



**RECOMENDACIONES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS
DE UBICACIÓN, DISEÑO Y PROGRAMAS DE VIGILANCIA EN
VERTEDEROS. V.1.**





Objetivos y alcance de las recomendaciones

Unos años después de la entrada en vigor del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, el entonces Ministerio de Medio Ambiente barajó la posibilidad de desarrollar sus anejos I y III- Requisitos generales para todas las clases de vertederos y Procedimientos de control y vigilancia en fases de explotación y mantenimiento posterior, respectivamente- mediante una orden ministerial. En tal sentido se redactó un borrador de orden que sin llegar a tomar fuerza de norma al no haber sido finalmente publicado fue objeto de amplia difusión entre autoridades ambientales y particulares del sector.

En muy buena medida las recomendaciones que aquí se presentan atienden al contenido del borrador mencionado y lo complementan con una ampliación sustancial del capítulo relativo a los planes de vigilancia de los vertederos, así como al establecimiento de criterios para evaluar los resultados de dichos planes.

La adopción de estas recomendaciones obedece pues a la necesidad de contar con una guía que, recogiendo las mejores prácticas internacionales disponibles en materia de vertido, oriente a las autoridades ambientales en la concesión de nuevas autorizaciones de vertederos. Se entiende además que parte de su contenido, particularmente el relativo a la vigilancia y control de vertederos, ha de ser igualmente de utilidad en aquellos vertederos ya en activo o en periodo de vigilancia postclausura.

El artículo 16.5 del Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, que ha venido a reemplazar al arriba mencionado, indicaba el compromiso de este departamento ministerial de elaborar una instrucción técnica a ser aprobada mediante orden ministerial para determinar bajo qué circunstancias un vertedero ya clausurado dejaba de constituir un riesgo para el medio ambiente. Sin prejuzgar cuál vaya a ser la forma que finalmente vaya a tomar la mencionada instrucción técnica, resulta evidente la importancia de evaluar cuidadosamente los resultados de los planes de vigilancia en el entendimiento de que uno de los mejores instrumentos para hacer análisis prospectivo - determinar el momento de no riesgo para un vertedero clausurado no deja de ser una predicción a muy largo plazo- es analizar el comportamiento pasado. En tal sentido, algunas de las cuestiones abordadas en estas recomendaciones deben entenderse como parte de los trabajos preparatorios de la citada instrucción técnica.





ÍNDICE

I. CRITERIOS PARA LA UBICACIÓN DE VERTEDEROS

1. Terrenos en zonas restringidas7
2. Terrenos con limitaciones..... 10

II. ESTUDIOS RECOMENDADOS PARA LA UBICACIÓN DE UN VERTEDERO

1. Datos Meteorológicos..... 16
2. Reconocimiento geológico, geotécnico e hidrogeológico de los terrenos en que se pretende ubicar un vertedero..... 17

III. ELEMENTOS DE DISEÑO DE VERTEDEROS

1. Sistemas de recogida y evacuación de aguas pluviales. 25
2. Barrera geológica artificial, sistemas de impermeabilización lateral-de fondo, cubiertas de sellado...26
3. Estabilidad de los vertederos. 34

IV. PROGRAMAS DE VIGILANCIA DE VERTEDEROS EN FASE ACTIVA Y POSTCLAUSURA. VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS PROGRAMAS: INCUMPLIMIENTOS Y NIVELES DE INTERVENCIÓN

1. Introducción..... 37
2. Vigilancia de lixiviados 38
3. Vigilancia de las aguas subterráneas. 40
4. Vigilancia de la estabilidad del vertedero..... 42
5. Vigilancia de gases de vertedero. 43

ANEXO: VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROGRAMA DE VIGILANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

1. Métodos de interpretación de los resultados de los programas de vigilancia de las aguas subterráneas y requisitos generales de aplicación. 46
2. Consideraciones sobre los datos del programa de vigilancia de aguas subterráneas..... 47
3. Observaciones por debajo del límite de detección o cuantificación. 50
4. Descripción de los métodos de comprobación y requisitos específicos de aplicación. 51
5. Aplicación simultánea de más de un método de interpretación..... 54
6. Bibliografía recomendada y aplicaciones informáticas. 54



I. Criterios para la ubicación de vertederos



En relación con los criterios de ubicación de vertederos de nueva construcción se establecen dos categorías de terrenos:

- Terrenos en zonas restringidas

Incluyen aquellos para los que, en razón de alguna de las características que se enumeran a continuación, se estima que existe una incompatibilidad absoluta no siendo aptos para soportar una instalación de vertido de residuos.

- Terrenos con limitaciones

Incluyen aquellos en que la autorización para la instalación está condicionada a la comprobación del cumplimiento de determinados requisitos.

1. Terrenos en zonas restringidas.

1.1. Áreas inestables.

Zonas donde se hayan identificado evidencias (cartográficas, históricas, mediciones o reconocimientos técnicos) que indiquen la existencia de un peligro significativo asociado a procesos de deslizamiento, movimientos de tierras, movimientos en masa o caída de bloques que afecten a los terrenos en los que se pretenda ubicar el vertedero.

Respecto a aquellas zonas en las que existan procesos de deslizamiento, movimientos de tierras, movimientos en masa o caída de bloques, se establecerá una zona de separación de 100 m entre el límite periférico de las instalaciones de vertido y la identificada por la potencial inestabilidad.

1.2. Áreas volcánicas.

No podrá ubicarse el vertedero sobre o en el interior de calderas volcánicas, conos volcánicos o cráteres activos o en aquellos inactivos que por su estado de conservación y singularidad constituyan un elemento de interés cultural catalogado, protegido o en trámite de protección.

Estará restringida la ubicación en aquellas localizaciones en las que la identificación de evidencias (cartográficas, históricas, mediciones o reconocimientos técnicos) indiquen la existencia de un peligro significativo por procesos de erupción (desplazamiento de lava, recorrido de coladas, etc.) que supongan un potencial daño al vertedero incompatible, total o parcialmente, con su integridad, seguridad y estabilidad. Respecto a la calificación del riesgo volcánico se deberá tener en cuenta las evidencias que consideren, como mínimo, los procesos activos de los últimos 500 años.

1.3. Áreas cársticas y cavidades subterráneas.

La ubicación del vertedero no podrá suponer la ocupación, el cierre de dolinas, o simas indicadoras de sistemas cársticos de desarrollo vertical.

Tampoco se podrá localizar en zonas afectadas por inestabilidad o asiento por la presencia (en superficie o profundidad) de sistemas cársticos de desarrollo horizontal o vertical (cavidades naturales o artificiales).

Las instalaciones de vertido se situarán a una distancia de 100 m, tomada entre el perímetro exterior de la instalación y el límite de la zona en la que tienen lugar los citados procesos.



Ni los vertederos ni sus instalaciones auxiliares podrán suponer la destrucción, cierre o relleno de sistemas cársticos en los que existan colonias estables de quirópteros o que presenten patrimonio catalogado de tipo cultural, histórico-artístico, turístico o deportivo en su interior. En estos casos también se aplicará la distancia de restricción de 100 m.

1.4. Zonas con riesgo de aludes.

Serán objeto de restricción aquellas zonas en las que exista un peligro significativo por aludes derivados de la acumulación estacional de nieve, así como aquellas en las que los potenciales efectos derivados de los mismos supongan un grave daño a la integridad, estabilidad y seguridad ambiental de la instalación.

1.5. Aguas superficiales continentales y zonas costeras.

No podrá ubicarse un vertedero en terrenos de Dominio Público Hidráulico, incluyendo los cauces de corrientes naturales continuas, manantiales, lagos, lagunas, charcas, embalses, canales, y espacios ocupados por extensiones permanentes con presencia de lámina libre públicos o privados, así como las riberas, márgenes, sus zonas de servidumbre y policía de acuerdo a lo establecido por el Título primero del Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.

Tampoco se podrán ubicar vertederos en las zonas relacionadas en el Anexo IV de la Directiva 2000/60/CE, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, y que en el momento del inicio del expediente de autorización se encuentren incluidas en el registro previsto por el artículo 6 de la citada Directiva.

No se podrán ubicar vertederos en zonas con riesgo de inundación (delimitado por evidencias de cálculo, registros históricos o registros geológicos sedimentarios) por las aguas para la avenida correspondiente a un período de retorno mínimo de 100 años para el caso de vertederos de residuos no peligrosos e inertes y de 500 años para el caso de vertederos de residuos peligrosos. También se prohíbe la ubicación de vertederos de residuos no peligrosos y residuos peligrosos en zonas ocupadas por el primer nivel de terrazas activas asociadas a sistemas fluviales cuando se establezca que están relacionadas con la avenida correspondiente a los periodos de retorno de 100 y 500 años respectivamente.

La localización de la instalación de vertido considerará la presencia de embalses, presas artificiales y canales principales abiertos dedicados a regadío o abastecimiento (teniendo en cuenta si el vertedero se sitúa aguas arriba o abajo del embalse respecto a su cerrada). Tomadas respecto al límite entre la instalación de vertido y el perímetro de protección establecido para dichas infraestructuras se guardarán las siguientes distancias:

Elemento	Tipo de Vertedero	Distancia ¹	
		Aguas arriba	Aguas abajo
Embalses para Abastecimiento o Riego y Canales abiertos para abastecimiento o riego	Inerte	500 m	250 m
	No Peligroso	1000 m	500 m
	Peligroso	2000 m	1000 m
Embalses dedicados a Baño, Navegación o uso Ecológico	Inerte	250 m	250 m
	No Peligroso	1000 m	250 m
	Peligroso	2000 m	1000 m

1. Estos valores de referencia serán de aplicación cuando la localización de la instalación de vertido se encuentre en la misma cuenca de aportación que el embalse.



No se podrán ubicar vertederos en terrenos del Dominio Público Marítimo-Terrestre, así como en las zonas de servidumbre de protección, de tránsito y de acceso al mar de acuerdo con lo dispuesto en el título II de la Ley 22/1988 de Costas y en su Reglamento de desarrollo (R.D. 876/2014).

1.6. Aguas subterráneas y acuíferos.

En relación con la prohibición de ubicación de vertederos, se tendrán en cuenta los aspectos de planificación hidrológica, de protección del dominio público hidráulico, de la calidad de las aguas continentales, perímetros de protección y acuíferos establecidas en los títulos III y V del R.D.L. 1/2001.

Igualmente, y atendiendo a la consideración de las aguas subterráneas y los acuíferos como un bien público de interés general e independientemente que sean o no objeto de aprovechamiento para fines públicos o privados, se establece la incompatibilidad de ubicar instalaciones de vertido de residuos sólidos no peligrosos o peligrosos dentro de la zona correspondiente a la isócrona de 50 días para todo tipo de vertederos, dentro de la zona correspondiente a la isócrona de 5 años para vertederos de residuos no peligrosos y residuos peligrosos, y dentro de la zona de captación que es fuente de suministro para el caudal objetivo de la captación de aguas subterráneas. Estos criterios serán de aplicación a los perímetros de protección de captaciones aprobados, en proceso de aprobación o cuando estando en proceso de investigación, los resultados de ésta hayan sido debidamente comunicados al organismo competente de su autorización.

La distancia vertical existente entre la cota mínima del fondo de excavación o de apoyo del sistema de impermeabilización artificial y el nivel freático medio en los 10 últimos años previos a la solicitud de autorización de vertedero será superior a 5 m para vertederos de residuos peligrosos y superior a 2 m para vertederos de residuos no peligrosos y de residuos inertes. En cualquier caso, el nivel freático en un periodo húmedo no podrá alcanzar la cota mínima del fondo de excavación del vaso de vertido o de apoyo del sistema de impermeabilización artificial².

1.7. Zonas húmedas (humedales).

Los vertederos deberán ubicarse fuera de cualquiera de los espacios incluidos en la última actualización disponible, en el momento de la autorización de la instalación, del Inventario Español de Zonas Húmedas elaborado en cumplimiento del R.D. 435/2004, y de los perímetros de protección que pudiesen estar asociados a los mismos.

1.8. Espacios naturales protegidos.

Los vertederos de residuos peligrosos y no peligrosos no podrán ubicarse en los terrenos ocupados por espacios naturales protegidos a no ser que se haya previsto expresamente su compatibilidad en los instrumentos de ordenación (PORN y/o PRUG) de acuerdo con la ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. En este último caso, para los vertederos de residuos peligrosos localizados aguas arriba del espacio natural protegido, se guardará una distancia mínima 2.000 m tomada entre el perímetro de la instalación y el de los citados espacios naturales

2. A los efectos de la presente restricción para establecer la posición del nivel freático medio se tendrá en cuenta la identificación de su posición en condiciones normales durante un período húmedo y un periodo seco. Además, mediante el correspondiente estudio hidrogeológico se analizará la probabilidad de que un ascenso excepcional del nivel freático pudiese alcanzar la zona de implantación del vaso. Para estas situaciones de ascenso excepcional del nivel freático y en caso de ser necesario, se incorporarán los sistemas de subdrenaje (separados respecto a la red de lixiviados) que garanticen que aún en esta circunstancia excepcional no se produce entrada de agua freática en la masa de residuos.



1.9. Vías pecuarias.

No podrán ubicarse vertederos en vías pecuarias reguladas por la Ley 3/95 de Vías Pecuarias y la normativa autonómica que la complementa. Además, el vertedero respetará una distancia mínima de 50 m para cañadas y cordeles y de 10 m para vías de rango inferior a éstas.

1.10. Zonas residenciales, de equipamientos sanitarios o educativos.

Se respetarán las siguientes distancias mínimas entre el perímetro del vertedero y:

- Suelo Urbano (SU) o Suelo Urbanizable Programado o no (SUP o SUNP) o Suelo Apto para Urbanizar (SAU) de núcleos urbanos³ y núcleos de población definidas por las normas de planeamiento en vigor o en fase de aprobación que hayan sido sometidas a información pública en el momento de la autorización del vertedero y zonas reservadas para equipamientos educativos o sanitarios: 1000 m para vertederos de residuos inertes, 2000 m para vertederos de residuos no peligrosos y 4000 m para vertederos de residuos peligrosos.
- Elementos del patrimonio arquitectónico y/o cultural tomados respecto al perímetro declarado para la protección de los mismos: 100 m a las instalaciones de vertido, cualquiera que sea su categoría.

En relación con los vertederos en activo debidamente autorizados y legalizados, las modificaciones y nuevas aprobaciones de las normas generales o particulares en materia de ordenación urbanística deberán velar por el mantenimiento de las distancias indicadas.

2. Terrenos con limitaciones.

2.1 Sismicidad.

La ubicación del vertedero deberá tener en cuenta los criterios de sismicidad de acuerdo con los criterios de análisis incluidos en la Norma de Construcción Sismorresistente en vigor (NCSR-02 aprobada por Real Decreto 997/2002). Además, considerará los datos y criterios de referencia del Instituto Geológico y Minero de España y/o del Instituto Geográfico Nacional respecto a la zonificación de áreas sísmicas.

De acuerdo con los criterios de la citada norma, las instalaciones de vertido se considerarán del siguiente modo:

3. Para la aplicación del presente documento, y sin menoscabo de otras definiciones recogidas en la normativa estatal o autonómica, se considerará como:

Núcleo Urbano al conjunto de los terrenos que constituyendo un perímetro único incluyen en su interior una trama urbana unificada que cumple la condición de estar completamente urbanizados (estando las calzadas pavimentadas y soladas y disponiendo de aceras de las vías municipales) y de disponer de servicios de abastecimiento de agua, evacuación de aguas residuales, suministro de energía eléctrica y alumbrado público dentro de una red de servicios común.

Núcleo de Población a aquella entidad inferior al núcleo urbano (que no esté incluida en éste) y que cumple las condiciones de la existencia de una agrupación de un número superior a cinco viviendas de ocupación permanente situadas dentro del ámbito de una superficie no superior a una hectárea, y que respondiendo a la existencia de una parcelación reconocible de terrenos dispongan de un sistema de servicios de abastecimiento de agua, evacuación de aguas residuales, suministro de energía eléctrica y alumbrado común a todas ellas. El perímetro del núcleo de población estará constituido por aquel que englobe el contorno exterior de todas las viviendas pertenecientes al mismo.



- Los vertederos de residuos inertes: de “moderada importancia” cuando estén incluidos en términos municipales con aceleración sísmica básica igual o inferior a 0,04 g. En el resto de los casos se considerarán de “normal importancia”.
- Los vertederos de residuos no peligrosos: de “normal importancia” cuando estén incluidos en términos municipales con aceleración sísmica básica igual o inferior a 0,08 g. En el resto de los casos se considerarán de “especial importancia”
- Los vertederos de residuos peligrosos: siempre se considerarán de “especial importancia”.

Las limitaciones para la instalación de vertederos en función de la sismicidad se basarán en la realización de un estudio sísmico justificativo que demuestre la integridad de la capa de impermeabilización inferior y la capa de sellado superior en lo que respecta a su función, y a la estabilidad de la masa de residuos considerando situaciones de carga sísmica. Este estudio se efectuará:

- Para aquellas instalaciones calificadas como de “normal importancia” cuando la Aceleración Sísmica Básica sea igual o superior a 0,08 g.
- En todos los casos para aquellas instalaciones calificadas como de “especial importancia”.

El alcance del citado estudio deberá contemplar los siguientes aspectos:

Aceleración horizontal Máxima NCSR-02 (RD 997/2002)	Situación del vertedero	Actuación de diseño
$\geq 0,12$ g	Todos los casos	Evaluación sísmica completa y estudio de la microzonación sísmica
$< 0,12$ g	Asiento débil o suelos inestables	Evaluación sísmica completa
$< 0,12$ g	Zona con asiento sólido	Análisis sísmico somero

2.2. Geotectónica.

En el caso de determinarse la evidencia de fallas neotectónicas con desplazamientos en el Holoceno en las proximidades de la ubicación del vertedero (a menos de 100 m del perímetro de la instalación) se justificará la ausencia de riesgos de inestabilidad.

2.3. Áreas inestables.

Serán objeto de estudio aquellas zonas en las que se evidencie (mediante reconocimientos, cartografía o registros históricos) la existencia de procesos de inestabilidad natural o provocada por la acción humana. A los efectos de la aplicación de limitaciones se tendrán en cuenta las medidas expuestas a continuación.

Será incompatible la ubicación del vertedero, salvo que se disponga de medidas correctoras específicas que eviten este efecto, en terrenos en los que existan materiales (tanto de origen natural como antrópico) que se identifiquen o bien sea razonadamente previsible que tengan asociados fenómenos de inestabilidad no compatibles con la operación segura del vertedero, el mantenimiento de la integridad de los elementos de sellado y recogida de lixiviados, o la estabilidad del vertedero. Entre los fenómenos de inestabilidad que deben estudiarse se incluirán:



- Las áreas con suelos compresibles.
- Los materiales con capacidad de hinchamiento, fenómenos de lavado, arrastre de finos o sifonamientos.
- Las áreas con suelos con baja resistencia o que son susceptibles de movimientos en masa.
- Suelos arcillosos que tienden a cambiar de volumen por ciclos de hidratación - deshidratación.
- Suelos sujetos a subsidencias como arcillas no consolidadas, aluviales saturados y zonas de humedales en general.
- Laderas sujetas a movimientos en masa del tipo de avalanchas, deslizamientos circulares o sobre superficies preferentes.

Se considerará en el análisis la inestabilidad inducida por actuaciones antrópicas y que puede producirse en las siguientes condiciones:

- Presencia de desmontes o rellenos.
- Extracciones de agua subterránea que pueden producir inestabilidad y asientos del subsuelo.
- La construcción de un vertedero sobre otro antiguo que pueda producir inestabilidades.
- Fenómenos de inestabilidad ocasionadas en el subsuelo por actividades mineras.

Para comprobar las características del suelo deberá llevarse a cabo un estudio previo de la estabilidad, tal como se define en los apartados de estudios integrantes del diseño del proyecto. Se verificará si existen captaciones de agua en las inmediaciones del emplazamiento.

2.4. Áreas inundables.

Los vertederos de residuos inertes no podrán ubicarse en zonas que supongan una modificación significativa de las condiciones de inundabilidad. Al objeto de identificar esta circunstancia limitante cuando se plantee su ubicación en terrenos de la franja entre el límite del Dominio Público Hidráulico y el límite de la zona de inundación de período de retorno de 100 años, se comprobará que se cumple que el vertedero no obstruirá el flujo de avenida. Además, se deberá comprobar que con las medidas correctoras adoptadas la disposición del vertedero no afectará al régimen de flujo aguas arriba y aguas abajo.

2.5. Zonas húmedas (humedales).

Para el establecimiento de distancias de separación entre los perímetros de protección de los humedales recogidos en el Inventario Nacional de Zonas Húmedas, se realizará el estudio caso a caso (en función de la posibilidad de transmisión de sustancias por la acción de la red de drenaje superficial o del flujo hidrogeológico) por la autoridad competente.

En caso de la inexistencia de dicho estudio se recomienda considerar los siguientes criterios mínimos de referencia, en lo que respecta a la zona situada aguas arriba (por flujo superficial o subterráneo) del perímetro de la zona húmeda:

Clase de vertedero	Distancia mínima (m)
Residuos inertes	500
Residuos no peligrosos	1000
Residuos peligrosos	2000



Cuando se detecten zonas húmedas que puedan tener un interés natural relevante pero aún no estén incluidas en una figura de protección para establecer un perímetro delimitador, con objeto de la aplicación de los criterios anteriores, se recomienda tomar el del máximo contorno ocupado conjuntamente por:

- La máxima zona correspondiente a un período de diez años ocupada por aguas libres.
- La máxima zona (también correspondiente a un período de diez años) en la que el nivel medio de las aguas subterráneas se encuentre a una profundidad no superior a 1 metro.

2.6. Espacios naturales protegidos.

En todos los vertederos que se pretendan ubicar en terrenos de la Red Natura 2000 o en áreas o espacios naturales así declarados de acuerdo con la Ley 42/2007 (en vigor o en trámite de aprobación en el momento de autorización del vertedero) se realizará por parte de la autoridad competente un análisis caso a caso de su compatibilidad (en función de la posibilidad de transmisión de sustancias por la acción de la red de drenaje superficial o del flujo hidrogeológico).

En virtud de dicho análisis la autoridad competente deberá emitir el correspondiente informe en el que, en su caso, se establezca razonadamente limitaciones y distancias mínimas. Transcurridos dos meses desde la notificación de consulta a la autoridad competente sin que esta emita el correspondiente informe, se entenderá que la ubicación puede ser incluida en un proceso de autorización sin necesidad de incorporar directrices de limitación específicas o complementarias.

2.7. Seguridad aeroportuaria.

Como criterio de limitación cuando exista la posibilidad de liberación de gases o elementos ligeros se aplicará una distancia mínima de alejamiento (consideradas estas distancias con relación al eje de las pistas operativas o que se encuentren proyectadas, autorizadas o en proceso de autorización) de 3 Km. para los aeropuertos comerciales públicos o privados, aeropuertos militares o en los que tenga lugar la operación de aeronaves a reacción, y de 1,5 Km. para aeródromos en los que únicamente operen aeronaves de motor de pistón o aeronaves ligeras.

Cuando por la naturaleza del residuo o el sistema de gestión del mismo exista la posibilidad de que la instalación pueda ser foco de atracción de aves o de emisión de flujos ascendentes de aire o gases y se encuentre a una distancia igual o inferior de 10 Km. a una pista de una instalación aeroportuaria a los efectos del trámite de autorización será preceptivo su notificación a la autoridad competente (Dirección General de Aviación Civil y Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea, AENA para los aeropuertos civiles y Ministerio de Defensa para los Aeropuertos de uso militar) a los efectos de evaluar la potencial interferencia que pueda tener la instalación respecto a la seguridad de las aeronaves.

El análisis debe incluir un informe justificativo de la interrelación entre ambos fenómenos, que será obligatorio para la autorización de la instalación. El informe analizará la presencia de fracciones orgánicas en el residuo que puedan ser origen de alimentación de aves, la posibilidad (tanto en operación como tras el sellado y durante el mantenimiento postclausura) de que se produzcan zonas de retención del drenaje que resulten atractivas para la presencia y el anidamiento de aves, así como la utilización previa de estas áreas a la instalación del vertedero por la avifauna (que pudieran modificar sus hábitos de comportamiento al crearse el vertedero). También deberá incluir dicho informe (con el objeto de posibilitar la autorización de la instalación) cuáles son las medidas necesarias que el promotor propone para neutralizar o minimizar esta afección, como pueden ser: la trituración y mezcla completa del residuo para que la fracción orgánica no pueda ser utilizada para la alimentación de aves y fauna, el ensacado del



residuo para que no presente superficie de materia orgánica disponible para la alimentación, la gestión del vertedero mediante cubrición con frecuencia inferior a la diaria (horaria) de los residuos, el mantenimiento y adecuado dimensionamiento de los drenajes, la preparación de un programa de mantenimiento (incluida la postclausura) en el que se prevean la prevención de zonas de encharcamiento asociadas al asentamiento y subsidencia de la masa de residuos, y la instalación de mecanismos de control de aves (barreras sónicas, ahuyentadoras visuales, barreras físicas, etc).



II. Estudios recomendados para la ubicación de un vertedero.



1. Datos Meteorológicos.

A efectos de dimensionar adecuadamente las instalaciones de evacuación de aguas pluviales y balsas de tormenta, así como para el cálculo de la infiltración y la formación de lixiviados, los proyectos de autorización de vertederos deberán contener información relativa a:

1. Precipitación.
2. Temperatura (máxima, media y mínima).
3. Evaporación y evapotranspiración.
4. Rosa de frecuencia y velocidad de los vientos.
5. Dirección dominante de los vientos y su variación mensual en la dirección de los vientos.
6. Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno de 25 años para vertederos de residuos inertes y de 50 años para vertederos de residuos no peligrosos y peligrosos.

Esta información deberá abarcar un periodo no menor a los 25 años inmediatamente anteriores a la solicitud de autorización del vertedero. Ésta se estimará a partir de datos de estaciones meteorológicas de organismos oficiales aplicándose los siguientes criterios:

- Podrá darse por válida la estimación a partir de datos de una única estación cuando, siendo dicha estación la más próxima al vertedero, se justifique convenientemente que el vertedero se encuentra dentro del ámbito de cobertura de la misma, por tener condiciones geográficas semejantes (respecto a altitud y latitud), no existir accidentes relevantes del terreno que puedan dar lugar a comportamientos climáticos distintos en el vertedero y en el lugar de emplazamiento de la estación, y cuando la estación disponga de registros con series de datos suficientemente representativas de acuerdo a los criterios de la Agencia Estatal de Meteorología.
- En los demás casos, se estimarán a partir de los datos obtenidos en las tres estaciones más próximas que representen un comportamiento climático semejante al de la situación del vertedero y formen un triángulo en el que quede inscrito el mismo.

Esta información se extenderá durante las fases de explotación y postclausura de acuerdo con las siguientes frecuencias mínimas:

	Vertederos de residuos peligrosos		Vertederos de residuos no peligrosos		Vertederos de residuos inertes	
	Explotación	Postclausura	Explotación	Postclausura	Explotación	Postclausura
Volumen de precipitación	diario	diario/ mensual	diario	diario/ mensual	diario	diario/ mensual
Temperatura máxima, media y mínima	diario	mensual	diario	mensual	diario	mensual
Evaporación y evapotranspiración en lisímetro u otros medios	diario	diario/ mensual	diario	diario/ mensual	diario	diario/ mensual
Humedad atmosférica	diario	mensual	diario	mensual	diario	mensual
Dirección y fuerza del viento dominante	diario		diario		diario	

La información meteorológica recopilada durante la fase de explotación y en periodo de vigilancia postclausura servirá de base para la elaboración de balances hídricos que permitan el contraste con los volúmenes de lixiviados generados.



2. Reconocimiento geológico, geotécnico e hidrogeológico de los terrenos en que se pretende ubicar un vertedero.

Los terrenos en los que se pretenda ubicar un vertedero deberán ser objeto de un estudio geológico y geotécnico que permita comprobar, entre otras cuestiones, su idoneidad en relación con la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas, su capacidad de soportar las cargas de residuos previstas para el vertedero sin que se produzcan asentamientos significativos en el terreno, la inexistencia de fenómenos de erosión significativos o movimientos de ladera que pudieran comprometer la estabilidad mecánica de la masa de residuos tanto durante la fase activa del vertedero como, a largo plazo, una vez entra en fase postclausura.

Tanto en sus aspectos geológicos como geotécnicos dichos estudios comportarán la realización de trabajos de gabinete recopilando información relevante ya existente (p.e. mapa geológico nacional -MAGNA-, mapa de orientación al vertido o mapa geomorfológico nacional entre otros), trabajos de campo (confección de cartografía geológica de detalle, realización de calicatas y sondeos, determinación de propiedades geotécnicas en campo, etc).

Aunque los estudios geológicos y geotécnicos tienen evidentes comunalidades, resulta pertinente tratar por separado sus contenidos y alcances.

2.1. Reconocimiento geológico.

El objetivo último de los estudios geológicos previos a la ubicación de un vertedero es determinar el número y características de las formaciones geológicas sobre las que descansarán los vasos de vertido (relaciones de yacencia, potencia, litología, relaciones laterales, etc) hasta una profundidad razonable. Además, evaluará la existencia de indicios de fenómenos geomorfológicos activos que pudieran comprometer la seguridad de las instalaciones de vertido.

El contenido que se considera mínimo para estos estudios es el siguiente:

2.1.1. Confección de un mapa geológico a escala 1:10.000 o mayor.

Este mapa se relacionará e interpretará en referencia a otros mapas geológicos ya existentes a escala menor (1:50.000) que se hayan podido localizar en los trabajos de gabinete previos.

Atenderá con preferencia a la existencia de discontinuidades que pudieran actuar como camino preferente en el transporte de contaminantes en caso de mal funcionamiento de la impermeabilización lateral y de fondo del vertedero (fracturas, diques, tránsitos laterales de facies, etc).

Contendrá, además, cortes geológicos longitudinales y transversales.

2.1.2. Confección de un mapa geomorfológico a escala 1:10.000 o mayor.

Identificará la existencia de rellenos, zonas susceptibles de deslizamientos, zonas susceptibles de caídas de bloques y movimientos de ladera.

Identificará, también, la existencia de evidencias de neotectónica.



2.1.3. Realización de sondeos de exploración geológica.

2.1.3.1. Número de sondeos y profundidad.

a) Para celdas de vertido cuya superficie de descanso sea inferior a 5 Ha y la geología del terreno sea homogénea⁴ se realizarán un mínimo de 3 sondeos con recuperación de testigo con una profundidad tal que se satisfagan los siguientes criterios:

- Al menos uno de ellos alcanzará una profundidad mínima de 50 m.
- Los dos restantes alcanzarán una profundidad mínima de 30 m.
- La profundidad a alcanzar no será inferior en ninguno de los sondeos a la de la cota de apoyo del vertedero más cinco veces el espesor requerido a la barrera geológica natural para la categoría más desfavorable de los residuos a almacenar de acuerdo con lo señalado en el Anexo I del Real Decreto 646/2020, de 7 julio.
- En caso de que con las antedichas profundidades no se hubiese alcanzado el nivel piezométrico regional, al menos uno de los sondeos deberá realizarse hasta alcanzar dicho nivel y penetrar 5 m por debajo de éste.

b) Para celdas de vertido cuya superficie de descanso sea superior a 5 Ha o los terrenos no sean de geología homogénea.

En este caso habrá de incrementarse el número de sondeos de acuerdo con las siguientes reglas:

- 1 adicional por cada 5 Ha de incremento o fracción adicional
- 2 adicionales por cada formación geológica aflorante

La profundidad de éstos se determinará con los criterios señalados en el apartado anterior.

2.1.3.2. Determinaciones a realizar en los sondeos y en los testigos.

Para cada sondeo se confeccionará un registro con la siguiente información:

- Localización y cota.
- Fecha.
- Identificación de la compañía perforadora y del técnico supervisor.
- Firma del autor de la descripción.
- Diámetro de perforación y profundidad.
- Tipo de revestimiento y método de perforación.
- Tipo y volumen de los fluidos o aditivos usados.
- Coeficiente de penetración o resistencia a la penetración.
- Intervalos de muestreo y % de recuperación.
- Descripción litológica.
- Identificación de los acuíferos, niveles de agua o zonas de alta permeabilidad o claramente fracturadas.
- Resultados de ensayo de permeabilidad *in situ*⁵.
- Resultado de test SPT con anotación de la profundidad.
- Indicación de nivel de toma de muestras para la realización de ensayos en laboratorio.

⁴ Se entenderá por terrenos geológicamente homogéneos aquellos en que sólo aflora una de las unidades geológicas identificadas en la cartografía 1:10.000 señalada en el punto 2.1.1. de estas recomendaciones.

⁵ En la formación geológica sobre la que descansa el vertedero, 1 cada 5m.



- Cualquier contaminación apreciable *de visu*.
- Registro de pérdidas de lodos u otras dificultades encontradas.
- Descripción, fotografías y clasificación de las rocas testificadas.
- En roca se medirá el índice *Rock Quality Designation* y se valorará la alteración, resistencia y fracturación de los testigos.

- **Toma de muestras y análisis químico de aguas subterráneas.**

En cada uno de los sondeos en que se alcance el nivel piezométrico se tomará una muestra de agua subterránea previo sobrebombeo y estabilización del nivel. Dichas muestras serán enviadas a la mayor brevedad posible al laboratorio para las determinaciones analíticas señaladas en el apartado 2.4.3.

- **Ensayos de estimación de la permeabilidad y su frecuencia.**

En cada formación geológica atravesada desde la superficie se realizará un ensayo de determinación de permeabilidad *in situ* Lugeon o Lefranc (dependiendo del grado de consolidación de la formación).

En aquellas secciones de sondeo que se sitúen por debajo de la cota del nivel de descanso previsto para el vertedero estos ensayos se realizarán cada 5 m por debajo de dicha cota.

- **Conservación de los testigos de sondeo.**

Los testigos de sondeo no consumidos en los ensayos destructivos de laboratorio serán custodiados por el titular del vertedero hasta la finalización del periodo de vigilancia postclausura. Dichos testigos se conservarán en cajas portatestigo en buen estado y correctamente identificadas con indicación de la profundidad de los tramos de sondeo a que corresponden.

- **Abandono de los sondeos.**

Finalizadas las tareas de perforación los sondeos serán sellados en su totalidad mediante una mezcla de cemento-bentonita.

2.2. Reconocimiento geotécnico

El reconocimiento geotécnico de los terrenos en los que se pretenda ubicar un vertedero tiene como finalidad la caracterización de las características geotécnicas de la sucesión de las distintas formaciones geológicas presentes en los terrenos en que se pretenda ubicar un vertedero, determinará la existencia de variaciones laterales de dichas características, y acopiará parámetros para la caracterización geotécnica de dichos terrenos que puedan orientar el diseño del vertedero. Además, evaluará la posibilidad de asientos en dichos terrenos y evaluará el grado de estabilidad de laderas.

Estos estudios se realizarán tanto en formaciones geológicas aflorantes de materiales no consolidados mediante catas superficiales en el terreno como, en formaciones a mayor profundidad, aprovechando los sondeos de exploración geológica señalados en el punto 2.1.3.



2.2.1. Reconocimiento geotécnico superficial.

2.2.1.1. Calicatas.

En los terrenos en los que las formaciones geológicas aflorantes sean de materiales no consolidados, la parte más superficial de éstos se evaluará mediante calicatas.

2.2.1.1.1. Número de calicatas.

Se practicarán calicatas de 4-5 m de profundidad para el examen de las características de las formaciones superficiales no consolidadas. En la realización de estas calicatas se prestará máxima atención a la existencia de posibles derrumbamientos y estricta observancia de las medidas legalmente previstas para su entibamiento.

El número de calicatas a realizar será de 6 si el vertedero previsto ocupa una superficie igual o inferior a 2 Ha. En caso de que se extendiese sobre una superficie mayor, dicho número se incrementará en 3 calicatas por cada Ha o fracción adicional.

2.2.1.1.2. Determinaciones a realizar en las calicatas.

Para cada calicata se confeccionará un registro que contenga la siguiente información:

- Localización.
- Fecha y datos de excavación.
- Identificación del técnico supervisor.
- Cota del punto.
- Profundidad de la excavación.
- Descripción de cada horizonte, profundidad, textura, color, mineralogía, tamaño grano, consistencia y densidad relativa, contenido de humedad, grado de alteración, procedencia geológica, y otras características.
- Identificación y clasificación de los horizontes, tomando fotografías de cada punto de muestreo.
- Toma de muestras.

- Ensayos de penetración dinámica

Se realizarán 4 ensayos de penetración dinámica por cada Ha de superficie de vertedero.

-Ensayos para la determinación de conductividad hidráulica vertical.

En el caso de que la formación geológica aflorante sea la misma que aquella sobre la que se prevé descansa el vertedero se realizarán 2 ensayos de permeabilidad con infiltrómetro de doble anillo por cada Ha.

-Abandono de las calicatas

Concluida la descripción y toma de muestras las calicatas se rellenarán y compactarán con los materiales originales.



2.2.3. Reconocimiento geotécnico profundo.

Con independencia del estado de agregación de los materiales geológicos aflorantes, en los sondeos de exploración geológica mencionados en el punto 2.2.1.3. se realizarán las siguientes determinaciones y ensayos:

-Toma de muestras inalteradas.

Cada 3 m de profundidad.

- Ensayos SPT.

Cada 3 m de profundidad y al menos 1 por cada unidad geotécnica atravesada.

2.2.3.1. Ensayos a realizar en laboratorio sobre muestras inalteradas.

- Granulometría (en el 50% de las muestras).
- Límites de Atterberg (en el 50% de las muestras).
- Clasificación textural de suelos (en el 50% de las muestras).
- Humedad natural (en el 50% de las muestras).
- Densidad *in situ* (en el 50% de las muestras).
- Granulometría por sedimentación (en el 50% de las muestras).
- Contenido en materia orgánica (en el 50% de las muestras).
- Proctor modificado (en el 25% de las muestras).
- Curvas de compactación (en el 25% de las muestras).
- Ensayo triaxial de permeabilidad⁶.
- Ensayo edométrico (en el 25% de las muestras).
- Expansividad (en el 25% de las muestras).
- Ensayos de resistencia al corte: compresión simple, corte directo, triaxial (en el 25% de las muestras).

2.2.4. Estabilidad de los materiales

Con la ayuda de la cartografía geomorfológica señalada anteriormente se evaluará la posibilidad de ocurrencia de fenómenos de deslizamientos, subsidencias, hundimientos o cualquier otra circunstancia que pudiera comprometer la integridad de los vasos de vertido durante la fase de explotación y en periodo postclausura al objeto de:

- Identificar las laderas naturales potencialmente inestables y otras áreas que pudieran desestabilizarse como consecuencia de actuaciones constructivas, tales como excavaciones o relleno de materiales u otras modificaciones en el emplazamiento.
- Considerar la estabilidad de la cimentación del vertedero teniendo en cuenta el modelado (morfología específica) y las condiciones geológicas del emplazamiento, cargas estáticas y dinámicas y cualquier otro factor que pudiera influir.
- Determinar la compresibilidad de las unidades geológicas infrayacentes y el asentamiento potencial del relleno del vertedero. Estimar los asentamientos totales y diferenciales, basándose en métodos adecuados de campo y ensayos de laboratorio.

⁶ En muestras inalteradas en la formación geológica sobre la que descansa el vertedero, 1 cada m.



2.3. Reconocimiento hidrogeológico.

Con ocasión de los trabajos de reconocimiento geológico y geotécnico mencionados en el apartado 2.2. se habrá obtenido suficiente información para evaluar el contexto hidrogeológico del vertedero que se pretende ubicar. La finalidad de conocer dicho contexto es múltiple: por una parte evaluar en qué medida los terrenos sobre los que descansa el vertedero que constituyen la barrera geológica natural se ajustan a lo señalado en el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, en lo relativo a valores de conductividad hidráulica y potencia de la barrera que pudieran condicionar el diseño de la impermeabilización lateral y de fondo, evaluar la existencia de formaciones acuíferas y su extensión lateral, determinar la dirección y velocidad de flujo en los acuíferos, explorar los mecanismos de dispersión de contaminantes que se pudieran inyectar en el acuífero y su magnitud, entre otras. En definitiva, esta información servirá de base para elaborar un modelo hidrogeológico conceptual. Dicho modelo deberá cubrir una distancia no inferior a 10 Km. aguas abajo del vertedero. Adicionalmente, esta información será de utilidad para, posteriormente, diseñar la red de vigilancia de calidad de las aguas subterráneas que deberá estar operativa durante la fase de explotación y la fase postclausura, tal y como se establece en el real decreto arriba mencionado.

Esta información se referirá al acuífero infrayacente más próximo a la superficie del terreno ocupada por la base de la celda del vertedero con un valor de transmisividad igual o superior a 50 m²/día y, si procede, aquellos otros que pudieran estar en conexión hidráulica con éste. En el caso de que en los sondeos de reconocimiento geológico no se atravesase ninguna formación de estas características el modelo hidrogeológico se referirá a la formación geológica infrayacente en contacto directo con la base del vertedero que sirve como barrera geológica.

2.3.1. Asignación de valor de conductividad hidráulica en los materiales geológicos infrayacentes al vertedero.

Una cuestión para dilucidar en el reconocimiento hidrogeológico de los terrenos es la asignación de un valor de conductividad hidráulica representativo de las formaciones acuíferas que puedan estar en conexión hidráulica con la base de las celdas de vertido. En este sentido se debe tener en consideración que tras el reconocimiento geológico y geotécnico de los terrenos ya se dispondrá de información sobre esta característica en los ensayos de campo y laboratorio señalados en el apartado 2 de estas recomendaciones. Si el acuífero de interés es homogéneo, en lo que a este parámetro se refiere, los valores de conductividad deberán situarse en el mismo orden de magnitud y el valor a asignar será el mayor de los determinados dentro del mismo orden de magnitud. Si por el contrario los valores de conductividad hidráulica determinados presentan mayores rangos es razonable aplicar un criterio conservador y adoptar como valor de conductividad el correspondiente a la mayor de las determinadas multiplicada por 10 o un factor superior de acuerdo con el grado de heterogeneidad que se haya podido valorar en el reconocimiento geológico.

2.3.2. Otras determinaciones hidrogeológicas.

Además de la conductividad hidráulica y la transmisividad la confección de un modelo hidrogeológico adecuado implicará la determinación de:

- Gradiente hidráulico.
- Dirección y velocidad de flujo.
- Dispersividad longitudinal y transversal en la isocrona de 10 años.
- Gradiente vertical entre niveles acuíferos (en el caso de más de un acuífero).
- Porosidad eficaz y coeficiente de almacenamiento (cuando corresponda).



- Conductividad hidráulica de los acuitardos por medio de ensayos de campo o laboratorio.

2.3.3. Composición química de las aguas subterráneas.

En muestras de las aguas subterráneas que se pudieran detectar con ocasión del reconocimiento geológico se realizarán análisis químicos para la determinación de los siguientes parámetros:

- Carbonatos y bicarbonatos.
- Sulfatos.
- Cloruros.
- Sodio.
- Potasio.
- Magnesio.
- Calcio.
- Conductividad eléctrica.

2.4. Estudios de Hidrología superficial.

A efectos de evaluar la idoneidad de un terreno para la ubicación de un vertedero, dimensionar las instalaciones de evacuación de aguas pluviales y balsas de tormenta, así como para identificar zonas húmedas potencialmente receptoras de la contaminación en el caso de fallo en estructuras de impermeabilización, se recopilará y analizará la información necesaria para:

- Describir y cartografiar a escala 1:25.000 la red de drenaje y cuencas afectadas por la ubicación.
- Inventario y cartografía a escala 1:25.000, en un círculo mínimo de 10 Km. de diámetro aguas abajo del vaso del vertedero de los cursos de agua en régimen constante, estacional y torrencial, láminas de agua, manantiales, humedales, marismas, estuarios, zonas costeras y playas, etc. Los elementos de este inventario se analizarán en relación con la posible conexión hidráulica del vertedero con éstos. Dicho inventario será igualmente analizado en relación con el esquema hidrogeológico propuesto.
- Se localizarán e inventariarán las áreas inundables para un periodo de retorno de 100 ó 500 años de acuerdo con la clase de vertedero que se pretenda ubicar.



III. Elementos de diseño de vertederos.



Del concepto de vertedero se desprende que la eliminación de residuos en éstos se debe realizar sin poner en riesgo el medio ambiente. Ello implica que los vertederos han de contar con elementos de ingeniería que los aislen del suelo, las aguas y la atmósfera. Entre dichos elementos se deben mencionar:

- Evacuación y recogida de aguas pluviales.
- Barrera geológica artificial, impermeabilización de fondo-lateral y cubiertas de sellado superficial.
- Sistemas de recogida de lixiviados.
- Sistemas de recogida de gases.

Los requisitos mínimos a cumplir por estos elementos se recogen en los siguientes apartados.

1. Sistemas de recogida y evacuación de aguas pluviales.

Los dispositivos de recogida y evacuación de las aguas superficiales se diseñarán de manera que eviten su entrada en el vaso de vertido o en otras instalaciones del vertedero donde puedan resultar contaminadas por contacto con los residuos. De este modo se debe prever la existencia de un circuito de aguas limpias y otro, separado, para las aguas pluviales que hayan estado en contacto con los residuos o las cubiertas diarias de los frentes de vertido. Los primeros se conducirán a las balsas de tormenta y los últimos, al ser potencialmente contaminados, a las balsas de lixiviados.

1.1. Conducciones perimetrales.

Se diseñarán conducciones perimetrales con una sección suficiente para evacuar el caudal máximo correspondiente a la máxima precipitación en 24 h con un periodo de retorno mínimo de 25 años, en el caso de vertederos de residuos inertes. En el caso de vertederos de residuos peligrosos y no peligrosos el periodo de retorno a considerar será como mínimo de 50 años.

Además de su capacidad de evacuación, en el diseño de las conducciones perimetrales y en su mantenimiento se tendrán en consideración los asientos previsible y descalces.

1.2. Balsas de tormenta.

Las aguas pluviales limpias serán conducidas a balsas de tormentas con las siguientes características:

- Su capacidad se calculará teniendo en consideración la precipitación máxima en 24 horas esperada en un periodo de retorno de 25 años para los vertederos de residuos inertes y 50 para el caso de los residuos peligrosos y no peligrosos.
- Deberán disponer de un sistema de vallado independiente al general de las instalaciones de residuos. Igualmente dispondrá de las protecciones individuales y colectivas para la seguridad de los trabajadores.
- Los costados y el fondo se recubrirán de material sintético impermeabilizante cuyas características deberán ser similares a la lámina impermeabilizante del fondo del vaso de vertido.
- Dispondrá de los elementos adecuados (plataformas, escaleras, etc.) para garantizar la seguridad en la toma de muestras.

Las aguas recogidas de la balsa de tormentas serán objeto de comprobación de su calidad y sólo podrán verterse si cumplen los límites de vertido legalmente autorizados. En caso contrario deberán recibir tratamiento para cumplir los límites de vertido fijados en la autorización o bien ser recogidas y transportadas a instalaciones de tratamiento fuera del vertedero.



2. Barrera geológica artificial, sistemas de impermeabilización lateral y de fondo y cubiertas de sellado.

Los requisitos del revestimiento lateral y de fondo de los vertederos están recogidos en el Anexo I del RD 646/2020, de 7 de julio. Para su cumplimiento en este apartado se propone una solución de referencia⁷ para cada una de las clases de vertedero consideradas en la pieza legislativa arriba mencionada. Dicha solución atiende tanto a los revestimientos como a la barrera geológica artificial, que habrá que disponerse adicionalmente en el caso de no satisfacerse las condiciones de conductividad hidráulica o espesor mínimo.

Por otra parte, esta pieza legislativa enfatiza la posibilidad de disponer elementos de sellado en los vertederos clausurados cuando se aprecie la posibilidad de que las aguas pluviales y de escorrentía que se puedan filtrar a la masa de residuos y generen lixiviados en el vertedero ya clausurado.

2.1. Barrera geológica artificial.

Cuando la conductividad de las formaciones geológicas sobre la que descansan los vertederos exceda los límites de conductividad hidráulica señalados en el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, bien por ser materiales de elevada conductividad hidráulica o por estar fracturados, sobre éstos, para todas las clases de vertederos, se dispondrá una barrera geológica artificial de un espesor mínimo de 0,5 m.

Las características a considerar en los materiales geológicos de aportación de esta barrera artificial son las siguientes:

- el porcentaje de finos (tamiz 0.08 UNE) será superior al 30%.
- tendrá un índice de plasticidad: 10 - 30.
- el tamaño de partícula máximo será inferior a 0,02 m.
- su densidad seca mínima será la del 95% del Ensayo Proctor Modificado y su humedad se encontrará en el intervalo -1, +3 con relación a la humedad óptima del ensayo.
- no contendrá arcillas de naturaleza expansiva.

2.2. Sistemas de impermeabilización lateral y de fondo.

El revestimiento de aislamiento de fondo de un vertedero consta, en sentido ascendente, de una capa de impermeabilización y una capa de filtrado y drenaje de lixiviados.

2.2.1. Capa de impermeabilización.

- Lámina sintética impermeabilizante.

Está constituida por una lámina impermeabilizante flanqueada por ambas caras por un geotextil de protección. Las láminas impermeabilizantes funcionan como última barrera de contención de los lixiviados antes de alcanzar la barrera geológica natural o artificial. Éstas podrán ser de materiales plásticos (polietileno de alta densidad -HDPE-) o de materiales sintéticos arcillosos (manta de bentonita).

⁷ El RD 646/2020 contempla la posibilidad de que en los flancos se plantee una solución alternativa a la de referencia basada en la combinación de materiales geosintéticos que proporcionen la impermeabilidad equivalente requerida en cada clase de vertedero.



Los requisitos a cumplir por las láminas de HDPE incluyen los siguientes:

- Deberán ajustarse en sus características a la norma UNE 104425:2001 (Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de vertederos de residuos con láminas de polietileno de alta densidad).
- Deberán ser químicamente resistentes a los lixiviados.
- Deberán soportar su propio peso sin rotura en caso de disponerse en los taludes de los vasos de vertido.
- Deberán presentar relaciones tensión máxima nominal/tensión de trabajo 3 o mayor.
- El espesor mínimo de las láminas será de 2 mm.
- Las láminas podrán ser texturizadas, en tal caso su peso por unidad de superficie no será menor que la de la lisa del mismo espesor y la resistencia a la tracción en las dos direcciones entre la lámina lisa y texturizada del mismo espesor no tendrá una diferencia mayor del 10%.

Tal y como se señala en el artículo 11.3. del RD 646/2020, de 7 de julio, antes del inicio de las operaciones de vertido deberá verificarse el grado de impermeabilización efectiva por métodos adecuados (prospección eléctrica, trazadores, etc.)

En el caso de mantas de bentonita la permeabilidad será menor o igual a 10^{-11} ms^{-1} soportando ciclos humedad-sequedad sin pérdida de impermeabilidad ni propiedades mecánicas.

- Geotextiles de protección.

En la solución de referencia se requiere la disposición por ambas caras de las láminas de impermeabilización de una lámina geotextil de protección frente al punzamiento y la tracción. La resistencia a ambas será al menos el doble de la nominal de la lámina impermeabilizante.

2.2.2. Capa de filtrado y drenaje de lixiviados

Las características de los materiales a emplear para el diseño de la solución de referencia son las siguientes:

- Capa de drenaje.

La capa de drenaje tiene como función recoger los lixiviados de la masa de residuos y canalizarlos hacia la balsa de lixiviados. Está constituida por un lecho de gravas permeables en el que se encaja la red de tuberías de drenaje y evacuación. Las características de dicho lecho serán las siguientes:

- Estará constituido por gravas con una conductividad hidráulica superior a 10^{-3} ms^{-1} .
- Las gravas a utilizar no experimentarán reacciones químicas apreciables con los lixiviados, recomendándose que su composición tenga un contenido en carbonatos inferior al 30%.
- El contenido en finos (tamiz UNE 0.08) no será superior al 5%.
- El tamaño de grano estará en el rango 0,02-0,04m.
- La pendiente del lecho de gravas tras los máximos asientos previsibles no será menor del 2%.

El espesor mínimo de la capa de drenaje será de 0,3 m. Cuando así se requiera la capa de drenaje podrá ser sustituida por georedes con capacidad de drenaje equivalente no presentando riesgo de colmatación.



- Capa filtrante.

Como quiera que los lixiviados pueden tener cantidades apreciables de sólidos en suspensión y a fin de evitar que la capacidad de drenaje se vea comprometida por encima de esta última se dispondrá una capa filtrante de arena. El tamaño de grano de las arenas a utilizar en esta capa será el resultado de compatibilizar un potencial de drenaje y una capacidad de retención adecuada. La solución de compromiso es que en la curva granulométrica de estas arenas se deben satisfacer las siguientes condiciones:

- $d_{85 \text{ arenas}} > 5 \cdot d_{15 \text{ gravas}}$ y
- $d_{15 \text{ arenas}} < 5 \cdot d_{85 \text{ finos de lixiviado}}$.

Donde $d_{85 \text{ arenas}}$ es el tamaño de malla que retiene el 85% de la arena, $d_{15 \text{ arenas}}$ el tamaño de malla que retiene el 15% de la arena, $d_{15 \text{ gravas}}$ es el tamaño de malla que retiene el 15% de las gravas de la capa de drenaje y $d_{85 \text{ finos de lixiviado}}$ es el tamaño de malla equivalente que retiene el 85% de los finos de lixiviado.

La capa de arena de deberá tener un espesor mínimo de 0,3 m con independencia de la clase de vertedero.

La capa de arena de filtración puede ser sustituida por una lámina geotextil que satisfaga las siguientes condiciones:

- Deberá ser químicamente resistente a los lixiviados.
- Deberá ser suficientemente resistente para reforzar el tamaño de hueco de las gravas sobre las que descansa.
- Deberá retener el 95% de las partículas del lixiviado.
- Deberá tener una relación permeabilidad/espesor ajustada a la norma ASTM D 4.491.

- Tuberías de drenaje y evacuación.

Deberán contar con las siguientes características:

- Las tuberías de drenaje serán ranuradas y las de evacuación ciegas.
- Tendrán un diámetro mínimo de 150 mm.
- Su pendiente mínima será del 2%.
- Estarán construidas con un material que garantice su funcionalidad frente a acciones físicas, químicas y biológicas durante la totalidad del ciclo de vida del vertedero (incluyendo la fase postclausura).
- La densidad de disposición de tuberías de drenaje será tal que la distancia entre éstas no exceda 20 m.
- Contarán con registros espaciados y accesibles por ambos extremos para su limpieza e inspección.

2.2.3. Cubiertas de sellado.

El Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, señala la posibilidad de que aquellos vertederos en los que se prevea la generación de cantidades significativas de lixiviados, y una vez haya concluido su vida útil, sean objeto de operaciones de sellado. Describe, en este sentido, una estructura orientativa de cubierta de sellado tanto para vertederos de residuos peligrosos como no peligrosos. Conviene señalar, además, que cuando sean de prever importantes asentamientos, particularmente



en vertederos con contenidos significativos de fracción orgánica, se puede plantear efectuar un sellado provisional previo al definitivo hasta el momento en que los asientos se estabilicen.

En este apartado se plantea un desarrollo adicional a lo señalado en la legislación mencionada, especificando las recomendaciones de cubiertas para las tres clases de vertederos.

Resulta pertinente, no obstante, hacer algunas consideraciones previas respecto de la razón de ser y las funcionalidades requeridas a las cubiertas.

Con relación a su función conviene señalar que tanto el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, como la Directiva que éste transpone sólo justifica las mismas en relación con la disminución en la generación de lixiviados. Sin restar importancia a este factor, las cubiertas cumplen otras funciones ciertamente relevantes, actuando como elementos que aíslan la masa de residuos del medio ambiente, facilitan el abatimiento de gases y olores, potencian la escorrentía superficial de las aguas de lluvia, atenúan los efectos de asentamientos en la masa de residuos y son en definitiva la base para una restauración ambiental y paisajística efectiva de los terrenos ocupados por los vertederos.

El diseño de una cubierta ha de plantearse, además, tomando en consideración que las funciones descritas han de ser mantenidas por periodos de tiempo muy prolongados (del orden de centenares de años) debiendo ser particularmente resistentes a fenómenos de asentamiento, erosión o ciclos de sequía-humefacción.

La estructura básica de una cubierta consta, en sentido ascendente, de:

- Capa de regularización.
- Capa de recogida de gases (cuando sea menester).
- Capa de impermeabilización.
- Capa de filtración y drenaje de aguas infiltradas y,
- Capa de cobertura.

2.2.3.1. Capa de regularización.

La capa de regularización deberá estar constituida por materiales de elevada resistencia mecánica que sean capaces de absorber sin deformaciones apreciables los esfuerzos verticales del peso de la maquinaria que operará durante la construcción de la cubierta. Se considerará la utilización de residuos de construcción y demolición adecuados en sustitución de materiales vírgenes. El espesor de esta capa se ajustará a lo señalado en el cuadro siguiente para las distintas clases de vertedero.

	Vertederos de residuos no peligrosos	Vertederos de residuos inertes	Vertederos de residuos peligrosos
Espesor de la capa (m).	> 0,5 m.	> 0,5 m.	> 1 m.

En vertederos susceptibles de generar gases en cantidades apreciables (vertederos de residuos no peligrosos y vertederos de residuos peligrosos) se podrá considerar la disposición en la coronación de una subcapa para la recogida de gases. Dicha subcapa estará constituida por arenas limpias con un mínimo de porosidad comunicada. Las características de dichas arenas serán iguales a las señaladas en el apartado 2.2.2.



2.2.3.2. Capa de recogida de gases.

Estará construida con materiales de una permeabilidad mínima de 10^{-3} ms^{-1} que estimativamente corresponde a una textura arena gruesa-grava. Alternativamente esta capa puede sustituirse por un geodren de las mismas características de permeabilidad flanqueado por geotextiles en ambas caras.

En el caso de que la capa de drenaje de gases se construya con materiales granulares el espesor de dicha capa no será inferior a 0,3 m quedando en cualquier caso condicionado por la posibilidad de que en la misma puedan quedar embebidas tuberías horizontales de captación de gases.

2.2.3.3. Capa de impermeabilización.

La capa de impermeabilización constará de una lámina de impermeabilización flanqueada por geotextiles de protección de las mismas características descritas para la impermeabilización del fondo del vertedero.

En algunas circunstancias, dependiendo de la gestión de lixiviados que se pretenda llevar a cabo en el periodo postclausura, la lámina de impermeabilización puede ser sustituida por otra equivalente de naturaleza mineral.

En efecto, en las cubiertas de vertederos que albergan residuos con una alta proporción de fracción orgánica la lámina de impermeabilización puede jugar un papel en un doble sentido, en cierto modo antitético, pues si bien es cierto que actúa eliminando las infiltraciones de agua y minimizando la generación de lixiviados, conviene tener en cuenta que la metanogénesis de los residuos orgánicos es muy sensible a las condiciones de humedad y prácticamente se detiene por debajo de determinados niveles. La interrupción de la metanogénesis se mantendría en tanto persistiesen las condiciones de sequedad siendo, sin embargo, susceptible de reiniciarse en cualquier momento en que se volvieran a dar las condiciones de humedad requerida.

El proceso descrito, por otro lado, conviene considerarlo desde la perspectiva del tipo de gestión previsto para los lixiviados de vertedero una vez se produzca la clausura del mismo. Si la gestión que se considera es la reinyección⁸ por debajo de la lámina de impermeabilización de la cubierta, es deseable que ésta sea tan perfecta como sea posible y, en tal sentido, se considera plenamente justificada la elección de material plástico para la lámina. Si contrariamente se planea gestionar los lixiviados fuera de la planta, cabría considerar la posibilidad de una lámina de naturaleza mineral con una mayor conductividad hidráulica que permitiera cierto grado de infiltración. En este último caso habrá también que tener en consideración que las láminas minerales no son tan efectivas como las plásticas en términos de gestión de gases.

En los vertederos de residuos peligrosos la impermeabilización constará forzosamente de una lámina de HDPE de iguales características a las señaladas en el punto 2.2.1 (lámina impermeabilizante) o por una manta de bentonita de las mismas características a las señaladas en el mismo punto.

2.2.3.4. Capa de filtración y drenaje de aguas infiltradas.

De las características señaladas en el punto 2.2.2.

⁸ No obstante, esta práctica vendrá limitada tanto por la carga contaminante del lixiviado que pudiera llevar a la reducción de la actividad biológica anaerobia, como por los efectos de la recirculación de dichos lixiviados en la estabilidad mecánica de los vertederos.



2.2.3.5. Capa de cobertura.

Coronando la estructura se dispondrá una capa de cobertura de un espesor mínimo de 1 m. Las funciones a desarrollar por esta capa incluyen, entre otras:

- Servir de medio para el crecimiento de una cubierta vegetal en condiciones adecuadas.
- Minimizar los efectos erosivos de la escorrentía superficial.
- Evapotranspirar.
- Oxidar gases de vertedero, particularmente los gases difusos.
- Mitigar el impacto visual de los vertederos.

El diseño de esta cubierta debe ser abordado con exactamente el mismo rigor técnico que le es prestado al resto de los elementos de aislamiento del vertedero.

En tal sentido se debe considerar la creación de las condiciones adecuadas para crear un sustrato de crecimiento que haga viable la implantación y mantenimiento a largo plazo de colonias herbáceas estables. En definitiva, a largo plazo, la cubierta formará un suelo.

Los materiales a utilizar serán de naturaleza terrígena con dos características relevantes: textura y propiedades hidráulicas. La textura de los materiales a emplear debe asegurar la existencia de reservas de agua para las plantas en periodos de sequía, en tal sentido son recomendables suelos de texturas limosas o franco-limosas. El contenido en materia orgánica de los materiales terrígenos de la cubierta condiciona, por otra parte, el grado de cohesión, sus propiedades hidráulicas y su resistencia a la erosión. En este sentido se estima que el contenido mínimo de materia orgánica no debe ser inferior al 3% en peso. A tal propósito se puede considerar la posibilidad de adicionar compost a los materiales terrígenos hasta alcanzar dichos niveles. Además, se controlarán otros factores edáficos como pH y nutrientes añadiendo correctores para las deficiencias que pudieran persistir tras las enmiendas orgánicas.

En el extendido de la cubierta la maquinaria empleada deberá trabajar en direcciones paralelas al contorno del vertedero para reducir los riesgos de erosión y promover la retención de semillas en la revegetación.

La revegetación de la cubierta debe plantearse inmediatamente finalizada la disposición de ésta seleccionándose especies herbáceas resistentes adaptadas a las condiciones climáticas del vertedero. Deberá cubrir con éxito un porcentaje mínimo del 90% del vertedero al final del primer año, reparando las zonas erosionadas y resemillando en caso contrario.

2.3. Sistemas de recogida de lixiviados

La balsa de lixiviados recoge y almacena los lixiviados producidos por el contacto del agua con la masa de residuos y su percolación a través de estos hasta la capa de drenaje o de aguas de escorrentía que han estado en contacto con los residuos o las cubiertas temporales. Para el diseño de sus capacidades, operación y características deberán considerarse los siguientes aspectos:

- Su capacidad de almacenamiento mínimo se calculará teniendo en consideración los picos de pluviometría máximos en 24 horas esperados en un periodo de retorno de 25 años para vertederos de residuos inertes, y 50 para el caso de los vertederos de residuos peligrosos y no peligrosos. Para el cálculo de las dimensiones mínimas también se considerará la naturaleza de los residuos previstos en el vertedero y su retención específica, la pluviometría total y estacional y la evapotranspiración.
- La capacidad de almacenamiento mínimo de la balsa será tal que ésta sea suficiente para recoger los lixiviados generados en cualquier época del año.



- La capacidad final de la balsa a instalar será el doble de la capacidad mínima para facilitar el mantenimiento y prevenir fallos de operación y contarán con un sistema antirebose.
- Dispondrán de un sistema de drenaje perimetral y un sistema de inspección para la detección de cualquier fuga o filtración al terreno o un sistema automático de detección de fugas.
- Podrán cubrirse, bien de manera permanente o bien de forma temporal, si las condiciones meteorológicas lo requieren.
- Deberán disponer de un sistema de vallado independiente al general de las instalaciones de residuos. Igualmente contarán con las protecciones individuales y colectivas para la seguridad de los trabajadores.
- Los costados y el fondo se recubrirán de material sintético impermeabilizante cuyas características deberán ser similares a la lámina impermeabilizante del fondo del vaso de vertido.
- Contarán con los elementos adecuados (plataformas, escaleras, etc.) para garantizar la seguridad en la toma de muestras.
- Los tubos de evacuación de lixiviados influentes estarán dotados de caudalímetros.

2.4. Sistemas de recogida y tratamiento de gases.

El Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, señala que en las instalaciones de vertido que admitan residuos biodegradables los gases de vertedero deberán ser recogidos y aprovechados o al menos tratados. También señala la preferencia por adelantar, tanto como sea posible, la captación y aprovechamiento/tratamiento de gases no esperando a la clausura de los vertederos.

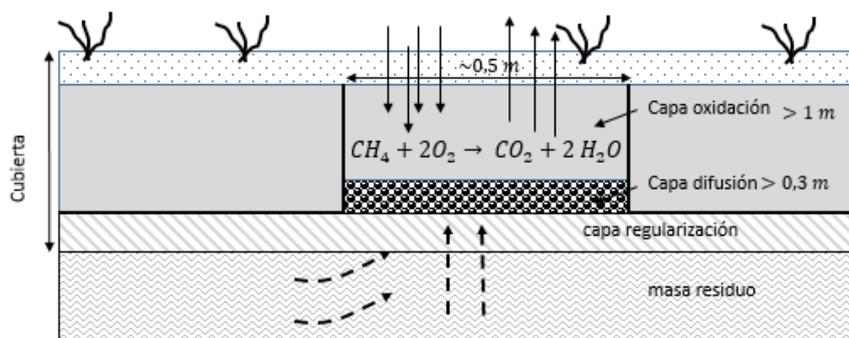
Existen dos planteamientos para los sistemas de captación de gases: pasivos y activos. Los sistemas pasivos descansan en la difusión y movimiento del gas de vertedero por gradiente de presión: el gas de vertedero a mayor presión que la atmosférica se desplaza hacia zonas del vertedero en que es recogido en zanjas permeables perimetrales y/o bioventanas dispuestas sobre la masa de residuos donde la presión se iguala a la atmosférica. En los sistemas activos el diferencial de presión es creado mediante una red de pozos de extracción horizontales o verticales perforados en la masa de residuos trabajando a presión negativa.

Obviando consideraciones económicas, optar por uno u otro planteamiento va a depender esencialmente de la cantidad de gas de vertedero que previsiblemente se pueda generar que, en última instancia, estará condicionada por el tipo y cantidad de materia orgánica en los residuos y su grado de evolución.

- Sistemas pasivos.

Los sistemas pasivos resultan una opción a considerar en instalaciones que hayan admitido residuos con baja proporción de fracción orgánica en los que la cantidad de gas de vertedero generada haga técnica o económicamente inviable su aprovechamiento o combustión en antorcha. En la figura se representa una sección tipo de bioventana. Éstas constan de una capa de difusión, constituida por una capa de gravas de un espesor mínimo de 0,5 m de gravas de granulometría de 16-32 mm y, una capa de oxidación de compost de buena calidad⁹ de un espesor mínimo de 1 m.

⁹ Tendrá un valor de índice Rottegrade IV-V, una densidad <0,4 g/cm³.



La densidad mínima de bioventanas se establece en 4/Ha.

- Sistemas activos.

Los sistemas activos están constituidos por una red de pozos de extracción que aspiran el gas.

Las cuestiones que considerar en el diseño de dichos sistemas deben atender los siguientes aspectos:

- Se debe determinar del radio de influencia¹⁰ de cada pozo espaciándolos y solapándolos de modo que quede asegurando que la totalidad de la superficie del vertedero quede cubierta.
- Los materiales de las tuberías de impulsión deben ser mínimamente flexibles y resistentes a la corrosión (p.e. polietileno de alta densidad).
- Las tuberías deben ser ranuradas (excepto en su tramo superior para prevenir la entrada de aire)
- El anular de los pozos debe quedar relleno por materiales permeables (p.e. gravas).
- Los pozos deben estar dotados de un dispositivo para la toma de muestras.
- Los gases recuperables no contendrán más de un 5% de O₂ en volumen para no alcanzar valores de explosividad. Para alcanzar esta situación se regulará el vacío de cada pozo y se impermeabilizará la embocadura del pozo en superficie para reducir la entrada de aire.
- La profundidad de los pozos debe ser tal que durante su perforación se asegure que no se dañara el sistema de impermeabilización de fondo.
- Se dispondrá de un procedimiento para la recogida y gestión de condensados

- Antorchas.

Los gases extraídos mediante sistemas activos son canalizados y enviados a motores para su aprovechamiento o a combustión en antorcha. En este último caso, los requisitos mínimos exigibles a las antorchas son los siguientes:

- Contarán con indicador y registrador de temperatura asegurando que la temperatura de trabajo es de 850°C o superior.
- Contarán con dispositivos automáticos que garanticen la proporción de oxígeno adecuado para alcanzar la temperatura requerida.
- Estarán dotadas con dispositivo de parada automática cuando la riqueza del gas de vertedero sube o baja de determinados valores límite, desactivando las soplantes.
- Contarán con dispositivos de muestreo e inspección.

¹⁰ En la bibliografía se describen radios de influencia en vertederos de residuos municipales en el rango 15 - 100 m.



- Contarán con pantallas de protección contra el viento y para facilitar las operaciones de muestreo e inspección.

2.5. Sistemas de contención de residuos volados.

A efectos de evitar la dispersión de residuos livianos (plásticos, materiales ligeros, papeles, etc.) en zonas despejadas con riesgo de fuertes vientos, se diseñará un vallado de captación con la suficiente altura y resistencia para poder atrapar y contener dichos residuos.

3. Estabilidad de los vertederos.

Entre los requisitos exigibles en el planeamiento de los vertederos se debe señalar la necesidad de que su geometría y características constructivas se traduzcan en la conformación de estructuras mecánicamente estables incluso en condiciones de fallo que puedan provocar una inestabilidad en el vertedero con consecuencias para la seguridad de las personas y/o el medio ambiente. En tal sentido se consideran los siguientes escenarios de riesgo:

- Situaciones de bajo riesgo son aquéllas en las que una potencial inestabilidad provocaría exclusivamente daños materiales sin consecuencias significativas ambientales ni para la seguridad de las personas.
- Situaciones de riesgo medio en las que una potencial inestabilidad provocaría daños significativos para el medio ambiente pero no para la seguridad de las personas.
- Situaciones de alto riesgo son aquéllas en las que se pueden provocar daños a personas o bien impactos ambientales severos o irreversibles.

El análisis de estabilidad debe considerar la existencia de una serie de superficies de contacto que actúan como elementos de discontinuidad y sobre tales superficies deben centrarse los estudios geotécnicos pertinentes. En particular atenderán las siguientes:

- Estabilidad del conjunto vertedero-terreno.
- Estabilidad interna de la masa de residuos.
- Estabilidad local de la capa de sellado por deslizamiento del contacto de los distintos elementos del sellado.
- Estabilidad del conjunto vertedero -impermeabilización de fondo-, si procede, por deslizamiento entre distintos elementos de la capa impermeable. En el caso de que en la impermeabilización de fondo se haga uso de láminas texturizadas el incremento en los coeficientes de fricción se determinará tomando en consideración la carga ejercida por los residuos en la cota de llenado del diseño.

En el diseño de la geometría de los vertederos, en particular en lo referido a la estabilidad de taludes, se considerarán, cuanto menos, dos escenarios: uno normal con vertederos situados en zonas de bajo riesgo sísmico, con la impermeabilización de fondo y los sistemas de drenaje de lixiviados funcionando correctamente y otro accidental en que alguna de estas circunstancias no se verifica.

En el escenario normal para las superficies arriba señaladas se determinará una situación de ángulo de reposo estable ponderándose con los siguientes factores de seguridad:



Situación de riesgo	Clase de vertedero		
	Residuos inertes	Residuos no peligrosos	Residuos peligrosos
Bajo	1.3	1.4	1.5
Medio	1.4	1.5	1.6
Alto	1.5	1.6	1.8

En escenario accidental (vertedero situado en zonas de riesgo sísmico medio-alto o hipótesis de obturación de drenajes o hipótesis de fallo de la impermeabilización de fondo) se requerirá de la realización de un análisis específico para determinar dichos factores. Para este análisis se admitirá una reducción de 0.10 en los coeficientes de seguridad arriba señalados.

Igualmente, en el caso de que durante la fase operativa del vertedero o en periodo de vigilancia postclausura se detectasen acumulaciones significativas de lixiviados o indicios de pérdida de impermeabilidad en el vaso habrán de reexaminarse los factores mediante estudios específicos.



**IV. Programas de vigilancia de vertederos en fase activa y postclausura.
Valoración de los resultados de los programas: Incumplimientos y niveles
de intervención.**



1. Introducción.

Los programas de vigilancia de los vertederos son el instrumento esencial para determinar que las operaciones de vertido se realizan sin producir efectos negativos significativos para el medio ambiente, tal y como se señala en el artículo 1 del RD 646/2020, de 7 de julio.

El mencionado real decreto establece la obligación de que, entre la documentación a remitir para la solicitud de autorización (Anexo V.1.A.11º), se incluya un apartado específico a este respecto, y que las autoridades ambientales se pronuncien sobre el alcance y contenido de dichos programas (Anexo VI.1.A.8º). De este modo, la correcta definición y ejecución de los programas resultan ser uno de los aspectos considerados para la concesión de las autorizaciones de las instalaciones de vertido. Igualmente, el artículo 15 señala que con una frecuencia mínima anual los explotadores de los vertederos están obligados a remitir informes sobre los resultados de la ejecución de los programas de vigilancia.

Estos programas juegan, por otra parte, un papel central en la determinación del momento en que, finalizado el periodo postclausura, los vertederos dejan de constituir un riesgo para el medio ambiente, siendo razonable hacer descansar tal decisión en una valoración en perspectiva de los resultados de los programas durante dicho periodo, en consecuencia las resoluciones de clausura habrán de considerar estos resultados.

Por otra parte, el RD 646/2020, de 7 de julio, señala en su anexo III la necesidad de establecer niveles de intervención en relación con la vigilancia de la calidad de las aguas subterráneas, definiéndolos como las concentraciones de sustancias en piezómetros de control que ponen de manifiesto la existencia de variaciones significativas en su calidad.

En relación con los niveles de intervención conviene tomar en consideración que los fenómenos valorados en dichos programas, particularmente en lo relacionado con la afección a las aguas subterráneas, son por una parte de carácter progresivo, quedando sujetos por otra a fluctuaciones de naturaleza aleatoria. En atención a estas circunstancias y a la conveniencia de no incurrir en excesos en la declaración de tales niveles, parece adecuado establecer un sistema de “avisos” de carácter gradual. De este modo se definen los incumplimientos como desviaciones de carácter puntual y los niveles de intervención, a partir de la constatación de incumplimientos simultáneos en más de un parámetro o de su persistencia en el tiempo.

Se estima además que a efectos de dar sentido y utilidad a los programas de vigilancia es razonable extender este sistema de avisos a otras variables concurrentes particularmente las relativas al control de gases y lixiviados, también incluidas en dichos programas.

Los niveles de intervención no valoran la magnitud de los posibles efectos ambientales y, en consecuencia, no conjeturan situación de riesgo ambiental alguna. Sin embargo, sí deben poner sobre aviso a las autoridades ambientales sobre la posibilidad de que un vertedero en esta situación ya sea en fase activa o en periodo postclausura, no esté operando en observancia del artículo 1 del real decreto 646/2020, de 7 de julio. En cualquier caso, la entrada en niveles de intervención para cualquiera de las variables contempladas en los programas de vigilancia debe comportar como mínimo la realización de estudios específicos que permitan determinar los efectos en el medio ambiente y la seguridad de los vertederos y a la luz de los resultados de dichos estudios a la conveniencia de activar alguna de las medidas contempladas en los planes de emergencia señaladas en el Anexo III de esta pieza legislativa.

Con una frecuencia mínima trienal se procederá a una evaluación conjunta de los resultados de los programas de vigilancia analizando los resultados acumulados en los tres años anteriores. Las autoridades ambientales señalarán el año de inicio del primer periodo trienal de evaluación.



2. Vigilancia de lixiviados.

2.1. Volúmenes de lixiviados generados.

Como se señala en el apartado correspondiente de estas recomendaciones, los datos meteorológicos recopilados servirán como base para la determinación de la infiltración en el cálculo de los volúmenes teóricos de lixiviados generados por el método del balance hídrico.

Como quiera que dicho método está sujeto a un buen número de incertidumbres (diferencias entre precipitaciones anuales estimadas y reales, variaciones en el almacenamiento de la masa de residuos, etc.) es razonable asumir que existan ciertas discrepancias entre las cantidades de lixiviados generados medidas y las estimadas.

2.1.1. Redes de vigilancia de lixiviados y frecuencia de medida.

Los volúmenes de lixiviados recogidos en la balsa se determinarán con la frecuencia mínima señalada en el Anexo III.3 del Real Decreto 646/2020, de 7 de julio. Para la realización del balance hídrico anual, estos volúmenes serán contrastados anualmente frente a los volúmenes teóricos generados.

En aquellos vasos en los que sea previsible la generación y acumulación de cantidades importantes de lixiviados se dispondrá de al menos un pozo de registro de lixiviados completamente penetrante -hasta el límite superior de la impermeabilización- en la masa de residuos para su control.

En cualquier caso, dichos pozos de registro se instalarán en aquellos vertederos en que se dé alguna de las siguientes circunstancias:

- Vertederos que admitan una cantidad media superior a 50.000 t/año.
- Vertederos con espesores de apilamientos de residuos superiores a 20 m.
- Vertederos con talud frontal de pendiente igual a superior a 2H:1V.
- Vertederos en que la evacuación de lixiviados requiera medios mecánicos o no pueda realizarse por gravedad.
- Vertederos que admitan residuos biodegradables.

En estos pozos de registro con una frecuencia mínima mensual se determinará la altura del nivel piezométrico.

2.1.2. Incumplimientos y niveles de intervención

En relación con la posibilidad de fugas de lixiviados se determinará la existencia de un incumplimiento cuando en la evaluación trienal del programa de vigilancia se aprecie la existencia de diferencias superiores al 20% entre los volúmenes de lixiviados medidos y los calculados por el método en alguno de los balances hídricos anuales.

Igualmente se determinará la existencia de un incumplimiento cuando en alguna de las medias anuales de las medidas de nivel de los lixiviados arriba señaladas incluidas en el periodo trienal se determinen incrementos en el volumen de lixiviados acumulados en la base del vertedero superiores al 10%.

Se considerará que se alcanza el nivel de intervención cuando se produzcan dos incumplimientos consecutivos dentro de la misma evaluación trienal o más de dos no consecutivos en dos evaluaciones trienales consecutivas.



2.2. Control de la composición química de lixiviados.

Los lixiviados se producen como resultado de la interacción de las aguas percoladas con la masa de residuos. Su composición es extremadamente variable y en cualquier caso absolutamente dependiente de la naturaleza y la composición de los residuos que alberga el vertedero.

La necesidad de controlar la composición química de los lixiviados deriva de la posibilidad de introducir cantidades significativas de contaminación en las aguas subterráneas en el caso de fallos en la impermeabilización de fondo y, por otro lado, orienta el alcance y parámetros químicos a determinar en el programa de vigilancia de las aguas subterráneas. Además, el análisis de muestras de lixiviados en un mismo vertedero a lo largo del tiempo permite, en el caso de vertederos que admiten residuos con una alta proporción de fracción orgánica, determinar en qué medida se ha estabilizado la materia orgánica durante el enterramiento.

2.2.1. Determinaciones analíticas y frecuencia de los análisis.

De acuerdo con lo señalado en el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, los lixiviados deben ser muestreados y analizados periódicamente. Las muestras de lixiviados podrán ser recogidas tanto en las balsas como, en caso de disponerse de ellos, en los piezómetros de control.

La frecuencia del muestreo y la relación mínima de analitos a determinar en éstos se recogen en el cuadro adjunto.

Parámetro	Frecuencia	
	Trimestral	Semestral
Al		x
Alcalinidad		x
Amonio		x
As		
C.O.T.		x
Cd		
Cloruros		x
Conductividad	x	x
Cr total		
Cu		x
DBO		x
DQO		x
Eh	x	x
Fe		x
Fenoles		x
Mn		x
Nitratos		x
O2 disuelto	x	x
Pb		x
pH	x	x
S.T.D.		x
SVOCs		x
VOCs		x
Zn		x

La relación de analitos recogida en el cuadro se entiende como básica. Dicha relación podrá y deberá ser ampliada a la luz de la naturaleza y composición de los residuos admitidos en un vertedero concreto.



3. Vigilancia de las aguas subterráneas.

3.1. Redes de vigilancia.

En la formación acuífera más próxima a la base del vertedero en los términos establecidos en el punto 2.3. del capítulo II de estas recomendaciones y, si procede, en aquellos otros que pudieran estar en conexión hidráulica con éste se dispondrá una red piezométrica para el control de la calidad de las aguas subterráneas. Dicha red está constituida de acuerdo con lo señalado en el RD 646/2020 por un mínimo de tres piezómetros (uno aguas arriba -piezómetros de referencia- y dos aguas abajo -piezómetros de control-). La disposición de los piezómetros situados aguas abajo atenderá a las características del flujo subterráneo deducidas de los estudios hidrogeológicos previos, particularmente la velocidad media de las aguas subterráneas y la posible dispersividad de los contaminantes en el acuífero.

La evaluación del plan de vigilancia de la calidad de las aguas subterráneas se realizará atendiendo a los valores de referencia que se puedan establecer en las autorizaciones. No obstante, en aquellos casos en que éstas no especifiquen dichos valores se plantearía una evaluación en términos de variaciones estadísticamente significativas en las variables periódicamente determinadas en piezómetros de control y referencia. Alcanzar unos mínimos niveles de significatividad aconseja las más de las veces incrementar el número de piezómetros de referencia para la correcta definición de los valores de fondo y el número de piezómetros de control para incrementar las posibilidades de detectar posibles contaminaciones en caso de tratarse de acuíferos anisótropos.

Los piezómetros penetrarán completamente el acuífero y, cuando no sea posible un mínimo de 5 metros en éste contarán con un tapón de fondo, el espacio anular alrededor de la zona enrejillada se rellenará de material silíceo filtrante de granulometría adecuada. La zona enrejillada cubrirá exclusivamente la sección de acuífero que se pretende controlar debiendo quedar hidráulicamente aislada de otras formaciones o de la superficie. Por encima de la zona enrejillada se dispondrá un sello bentonítico y se cementará el espacio anular hasta la superficie. Se estima muy importante ajustarse escrupulosamente a las características constructivas descritas para evitar la mezcla de aguas de otros acuíferos o la entrada de aguas superficiales que pudieran falsear la química del acuífero que se pretende controlar.

La tubería piezométrica será preferentemente de polietileno.

Tras la construcción de los piezómetros se procederá a su desarrollo. Igualmente, antes de la toma de muestras se procederá a un purgado de los mismos.

El objeto de esta red de vigilancia es la detección tan pronto como sea posible de eventuales fugas de lixiviados que se puedan producir en la base del vertedero con la consiguiente inyección de éstos en las aguas subterráneas. Ello obliga a muestrear periódicamente tanto los piezómetros de referencia como los de control y a la realización de determinaciones *in situ* en las aguas subterráneas muestreadas y al análisis de las mismas en laboratorio.

La definición de la frecuencia de muestreo y los parámetros analíticos a determinar es el resultado de conjugar varios factores entre los que deben citarse los siguientes: a) que la red de vigilancia sea suficientemente eficiente para detectar indicios o evidencias de contaminación de modo temprano, b) que los falsos positivos que con casi absoluta seguridad se vayan a producir durante un programa de vigilancia a largo plazo se mantengan en tasas razonables y, por último, c) que los costes de puesta en práctica del programa sean asequibles.

Tal y como se expone en el anexo de estas recomendaciones, relativo a la valoración de los programas de vigilancia de las aguas subterráneas, dicha valoración se plantea sobre la base de



pruebas estadísticas de contraste de hipótesis. Como quiera que tales contrastes llevan implícitamente asociados la posibilidad de errores de tipo II (falsos positivos) y que este tipo de errores se multiplican rápidamente con la repetición de las pruebas, se hace necesario reducir su número tanto como sea posible sin que tal reducción suponga merma en la capacidad de detección. El modo inmediato de reducir el número de pruebas es reducir el número de variables sobre las que éstas se realizan. A estos efectos, de entre todos los analitos arriba mencionados se han seleccionado un número reducido de éstos que serán objeto de las pruebas estadísticas pertinentes en las evaluaciones trienales. Estas variables se denominan variables de control.

La relación de variables de control propuesta es de naturaleza orientativa y de hecho debería ser adaptada en cada programa de vigilancia a la luz de la composición específica de los lixiviados mediante técnicas adecuadas (p.e. análisis de componentes principales).

3.2. Determinaciones analíticas y frecuencia de los análisis.

En el cuadro adjunto se recoge la relación de analitos a determinar tanto en los piezómetros de referencia como en los de control y, cuando procede, su carácter de variable de control, siendo la frecuencia mínima de control semestral. La relación de analitos recogida en el cuadro se entiende como básica, pudiendo incrementarse a la luz de la naturaleza y composición de los residuos admitidos en un vertedero concreto y a la previsible composición de los lixiviados.

Parámetros	Observaciones
Al	
Alcalinidad	
Amonio	variable de control
As	
C.O.T.	variable de control
Ca	
Cd	
Cloruros	variable de control
CO ₃ H	
Conductividad	variable de control
Cr total	
Cu	variable de control
DBO	variable de control
DQO	variable de control
Eh	
Fe	
K	
Mg	
Mn	
Na	
Nitratos	variable de control
Nitritos	
O ₂ disuelto	
Pb	
pH	
S.T.D.	
SO ₄	
SVOCs	variable de control
VOCs	variable de control
Zn	



Existe una discusión no concluida sobre la conveniencia o no de hacer las determinaciones analíticas en las aguas subterránea sobre muestras filtradas o sin filtrar. A este respecto se estima que la red de vigilancia, además de detectar contaminaciones de las aguas subterráneas, debe cuantificar tanto como sea posible la carga total de contaminantes y que, por otro lado, el propio esqueleto del acuífero actúa como filtro. En atención a ambas circunstancias estas recomendaciones asumen que salvo en casos muy justificados, las determinaciones analíticas deberán realizarse sobre muestras sin filtrar.

3.3. Incumplimientos y niveles de intervención.

Trienalmente se procederá a evaluar la existencia de diferencias en los valores de las variables de control determinadas en piezómetros de referencia y control.

Se considerará que existe un incumplimiento cuando en una variable de control se aprecia la existencia de diferencias significativas en las concentraciones determinadas en piezómetros de referencia y de control. La determinación de la significatividad de las diferencias se realizará de acuerdo con lo señalado en el Anexo correspondiente de estas recomendaciones.

Se alcanzarán los niveles de intervención si en la realización de estas comparaciones se verifica alguna de las siguientes circunstancias:

- En un mismo periodo trienal se dan incumplimientos en los piezómetros ubicados aguas abajo del vertedero en 2 o más variables de control o
- En dos periodos trienales consecutivos se dan incumplimientos en la misma variable de control.

4. Vigilancia de la estabilidad del vertedero.

4.1. Redes de vigilancia

Durante la fase de explotación del vertedero se controlará periódicamente la velocidad de llenado del vaso mediante levantamiento topográfico anual determinándose la superficie ocupada por los residuos vertidos, la duración del depósito, el peso y volumen de residuos vertidos, su naturaleza (biodegradables, RCDs, etc.) y la capacidad restante, tal y como se señala en el apartado 6 del Anexo III del Real Decreto 646/2020, de 7 de julio.

Igualmente, tanto durante la fase de explotación como en periodo de vigilancia postclausura, se determinará periódicamente el comportamiento mecánico del vertedero mediante el control topográfico de una red de secciones de medida. Dicha red constará de un mínimo de 2 secciones: una en la coronación y otra en el pie del talud. Adicionalmente, se controlará la frecuencia de aparición de grietas y regueros de erosión.

En los vertederos en que los residuos depositados presenten taludes frontales de altura superior a 20 m o pendientes mayores de 2,5H : 1V, las características de la red de vigilancia (densidad de secciones y situación de las mismas) se establecerá como resultado de un estudio de estabilidad específico. Igualmente se requerirá un estudio específico de estabilidad en cualquier otro vaso de vertido en que como resultado de la aplicación del plan de vigilancia se observen movimientos o frecuencias significativas de aparición de grietas.

Las frecuencias mínimas de medida de estos parámetros según la clase de vertedero se recogen en el siguiente cuadro:



	Inertes	No peligrosos	Peligrosos
Capacidad restante	Anual	Semestral	trimestral
Movimientos verticales	Anual	Trimestral	trimestral
Movimientos horizontales	Anual	Trimestral	trimestral
Grietas y regueros de erosión	Anual	Mensual	trimestral

4.2. Incumplimientos y niveles de intervención.

No resulta posible establecer criterios de incumplimiento o entrada en niveles de intervención debido a la enorme variabilidad de las propiedades mecánicas de los residuos debiendo establecerse caso por caso a la luz de la escala de los movimientos en cada vertedero determinada en las secciones.

5. Vigilancia de gases de vertedero.

En vertederos que admitan residuos biodegradables y en aquellos otros que hayan admitido residuos que en contacto con otros residuos o con el agua sean susceptibles de producir gases, el programa de vigilancia considerará el control tanto de los gases captados como los emitidos de forma difusa. Dicho programa abarcará tanto la fase operativa como la fase postclausura.

5.1. Redes de vigilancia de gases.

Para los gases captados estará constituida tanto por los pozos de extracción de gases como por las bioventanas. Para los gases difusos se establecerá una red de puntos de medida representativos para la determinación de las tasas de emisión; dicha red estará constituida por un mínimo de 1 punto de medida por cada 20 hectáreas de celda sellada o parcialmente sellada.

En cada uno de los pozos de extracción o bioventanas se determinará el volumen anual extraído y, en al menos uno de ellos representativo, se realizarán las determinaciones analíticas que se especifican en el cuadro del apartado siguiente.

En las parcelas para la medida de las emisiones difusas se determinará la tasa de emisión de metano y la concentración promedio horaria de metano y ácido sulfhídrico.

5.2. Determinaciones analíticas y frecuencia de los análisis.

Con la frecuencia que se indica en el cuadro se realizarán las siguientes determinaciones:

		Concentración				
		CH₄	CO₂	O₂	SH₂	H₂
Fase operativa	Emisiones captadas/circuladas por bioventanas	mensual	mensual	mensual	mensual	mensual
	Emisiones difusas ⁽¹⁾	anual (2)			anual (2)	
Fase postclausura	Emisiones captadas/circuladas por bioventanas	semestral	semestral	semestral	semestral	semestral
	Emisiones difusas	anual (2)			anual (2)	



5.3. Incumplimientos y niveles de intervención.

Para las emisiones captadas no se establecen valores de incumplimiento o niveles de intervención más allá de los que pudieran derivarse de la aplicación de la normativa de seguridad e higiene para los trabajadores expuestos.

Respecto de las emisiones difusas la definición de incumplimientos se establece en relación con las siguientes concentraciones medias horarias máximas admisibles para metano y ácido sulfhídrico:

- $[\text{CH}_4] > 16.000 \text{ mg/m}^3$.
- $[\text{SH}_2] > 5 \text{ mg/m}^3$.

Se da incumplimiento cuando en alguno de los puntos la concentración anual medida excede alguna de las concentraciones medias horarias arriba señaladas.

Se entrará en niveles de intervención cuando:

- En un mismo periodo trienal se acumula más de 1 incumplimiento o
- En dos periodos trienales consecutivos 3 o más incumplimientos.



ANEXO

Valoración de los resultados del programa de vigilancia de las aguas subterráneas: métodos de interpretación de resultados.



1. Métodos de interpretación de los resultados de los programas de vigilancia de las aguas subterráneas y requisitos generales de aplicación.

Las concentraciones de una sustancia en un medio natural como son las aguas subterráneas son variables de naturaleza aleatoria, ello unido a que la acumulación a lo largo del tiempo de información analítica sobre la calidad de estas aguas en los piezómetros de referencia y control dan lugar a extensas series de datos, conduce a la conveniencia de analizarlas por los métodos estadísticos propios de dichas variables, derivándose de los resultados de este análisis la existencia de incumplimientos y la entrada en niveles de intervención para el quimismo de las aguas subterráneas mencionados en el Anexo III.4 del Real Decreto 646/2020, de 7 de julio.

Desafortunadamente, salvo referencias un tanto incompletas en este real decreto y en la directiva que transpone, no se tiene conocimiento de que ningún Estado Miembro de la UE haya planteado mayores precisiones respecto del método con que evaluar los resultados de los programas de vigilancia de la calidad de las aguas subterráneas y los criterios para la definición de incumplimientos y entrada en niveles de intervención. Por el contrario, la legislación en materia de residuos de los Estados Unidos de América, y en particular la relativa a las autorizaciones de vertederos, sí que hace referencia explícita de dichos métodos señalando qué requisitos técnicos son de aplicación en cada caso ([*Resource Conservation and Recovery Act*](#)¹¹). Estas recomendaciones asumen dichos métodos al entender que se encuentran entre las mejores prácticas de gestión de vertederos -interpretación de los resultados de los planes de vigilancia en este caso-.

Estos métodos se fundamentan en la comparación estadística de los datos de las variables recopiladas en los piezómetros de referencia, que representan los fondos hidrogeoquímicos no afectados por los vertederos, frente a los valores de las mismas variables en los piezómetros de control. Se trata pues de valoraciones relativas. Los métodos serán de aplicación en aquellos casos en los que en las autorizaciones no se especifiquen las condiciones en las que se entraría en niveles de intervención de acuerdo con lo señalado en el Anexo III.4 del Real Decreto 646/2020, de 7 de julio.

Con la frecuencia señalada en el apartado IV.3.2 de este documento se procederá a la toma de muestras y realización de análisis o medidas *in situ* en piezómetros de referencia y control. Dichas medidas serán evaluadas trienalmente de acuerdo con lo señalado en el apartado IV.1.

Los métodos interpretación de los resultados podrán incluir uno o más de los siguientes:

- **Método 1.** Contraste de la hipótesis de igualdad de las medias aguas arriba y abajo del vertedero mediante un análisis de la varianza y, en su caso, comparaciones múltiples entre pozos de referencia y control.
- **Método 2.** Comprobación de que ninguna de las observaciones de los piezómetros de control excede el intervalo superior de confianza del percentil 95 de las observaciones de los piezómetros de referencia.
- **Método 3.** Comprobación de que las determinaciones realizadas en los piezómetros de control no exceden los límites de un gráfico de control de Shewart establecidos a partir de las observaciones de los piezómetros de referencia.
- **Método 4.** Contraste de la hipótesis de igualdad de las medianas aguas arriba y abajo del vertedero mediante un análisis de la varianza y, en su caso, comparaciones múltiples entre pozos de referencia y control.

¹¹ Véanse en particular los apartados 264.97 (h), 264.97 (i) y 258.53 (h).



La elección de uno u otro método viene dada por el cumplimiento de sus requisitos específicos de aplicación, estando condicionada en primera instancia por la naturaleza de las distribuciones que caracterizan las poblaciones de datos de los piezómetros. En este sentido se debe señalar que no todas las variables de control tienen que ser evaluadas con el mismo método; algunas de estas variables podrán ser contrastadas por un método y otras por métodos alternativos, dependiendo de su naturaleza y, en particular, del tipo de distribución a que se ajusten.

Los requisitos generales exigibles a los métodos arriba enumerados incluyen:

- El método estadístico que aplicar debe ser apropiado para el tipo de distribución que presenten las observaciones de las variables. Si las observaciones se ajustan a una distribución normal se aplicarán métodos paramétricos, reservándose los no paramétricos para distribuciones de ley no conocidas o libres.
- En el caso de que la red de vigilancia incluya más de un piezómetro de referencia, los valores medios, medianos y de desviación típica de los fondos hidrogeoquímicos se calcularán agregando los resultados de los distintos piezómetros de referencia. No obstante, dichos resultados deberán ser considerados individualmente a los efectos de comprobar el supuesto de estacionariedad temporal.
- Cuando el método a aplicar suponga la comprobación de diferencias en los valores medios de una variable entre piezómetros de referencia y piezómetros de control mediante un análisis de la varianza de un factor, el nivel de significación no será inferior a 0,01. En el caso de que se rechazase la hipótesis nula se procederá a realizar comparaciones múltiples con un nivel de significación no inferior a 0,05.
- Cuando el método a aplicar consista en la comprobación de que no se excede el límite superior del intervalo de confianza para el percentil 95 de las observaciones registradas en los piezómetros de referencia, el nivel de significación para la definición de dichos límites no será inferior a 0,01.
- Cuando el método de comprobación consista en la representación de gráficos de control se requerirá que las observaciones de los piezómetros de referencia se ajusten a una distribución normal o lognormal.

2. Consideraciones sobre los datos del programa de vigilancia de aguas subterráneas.

El grueso de los métodos estadísticos de análisis de datos que se recogen en estas recomendaciones se fundamenta en la comparación de los valores de las variables que definen el fondo hidrogeoquímico de un acuífero aguas arriba del vertedero -piezómetros de referencia- con los valores de la misma variable aguas abajo -piezómetros de control-. En consecuencia, la definición de los fondos hidrogeoquímicos es una cuestión de la mayor importancia y a la que hay que prestar no poco esfuerzo. En tal sentido, para la mayoría de los métodos propuestos las variables que definen estos fondos deben satisfacer cuatro condiciones:

- Deben ser independientes.
- Deben ser estacionarias en el tiempo y el espacio.
- Deben ajustarse a la normalidad y
- Deben estar exentas de valores *outlayers*.



2.1. Independencia.

La independencia en el contexto de estas recomendaciones se traduce en que los valores medidos de una variable en una muestra que ha sido tomada en un momento dado no influyen en el valor de dicha variable en un evento muestral posterior.

La demostración de la independencia es una cuestión de dificultad extrema y requeriría de una cantidad ingente de recursos. No obstante, en el estudio del quimismo de las aguas subterráneas se puede asumir que la principal razón que puede llevar al incumplimiento de este requisito es la repetición sistemática del muestreo en cortos periodos de tiempo, pues de este modo se abre la posibilidad de que aparezcan autocorrelaciones entre pares de muestras temporalmente consecutivas.

En la práctica, la mejor manera de preservar la independencia entre observaciones es distanciándolas prudentemente en el tiempo. En estas recomendaciones las frecuencias de muestreo en los programas de vigilancia se distancian 6 meses como mínimo, estimándose que este periodo de tiempo es lo suficientemente prolongado para garantizar razonablemente este requisito.

De acuerdo con lo expuesto, en caso de que por cualquier circunstancia fuese necesario remuestrear algún piezómetro -p.e. comprobación de errores en el muestreo o análisis de las muestras, superación del nivel de intervención, etc.-, el nuevo muestreo no se producirá sino transcurridos 3 meses desde el primero.

El requisito de independencia es exigible tanto a las poblaciones construidas a partir de las determinaciones de los piezómetros de referencia como de control.

2.2. Estacionariedad.

En la puesta en práctica de los métodos arriba señalados se requiere que las variables medidas para la definición de los valores de fondo que se establezcan a partir de los piezómetros de referencia sean estacionarias tanto en el espacio como en el tiempo. La estacionariedad asume que tanto la media como la varianza de una variable permanece constante en una población sin importar el momento o el lugar en que se tomen las muestras a partir de las que se construyen las poblaciones a analizar.

En el caso de que los valores de fondo fueran definidos a partir de más de un piezómetro, el supuesto de estacionariedad espacial se puede comprobar gráficamente mediante la comparación separada de diagramas de cajas y bigotes y, más formalmente, mediante el análisis de la varianza de un factor de las variables observadas en los piezómetros de referencia, dicho factor de variación será la posición relativa de dichos piezómetros en relación al sentido de flujo del agua subterránea. De aquí la importancia, entre otras cosas, de que el número de piezómetros de referencia vaya más allá de lo estrictamente señalado en el Real Decreto 646/2020, de 7 de julio.

El supuesto de estacionalidad temporal es comprobable con medidas de la variable espaciadas en el tiempo dentro de un mismo piezómetro. Como se explicará con más detalle cuando se describa el método basado en las gráficas de control, se puede analizar mediante la regresión temporal de las variables analizadas.

La ausencia de tendencias temporales no sólo es exigible para los piezómetros de referencia sino también para los de control.



2.3. Normalidad.

Con la excepción de los métodos estadísticos no paramétricos en los que se fundamentan los métodos 4 y parcialmente el 2, los procedimientos requieren que las observaciones de los piezómetros de referencia y control se ajusten a una distribución normal.

La normalidad se puede comprobar de modo gráfico mediante la evaluación de los histogramas y el análisis de los gráficos de cuantiles (Q-Q) en los que se representan los cuantiles de la población objeto de comprobación frente a los cuantiles de una distribución normal teórica.

Igualmente existen pruebas de contraste de hipótesis de normalidad en que se puede especificar la confianza, este es el caso de la prueba de Shapiro-Wilks o similar para poblaciones pequeñas (tamaños de muestra inferior a 50).

Comúnmente en la naturaleza, los datos geoquímicos se distribuyen siguiendo una distribución logarítmico-normal en que son los logaritmos naturales de los valores de las variables los que se ajustan a la normalidad en lugar de los valores de las variables en sí mismos. Para la comprobación de este extremo se determinarán los logaritmos de los valores de las variables y se comprobará la normalidad de la distribución transformada mediante el análisis del histograma, gráficos Q-Q y también mediante un contraste de hipótesis formal.

2.4. Inexistencia de *outlayers*.

En el contexto de estas recomendaciones se deben entender como *outlayers* aquellos valores extremadamente altos o bajos en relación con un valor vecino -en el espacio o el tiempo- y que no atienden a una causa conocida o sospechada. El efecto de estos valores es distorsionar artificialmente la geometría de las distribuciones, haciendo cuestionable la aplicación de los procedimientos estadísticos de análisis previstos en estas recomendaciones. En consecuencia, una de las primeras tareas a realizar con los boletines analíticos es identificar y eliminar estos valores para tratamientos estadísticos posteriores.

No deja de ser paradójico que los procedimientos de determinación de los incumplimientos y niveles de intervención se fundamentan en la existencia de anomalías entre los piezómetros de control y de referencia o incluso dentro de un mismo piezómetro. Conviene, por tanto, discriminar entre aquellas anomalías que puedan estar relacionadas con la inyección de contaminantes en el acuífero y los *outlayers* que son valores espurios, que las más de las veces tendrán su origen en errores (errores en el muestreo, transcripción de datos, etc.). Las anomalías, en consecuencia, deben mantenerse para el tratamiento estadístico, pero no así los *outlayers*.

En la detección y explicación de *outlayers* puede ser de ayuda analizar la consistencia interna de los datos analíticos mediante la consulta de los estadillos de campo, blancos o réplicas que se hayan podido realizar en alícuotas, etc. Una buena regla es considerar el equilibrio que debe existir entre cationes y aniones en las aguas muestreadas. Un desequilibrio entre ambos superior al 5% debería hacer sospechar sobre la consistencia de los resultados analíticos.

Igualmente, en la distinción entre *outlayers* y anomalías puede ser de utilidad considerar que mientras las anomalías suelen inscribirse en una situación de crecimiento o disminución del valor de la variable de carácter progresivo, los *outlayers*, por su propia naturaleza, no suelen tener continuidad ni en el espacio ni en el tiempo.

Por último, conviene mencionar la existencia de métodos estadísticos para la detección de *outlayers* tanto de naturaleza gráfica -gráficas de cajas y bigotes y representaciones de cuantiles- como de pruebas numéricas (prueba de Rosner, p.e.), si bien en este último caso el planteamiento



y discusión de los resultados de la prueba puede ser más discutible. En cualquier caso, la interpretación de los resultados de la aplicación de estos métodos y, sobre todo, la decisión de eliminar *outlayers* sólo debería plantearse cuando previamente se hayan verificado los elementos antes expuestos (comprobación de los balances cationes-aniones, evaluación de resultados de las réplicas y persistencia en el tiempo y en el espacio).

El establecimiento de niveles de fondo requiere de un número de muestras suficiente para captar el potencial de variabilidad natural de las aguas subterráneas. Desde luego que cuanto mayor es el número de observaciones tanto mejor es la definición de estadísticos de centralización para la definición de los fondos, si bien es cierto que esta tarea se podría prolongar durante muchos años atendiendo a la necesidad de salvaguardar la independencia de los datos. En este punto, por tanto, hay que llegar a un compromiso entre lo que es mínimamente fiable en términos estadísticos y la necesidad de contar, tan pronto como sea posible, de valores para el contraste. Estas recomendaciones establecen en 8 el número mínimo de observaciones a partir de las que se podrán establecer los fondos.

3. Observaciones por debajo del límite de detección o cuantificación.

Una circunstancia que previsiblemente se puede dar en la puesta en práctica de un programa de vigilancia a largo plazo es que las observaciones relativas a determinados parámetros analíticos, particularmente pero no en exclusiva los de microcontaminantes, sean referidas en los boletines analíticos como valores por debajo del límite inferior de detección (LID) o cuantificación (LIC).

En el primer caso, a los efectos de la aplicación de los métodos tiene sentido asignar un valor 0 a dichas observaciones. El segundo caso engloba observaciones en que las concentraciones se encuentran en un rango entre dos valores conocidos: el correspondiente al límite de detección y el de cuantificación. En esta última circunstancia es razonable asignar a éstos un valor promedio $-LIC/2-$.

No obstante, la asignación de valores a aquellas variables por debajo del límite de cuantificación como la mitad de este último no está exenta de algunas consideraciones adicionales:

- La primera de ellas se refiere a la circunstancia de que dichos límites no son necesariamente constantes a lo largo del tiempo, quedando determinados por el laboratorio que realiza dichas determinaciones y a cambios en los equipos de análisis, entre otros. En consecuencia, es posible que en periodos quinquenales-decenales o incluso menores para un mismo analito se observe la existencia de más de un LIC. El criterio lógico para aplicar en estas circunstancias es asignar la mitad del LIC señalado en el boletín analítico de cada determinación.
- La segunda consideración se refiere a la frecuencia de aparición de los LICs. En términos estadísticos un elevado número de observaciones por debajo del límite de cuantificación se traduce en un sesgo hacia la izquierda que hace imposible el cumplimiento del requisito de normalidad (o de alguna otra función de distribución conocida). A efectos prácticos estas recomendaciones entienden que los métodos de interpretación son aplicables siempre que la proporción de estos valores no exceda el 30% del total de observaciones de una variable. Esta limitación debe aplicarse tanto a observaciones en los pozos de referencia como de control.

Por último, conviene enfatizar de nuevo que la aplicación de estos métodos no es otra cosa sino un análisis causa-efecto y que son de utilidad en la medida en que las poblaciones que se comparan corresponden a las mismas poblaciones (son muestras tomadas en los mismos niveles hidroestratigráficos). De aquí la importancia de prestar la mayor atención al diseño de la red de



muestreo asegurando que ésta refleja correctamente las circunstancias hidrogeológicas en que se ubican los vertederos.

4. Descripción de los métodos de comprobación y requisitos específicos de aplicación.

4.1. Comprobación de la existencia de diferencias significativas entre los valores medios determinados en piezómetros de referencia y control mediante un análisis de la varianza.

4.1.1. Descripción del método.

El contraste de los valores medios de una misma variable determinada en los piezómetros de referencia aguas arriba del vertedero y aguas abajo permite identificar posibles relaciones causa-efecto. Si el aislamiento hidráulico del vertedero actúa de modo efectivo conteniendo los lixiviados que se generan¹² en el mismo no producirán efecto alguno en el quimismo de las aguas subterráneas.

Como quiera que legalmente se ha establecido una densidad mínima de red piezométrica que incluye al menos dos piezómetros de control, una de las alternativas posibles para evaluar el efecto de los vertederos es la realización de un análisis de la varianza de un factor con un nivel de variación y una significación de 0,01, estableciéndose como variable independiente (factor) la categoría de los piezómetros (referencia o control) y como dependiente las medidas o concentraciones. Para la realización de la prueba se asumirá que las varianzas no son iguales.

Mediante el análisis de la varianza se contrastará la hipótesis nula -Ho- de no diferencias significativas en los valores medios determinados en los piezómetros de referencia y control.

En caso de rechazarse Ho significará que sí existen diferencias significativas entre las concentraciones medias determinadas en los piezómetros de referencia y control. En estas circunstancias se puede realizar una comparación múltiple por pares entre la media de los valores de fondo y cada una de las medias establecidas en cada uno de los piezómetros de control con un nivel de significación no inferior a 0,05 para determinar qué piezómetro o piezómetros son los que incumplen.

4.1.2. Requisitos específicos de aplicación del método.

Las poblaciones a comparar se ajustarán a una distribución normal o logarítmico-normal. Por ello con carácter previo se comprobará el cumplimiento por uno o más de los procedimientos arriba señalados para el ajuste a la normalidad con un nivel de significación no inferior a 0,01.

En el apartado anterior se ha señalado que para la realización de las pruebas se parte del supuesto de no igualdad de varianzas en las poblaciones a comparar, manteniéndose el mismo de no ser que se presenten evidencias en sentido contrario. Para la comprobación de este supuesto puede realizarse la prueba de Levene con un nivel de significación no inferior a 0,01.

4.1.3. Interpretación de resultados e incumplimientos.

Si en la realización de la prueba se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, se desprenderá que al menos una de las poblaciones comparadas tiene un valor medio significativamente distinto

¹² También se pueden dar situaciones en que el nivel piezométrico de un acuífero esté suficientemente bajo dejando bajo la lámina de impermeabilización un espesor de terreno no saturado suficientemente potente para dar lugar a que la inyección del lixiviado se vea atenuada.



y se considerará un incumplimiento. Mediante comparaciones múltiples se determinará qué piezómetro(s) de control son los que incumplen.

4.2. Comprobación de que ninguna de las observaciones de los piezómetros de control excede el límite superior del intervalo de confianza del percentil 95 de las observaciones de los piezómetros de referencia.

Con este método no se persigue comparar los valores medios o medianos de las observaciones registradas en los piezómetros de control y de referencia sino comprobar que en ninguno de los piezómetros de control se excede el límite superior del intervalo de tolerancia del cuantil 95 establecido para las concentraciones que definen los fondos hidrogequímicos en los piezómetros de referencia.

4.2.1. Descripción del método.

Un intervalo de tolerancia es un rango de observaciones acotado superior e inferiormente en el que es esperable encontrar una proporción especificada de la población. Así p.e., si se calcula el intervalo de tolerancia y su límite superior para el 95% de una colección de observaciones, se puede esperar que con una confianza dada -la que se haya especificado para dicho límite- que el 95% de las observaciones se situarán por debajo de ese valor.

En esta prueba se calcula el límite superior del intervalo de tolerancia para las observaciones de los piezómetros de referencia (observaciones del fondo hidrogequímico) abarcando el 95% de dichas observaciones y con un nivel de significación de 0,01. Este límite es comparado en cada periodo de prueba con las observaciones registradas en el mismo periodo en los piezómetros de control.

4.2.2. Requisitos específicos de aplicación del método.

Si se pretende establecer límites paramétricos las poblaciones de los piezómetros de referencia y control se ajustarán a una distribución normal¹³. Si esta condición no se cumple se optará por determinar los límites no paramétricos.

4.2.3. Interpretación de resultados e incumplimientos.

Si una o más observaciones en alguno de los piezómetros de control exceden el límite superior del intervalo de confianza del percentil 95 de la población que define los fondos hidrogequímicos -piezómetros de referencia- se considerará un incumplimiento.

4.3. Comprobación de que las determinaciones realizadas en los piezómetros de control no exceden los límites de un gráfico de control de Shewart establecidos a partir de las observaciones de los piezómetros de referencia.

4.3.1. Descripción del método.

En estos gráficos se representan las observaciones de los piezómetros de control ordenados cronológicamente, además, se establecen unos límites de control que se calculan a partir de las desviaciones estándar de los piezómetros de referencia sumando/restando 2,5 desviaciones estándar a la media de los valores de los piezómetros de referencia.

¹³ Se admite una transformación logarítmica. En tal caso, para el contraste, se deshará la transformación de los límites determinados -l.s.c.- ($e^{l.s.c.}$).



Los límites de control se recalculan en cada periodo de prueba incorporando al registro histórico las observaciones determinadas en dicho periodo en los piezómetros de referencia.

Es un método que puede resultar atractivo al poder recoger la variabilidad temporal de las observaciones, sin embargo, como se expone en el apartado de requisitos específicos, requiere de la normalidad de las poblaciones de fondo, siendo por tanto muy sensible a la existencia de observaciones por debajo de los LID o LIC; en tal caso la sustitución de estos valores por un valor fijo como 0 ó LID/2 se traduce en la aparición de numerosos “empates”, que hacen difícil demostrar el requisito de normalidad. Es por ello por lo que los gráficos de control pueden ser un método adecuado para parámetros que presenten rangos de valores muy por encima de los correspondientes al LID o LIC (p.e. conductividad o concentración de cationes mayores) y de uso más limitado en el caso de contaminantes en niveles traza.

Es igualmente sensible a la existencia de tendencias en los piezómetros de referencia, que pueden dar lugar a falsos negativos en los piezómetros de control. En este sentido, dado el carácter temporal de estos gráficos, en la aplicación de este método es particularmente necesario probar la ausencia de tendencias temporales mediante el análisis de la correlación temporal y/o la aplicación de pruebas específicas (p.e. análisis de la varianza para efectos temporales).

No existen límites de control no paramétricos.

4.3.2. Requisitos específicos de aplicación del método.

La aplicación de este método requiere que las observaciones de los piezómetros de referencia se ajusten a una distribución normal y no presenten tendencias temporales.

4.3.3. Interpretación de resultados.

Se considerará que se produce un incumplimiento cuando una o más observaciones en alguno de los piezómetros situados aguas abajo del vertedero exceden los límites de control del gráfico en el periodo de prueba.

4.4. Comprobación de la existencia de diferencias significativas entre los valores medianos determinados en piezómetros de referencia y control mediante un análisis de la varianza.

4.4.1. Descripción del método.

En aquellos casos en que los piezómetros de referencia o los de control o ambos simultáneamente no se ajusten a una distribución normal o logarítmico normal el valor a comparar no será la media aritmética sino el valor mediano.

En este caso mediante la aplicación de la prueba de Mann-Whitney con un nivel de significación de 0,01 se determinará si existen diferencias significativas entre los valores medianos de las concentraciones entre los piezómetros de referencia y control. Mediante el análisis de la varianza se contrastará la hipótesis nula - H_0 - de no diferencias significativas en los valores medianos.

En caso de rechazarse H_0 significará que existen diferencias significativas entre las concentraciones medianas determinadas en los piezómetros de referencia y control. En estas circunstancias se puede realizar una comparación múltiple por pares entre la mediana de los valores de fondo y cada una de las medianas establecidas en cada uno de los piezómetros de control con un nivel de significación no inferior a 0,05 para determinar qué piezómetro o piezómetros son los que incumplen.



4.4.2. Requisitos específicos de aplicación del método.

La aplicación de este método no requiere que las observaciones de los piezómetros de referencia ni de control se ajusten a una distribución normal.

4.4.3. Interpretación de resultados.

Se considerará que se produce un incumplimiento cuando se rechaza la hipótesis de igualdad de valores medianos entre los piezómetros de referencia y uno o más de los de control.

5. Aplicación simultánea de más de un método de interpretación.

En la figura anexa al final del documento se ha recogido un diagrama de flujo para la puesta en práctica de los métodos de interpretación. En esta figura se puede apreciar que el primer condicionante para la elección de uno u otro método es el relativo al grado de ajuste de los conjuntos de datos a comparar a una distribución normal o logarítmico normal, en caso afirmativo se optará por métodos paramétricos (métodos 1, 2 ó 3) y por métodos no paramétricos en caso contrario (métodos 2 y 4).

En ambas circunstancias siempre será posible aplicar simultáneamente más de un método, uno referido a estadísticos de centralización (media o mediana) y otro referido a estadísticos extremos de orden (percentil 95).

Puede darse el caso de que para una misma variable de control la aplicación de uno u otro método lleve a interpretaciones no necesariamente coincidentes en términos de incumplimientos. Esto es así por cuanto en el fondo ambos describen realidades diferentes de las mismas distribuciones: las diferencias entre medias y medianas entre pozos de referencia y control, en general más robustas, valorarían en qué medida dichas diferencias son persistentes en el tiempo mientras que los intervalos de confianza de los percentiles extremos estarían influidos por mayores amplitudes en los rangos de variabilidad de los niveles de fondo.

En aplicación del principio de precaución se establece que cuando se aplique más de un método de interpretación simultáneamente se considerará que se produce un incumplimiento cuando así se determine por alguno de los aplicados.

6. Bibliografía recomendada y aplicaciones informáticas.

Los métodos descritos no son sino un resumen sumario de los elementos a tener en cuenta en los programas de vigilancia de la calidad de las aguas subterráneas y en la interpretación de sus resultados. Se estima que son suficientes para la mayoría de las situaciones, sin embargo, en ocasiones la detección de variaciones en la química de las aguas subterráneas será tarea más compleja. Para tales casos y muy particularmente cuando se entrase en niveles de intervención será preciso ampliar lo expuesto en estas recomendaciones. En este sentido se debe hacer referencia de dos textos que se juzga de consulta ineludible en estas circunstancias: Gilbert, R.O. 1987. *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. John Wiley and sons y [US.EPA. 2009. *Statistical Analysis of groundwater monitoring data at RCRA facilities. Unified Guidance*](#).

La práctica totalidad de los métodos descritos se pueden realizar con programas comercialmente disponibles. Además, existe la posibilidad de aplicar estos métodos en lenguaje R para el que existen un buen número de bibliotecas desarrolladas. Para este último caso es recomendable consultar el siguiente texto: Millard, P.S. 2013. *EnvStats An R Package for Environmental Statistics*. Springer Verlag.