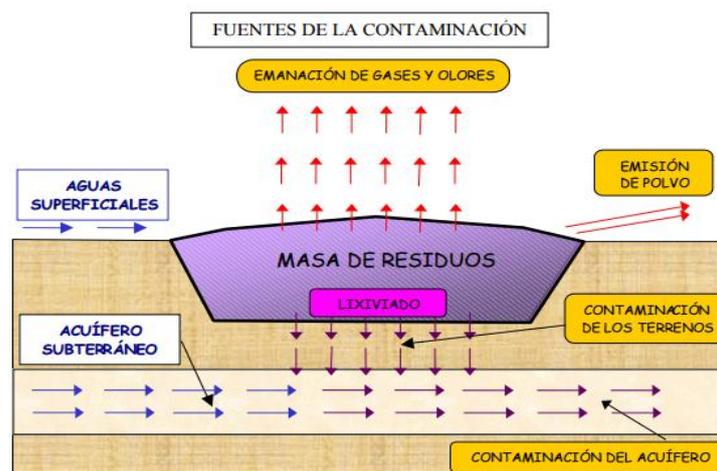


Figura 7.- Fuentes de la contaminación por acumulación de residuos en un vertedero (Botámico García. Iván. Depósito de Residuos en Vertedero.)

Además se puede convertir en otro grave problema no llevar a cabo una buena gestión, recogida de lixiviados, mantenimiento del vertedero, o una mala impermeabilización, ya

que pueden producirse roturas en el vaso generando vertidos incontrolados de lixiviado al medio ambiente.

1.4.1. Características y composición

Las características en la composición de la generación de los lixiviados dependen de diversos factores como son, la naturaleza o edad del residuo, la hidrogeología de la zona o el clima, además de un factor importante como es, el tratamiento previo de éste hasta su llegada al vertedero, así como la explotación, tratamiento y tecnología utilizado en la explotación del propio vertedero [10]. Por ello, al filtrarse el agua a través de los residuos en descomposición, se lixivian en disolución materiales biológicos y constituyentes químicos como son sales orgánicas e inorgánicas, metales pesados, y otras sustancias químicas diluidas [21], que según se trate de un lixiviado de vertedero nuevo o maduro, obtenemos valores diferentes para estos compuestos como podemos ver en la tabla 3.

Por otra parte, los mecanismos de transferencia de los contaminantes en la producción de lixiviado, hace que la composición y características de éste cambie dependiendo de la fase de generación en la que se encuentre el lixiviado, estas fases como se puede observar en la figura 8, son cinco, en las que según el tiempo transcurrido en un vertedero las características del lixiviado son muy diferentes [21, 22].

Tabla 3.- Composición media de un lixiviado joven y maduro. (Hidalgo, et al 2007. (I) Tratamientos convencionales)

Parámetro	Lixiviado joven (mg/l)	Lixiviado maduro (mg/l)
pH	4,5-7,5	6,6-7,5
DBO ₅	2.000-30.000	100-200
DQO	3.000-60.000	100-500
COT	1.500-20.000	80-160
NH ₄ -N	10-800	20-40
SS	200-2.000	100-400
Cloro	200-3.000	100-400
SO ₄	50-1.000	20-50
Ca	200-3.000	100-400
Mg	50-1.500	50-200
Fe	50-1.200	20-200

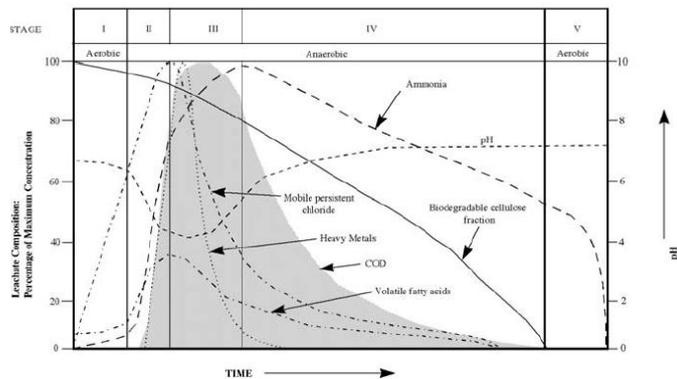


Figura 8: Fases de estabilización de la materia orgánica biodegradable en la evolución de la generación de lixiviados (Botánico García. Iván. Depósito de Residuos en Vertedero.).

Estas fases son:

- Fase I: Ajuste inicial, degradación aeróbica. En esta fase los microorganismos aeróbicos degradan los residuos biodegradables y como resultado forman, agua, CO₂, compuestos orgánicos y calor.
- Fase II: fase de transición, hidrólisis y fermentación. En esta etapa de transición se empiezan a producir condiciones anaeróbicas ya que los microorganismos empiezan a consumir oxígeno, por lo que se reducen compuestos como el nitrato y sulfato produciendo nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. Los compuestos orgánicos comienzan a hidrolizarse y a dar como productos compuestos ácidos orgánico e intermedios.
- Fase III: fase inicial o ácida. En esta fase los compuestos formados en la fase de hidrólisis anterior se transforman en ácidos grasos, aquí la carga orgánica es muy elevada y el pH baja siendo más ácido, esto facilita una subida en la concentración de metales pesados, además niveles altos de concentración de, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico Total (COT), y nutrientes.
- Fase IV: fase metanogénica. Una vez en esta fase los ácidos grasos son transformados en CO₂ y CH₄. Sube el pH y se produce una disminución de la carga contaminante al precipitar los metales pesados, además de, en los nutrientes, DBO₅, DQO y COT. Con respecto a los metales cabe decir que se debe a que son menos solubles en aguas con valores de pH neutros.
- Fase V: fase de maduración. En esta última etapa se restablecen las condiciones naturales del medio, dejando de producirse gas, y consumiéndose de manera completa los nutrientes, favoreciendo la aparición de oxígeno.

Estos valores varían muchos dependiendo del momento, del tratamiento previo, del muestreo y de la antigüedad del vertedero, esto es debido a la fase de degradación en la que se encuentre el proceso de formación del lixiviado como hemos visto anteriormente, ya que si se trata de los primeros años de operación, la carga orgánica de los lixiviados alcanza valores máximos y van disminuyendo con la edad del vertedero, todo lo contrario

que la concentración de amonio que a menudo suele constituir el principal contaminante ya que su concentración es muy alta desde las primeras fases hasta las últimas. En cuanto a los metales pesados, encontramos concentraciones más bajas en la fase IV o metanogénica, mientras que se dan valores importantes en la fase ácida [19, 21].

Los valores de pH que se den en el lixiviado van a depender tanto de la presión parcial de CO₂ del gas producido en el vertedero, como de los ácidos presentes en él [19, 21].

2. Tratamientos y tecnologías alternativas en la depuración de lixiviados: Casos de estudio.

Con el fin de minimizar tanto la producción de lixiviado en los vertederos como la contaminación sobre el medio ambiente, se han establecido ciertas medidas tanto para su recogida, como los usos alternativos para depurar el lixiviado de los vertederos.

Como expone la Directiva IPPC 96/61/CE, modificada por la **Directiva actual 2010/75/UE**, la mejor forma de reducir la contaminación es realizar una prevención en el origen, al igual que se debe evitar que la contaminación pase de un medio receptor a otro, es por ello que enfoca al uso de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD), ya que serán las que en estos momentos estén más avanzadas y constituyan un valor mínimo de emisión al medio ambiente en su conjunto. Por tanto, a continuación se exponen las técnicas y tecnologías más utilizadas actualmente para el tratamiento de los lixiviados de vertedero, así como algunos casos de estudio donde se desarrollan ó aplican estas tecnologías.

2.1. Tratamientos utilizados en la depuración de lixiviados.

Hasta el momento, no se ha descubierto el tratamiento, ni la tecnología que permita depurar de forma definitiva los lixiviados producidos en el vertedero [23], pero sí operaciones de tratamiento con las que se obtienen buenos rendimientos de depuración. Para la gestión de los lixiviados recogidos en el vertedero se han establecido varias alternativas para el tratamiento, la elección de este dependerá principalmente de la composición del lixiviado y, por lo tanto, de su edad [24].

Si el vertedero se encuentra en una zona urbana cercana a la red de alcantarillado, el lixiviado suele ser vertido a esta para ser tratados en la depuradora de aguas residuales urbanas junto con las aguas residuales, esto es debido a que los tratamientos utilizados en la depuración de aguas residuales suelen ser similares o iguales a los usados para el tratamiento de lixiviado de vertedero, eso sí, si dicha planta acepta la gran cantidad de materia orgánica que estos aportan y no entorpece el proceso de una correcta depuración de las aguas residuales urbanas.

Por otro lado, este proceso sería inviable si el vertedero se encuentra en una zona muy alejada de las grandes densidades urbanas, ya que la red de alcantarillado se encuentra muy lejos y resultaría muy costoso, por lo tanto, en estos casos se utilizarán tratamientos *in situ* del lixiviado en el vertedero [24].

Estos tratamientos se pueden clasificar de manera diferente, según el tipo de estudio o autor que los cite. La siguiente clasificación atendiendo a la bibliografía seleccionada los divide en [9, 23, 24]:

- Tratamientos convencionales, que a su vez se dividen en biológicos (aerobios o anaerobios) y físico-químicos.
- Tratamientos de bajo coste.
- Tratamientos avanzados.

A continuación se describe brevemente en qué consiste cada uno de los tratamientos de lixiviados según la clasificación escogida.

1. Tratamientos convencionales [9].

Estos tratamientos se dividen en biológicos (aerobios y anaerobios) y físico-químicos.

- Proceso aerobio: Este proceso biológico se lleva a cabo gracias a la acción de asimilación de oxígeno de los microorganismos, que asimilando la materia orgánica presente en el medio y, junto con los nutrientes que necesitan producen nuevos microorganismos, productos finales como son CO_2 , H_2O y energía [9].
- Proceso anaerobio: En este proceso biológico, a partir de la materia orgánica y en ausencia de oxígeno disuelto, los microorganismos obtienen lo que necesitan a partir de los compuestos oxigenados que se encuentra en el medio y con ello producir nuevos microorganismos, además de CH_4 , CO_2 y energía [9].
- Procesos físico-químicos: Estos procesos se llevan a cabo mediante el uso de técnicas físicas o la alteración físico-química de la disolución, con el fin de eliminar los compuestos sólidos, coloidales y disueltos presentes en la mezcla. Según la bibliografía consultada, estos procesos se suelen utilizar como pretratamiento para la eliminación de sustancias que se encuentran en la disolución a tratar y pueden interferir en las etapas de tratamiento posteriores [9].

2. Tratamientos de bajo coste [24].

Los tratamientos de bajo coste consisten en tecnologías sencillas que utilizan tanto fuentes de energía principales, como otras que aprovechan la red de alcantarillado urbano de aguas residuales para ser tratadas en conjunto con los lixiviados. Estas tecnologías se caracterizan por la sencillez de sus instalaciones, así como, el bajo coste de inversión que supone su posterior mantenimiento.

3. Tratamientos avanzados [23].

Los procesos de tratamiento de lixiviado han ido avanzando con las nuevas tecnologías, estas ponen en combinación los procesos biológicos con tecnologías de filtración avanzada o ósmosis inversa, entre otras. Todas ellas se basan en los tratamientos avanzados de separación de membranas, estos son muy efectivos en la eliminación de materia orgánica, así como iones metálicos o sólidos en suspensión, aunque tienen el inconveniente de ensuciarse sus membranas con frecuencia, disminuyendo la eficacia en el proceso de depuración de las aguas de lixiviado de vertedero.

Este estudio se ha centrado en este tipo de tratamientos y en especial en las tecnologías de membrana.

A continuación se han estudiado para cada grupo (para tratamientos convencionales, de bajo coste y avanzados) los tratamientos más relevantes y las tecnologías más utilizadas hasta el momento. Para ello se han realizado las tablas 4, 5 y 6, donde se encuentran recogidas de forma resumida cada una de las tecnologías, además de la aplicación que tienen en el tratamiento de lixiviados y algunas de las observaciones más importantes para cada una de ellas.

Tabla 4.- Resumen de procesos de tratamientos convencionales (biológicos y físico-químicos). (ATEGRUS. Unidad didáctica III: Lixiviados).

Proceso de tratamiento	Aplicación	Observaciones
Fangos activos	Separación de compuestos orgánicos	Pueden ser necesarios aditivos anti-espumantes y un clarificador separador
Reactores secuenciales por lotes	Separación de compuestos orgánicos	No precisa de clarificador separado, solamente aplicable a tasas de flujo lentas
Estanques de estabilización	Separación de compuestos orgánicos	Requiere gran superficie de terreno
Procesos de biopelícula	Separación de compuestos orgánicos	Utilizado en efluentes industriales similares a lixiviados, pero no ensayado con estos
Lagunas anaerobias	Separación de compuestos orgánicos	Requisitos de energía y producción de fangos menores que los sistemas aerobios, requiere calefacción, mayor potencial de inestabilidad, más lentos que los sistemas aerobios
Nitrificación-Desnitrificación	Separación de hidrógeno	Puede llevarse a cabo simultáneamente con la separación de compuestos orgánicos
Precipitación	Separación de metales y algunos aniones	Produce fango, que posiblemente requiera evacuación como residuo peligroso
Neutralización	Control de pH	De aplicación limitada para lixiviados
Oxidación	Separación de compuestos orgánicos, detoxificación de algunas especies inorgánicas	Funciona mejor con flujos de residuos diluidos, el uso de cloro puede provocar la formación de hidrocarburos clorados
Oxidación por aire húmedo	Separación de compuestos orgánicos	Es caro, funciona bien con compuestos orgánicos refractarios
Sedimentación-Flotación	Separación de materia en suspensión	Sólo tienen una aplicación limitada, puede utilizarse con otros procesos

Filtración	Separación de materia en suspensión	Solamente útil como proceso de afino
Arrastre por aire	Separación de amoniaco u compuestos orgánicos volátiles	Puede requerir equipamiento de control de la contaminación atmosférica
Separación por vapor	Separación de compuestos orgánicos volátiles	Altos costes energéticos, el vapor de condensado requiere tratamiento adicional
Absorción	Separación de compuestos orgánicos	Tecnología probada, costes variables según el tipo de lixiviado
Intercambio iónico	Separación de compuestos inorgánicos disueltos	Útil solamente como un paso de acabado
Evaporación	Cuando no se permite la descarga de lixiviados	Los fangos resultantes pueden ser peligrosos y costosos, excepto en zonas áridas

Tabla 5.- Resumen de procesos de tratamientos de bajo coste. (Elaboración propia).

Proceso de tratamiento	Aplicación	Observaciones
Recirculación	Para favorecer la recuperación del metano para la obtención de energía. Aumenta la humedad de los residuos, incrementa la estabilidad y la degradación biológica.	A cielo abierto produce problemas de olores y de salud para los trabajadores. Bajo coste de implantación, uso limitado a vertederos pequeños
Depuración conjunta con las aguas residuales urbanas	Para ahorrar costes de tratamiento en el vertedero, se vierten al alcantarillado, ofrecen mayor aportación de nutrientes a la depuradora. La mayoría de los lixiviados se tratan en EDAR, ya que los tratamientos son similares	Bajo coste. Uso limitado a vertederos en zonas urbanas y es necesario que el lixiviado no contenga sustancias peligrosas, requiere tratamiento previo
Técnicas de fitorremediación	Para tratar lixiviados de forma económica y por filtros naturales como son cultivos de plantas específicas, reduce sólidos en suspensión, materia orgánica, nitrógeno amoniacal y algunos metales	Inconvenientes debidos al exceso de vertido de lixiviado en los cultivos y a la falta de conocimiento del desarrollo vegetativo de las plantas sembradas en el humedal
Tratamientos con turba	Para reducir la cantidad de metales pesados y de nitrógeno amoniacal, obtiene porcentajes de eliminación elevados pero inferiores a los teóricos	Generalmente precedido por un buen pretratamiento del lixiviado. Con el tiempo disminuye el porcentaje de eliminación por eso se debe regenerar la turba cada varios días.

Tabla 6.- Resumen de procesos de tratamientos avanzados con membrana. (Elaboración propia).

Proceso de tratamiento	Aplicación	Observaciones
Ósmosis inversa	Disoluciones diluidas de compuestos inorgánicos, solutos de bajo peso molecular	Costoso, necesario un pretratamiento extensivo
Ultrafiltración	Separación de bacterias y de compuestos orgánicos con alto peso molecular, se suele usar donde los requerimientos de calidad del efluente a tratar sean bajos	Propenso al atascamiento, suele utilizarse tratamientos previos para evitar ensuciamientos
Nanofiltración	Separación de bacterias y de compuestos	Suele necesitar tratamiento

	orgánicos con peso molecular más bajo que ultrafiltración	previo para obtener buenos rendimientos de depuración
Microfiltración	Como ultra y nano-filtración pero tamaño de poro más pequeño, se suele usar donde los requerimientos de calidad del efluente a tratar sean bajos	Suele utilizar tratamiento previo para evitar ensuciamientos
Electrodialisis	Separación de especies iónicas, Para tratar la precipitación de metales pesados en lixiviados contaminados por estos.	Requiere gran cantidad de energía para su funcionamiento y precisa de tratamiento previo del lixiviado

2.2. Tratamientos avanzados con tecnologías de membrana.

Los procesos de filtración a través de membranas son operaciones en las que las membranas se comportan como una barrera semipermeable para las partículas, iones o moléculas, que modifica o impide de manera selectiva la circulación a su través de algunos de los componentes de la mezcla, favoreciendo la cinética de la separación. Las membranas se pueden clasificar según su tamaño de poro, que está relacionado con el tamaño de los iones, moléculas o partículas que se quieren separar y que van a quedar retenidas en las mismas.

Los procesos basados en la separación del agua, de sales y otros componentes por los tratamientos de membrana, como se puede observar en la tabla 6, se clasifican según la bibliografía consultada, por su tamaño de poro como [23]: ósmosis inversa (OI), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), microfiltración (MF) y electrodiálisis.

Estos tratamientos se ha demostrado que son útiles para el tratamiento de lixiviados de vertedero, ya que todos ellos han sido aplicados en la práctica, y se han obtenido resultados con una alta eficacia en la eliminación de algunas sustancias presentes en los lixiviados maduros además de, sales inorgánicas, compuestos nitrogenados, compuestos halogenados o sustancias inorgánicas [23].

A continuación se exponen algunos de los aspectos más importantes de cada uno de éstos procesos, además se describirá brevemente en qué consiste las tecnologías de biorreactores de membrana (BRM).

1. Microfiltración

La microfiltración resulta útil en procesos donde los requerimientos de calidad del efluente sean bajos [23]. Esta tecnología posee unas membranas con un tamaño de poro de $> 0,15 \mu\text{m}$, por eso la hace interesante y eficaz en la separación de macromoléculas, coloides y la materia en suspensión presente en los lixiviados [25]. Este tratamiento no puede utilizarse solo y es por ello que se utiliza como pretratamiento de UF, NF o OI, ó asociado con tratamientos químicos [25].

En un estudio realizado en 2015 por Amaral et al., se describe un método que consiste en la combinación de varios procesos para la eliminación de contaminantes del lixiviado generado en el vertedero. Primero se sometió a un pretratamiento por MF, tras este se

pasó a un proceso de precipitación química y por último a un proceso de NF. La combinación de estos procesos dió como resultado un efluente claro e incoloro, además de una alta tasa de eliminación de la materia tanto orgánica como inorgánica. En el estudio destaca que los resultados demostraron la importancia que tenían los procesos de membrana en la calidad del tratamiento de lixiviado, como también, que el pretratamiento de MF había evitado de forma considerable el ensuciamiento de las membranas, debido a la retención de las sustancias húmicas que son propensas a causar ensuciamiento en los tratamientos de NF [26].

2. Ultrafiltración

Esta técnica consiste en el proceso de selección de los solutos que atraviesan la membrana determinado por el tamaño de poro de ésta. La UF es muy eficaz para la eliminación de partículas y macromoléculas, como son materia orgánica o moléculas de contaminantes orgánicos presentes en un lixiviado dado [25]. Las membranas de estas tecnologías contienen un tamaño de poro de entre 5×10^{-2} m – 0,15 m. Estos tratamientos se suelen utilizar donde los requerimientos del efluente sean bajos. Además es frecuente el ensuciamiento en sus membranas por lo que es común utilizar algún tratamiento previo como OI o NF [23].

En un estudio realizado en 2010 por Sun et al. se aplicaron dos tipos de membranas de UF diferentes para realizar una comprobación y ver cuál de ellas era más idónea para mejorar el tratamiento de lixiviado de vertedero. Los resultados del estudio pusieron de manifiesto que los dos tipos de membranas de UF eran efectivos casi por igual para la eliminación de los diferentes componentes contaminantes que se encontraban en el lixiviado. Demostrando así la eficacia de este tratamiento de membrana para el tratamiento de los lixiviados de vertedero [27].

En otro estudio realizado en 2008 por García et al. en una planta de reciclado y compostaje de Onda, se usó para el tratamiento de los lixiviados generados una combinación de procesos que tras el tratamiento físico-químico se utilizó un sistema de filtros de cartucho previo a una UF y más tarde a un proceso de OI en dos etapas. Los resultados obtenidos arrojaban unos buenos rendimientos de depuración de los lixiviados para parámetros como DQO, amonio y conductividad del 99 %, lo que permitió a la Planta de Reciclaje y Compostaje a conseguir la autorización del vertido a cauce por la Confederación Hidrológica del Júcar [28].

3. Nanofiltración

Al igual que la UF este proceso consiste en la selección del paso de solutos a través de sus membranas mediante un tamaño de poro elegido para dicho fin. Esta tecnología presenta múltiples beneficios para el tratamiento de lixiviados así como para la calidad del agua, ya que con él se obtienen un buen control de la materia orgánica, inorgánica así como de los contaminantes microbianos presentes en los lixiviados [25]. La NF es un proceso con características intermedias entre la OI y la UF referida al tamaño de poro [23], y con ello a la retención de compuestos, concretamente ésta técnica posee un tamaño de poro que retiene moléculas de entre 5×10^{-3} m – 5×10^{-2} m, por lo que permite un alto rendimiento de eliminación de compuestos como iones sulfato, materia orgánica

disuelta o cloruro de sodio, además de reducir de forma considerable el volumen de concentración [25]. Esta tecnología se suele utilizar también en combinación con otros procesos para una mayor eficacia en el tratamiento de lixiviados de vertedero.

Košutić et al. estudiaron un lixiviado del vertedero de Jakuševac, Zagreb, Croacia. Este fue tratado con una combinación de sistemas de tratamiento de NF y OI, además antes de la filtración se utilizó un proceso de coagulación. Durante el tiempo que se llevó a cabo el estudio se tomaron análisis en todas las etapas de los valores en parámetros de carbono total, COT, carbono inorgánico, DQO, pH, turbidez, conductividad, concentración de iones inorgánicos o metales pesados, entre otros. El objetivo final del estudio era obtener valores de los contaminantes del lixiviado por debajo de los niveles máximos permitidos por la legislación Croata y de la Unión Europea. Como resultado tras el proceso de NF y OI se obtuvieron tasas de eliminación del >94.6 % y >92.5 % para DQO y COT, y un poco más bajas para iones amonio con una tasa del 88.9 %. Como conclusión se obtuvieron valores muy satisfactorios [29].

En un trabajo realizado en 2015 por C. Miriam et al. se evaluó el proceso combinado de arrastre con aire como tratamiento inicial, tras éste se hace pasar el lixiviado de vertedero por un sistema de BRM y por último se trata con un sistema de NF. El resultado fue una eficacia en la eliminación de la mayoría de los parámetros analizados, como fueron en el amoníaco, color, toxicidad y DQO del 88 %, 95 %, 100 % y 100 %. Como conclusión el sistema de NF en combinación con el BRM y arrastre con aire, demostró ser muy eficaz en la eliminación de compuestos orgánicos, alta toxicidad, nitrito y nitrato, además el lixiviado tratado con este proceso de tratamiento puede ser reutilizado para otros fines en el propio vertedero u obras de construcción [30].

4. Ósmosis inversa

Esta técnica es muy utilizada para tratamientos tanto de acondicionamiento de lixiviados de vertedero, como para desalación de aguas o la depuración de aguas residuales. Con esta técnica se consigue retener tanto compuestos orgánicos como inorgánicos y se obtienen resultados en los efluentes muy eficaces, baja concentración en materia orgánica y la eliminación casi total de sales, obteniéndose rendimientos de eliminación muy satisfactorios de la DQO [23]. Esta eficacia depende de varios factores en las membranas como son el material del que esté hecha.

En algunos trabajos ya realizados para comprobar la eficacia de las membranas dependiendo del material que estén hechas según Chian y DeWalle, para la eliminación del COT presente en los lixiviados de vertedero se llegaron a obtener resultados del 88 % de eliminación de este compuesto, utilizando membranas de poliamida, mientras que con membranas de celulosa obtuvieron peores resultados [31].

Otros estudios en el pasado, realizado tanto en laboratorios como a nivel industrial han demostrado que el tratamiento de OI es uno de los métodos más eficientes para tratar los lixiviados de vertedero, ya que los resultados obtenidos en estos estudios fueron de rendimientos de eliminación del 98 % y 99 % para DQO como para la concentración de metales pesados [25].

La OI no resulta útil para la retención de lixiviados con contenidos en ácido y otras especies volátiles, para ello es necesario combinarlo con un pretratamiento biológico [32]. Otra de las ventajas que proporciona esta tecnología es que no requiere de un alto consumo energético [32]. Por otro lado según la bibliografía consultada, este tratamiento presenta algunos inconvenientes referentes al ensuciamiento y colmatación de sus membranas, lo que obliga a realizar continuos lavados, retrolavados, limpiezas y reemplazos de las membranas, lo que aumenta el coste de la operación como en el mantenimiento [32].

Algunos estudios actuales que pone en práctica este tratamiento de OI, como el realizado por Smol et al. , que se han publicado en el año 2016, estos autores trabajaron con este sistema de OI para el tratamiento de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), ya que se tratan de componentes comunes en lixiviados de vertedero y que por sus propiedades mutagénicas y carcinogénicas su presencia en el entorno sigue siendo de vital atención. Para ello tomaron muestras de lixiviado de un vertedero dónde tras una primera prefiltración se encontraron tras el análisis 16 PAHs listados por la EPA. Tras someter el lixiviado al tratamiento de OI se confirmó la alta eficiencia de eliminación de estos compuestos, obteniendo resultados de eliminación entre (81 % - 86 %). La concentración antes de la prefiltración era de 23,64 m/L – 26,95 m/L, mientras que tras el proceso de filtración y OI fue de 4,46 m/L – 4,99 m/L [33].

Talalaj desarrolló un estudio en el que se proponía evaluar la eficacia de eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en los lixiviados mediante el proceso de OI a largo plazo. Las investigaciones se llevaron a cabo durante el primer año de explotación, en este período de tiempo se analizaron más de 20 parámetros en los lixiviados. Los resultados obtenidos tras este período de tiempo con este tratamiento, fueron eficaces para la mayoría de los contaminantes presentes en el lixiviado analizado, obteniendo tasas de eliminación de DQO, conductividad, nitrógeno amoniacal, nitrógeno inorgánico total, cianuros, hierro y cloruros del 97 %, 97.2 %, 98.7 %, 99 %, 93 %, 97,6 % y 98 %, respectivamente. Mientras que en otros compuestos como sulfatos y sulfuros se obtuvieron rendimientos de eliminación algo más pequeños siendo del 83 % y 86 %. En otros como el boro se consiguió eliminar en un 81 %, mientras que en nitritos y nitratos fue tan sólo del 63.8 %. Demostrando así la efectividad de este tratamiento para la mayoría de los componentes [34].

5. Electrodiálisis

La electrodiálisis es un proceso por el que a través de una serie de membranas permeables de forma selectiva y mediante una corriente eléctrica se separan moléculas de especies iónicas, macrosolutos y todos los solutos sin carga [35], esto se produce mediante una serie de membranas catiónicas y aniónicas colocadas de forma selectiva y entre dos electrodos, por entre los que se hace circular el lixiviado que se quiere tratar. Este método resulta muy útil para el tratamiento de lixiviados procedentes de vertederos con residuos peligrosos [23]. Numerosos estudios que ponen en práctica este sistema de tratamiento, coinciden en que se trata de una de las tecnologías de membranas más innovadoras actualmente para la depuración de lixiviado de vertedero.

6. Biorreactores de membrana

Los BRM consisten en sistemas que combinan procesos de depuración biológicos con los de separación con membranas, como son los mencionados en apartados anteriores, OI, NF, UF y MF. En este proceso combinado el lixiviado a depurar es transportado desde el reactor biológico al sistema de separación con membranas, dónde una vez ahí éstas van a retener los sólidos en suspensión y la biomasa que se genera en el biorreactor. Tras pasar por el sistema de separación de membranas, parte de la biomasa generada anteriormente se recircula de nuevo al sistema y el agua depurada se evacua del proceso [23].

Puede haber tantos biorreactores como posibles combinaciones de tratamientos biológicos y de filtración se puedan realizar. Estos biorreactores son muy útiles para lixiviados con composiciones muy variadas, dependiendo de la calidad del efluente que se quiera conseguir [23], por ello se pueden utilizar tanto para lixiviados de vertederos jóvenes como de vertederos maduros, para los que se elegirá el tipo de combinación de depuración adecuado en el proceso, consiguiendo muy buenos resultados en los compuestos que se quieren eliminar.

Varios autores coinciden en que una gran ventaja de estos sistemas es que pueden operar a temperatura ambiente, además de que las membranas no necesitan adición de sustancias químicas agresivas para realizar el proceso de depuración de lixiviados [23], lo que hace que sean procesos de tratamientos alternativos muy respetuosos con el medio ambiente, además de económicos.

3. Conclusiones

Una vez completada la revisión bibliográfica se ha comprobado como los lixiviados generados en el vertedero constituyen un problema importante si no se lleva a cabo un correcto tratamiento para su depuración, y como con el tiempo se han desarrollado numerosas tecnologías alternativas para su tratamiento. Las conclusiones que se obtienen durante el desarrollo del trabajo son las siguientes:

1. Respecto a la cantidad de información disponible en la red, encontramos un gran número de páginas web al introducir los conceptos clave sobre este tema en concreto, que tras realizar la selección de las fuentes más útiles y fiables, los artículos consultados han resultado un porcentaje muy bajo, al igual que los documentos que realmente han sido de utilidad.
2. Tras analizar la información referida a las cantidades de lixiviados generados, encontramos que no existen datos oficiales sobre este tema en concreto, debido a que depende de factores como el clima, geología, edad, explotación, hidrología, situación geográfica, por lo que tanto la cantidad como la composición varían con el tiempo y el lugar. Se ha establecido un balance hídrico para su cálculo de producción. Por otro lado, sí aparece información útil sobre la cantidad de residuos generados y que

finalmente acaban en el vertedero, encontrando que tanto a nivel global como europeo el porcentaje varía en función del nivel de desarrollo económico de cada país, siendo los países más desarrollados los que más residuos generan, pero los que menos porcentaje de estos envían a vertedero, debido a los usos alternativos y tratamientos que se aplican a estos residuos. Con respecto a nivel nacional España todavía envía más del 50 % de los residuos que genera.

3. No se ha encontrado una normativa concreta sobre los lixiviados de vertedero, pero sí varias a nivel europeo, estatal y regional, que hablan de sus buenas prácticas de gestión en el vertedero, además de otras en las que califica estos líquidos como una sustancia peligrosa por sus características.
4. Se ha comprobado que el principal problema ambiental de la generación de lixiviados en el vertedero es la contaminación de las aguas tanto superficiales por escorrentía como subterráneas por infiltración de éstos a través de alguna rotura en el vaso o mala impermeabilización del propio vertedero. Para evitar éste y otros problemas se instalan sistemas de gestión y recogida en el vertedero antes de su explotación.
5. Todavía no se ha descubierto el tratamiento, ni la tecnología que permita depurar de forma definitiva los lixiviados de vertedero, aun así se han llevado a la práctica numerosas técnicas muy eficaces en la eliminación de algunos de los componentes contaminantes que contienen los lixiviados. Hasta el momento, las tecnologías más actuales en la depuración de lixiviados de vertedero son los tratamientos avanzados con membranas, entre ellas destacan por su efectividad y modernidad los biorreactores de membrana y la electrodiálisis.

4. Referencias

[1] Ministerio de Agricultura, Alimentación y medio Ambiente. Terminología: lixiviado. Calidad y evaluación ambiental. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/terminologia/> (consultado el 20 de febrero de 2016).

[2] Real Academia Española. Diccionario de la lengua española. Edición del Tricentenario. Disponible en <http://dle.rae.es/?id=NT2erac> (consultado el 21 de febrero de 2016).

[3] Hidalgo, A. M. 2015. Tema 2: *Gestión de RSU*. Universidad de Murcia.

[4] CEAMSE. Glosario de término: Líquidos lixiviados. Disponible en <http://www.ceamse.gov.ar/glosario/liquidos-lixiviados/> (consultado el 21 de febrero de 2016).

[5] OSMAN (Observatorio de salud y medio ambiente de Andalucía). Diccionario: Definición de lixiviado del IPCS. Disponible en <http://www.osman.es/ficha/13121> (consultado el 21 de febrero de 2016).

- [6] Blogecologista. ¿Que son los lixiviados? Disponible en <http://blogecologista.com/contaminacion-que-son-los-lixiviados/> (consultado el 21 de febrero de 2016)
- [7] Wikipedia. Concepto de lixiviado. Disponible en <https://es.wikipedia.org/wiki/Lixiviado> (consultado el 21 de febrero de 2016).
- [8] Primo Martínez, O. 2009. *Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada*. Universidad de Cantabria.
- [9] Bódalo, A., Hidalgo, A. M., Gómez, M., Murcia, M. D., & Marín, V. 2007. Tecnologías de tratamiento de lixiviados de vertedero (I): tratamientos convencionales. *Ingeniería Química*, (451), 142-149.
- [10] ATEGRUS. 2010. Curso sobre Introducción a la Gestión de Vertederos, Unidad didáctica III: Lixiviados. *Ategrus*. Disponible en http://www.ategrus.org/images/stories/residuos/vertederos/ategrus_lixiviados_11_JUN_2010.pdf (consultado el 26 de febrero de 2016).
- [11] Waste Management World. 2012. Global municipal solid waste to double by 2025. Disponible en <https://waste-management-world.com/articles/2012/07/global-municipal-solid-waste-to-double-by-2025.html> (consultado el 26 de febrero de 2016).
- [12] Hoornweg, D & Bhada-Tata. P. 2012. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. *World Bank*. Disponible en http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf (consultado el 29 de febrero de 2016).
- [13] Eurostat. 2013. Gestión de residuos en el mundo. Disponible en <http://gestionderesiduosonline.com/wp-content/uploads/2016/03/Eurostat1.jpg> (consultado el 29 de febrero de 2016).
- [14] European Commission. 2015. Environment studies: Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU (2015). Disponible en <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/index.htm> (consultado el 2 de marzo 2016).
- [15] Barras Quilez F. 2013. Anejo IV Producción de lixiviados. *Proyecto de construcción de la celda nº 1 de vertido del vertedero de residuos no peligrosos del complejo ambiental de zonzamas (lanzarote)*. Cabildo de Lanzarote: Consejería de Medio Ambiente.
- [16] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2016. Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/Planes-y-Programas.aspx> (consultado el 3 de marzo de 2016).
- [17] Pastor Piñeiro, J .CSIC. 1994. *Vertederos controlados. Problemática de los lixiviados*. Universidad Autónoma de Madrid.

- [18] CARM. 2015. Plan de Residuos de la Región de Murcia. *Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental*. Disponible en http://www.murcianatural.carm.es/alfresco/service/participacion/plan_residuos?quest=true (consultado el 4 de marzo de 2016).
- [19] Tchobanoglous, G. 1994. Evacuación de Residuos Sólidos y Rechazos. *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Mc Graw Hill. pp: 469-499.
- [20] Al-Mefleh, M. N. L., & Muñoz, D. A. H. 2003. *Investigación relativa a la minimización de lixiviados en vertederos y su depuración*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [21] Cárdenas Sánchez A.C. 2012. Capítulo 5: Marco teórico. *Trabajo Fin de Máster: Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios*. Universidad de Sevilla.
- [22] Botámico García. Iván. Depósito de Residuos en Vertedero. Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental. *Escuela de Organización Industrial (EOI)*. Disponible en http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45615/componente45613.pdf. (consultado el 4 de abril de 2016).
- [23] Hidalgo, A. M., Bódalo, A., Gómez, M., Murcia, M. D., & Marín, V. 2007. Tratamiento de Residuos-Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertedero (III)-Tratamientos avanzados. *Ingeniería química*, (454), 108.
- [24] Bódalo, A., Hidalgo, A. M., Gómez, M., Murcia, M.D. & Marín, V. 2007. Tecnologías de tratamiento de vertedero (II) Tratamientos de bajo coste. *Ingeniería Química*, (452), 204-213.
- [25] Peng, Y. 2013. Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*. [doi:10.1016/j.arabjc.2013.09.031](https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.09.031).
- [26] Amaral, M. C. S., Pereira, H. V., Nani, E., & Lange, L. C. 2015. Treatment of landfill leachate by hybrid precipitation/microfiltration/nanofiltration process. *Water Science and Technology*, 72(2), 269-276.
- [27] Sun, L.M., Shi, Q.L., Li, L., Gu, Z. 2010. *Ind Saf Environ Prot* 36, 14–16.
- [28] Castillo, J. G., Ferrer, C., Moliner, F., Donato, J., & Albarrán, F. 2008. Tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante proceso combinado de ultrafiltración y ósmosis inversa. *Retema: Revista técnica de medio ambiente*, 21(127), 20-29.
- [29] Košutić, K., Dolar, D., & Strmecky, T. 2015. Treatment of landfill leachate by membrane processes of nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination and Water Treatment*, 55(10), 2680-2689.
- [30] Amaral, M. C., Moravia, W. G., Lange, L. C., Zico, M. R., Magalhães, N. C., Ricci, B. C., & Reis, B. G. 2016. Pilot aerobic membrane bioreactor and nanofiltration for municipal

landfill leachate treatment. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 51(8), 640-649.

[31] Chian, E. S. K., & DeWalle, F. B. 1977. Treatment of high strength acidic wastewater with a completely mixed anaerobic filter. *Water Research*, 11(3), 295-304.

[32] REYES MEDINA, M. A. N. U. E. L. 2015. *Lixiviados en plantas de residuos. Una contribución para la selección del proceso de tratamiento*. Universidad Politécnica de Valencia.

[33] Smol, M., Włodarczyk-Makula, M., Mielczarek, K., Bohdziewicz, J., & Włóka, D. 2016. The use of reverse osmosis in the removal of PAHs from municipal landfill leachate. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 36(1), 20-39.

[34] Talalaj, I. A. 2015. Removal of organic and inorganic compounds from landfill leachate using reverse osmosis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(9), 2791-2800.

[35] Murcia, M.D. 2016. *Tema 7: Bases de la Ingeniería Ambiental*. Universidad de Murcia.