



GUÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE HUECOS MINEROS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)

Autores

María Esther Alberruche del Campo, Francisco Javier Fernández Naranjo,
Julio César Arranz González, Virginia Rodríguez Gómez, María Ángeles Perucha,
Lucas Vadillo Fernández, Almudena de la Losa Román, Carlos Baquedano Estévez
y Roberto Rodríguez Pacheco.



Madrid, 2018



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser utilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización.



**Ministerio
para la Transición Ecológica**

Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica
Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones

www.miteco.es

NIPO: 013-18-116-6 (línea)
NIPO: 013-18-115-0 (papel)
Depósito Legal: M-22755-2018

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

En esta publicación se ha utilizado papel libre de cloro de acuerdo con los criterios medioambientales de la contratación pública.

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Justificación y objetivo	11
1.2. Marco legal de los RCD	12
1.2.1. Legislación europea	12
1.2.2. Legislación nacional	13
1.2.3. Legislación autonómica	17
2. TIPOLOGÍA Y SELECCIÓN DE HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	23
2.1. Tipología de huecos mineros de explotaciones a cielo abierto	23
2.2. Criterios de selección de huecos mineros para su rehabilitación con RCD	30
2.2.1. Evaluación preliminar de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD	30
2.2.1.1. <i>Condicionantes técnico-mineros (C_{MIN})</i>	32
2.2.1.2. <i>Coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})</i>	43
2.2.1.3. <i>Prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST})</i>	45
2.2.1.4. <i>Índice de idoneidad del hueco para su rehabilitación con RCD (ID)</i>	46
2.2.2. Idoneidad de los huecos mineros según tipología de explotaciones mineras a cielo abierto	48
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RCD PARA RELLENO DE HUECOS MINEROS	53
3.1. Caracterización básica y geotécnica del material de rechazo del precibado de finos	57
3.1.1. Caracterización básica del residuo de precibado	59
3.1.2. Caracterización geotécnica del residuo de precibado para relleno de huecos mineros	59
3.1.3. Composición mineralógica de los residuos de precibado	60
4. RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL RELLENO Y REHABILITACIÓN DE UN HUECO MINERO CON RCD	63
4.1. Fase Preparatoria: Caracterización del emplazamiento	63
4.1.1. Datos administrativos, de localización y delimitación	64
4.1.2. Tipología y características geométricas del hueco minero	65
4.1.3. Infraestructuras asociadas a la explotación minera	65



4.1.4. Análisis del medio físico	66
4.1.4.1. <i>Topografía y relieve</i>	66
4.1.4.2. <i>Geología, geomorfología y geotecnia</i>	68
4.1.4.3. <i>Hidrogeología</i>	71
4.1.4.4. <i>Climatología</i>	73
4.1.4.5. <i>Hidrología superficial</i>	78
4.1.4.6. <i>Edafología</i>	80
4.1.4.7. <i>Medio biótico</i>	82
4.1.4.8. <i>Paisaje e incidencia visual</i>	84
4.1.4.9. <i>Usos del suelo y afecciones territoriales</i>	85
4.2. Fase preparatoria: Remodelado y acondicionamiento del hueco	88
4.3. Fase Preparatoria: Estanqueidad físico-química del hueco y sistemas de drenaje internos	89
4.3.1. Barrera geológica natural e impermeabilización del hueco	89
4.3.2. Sistemas de drenaje interno	95
4.3.3. Aspectos constructivos de los sistemas de impermeabilización y drenajes internos	97
4.3.4. Sistemas de captación y tratamiento de lixiviados: balsas de almacenamiento y pozos de registro	99
4.4. Fase preparatoria: Obras auxiliares	99
4.5. Fase de relleno y clausura	101
4.5.1. Procedimiento y criterios de admisión de RCD para el relleno del hueco minero	101
4.5.2. Procedimiento de relleno del hueco con RCD	102
4.5.3. Fase de clausura	104
4.6. Técnicas y medidas correctoras para la rehabilitación de los huecos mineros	105
4.6.1. Estabilización y acondicionamiento de la cobertura final del relleno	105
4.6.2. Objetivos finales de la rehabilitación	110
4.7. Programa de vigilancia y control ambiental	113
4.7.1. Determinación de la situación preoperacional. Establecimiento de la Red de Control	113
4.7.2. Programa de vigilancia y control ambiental: Fase de explotación o relleno del hueco minero	115
4.7.2.1. <i>Vigilancia y control de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas</i>	115

4.7.2.2. <i>Control y vigilancia de la red de drenajes de desvío de aguas superficiales y, en su caso, de evacuación de lixiviados</i>	117
4.7.2.3. <i>Calidad atmosférica: Polvo y ruido</i>	117
4.7.2.4. <i>Gestión de residuos</i>	119
4.7.2.5. <i>Seguimiento de la formación y estructura del relleno con RCD</i>	119
4.7.2.6. <i>Estabilidad e integridad del relleno con RCD y de la capa de impermeabilización</i>	119
4.7.2.7. <i>Señalización y cerramientos</i>	120
4.7.3. Programa de mantenimiento, vigilancia y control durante las fases de clausura y posclausura	120
4.7.3.1. <i>Programa de mantenimiento</i>	120
4.7.3.2. <i>Programa de vigilancia y control durante las fases de clausura y posclausura</i>	122
5. CONCLUSIONES	127
6. BIBLIOGRAFÍA	135
ANEXO 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS RCD DE PRECRIBADO	145
ANEXO 2. INVENTARIO DE MUESTRAS DE RCD	179
ANEXO 3. EXPLOTACIÓN PILOTO: EVALUACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS DE EXPLOTACIÓN DE ARCILLA DE LA COMARCA DE LA SAGRA (TOLEDO) PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	271

	Pág.
Figura 1. Izquierda: minería metálica. Corta Cerro Colorado (Minas de Riotinto, Huelva). Derecha: minería de carbón. Corta Gargallo (Andorra, Teruel) (ENDESA GENERACIÓN, SA)	24
Figura 2. Minería de transferencia y relleno final del hueco residual con yesos de desulfuración en la Corta Barrabasa (Andorra, Teruel) (ENDESA GENERACIÓN, SA)	25
Figura 3. Izquierda: explotación de carbón por el método de descubierta (Romero, 2006). Derecha: explotación de carbón por el método de terrazas (Herrera Herbert, 2006)	25
Figura 4. a) Método de explotación por minería de contorno. b) Explotación de carbón por minería de contorno en los Apalaches, en EEUU. (Foto de J. Henry Fair para NRDC; www.nrdc.org)	26
Figura 5. Canteras de rocas industriales de: a) y b) calizas para áridos de machaqueo en Camargo (Cantabria) y Alhaurín de la Torre (Málaga); c) yesos en Pina de Ebro (Zaragoza) (Rubio Navas <i>et al.</i> , 2007); y d) arcillas en Teruel	27
Figura 6. Relleno y rehabilitación del hueco de una explotación de sepiolita mediante la transferencia de los estériles en Calatayud (Zaragoza)	27
Figura 7. a) Cantera de mármol (Cehegín, Región de Murcia). b) Cantera de pizarra (SIEMCALSA, 2007)	28
Figura 8. a) Escombrera de una explotación de mármol (Cehegín, Región de Murcia). b) Escombreras de una explotación de pizarra (La Cabrera, León)	28
Figura 9. Huecos de graveras abandonadas en la Ribera Alta del Ebro (Navarra) (izquierda), y en Fuentes de Ebro (Zaragoza) (derecha)	29
Figura 10. Conductividad hidráulicas (log K) para distintos tipos de rocas y sedimentos (Freeze & Cherry, 1979)	34
Figura 11. Distintos grados de erosión en taludes de huecos mineros	40
Figura 12. Grietas verticales y desprendimientos en una gravera (izquierda). Grietas de tracción en cabecera de un talud de una explotación de arcillas (derecha)	41
Figura 13. Taludes de huecos excavados en rocas duras con distinto grado de fracturación y alteración	41
Figura 14. Composición de los residuos de construcción y demolición (%)	53
Figura 15. RCD de hormigón (Izq.) y mixto-cerámicos (Dcha.) acopiados en la zona de descarga antes de la separación de elementos reutilizables (plásticos, madera, etc.) y otros elementos contaminantes	54
Figura 16. Esquema básico del proceso de reciclaje de RCD en plantas fijas de gestores autorizados	55



Figura 17.	Material de rechazo del precibado de finos acopiado en planta de reciclaje	56
Figura 18.	Material de rechazo del precibado de finos de RCD mixto-cerámicos (0-40 mm)	57
Figura 19.	Comunidades Autónomas (CCAA) de dónde se han obtenido muestras de RCD de gestores autorizados	58
Figura 20.	Clasificación de las muestras del material de rechazo del precibado de finos obtenidas de gestores autorizados según tipos de suelos para terraplenes, de acuerdo con el PG-3	60
Figura 21.	Composición mineralógica de muestras de material de rechazo del precibado de RCD mixto-cerámicos y de hormigón determinada por Difracción de Rayos X (análisis semicuantitativo)	61
Figura 22.	Discontinuidad geológica en un talud vertical en los límites de una cantera de mármol comercial (Sierra de las Andaluzas, Murcia). Se distingue un cambio neto de la roca competente (gris) a un material mucho más blando y deleznable (beige)	69
Figura 23.	Rosas de velocidades (m/s) y frecuencias (%) e histograma de velocidades medidas en m/s de Cartagena (Murcia), obtenidos del Mapa Eólico Nacional (CENER)	74
Figura 24.	Mapa de productividad potencial forestal, elaborado a partir del Índice de Paterson, modificado en función de la presencia de distintos substratos litológicos	78
Figura 25.	Solución de referencia para rellenos con RCD calificados como inertes y no peligrosos (Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001. Anexos I y III)	91
Figura 26.	Proceso de relleno del hueco minero con impermeabilización de huecos y taludes del mismo.	103
Figura 27.	Acopio de materiales de rechazo del precibado de finos en desuso durante años en Burgos, completamente colonizado por vegetación herbácea de forma natural	108
Figura 28.	Técnicas de hidrosiembra en taludes (IGME, 1989)	109

	Pág.
Tabla 1. Títulos del capítulo 17 para los RCD de la Lista Europea de Residuos (LER)	13
Tabla 2. Legislación estatal de aplicación al relleno de huecos mineros con RCD	16
Tabla 3. Legislación autonómica específica para RCD	18
Tabla 4. Legislación minera autonómica en materia de restauración y protección de espacios afectados por actividades extractivas	21
Tabla 5. Criterios para la exclusión de huecos mineros para su rehabilitación con RCD	31
Tabla 6. Escala de valoración de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD	32
Tabla 7. Recomendación de uso de RCD en rellenos mineros en función de las características geológicas y posición del nivel freático en la zona ocupada por la explotación minera (Flores Martínez <i>et al.</i> , 2010)	35
Tabla 8. Criterios de valoración del factor hidrogeológico (AG_{SUB})	37
Tabla 9. Criterios de valoración del factor de proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP})	39
Tabla 10. Criterios de valoración del grado de erosión de los taludes del hueco y/o presencia de inestabilidades (ER_{EST})	42
Tabla 11. Criterios de valoración del factor coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})	44
Tabla 12. Definición de las clases de accesibilidad visual (A_{VIS})	45
Tabla 13. Criterios de valoración del factor prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST})	46
Tabla 14. Índices definidos para la determinación de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD	47
Tabla 15. Valoración simplificada de la idoneidad potencial de los huecos mineros según tipología para su rehabilitación con RCD	51
Tabla 16. Clases de pendientes propuestas para el análisis fisiográfico y topográfico	67
Tabla 17. Balance hídrico realizado por el método directo o de Thornthwaite de la estación de Torrelavega (Cantabria)	76
Tabla 18. Factores de vigilancia y control, acciones y frecuencia de las mismas durante las fases de relleno del hueco minero o de explotación y pos-clausura	122
Tabla 19. Síntesis de recomendaciones técnicas para las diferentes fases de un proyecto de rehabilitación de un hueco minero con RCD	130
Tabla 20. Síntesis de los ensayos recomendados para los proyectos de rehabilitación de un hueco minero con RCD	134

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son aquellos residuos o desechos generados en obras de construcción o demolición, entendiéndose como tales: la construcción, rehabilitación, reparación, reforma o demolición de un bien inmueble como es el caso de edificios, instalaciones deportivas o de ocio e infraestructuras de obra civil. Así como aquellos otros residuos generados en otros trabajos que modifiquen la forma o sustancia del terreno o del subsuelo (excavaciones, inyecciones, urbanizaciones u otros análogos) que no estén relacionados con la actividad minera, tal y como recoge el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición en nuestro país. Según EUROSTAT, en el año 2014, los RCD representaban el 18,5% del total de residuos generados en España, superando incluso el porcentaje de residuos generados por la industria extractiva. En dicho período, España era el quinto país de la Unión Europea en cuanto a producción de RCD, con algo más de 20 millones de toneladas¹. Estos datos ponen en evidencia la magnitud del problema ambiental que representan, y la necesidad del reciclado o valorización de dichos residuos a fin de contribuir a una gestión más eficiente de los recursos naturales.

1.1. Justificación y objetivo

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos (Directiva Marco de Residuos) y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados establecen entre sus objetivos que antes del año 2020, el 70% en peso de los residuos “no peligrosos” de construcción y demolición producidos, con exclusión de los materiales en estado natural definidos en la categoría 17 05 04 de la lista de residuos, deberían estar sometidos a algún proceso de valorización (reutilización, reciclado, etc.). Este porcentaje ha sido incluido como objetivo cuantitativo en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022 (PEMAR). Aunque el nivel de valorización en nuestro país se ha incrementado significativamente en los últimos años, estando en 2015 en torno al 40,9% en peso de la producción total según la Federación Española de Gestores de RCD (FERCD), todavía está lejos del porcentaje propuesto por la Unión Europea. Asimismo, una parte importante de estos residuos se continúa eliminando en vertederos o de forma incontrolada (FERCD, 2017). La caída de la demanda de estos productos reciclados por la crisis del sector de la construcción en los últimos años ha contribuido a reforzar esta situación.

En este contexto, y con el objeto de incrementar las posibilidades de puesta en valor de este tipo de residuos, el Real Decreto 105/2008 establece que la utilización de residuos “inertes” procedentes de actividades de construcción y demolición en la restauración de un espacio ambientalmente degradado, o en obra de acondicionamiento o relleno, podría ser considerada una operación de valorización y no de eliminación en vertedero siempre que se cumplieran los criterios mínimos establecidos en la norma (art. 13). Asimismo, el PEMAR recoge como objetivo cualitativo: el fomento de la utilización de los residuos “no peligrosos” procedentes

1. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics/es



de RCD en la restauración de espacios degradados y en obras de acondicionamiento o relleno, de acuerdo con el R.D. 105/2008 que instaba a las Administraciones Públicas a fomentar este tipo de valorización.

Por otra parte, la falta de estériles en muchas explotaciones mineras imposibilita su restauración topográfica y paisajística dejando un hueco minero residual, tras el cese de la actividad. En estos casos, el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras, permite en el art. 13.1.d) el relleno del hueco de explotación con residuos de procedencia “no minera” en los trabajos de remodelación del terreno, siempre y cuando se cumpla el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Algunos especialistas defienden el uso de RCD en restauración por su bajo coste y porque facilita la restitución topográfica del terreno en condiciones geotécnicas más estables, así como el diseño de formas geométricas más favorables para la revegetación e integración paisajística (Flores Martínez *et al.*, 2010).

Asimismo, el R.D. 105/2008, en su disposición final tercera, faculta al Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente para establecer los criterios ambientales mínimos sobre la utilización de residuos inertes en obras de restauración, acondicionamiento o relleno. Con este objeto, la Subdirección General de Residuos de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural de dicho Ministerio, a través de una encomienda de gestión al Instituto Geológico y Minero de España, ha elaborado la presente “Guía para la Rehabilitación de Huecos Mineros con Residuos de Construcción y Demolición (RCD)” con el fin de promover el uso de estos residuos en la restauración de explotaciones mineras, activas y abandonadas, de tal forma que se garantice la protección del medio ambiente y la salud y seguridad de las personas. Y al mismo tiempo, se lleve a cabo la valorización de una parte importante de la producción de RCD que actualmente es desechada y eliminada en vertedero, como es el caso de los rechazos pétreos generados en la fase de precibado de finos en las plantas de tratamiento de gestores autorizados de RCD.

Las recomendaciones de esta Guía no están dirigidas al uso de materiales naturales excavados en la rehabilitación de huecos mineros siendo, en este caso, de aplicación lo establecido en la Orden APM/1007/2017, de 10 de octubre, sobre normas generales de valorización de materiales naturales excavados para la utilización en operaciones de relleno y obras distintas a aquellas en las que se generaron.

1.2. Marco legal de los RCD

El marco legal está constituido por el conjunto de normativas europeas, nacionales y autonómicas que regulan los RCD y su uso en restauración minera.

1.2.1. Legislación europea

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas, establece el marco jurídico comunitario que regula la producción y gestión de los mismos. A pesar de que la

Unión Europea considera los RCD como un “flujo prioritario de residuos”, no se ha desarrollado una norma europea específica para ellos. Esta Directiva tiene como objetivo para los residuos “no peligrosos” procedentes de la construcción y de las demoliciones conseguir, en 2020, que al menos el 70% en peso de dichos residuos sean reutilizados o valorizados mediante el reciclado u otras valorizaciones, entre las que se incluyen las operaciones de relleno que utilicen estos residuos en sustitución de otros materiales, con exclusión de los materiales presentes de modo natural definidos en la categoría 17 05 04 de la Lista Europea de Residuos (**Tabla 1**).

De acuerdo con la Decisión 2014/955/UE de la Comisión de 18 de Diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva Marco de Residuos, los RCD (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas) se encuentran incluidos en el capítulo 17, codificados todos ellos con seis dígitos. En la **Tabla 1** se enumeran los títulos que integran el capítulo de los RCD.

CAPÍTULO 17 Codificación	RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (INCLUIDA LA TIERRA EXCAVADA DE ZONAS CONTAMINADAS)
17 01	Hormigón, ladrillo, tejas y materiales cerámicos
17 02	Madera, vidrio y plástico
17 03	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados
17 04	Metales (incluidas sus aleaciones)
17 05	Tierra (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje
17 06	Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto
17 08	Materiales de construcción a base de yeso
17 09	Otros residuos de construcción y demolición

Tabla 1. Títulos del capítulo 17 para los RCD de la Lista Europea de Residuos (LER)

Merece también una mención especial la legislación comunitaria relacionada con los residuos destinados a vertedero, constituida por la Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos y la Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos.

1.2.2. Legislación nacional

El Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición constituye la normativa básica que establece el régimen jurídico de la producción y gestión de los RCD, con el fin de fomentar, por este orden, su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, así como el adecuado tratamiento de los destinados a eliminación, y contribuir a un desarrollo sostenible de la actividad de construcción (art. 1).



El R.D. 105/2008 define RCD como cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de “residuo” tal y como lo define la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, son generados en obras de construcción o demolición (art. 2.a) como: la construcción, rehabilitación, reparación, reforma o demolición de un bien inmueble, tal como un edificio, carretera, puerto, aeropuerto, ferrocarril, canal, presa, instalación deportiva o de ocio, así como cualquier otro análogo de ingeniería civil. O la realización de trabajos que modifiquen la forma o sustancia del terreno o del subsuelo, tales como excavaciones, inyecciones, urbanizaciones u otros análogos, con exclusión de actividades asociadas a la minería (art. 2.c) y que son reguladas por la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas.

Esta normativa fomenta y contempla la posibilidad del uso de RCD inertes para la restauración de espacios ambientalmente degradados, o la realización de obras de acondicionamiento o relleno, considerándola además como una operación de valorización y no de eliminación de residuos en vertedero, siempre y cuando se cumplan los siguientes requisitos (art. 13.1):

- a) Que el órgano competente en materia medioambiental de la Comunidad Autónoma así lo haya declarado, antes del inicio de las operaciones de gestión de los residuos.
- b) Que la operación se realice por un gestor de residuos sometido a autorización administrativa de valorización de residuos. No se exigirá autorización de gestor de residuos para el uso de aquellos materiales obtenidos en una operación de valorización de RCD que no posean la calificación jurídica de residuo y cumplan con los requisitos técnicos y legales para el uso al que se destinen.
- c) Que el resultado de la operación sea la sustitución de recursos naturales que, en caso contrario, deberían haberse utilizado para cumplir el fin buscado con la obra de restauración y acondicionamiento o relleno.

El R.D. 105/2008 insta a las Administraciones Públicas a fomentar el uso de estos materiales inertes para la restauración de espacios ambientalmente degradados, promoviendo también acuerdos voluntarios entre los gestores de residuos y los responsables de la restauración de estos espacios (art. 13.3). Es por ello, que el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022 (PEMAR) recoge y propone el desarrollo de acuerdos o convenios sectoriales entre las industrias extractivas y las Comunidades Autónomas, con objeto de promover el uso de los huecos mineros existentes y sin restaurar, para la valorización de RCD en operaciones de recuperación de espacios degradados, según el mencionado artículo 13 del R.D. 105/2008, de forma que se cumplan las especificaciones exigidas en dicha normativa y en los Planes de Restauración contemplados en el R.D. 975/2009.

La Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas tiene por objeto establecer el régimen jurídico de la investigación y aprovechamiento de los yacimientos minerales y demás recursos geológicos, cualesquiera que fueren su origen y estado físico.

El R. D. 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras establece las medidas, procedimientos y orientaciones para prevenir o reducir en la medida de lo posi-

ble los efectos adversos que sobre el medio ambiente y los riesgos sobre la salud humana, puedan producir la investigación y aprovechamiento de los yacimientos minerales y el resto de recursos geológicos, así como la gestión de los residuos mineros. El concepto aprovechamiento incluye, además de la explotación, almacenamiento y beneficio de dichos recursos, la rehabilitación de los espacios afectados por la actividad minera (art. 2.1). En su Título I sobre el Plan de Restauración se define el término Rehabilitación como el tratamiento del terreno afectado por dicha actividad de forma que se devuelva este a un estado satisfactorio, en particular en lo que se refiere, según los casos, a la calidad del suelo, la fauna, los hábitats naturales, los sistemas de agua dulce, el paisaje y los usos beneficiosos apropiados (art. 3.7.a). El Plan de Restauración consta de una descripción detallada del entorno previsto para el desarrollo de las labores mineras, así como de las medidas previstas para la rehabilitación del espacio natural afectado por la explotación de los recursos minerales y de los servicios e instalaciones anejas a la misma. Para el objetivo de esta Guía, de entre todas estas medidas, destacan las relacionadas con el remodelado del terreno. La norma contempla la posibilidad del relleno del hueco de explotación, ya sea en superficie o por laboreo de interior, con residuos de procedencia no minera (art. 13.1.d). En este caso, la entidad explotadora deberá registrar y certificar, sin perjuicio de la normativa vigente de residuos y, en particular, la correspondiente a la eliminación mediante depósito en vertedero, que les será de aplicación, el origen y naturaleza de los residuos, anotándose en el correspondiente Libro de Registro que estará a disposición de la autoridad competente. Por lo tanto, según el R.D. 975/2009, el relleno de huecos mineros con RCD debe realizarse de acuerdo con las prescripciones del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

De todo ello se deduce que el relleno de huecos mineros en una operación de valorización de RCD, según el R.D. 105/2008, deberá cumplir los requerimientos de protección del suelo y de las aguas establecidos por el R.D. 1481/2001 de acuerdo con las prescripciones técnicas del Anexo I y el correspondiente desarrollo técnico del mismo (Subdirección General de Calidad Ambiental, 2003). Para garantizar la protección del suelo y de las aguas, la norma establece en los vertederos de residuos inertes el siguiente diseño: a) existencia de una barrera geológica natural (en fondo y taludes del hueco) con un coeficiente de permeabilidad (k) menor o igual de 1×10^{-7} m/s, y 1 m de espesor. b) Cuando dicha barrera no cumpla las condiciones antes mencionadas, se intentarán alcanzar dichos niveles de impermeabilidad añadiendo una barrera geológica artificial que consistirá en una capa mineral de un espesor no inferior a 0,5 m. c) Sobre estas barreras geológicas, se colocarán unas capas de filtro y de drenaje para recogida de lixiviados. d) Por último, sobre dichas capas se depositarán los residuos (Anexo I, apartados 3.2, 3.3 y 3.4). Sin embargo, por la legislación de vertederos, el órgano ambiental competente de la Comunidad Autónoma puede decidir, sobre la base de una evaluación de riesgos para el medio ambiente que tenga en cuenta el control de aguas y la gestión de lixiviados, que no sea necesaria la recogida y tratamiento de los lixiviados. En este caso concreto, o en el caso de que el hueco minero presente un nivel de riesgo aceptable para el suelo, las aguas subterráneas y superficiales, los requisitos exigidos relacionados con el control de lixiviados y las barreras geológicas naturales y artificiales podrán ser modificados o reducidos en consecuencia, por dicho órgano ambiental (Anexo I, apartado 3.5). Estos



aspectos son de especial interés, desde el punto de vista de las exigencias legales que la normativa de vertederos pueda imponer, sobre el acondicionamiento del hueco minero para el relleno de éste con RCD inertes y no peligrosos en trabajos de restauración.

Asimismo, y como consecuencia de la aplicación del R.D. 1481/2001, y teniendo en cuenta el R.D. 105/2008, los RCD susceptibles de valorización mediante la restauración de huecos de explotaciones mineras deberán cumplir los criterios de admisión para residuos inertes establecidos en la Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del R.D. 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

Hay que señalar, no obstante, que una parte muy importante de los RCD generados en nuestro país podrían calificarse como “residuos no peligrosos” de acuerdo con la Orden AAA/661/2013. Sin embargo, el R.D. 975/2009 no prohíbe o limita el uso de estos RCD en la restauración ya que, como se ha señalado en varias ocasiones, sólo hace referencia expresa al uso de “residuos de procedencia no minera”. Por lo que, su uso en el relleno de huecos mineros deberá cumplir en estos casos los requerimientos establecidos por el R.D. 1481/2001 para vertederos de residuos no peligrosos.

La Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, de acuerdo con la Directiva Marco de Residuos, contempla además la elaboración de planes de gestión estatales y autonómicos para el desarrollo de la política de residuos en nuestro país. Respecto a los RCD hay que destacar: el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCDD), incluido en el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 (PNIR). Y el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) para el período 2016-2022.

El PEMAR dedica el apartado 13 al establecimiento de las directrices de la política española en materia de residuos de construcción y demolición. Tal y como se ha señalado anteriormente, el PEMAR incorpora como objetivo cualitativo la valorización de los residuos no peligrosos procedentes de RCD mediante su uso en la restauración de espacios degradados y en obras de acondicionamiento o relleno. De esta forma, se contribuye también al objetivo cuantitativo del plan de alcanzar en 2020 la valorización de al menos el 70% en peso de los RCD no peligrosos producidos en nuestro país. Para ello, el PEMAR contempla expresamente el desarrollo de acuerdos y convenios sectoriales entre las industrias extractivas y las Comunidades Autónomas, para promover la valorización de RCD mediante la utilización de los mismos en la restauración de huecos mineros.

En la **Tabla 2** se enuncia, a modo de síntesis, la normativa estatal de aplicación para el uso de RCD en restauración minera.

Legislación en materia de residuos	
Ley 22/2011	Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados
R.D. 105/2008	Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición

Legislación en materia de residuos	
R.D. 1481/2001	Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero
	Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, por el que se modifica el R.D. 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero
Desarrollo Técnico R.D. 1481/2001	Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001 relativo a las instalaciones de vertido de residuos
Orden AAA/661/2013	Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero
Orden MAM/304/2002	Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos
Legislación minera	
Ley 22/1973	Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas
	Ley 54/1980, de 5 de noviembre, de modificación de la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas con atención especial a los recursos energéticos
R.D. 2857/1978	Real Decreto 2857/1978, de 25 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento General para el Régimen de la Minería
R.D. 975/2009	Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras
	Real Decreto 777/2012, de 4 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por las actividades mineras
	Corrección de errores del Real Decreto 777/2012, de 4 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por las actividades mineras

Tabla 2. Legislación estatal de aplicación al relleno de huecos mineros con RCD

1.2.3. Legislación autonómica

De acuerdo con la Ley 22/2011 y el R.D. 105/2008 es competencia de las Comunidades Autónomas (CCAA), y de las Entidades Locales en el caso de los RCD procedentes de obra



menor o reparación domiciliaria, la elaboración de planes y programas de gestión específicos; así como la autorización, vigilancia, inspección y sanción de la producción, posesión y gestión de los residuos de construcción y demolición. La **Tabla 3** muestra una serie de normativas específicas en materia de gestión de RCD aprobadas por las CCAA.

Existe un consenso general en toda la normativa autonómica sobre RCD, de considerar las tierras y piedras de excavación y desmonte (LER 17 05 04) como las más aptas para operaciones de relleno. En algunos casos, solo se considera este material para este tipo de uso como por ejemplo en la Comunidad Autónoma de Madrid (Orden 2726/2009) o en el País Vasco (Decreto 49/2009). Aunque su uso para tal fin ayuda a reducir el número de vertederos o evitar la colmatación de los existentes; sin embargo, este tipo de materiales queda fuera del ámbito de aplicación del R.D. 105/2008 y su valorización en operaciones de relleno queda regulado por lo establecido en la Orden APM/1007/2017. Asimismo, estos residuos han sido excluidos del objetivo fijado por la Directiva 2008/98/CE para el conjunto de RCD no peligrosos que deben ser valorizados, hasta alcanzar el 70% de la producción en peso en 2020. Respecto al resto de RCD aptos para restauración de espacios degradados, en la mayor parte de las CCAA se sigue por lo general la norma básica estatal (R.D. 105/2008). No obstante, es posible destacar algunas casuísticas: en la Comunidad Valenciana, el Decreto 200/2004 contempla la restauración de actividades mineras en explotación o abandonadas con residuos inertes, en los que se incluyen tierras y piedras no contaminadas de excavación y desmonte, y residuos inertes homogéneos generados en el desarrollo de obras de infraestructuras, cuando los volúmenes a emplear sean inferiores a 50.000 m³. Se admiten estos materiales con volúmenes superiores o el empleo de otros RCD previa declaración administrativa de su adecuación para este tipo de usos. En Extremadura, el Decreto 20/2011 recoge una categorización de los RCD atendiendo a su tratamiento; a efectos de los objetivos de esta Guía resulta de interés que dicha norma considere el rechazo inerte derivado de procesos de reciclado de RCD como el adecuado para restauración y rellenos (definido como categoría IV), al igual que otras normativas autonómicas (Decreto 262/2006 en Aragón), aunque se admite también para dicho uso RCD inertes limpios (categoría III), separados en origen (hormigón o cerámicos), y excepcionalmente residuos inertes sucios o mezclas heterogéneas procedentes de diversas fuentes (categoría II) previa declaración como operación de valorización por la Consejería competente en materia ambiental.

CCAA	Legislación autonómica específica de RCD
ANDALUCÍA	- Decreto 73/2012, de 22 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía
ARAGÓN	- Decreto 262/2006, de 27 diciembre. Aprueba el Reglamento de la producción, posesión y gestión de los residuos de la construcción y la demolición, y del régimen jurídico del servicio público de eliminación y valorización de escombros que no procedan de obras menores de construcción y reparación domiciliaria en la Comunidad Autónoma de Aragón

CCAA	Legislación autonómica específica de RCD
ARAGÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Decreto 117/2009, de 23 junio, que modifica el Decreto 262/2006, de 27-12-2006, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el reglamento de la producción, posesión y gestión de los residuos de la construcción y la demolición, y del régimen jurídico del servicio público de eliminación y valorización de escombros que no procedan de obras menores de construcción y reparación domiciliaria en la Comunidad Autónoma de Aragón
ISLAS BALEARES	<ul style="list-style-type: none"> - Decreto 10/2000, de 4 febrero, fija provisionalmente y con carácter de extrema urgencia, la selección y vertido de residuos de la construcción y demolición - Orden de 28 de febrero 2000, medidas transitorias para la autorización de instalaciones de valorización y eliminación de residuos de la construcción y demolición - Resolución de 26 de febrero 2001. RESIDUOS. Aplicación de la disposición adicional de la Orden de la Conselleria de Medio Ambiente de 28-2-2000 (LIB 2000\69), sobre las medidas transitorias para la autorización de instalaciones de valorización y eliminación de residuos de la construcción y demolición
CANTABRIA	<ul style="list-style-type: none"> - Decreto 72/2010, de 28 octubre, regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición en la Comunidad Autónoma de Cantabria
CATALUÑA	<ul style="list-style-type: none"> - Decreto 89/2010, de 29 de junio, aprueba el Programa de gestión de residuos de la construcción de Cataluña (PROGROC), se regula la producción y gestión de los residuos de la construcción y demolición, y el canon sobre la deposición controlada de los residuos de la construcción
COMUNIDAD VALENCIANA	<ul style="list-style-type: none"> - Decreto 200/2004, de 1 de octubre, del Consell de la Generalitat, por el que se regula la utilización de residuos inertes adecuados en obras de restauración, acondicionamiento y relleno, con fines de construcción
EXTREMADURA	<ul style="list-style-type: none"> - Decreto 20/2011, de 25 febrero. Establece el régimen jurídico de la producción, posesión y gestión de los residuos de construcción y demolición en la Comunidad Autónoma de Extremadura



CCAA	Legislación autonómica específica de RCD
GALICIA	<ul style="list-style-type: none">- Ley 174/2005, de 9 de junio, por el que se regula el régimen jurídico de la producción y gestión de residuos y el Registro General de Productores y Gestores de Residuos de Galicia. <i>Esta ley ha derogado el Decreto 352/2002 por el que se regulaba la producción de los residuos de la construcción y la demolición</i>- Orden del 15 de junio de 2006, por la que se desarrolla el Decreto 174/2005, del 9 de junio, por el que se regula el régimen jurídico de la producción y gestión de residuos y el Registro General de Productores y Gestores de Residuos de Galicia- Orden de 20 de julio de 2009, por la que se regula la construcción y la gestión de los vertederos en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia
COMUNIDAD DE MADRID	<ul style="list-style-type: none">- Ley 5/2003, de 20 de marzo, de Residuos de la Comunidad de Madrid- Orden 2726/2009, de 16 julio, por la que se regula la gestión de los residuos de construcción y demolición en la Comunidad de Madrid
COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA	<ul style="list-style-type: none">- Decreto Foral 23/2011, de 28 marzo, regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición en el ámbito territorial de la Comunidad Foral de Navarra
PAÍS VASCO	<ul style="list-style-type: none">- Decreto 112/2012, de 26 junio, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición- Decreto 49/2009, de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos

Tabla 3. Legislación autonómica específica para RCD

Respecto a los RCD procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliar, tendrán la consideración jurídica de residuo doméstico (Ley 22/2011) y estarán, por ello, sujetos a lo que establezcan las Entidades Locales en sus respectivas ordenanzas municipales.

La planificación de las CCAA en materia de RCD se ha llevado a cabo a través de planes y programas de gestión específicos o incluyéndolos en planes integrales de residuos.

En la **Tabla 4**, además, se recoge legislación minera autonómica en materia de restauración y protección de espacios afectados por la actividad extractiva.

CCAA	Legislación minera autonómica
ARAGÓN	- Decreto 98/1994, de 26 de abril, de la Diputación General de Aragón sobre normas de protección del medio ambiente de aplicación a las actividades extractivas en la Comunidad Autónoma de Aragón
ISLAS BALEARES	- Ley 10/2014, de 1 de octubre, de ordenación minera de las Illes Balears
CASTILLA-LEÓN	- Decreto 329/1991, de 14 de noviembre, sobre restauración de Espacios Naturales afectados por actividades mineras
CATALUÑA	<ul style="list-style-type: none"> - Ley 12/1981, de 24 de diciembre, por la que se establecen normas adicionales de protección de los espacios de especial interés natural afectados por actividades extractivas - Decreto Legislativo 14/1994, de 26 de julio, por el que se adecua la Ley 12/1981, de 24 de diciembre, por la que se establecen normas adicionales de protección de los espacios de especial interés natural afectados por actividades extractivas - Decreto 343/1983, del 15 de julio, sobre las normas de protección del medio ambiente de aplicación a las actividades extractivas - Orden del 6 de junio de 1988, de despliegue parcial del Decreto 343/1983, del 15 de julio, sobre normas de protección del medio ambiente de aplicación a las actividades extractivas - Decreto 202/1994, de 14 de junio, por el que se establecen los criterios para la determinación de las fianzas relativas a los programas de restauración de actividades extractivas
COMUNIDAD VALENCIANA	- Decreto 82/2005, de 22 de abril, del Consell de la Generalitat de Ordenación Ambiental de Explotaciones Mineras en Espacios Forestales de la Comunidad Valenciana
GALICIA	- Ley 3/2008, de 23 de mayo, de ordenación de la minería de Galicia

Tabla 4. Legislación minera autonómica en materia de restauración y protección de espacios afectados por actividades extractivas

2. TIPOLOGÍA Y SELECCIÓN DE HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD

El tipo de hueco, y especialmente la geometría del mismo, va a determinar la capacidad o volumen de RCD necesarios para las labores de rehabilitación, así como el diseño y planificación de las operaciones de relleno (IHOBE, 2005). Los huecos mineros de explotaciones a cielo abierto presentan diversas tipologías cuyas principales características y limitaciones para el uso de RCD en su restauración son descritas en los **apartados 2.1 y 2.2.2**, respectivamente.

La selección de los huecos mineros para su rehabilitación con este tipo de residuos debe realizarse teniendo como criterios básicos: por un lado, la imposibilidad del relleno de los mismos con los propios residuos mineros; y por otro, la exclusión de aquellos huecos localizados en medios muy vulnerables en los que el uso de RCD puede generar un impacto grave e irreversible sobre el medio ambiente o sobre el patrimonio cultural, o estar expuestos a peligros naturales que puedan inducir a un riesgo ambiental inaceptable. En esta Guía se propone la aplicación de un índice de idoneidad de carácter multifactorial para evaluar el grado de aptitud de un hueco minero para su relleno con RCD, que contempla aspectos: técnico-económicos, ambientales y de prioridad social. Esta evaluación permite clasificar y establecer un orden o jerarquización de los huecos generados por la actividad extractiva según diferentes grados de idoneidad, a fin de establecer prioridades de actuación y el diseño de planes para la recuperación de espacios degradados por minería con este tipo de residuos.

2.1. Tipología de huecos mineros de explotaciones a cielo abierto

La tipología de hueco minero depende del tipo de yacimiento mineral y del método de explotación a cielo abierto aplicado en la extracción de los recursos minerales. A continuación, se describen las principales características de los huecos generados según los distintos tipos de explotación (IGME, 2004):

- Cortas

Este tipo de laboreo es propio de yacimientos de minerales metálicos que profundizan en vertical. El laboreo se realiza mediante un diseño geométrico tridimensional, en forma de cono invertido. Un diseño parecido, aunque no exactamente con la misma forma cónica invertida, se da en yacimientos de carbón masivo, tipo lignitos pardos (Puentes de García Rodríguez o Meirama en Galicia). La extracción del mineral se realiza por banqueo descendente hasta llegar al fondo de corta, calculado en función de parámetros de rentabilidad (**Figura 1**). El hueco generado en las cortas de minería metálica suele ser muy profundo, pudiendo en algunos casos superar los 300 m como es el caso de “Corta Atalaya” (Minas de Riotinto, Huelva).

En el caso de la minería metálica se generan importantes volúmenes de residuos mineros: estériles de descubierta o desmonte, estériles de corta, lodos de lavadero, etc. Sin embargo, la operatividad de la mina en bancos descendentes no permite el relleno del hueco generado a medida que avanza la explotación. El posterior relleno del mismo con los propios residuos



mineros resulta por lo general inviable económicamente, tras el cese de la actividad. No obstante, existen algunos ejemplos de cortas con relleno parcial, e incluso total, con residuos mineros en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Rodríguez *et al.*, 2006); esto es posible en zonas mineras donde el yacimiento mineral se explota con el desarrollo de más de una corta, muy próximas entre sí.



Figura 1. Izquierda: minería metálica. Corta Cerro Colorado (Minas de Riotinto, Huelva). Derecha: minería de carbón. Corta Gargallo (Andorra, Teruel) (ENDESA GENERACIÓN, S.A.)

- Minería por Transferencia

La minería por transferencia es propia de yacimientos estratiformes de carbón; generalmente, de varias capas horizontales o subhorizontales, con una corrida de producción que puede ir de cientos de metros a algunos kilómetros. Este tipo de yacimientos minerales permite la transferencia del estéril a medida que avanza la extracción, previa apertura de un hueco inicial que debe tener la superficie necesaria para el movimiento de la maquinaria de extracción y carga, y que se rellena con el estéril de la fase siguiente, de acuerdo con el avance unidireccional de las capas de carbón. El resultado de este tipo de laboreo es: la formación de una escombrera con los estériles procedentes del hueco inicial, el relleno de la mayor parte del hueco minero y un hueco residual al final de la vida útil de la mina que resulta del balance de estériles (**Figura 2**). Dicho método de laboreo minero facilita además la rehabilitación progresiva de la zona afectada a medida que se va transfiriendo el estéril y el suelo vegetal (Herrera Herbert, 2006). Aunque existen ejemplos de minería por transferencia en algunas cortas de carbón (**Figura 2**), los dos sistemas clásicos representativos de este tipo de minería son:

- La explotación por descubiertas (sistema americano) que se suele aplicar en los casos en que el recubrimiento por estériles presenta potencias inferiores a 50 m. Consiste en una excavación unidireccional de un solo banco, a modo de trinchera, al que se denomina módulo. Una vez explotados los recursos de un módulo, se procede a la excavación del siguiente que será paralelo y colindante con el anterior (**Figura 3**). Los estériles extraídos en cada módulo se depositan en el hueco creado por la excavación del módulo previo (Romero, 2006).

- La explotación por terrazas (sistema alemán) que se realiza en yacimientos con uno o varios niveles mineralizados con un recubrimiento de estériles muy potente. El método se basa en un banqueo con avance unidireccional. Las profundidades que se pueden alcanzar son importantes. No obstante, el método permite el depósito del estéril en los huecos creados con el avance de la explotación alrededor de ésta (**Figura 3**).



Figura 2. Minería de transferencia y relleno final del hueco residual con yesos de desulfuración en la Corta Barrabasa (Andorra, Teruel) (ENDESA GENERACIÓN, S.A.)



Figura 3. Izquierda: explotación de carbón por el método de descubierta (Romero, 2006). Derecha: explotación de carbón por el método de terrazas (Herrera Herbert, 2006)

La minería por transferencia también se ha aplicado a otros tipos de recursos mineros (sepíolita, níquel, gossan, etc.).

- **Minería de contorno**

La minería de contorno se aplica mayoritariamente a yacimientos de carbón (aunque también existen ejemplos en otros tipos de recursos), con capas horizontales de reducida poten-



cia y topografía generalmente desfavorable. Consiste en la excavación del estéril y del mineral en sentido transversal al afloramiento dejando un talud de banco único, y progresión longitudinal siguiendo dicho afloramiento. Si la longitud de corrida de producción es grande permitiendo un gran desarrollo superficial de la excavación, y teniendo en consideración la escasa profundidad de los huecos, es posible una transferencia de los estériles facilitando el relleno y rehabilitación de los mismos (**Figura 4**).

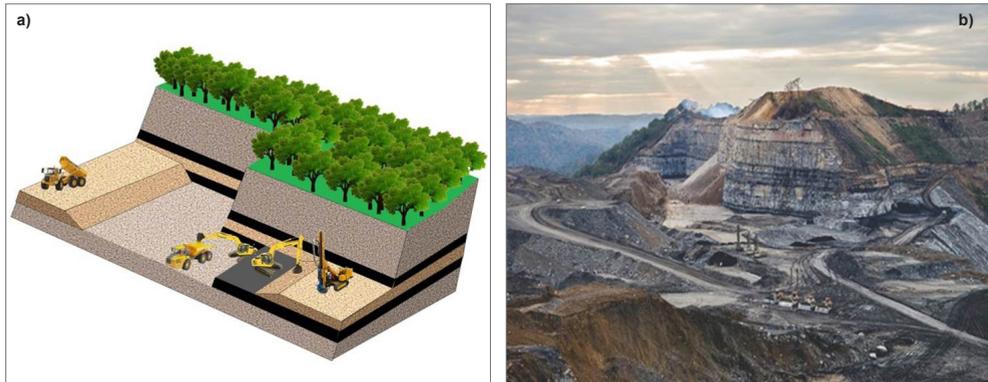


Figura 4. a) Método de explotación por minería de contorno. b) Explotación de carbón por minería de contorno en los Apalaches, en EEUU. (Foto de J. Henry Fair para NRDC; www.nrdc.org)

- Canteras

Se denominan canteras a las explotaciones de rocas industriales y ornamentales en las que el recurso mineral beneficiable es extraído de un macizo rocoso, generalmente competente. El método de explotación aplicado suele ser el de banqueo, con uno o varios niveles.

En las explotaciones de rocas industriales se extrae un todo-uno fragmentado, apto para alimentar a las plantas de tratamiento para la obtención de áridos u otros materiales de construcción (arcillas, yesos, etc.), la fabricación de cementos, productos industriales, etc., siendo común en las mismas la presencia de bancos de gran altura sobre todo en antiguas canteras abandonadas. De entre todas ellas, destacan las explotaciones de áridos para machaqueo por ser las más abundantes y próximas a los núcleos urbanos. Herrera Herbert (2006) distingue diversas tipologías en este tipo de explotaciones: a) canteras en terrenos horizontales, que se inician en forma de trinchera hasta alcanzar la profundidad del primer nivel, ensanchándose a continuación el hueco creado; b) canteras en ladera con un banqueado con numerosos bancos de poca altura (tendencia actual), o bien, pocos bancos pero muy elevados; y c) superquarries (supercanteras). La extracción de áridos y otros materiales de construcción (yesos, arcillas, etc.) presentan un ratio de aprovechamiento alto (material útil/material estéril), por lo que la generación de residuos mineros es muy baja, lo que imposibilita el relleno de los huecos mineros (**Figura 5**). Dentro del sector de rocas industriales es posible encontrar algún ejemplo de minería de transferencia, aunque no suele ser muy común, como es el caso de la explotación de sepiolita en Calatayud (Zaragoza) (**Figura 6**).



Figura 5. Canteras de rocas industriales de: a) y b) calizas para áridos de machaqueo en Camargo (Cantabria) y Alhaurín de la Torre (Málaga); c) yesos en Pina de Ebro (Zaragoza) (Rubio Navas *et al.*, 2007); y d) arcillas en Teruel



Figura 6. Relleno y rehabilitación del hueco de una explotación de sepiolita mediante la transferencia de los estériles en Calatayud (Zaragoza)



En las explotaciones de rocas ornamentales se obtienen grandes bloques paralelepípicos, que posteriormente son cortados y pulidos en placas de diferentes espesores según su uso (**Figura 7**). Estas explotaciones se caracterizan por la presencia de un gran número de bancos con planos de corte más o menos limpios dependiendo del método de corte empleado (hilo diamantado, rozadoras de brazo, etc.). Al igual que en el caso anterior, Herrera Herbert (2006) distingue diversos tipos: a) canteras en foso sobre terrenos llanos en las que la explotación se encuentra totalmente confinada por taludes verticales o subverticales; b) canteras en ladera sobre terrenos en pendiente; y c) canteras de nivelación en terrenos montañosos.



Figura 7. a) Cantera de mármol (Cehegín, Región de Murcia). b) Cantera de pizarra (SIEM-CALSA, 2007)



Figura 8. a) Escombrera de una explotación de mármol (Cehegín, Región de Murcia). b) Escombreras de una explotación de pizarra (Comarca de la Cabrera, León)

En las explotaciones de roca ornamental es común encontrar escombreras que incluyen estériles procedentes del desmonte del terreno e incluso material de cantera desechado por la

presencia de fracturas, rocas oxidadas e impurezas, etc., que imposibilitan su comercialización por no cumplir las calidades técnicas exigidas y otros rechazos del proceso de tratamiento (lodos, etc.) (**Figura 8**). En el caso de las escombreras de mármol, caliza marmórea y granito suele ser común una amplia variedad de tamaños de material con bloques centimétricos a métricos. Existen algunas experiencias de valorización de estos residuos como áridos mediante la instalación de plantas de machaqueo y trituración en la misma explotación (Vadillo y Rodríguez, 2012).

- Graveras

Las graveras son explotaciones que benefician materiales detríticos no consolidados como arenas y gravas, para la producción de áridos (**Figura 9**). En función de la afección o no al nivel freático, se pueden clasificar en: a) graveras secas, consistentes en excavaciones tridimensionales hasta alcanzar el fondo previsto o lecho del depósito de gravas y arenas por encima del nivel del río o el nivel freático. Según la profundidad de extracción pueden presentar un frente único o escalonado en varios bancos; b) graveras con explotación bajo lámina de agua, cuando el nivel freático se ve afectado, por lo que la extracción se realiza total o parcialmente bajo el agua, realizándose generalmente en un solo banco de altura igual a la de la profundidad del hueco inundado. En este caso, los terrenos afectados suelen ser restaurados como lagunas, llegándose a rellenar parcialmente algunas zonas; y c) graveras con rebajamiento del nivel freático mediante la construcción de pozos, zanjas, etc.



Figura 9. Huecos de graveras abandonadas en la Ribera Alta del Ebro (Navarra) (izquierda), y en Fuentes de Ebro (Zaragoza) (derecha)

Con vistas a las posibilidades de rehabilitación de los huecos mineros, y a modo de síntesis, es posible distinguir las siguientes casuísticas: 1) grandes cortas mineras con escombreras y presas de lodos de lavadero en las proximidades, que suelen presentar huecos de gran volumen, extensos y profundos, cuya remodelación y relleno es por lo general inviable económicamente; 2) explotaciones a cielo abierto que realizan una minería por transferencia o una minería de contorno que permiten el relleno de los huecos generados con los propios



residuos mineros. En estos casos, puede quedar un pequeño hueco residual y una escombrera externa con los materiales del hueco inicial de excavación; 3) canteras de rocas industriales y ornamentales que producen un elevado volumen de residuos mineros que son depositados en escombreras próximas; y 4) explotaciones de rocas industriales que generan pocos volúmenes de residuos (alto ratio de aprovechamiento mineral/estéril) para el relleno de los huecos creados, como es el caso de las canteras de áridos de machaqueo y materiales de construcción, graveras de áridos, etc., y que tienden a localizarse en las proximidades de los núcleos urbanos o centros de consumo.

2.2. Criterios de selección de huecos mineros para su rehabilitación con RCD

La selección de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD debe realizarse teniendo en consideración criterios técnico-económicos, medioambientales y sociales conjuntamente (Josimovic & Maric, 2012).

2.2.1. Evaluación preliminar de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD.

En esta Guía se propone una metodología de evaluación preliminar de la idoneidad de huecos mineros para su rehabilitación con RCD, basada en criterios de aptitud del mismo para dicho fin y capacidad de acogida del medio. De acuerdo con la misma, los huecos mineros más idóneos serán aquellos que: a) proporcionen la mayor protección ambiental por sus características intrínsecas (geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas, etc.); b) se localicen además en medios poco vulnerables a la contaminación y poco expuestos a riesgos naturales que pudieran comprometer la integridad de la estructura; c) se encuentren próximos a instalaciones de gestores de RCD y/o núcleos de población que puedan garantizar el suministro suficiente de material y reducir los costes de transporte; d) y que la recuperación del espacio degradado se considere prioritaria, por contribuir de forma significativa a la mejora de la calidad ambiental y del paisaje o a la protección del patrimonio natural y cultural.

No obstante, en explotaciones generadoras de elevados volúmenes de residuos mineros debe priorizarse el uso de los mismos para el relleno de los huecos residuales, siempre que sea técnica y económicamente viable, tal y como se recoge en los objetivos del plan de gestión de residuos en el R.D. 975/2009. Por lo tanto, un primer criterio para la selección de un hueco de explotación para su relleno con RCD, sería: *la falta o escasez de residuos mineros propios o inviabilidad técnico-económica del uso de los mismos, para poder llevar a cabo la remodelación topográfica.*

La definición de criterios de exclusión permite asimismo identificar y eliminar del proceso de selección, los huecos mineros considerados no idóneos para su rehabilitación con RCD. Para ello, se han incluido muchos de los criterios restrictivos para la ubicación de vertederos de inertes propuestos en el Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001, además de otros orientados a la protección del patrimonio natural y cultural. Entre estos últimos, destaca la exclusión de zonas mineras catalogadas o inventariadas como Lugares de Interés Geológico, siempre y cuando los trabajos de rehabilitación y relleno del hueco impliquen la destrucción o la pérdida de valor patrimonial, o declaradas como Bienes de Interés Cultural. Todos estos criterios han quedado recogidos en la **Tabla 5**.

CRITERIOS DE EXCLUSIÓN DE HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD

- Huecos mineros situados en zonas con evidencias¹ de un peligro significativo asociado a deslizamientos, movimientos en masa o caída de bloques, o localizados a una distancia ≤ 100 m de estas zonas inestables^a, así como evidencias de riesgos de subsidencia (incluida la minera)
- Huecos mineros situados en calderas, conos y cráteres volcánicos activos, o inactivos si se encuentran catalogados de interés cultural protegido o en trámites de protección; y en zonas con evidencias¹ de un peligro significativo asociado a procesos de erupción (coladas de lava, etc.)^a
- Huecos mineros situados en áreas kársticas con inestabilidades (asientos, colapsos, etc.), o con colonias estables de quirópteros o patrimonio catalogado de tipo cultural, histórico-artístico, turístico o deportivo que pudieran verse afectados, así como los localizados a una distancia ≤ 100 m de estas zonas kársticas inestables y/o con valor patrimonial natural o cultural^a
- Huecos mineros situados en zonas en las que exista un peligro significativo de aludes por acumulación estacional de nieve o en áreas que pudieran verse afectadas potencialmente^a
- Huecos mineros situados en zonas de Dominio Público Hidráulico definido en la Ley de Aguas (Capítulo I del Título 1 del RDL 1/2001), riberas y márgenes en sus zonas de servidumbre (5 m) y policía (100 m) (Capítulo II del Título 1 del RDL 1/2001), así como en el Dominio Público Marítimo Terrestre (Ley de Costas 22/1998, modificada por la Ley 2/2013)^a
- Huecos mineros en los que la distancia vertical entre la cota mínima del fondo de excavación del vaso o de apoyo del sistema de impermeabilización artificial si fuera necesario su uso, respecto al nivel freático medio sea ≤ 2 m, o que el nivel freático pueda alcanzar dicha cota en un período húmedo^a
- Huecos mineros que pudieran localizarse en humedales RAMSAR, o incluidos en el Inventario Español de Zonas Húmedas u otros Inventarios de las CCAA^a
- Huecos mineros situados en la zona de inundación de periodo de retorno de 100 años^b
- Huecos mineros próximos a embalses para abastecimiento situados aguas arriba, a menos de 500 m
- Huecos mineros que hayan sido catalogados e inventariados como Lugares de Interés Geológico (LIG), cuando el relleno represente su destrucción o la pérdida de valor patrimonial
- Huecos mineros declarados Bienes de Interés Cultural u otra figura de protección similar, y correspondiente perímetro de protección, o que el proyecto de relleno o restauración pueda representar una pérdida irreversible de patrimonio cultural catalogado o inventariado
- Huecos mineros que puedan afectar a una captación de agua (subterránea o superficial) para abastecimiento con un volumen medio diario igual o superior a 10 m^3 o que abastezca a más de 50 personas (núcleos urbanos, etc.), o al perímetro de protección de aguas minerales y termales aprobado por la legislación específica, situados a menos de 100 m aguas abajo, o en la dirección del flujo del agua subterránea si se conoce. Todos estos elementos expuestos deben estar incluidos en el registro de zonas protegidas de acuerdo con la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE)

¹ Cartográficas, históricas, mediciones o reconocimientos técnicos. Además, en el caso del riesgo volcánico, se consideran las evidencias de los procesos activos de los últimos 500 años.

^a Criterios restrictivos en el Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001

^b Criterios limitantes en el Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001

Tabla 5. Criterios para la exclusión de huecos mineros para su rehabilitación con RCD



En la determinación de la idoneidad de los huecos mineros para el relleno con RCD, no excluidos por algunos de los criterios enunciados anteriormente, se consideran los principales condicionantes técnico-económicos que encarecen un proyecto de relleno para garantizar la protección de la población y el medio ambiente, la vulnerabilidad del medio ante el impacto que pudiera generar el uso de estos residuos y el carácter prioritario de la restauración ambiental, entre otros. El objetivo último es una selección, o en su caso la elaboración de una lista de prioridades, de carácter preliminar de los huecos mineros en función del grado de idoneidad de los mismos para su rehabilitación con RCD. Respecto a los factores evaluados, sólo se han tenido en cuenta los más relevantes, y no todos los que podrían contemplarse en análisis más detallados del emplazamiento y caracterización del hueco de excavación como los que se realizan en estudios de evaluación de impacto ambiental o planes de restauración. La idoneidad de un hueco para su restauración con RCD se valora mediante un índice de idoneidad (ID), en términos cualitativos: baja, media, alta y muy alta de acuerdo con la escala de valoración de la **Tabla 6**. Dicha escala es aplicada a todos los componentes que definen dicho índice: condicionantes técnico-mineros, coste del transporte y garantía de suministro de RCD, y prioridad de restauración de espacios degradados por minería que son descritos en los siguientes apartados.

ESCALA DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
VALORES DEL ÍNDICE DE IDONEIDAD (ID)	CLASE DE IDONEIDAD
≤ 1	BAJA
$> 1 - 2$	MEDIA
$> 2 - 3$	ALTA
$> 3 - 4$	MUY ALTA

Tabla 6. Escala de valoración de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD

2.2.1.1. *Condicionantes técnico-mineros (C_{MIN})*

Este componente engloba todos aquellos aspectos, ambientales u de otro tipo, que van a condicionar el diseño técnico-minero del proyecto de rehabilitación del hueco de excavación, relacionados fundamentalmente con: la protección de las aguas subterráneas (AG_{SUB}) y superficiales (PA_{SUP}), o con la erosión e inestabilidad de los taludes de la zona excavada (ER_{EST}) que pudieran afectar a la seguridad durante las operaciones de relleno o a la estabilidad geotécnica del mismo, tras la restauración.

a) **Factor hidrogeológico (AG_{SUB})**

La protección de las aguas subterráneas es uno de los aspectos que más condicionan la idoneidad de un hueco minero para su remodelación con RCD, y es considerada en práctica-

mente todas las metodologías desarrolladas para la localización de vertederos (Josimovic & Maric, 2012; etc.) o para el relleno de huecos de excavación. La probabilidad de afección de las aguas subterráneas es evaluada a través del factor hidrogeológico (AG_{SUB}) que considera: las características hidrogeológicas del hueco minero, la localización del nivel freático, la presencia y vulnerabilidad de masas de agua subterránea que pudieran verse afectadas, y otros elementos expuestos (manantiales, fuentes, pozos, etc.).

Las *características hidrogeológicas del hueco de explotación* (H_{SUB}) hacen referencia al efecto barrera o impermeabilidad del terreno respecto a la infiltración de lixiviados que pudieran ser generados por los residuos. A pesar de que los RCD y tierras de excavación utilizados en restauraciones mineras deben ser “inertes” en operaciones de valorización, es posible que en algunos casos las concentraciones de sulfatos en los lixiviados superen los valores límites establecidos en la Orden AAA/661/2013 para este tipo de residuos, dependiendo del fondo geológico regional y materias primas minerales utilizadas en el sector de la construcción en la zona. La infiltración de estas aguas sulfatadas puede producir procesos de contaminación en los acuíferos afectados, salvo que el fondo hidroquímico natural de sus aguas presente elevadas concentraciones de sulfatos. La normativa que regula la eliminación de residuos en vertederos de inertes (R.D. 1481/2001), de aplicación en la remodelación de huecos mineros con RCD según el R.D. 975/2009, obliga en los mismos la existencia de una barrera geológica natural con un coeficiente de permeabilidad (K) menor o igual de 1×10^{-7} m/s, de 1 m de espesor mínimo, a fin de garantizar la protección de las aguas subterráneas y el suelo. Si se carece de dicha barrera natural, dicha normativa impone, salvo excepciones y previa autorización del órgano ambiental competente, tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la construcción de una barrera artificial consistente en una capa mineral de no menos de 0,5 m de espesor a fin de garantizar la impermeabilidad del vaso. El criterio que ha venido a denominarse “*características hidrogeológicas del hueco minero*” es evaluado a través de la permeabilidad o conductividad hidráulica (K) de las litologías que conforman el mismo. Este parámetro tiene un carácter técnico-económico pues informa, no solo del grado de protección del medio geológico frente a la contaminación de los recursos hídricos subterráneos por lixiviados de los RCD, sino también de la necesidad, en el caso de materiales con permeabilidad por encima de 1×10^{-7} m/s, de barreras artificiales (capas de mineral, geosintéticos, etc.) para poder alcanzar el nivel de impermeabilización que la normativa exige lo que implica un incremento significativo de los costes de acondicionamiento del hueco. Para la evaluación de este criterio, se ha tenido en consideración las conductividades hidráulicas (m/s) de distintos tipos de rocas y sedimentos (Freeze & Cherry, 1979), y que se muestran en la **Figura 10**.

En la **Tabla 7** se recogen las valoraciones de este componente en función de la permeabilidad de las formaciones geológicas que conforman el hueco.

Otro criterio que se considera es el de la *vulnerabilidad de las masas de agua subterránea* (V_{SUB}) que pudieran verse afectadas. La probabilidad de contaminación de los recursos hídricos subterráneos va a depender, en primer lugar, de que exista una masa de este tipo que pueda verse expuesta. Se parte de la base de que todo acuífero expuesto es vulnerable en mayor o menor grado (NRC, 1993). Por lo tanto, en caso de que se confirme su existencia,



se evalúa su vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de tal forma que: a mayor vulnerabilidad menor es la protección natural y viceversa. Existe una gran variedad de métodos (matemáticos, de simulación o indexados) para evaluar la vulnerabilidad intrínseca (Jiménez Madrid, 2011). En esta fase de selección preliminar, pueden resultar de utilidad los métodos de índices y superposición cartográfica que permiten una evaluación de la misma rápida y barata, aunque con una mayor incertidumbre respecto a otros. De entre los métodos indexados que pueden aplicarse podemos destacar los siguientes: DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), GOD (Foster, 1987), SINTACS (Civita *et al.*, 1990), AVI (Van Stempwoort *et al.*, 1992), EKV (Auge, 1995), BGR (BGR-LÄNDER, 1995), DRASTIC reducido (DGOHCA-IGME, 2002), o en el caso específico de acuíferos kársticos lo métodos EPIC (Doerfliger & Zwahlen, 1997) y COP (Vías *et al.*, 2006), entre otros. Además, pueden utilizarse también algunas cartografías de vulnerabilidad de acuíferos y masas de agua subterránea realizadas por algunas CCAA, o los *Mapas de Vulnerabilidad Intrínseca de las Masas de Agua Subterránea Intercomunitarias: Detríticas y Mixtas o Carbonatadas* realizados por la Dirección General del Agua (DGA) y el IGME. La valoración de este parámetro se muestra en la **Tabla 8**.

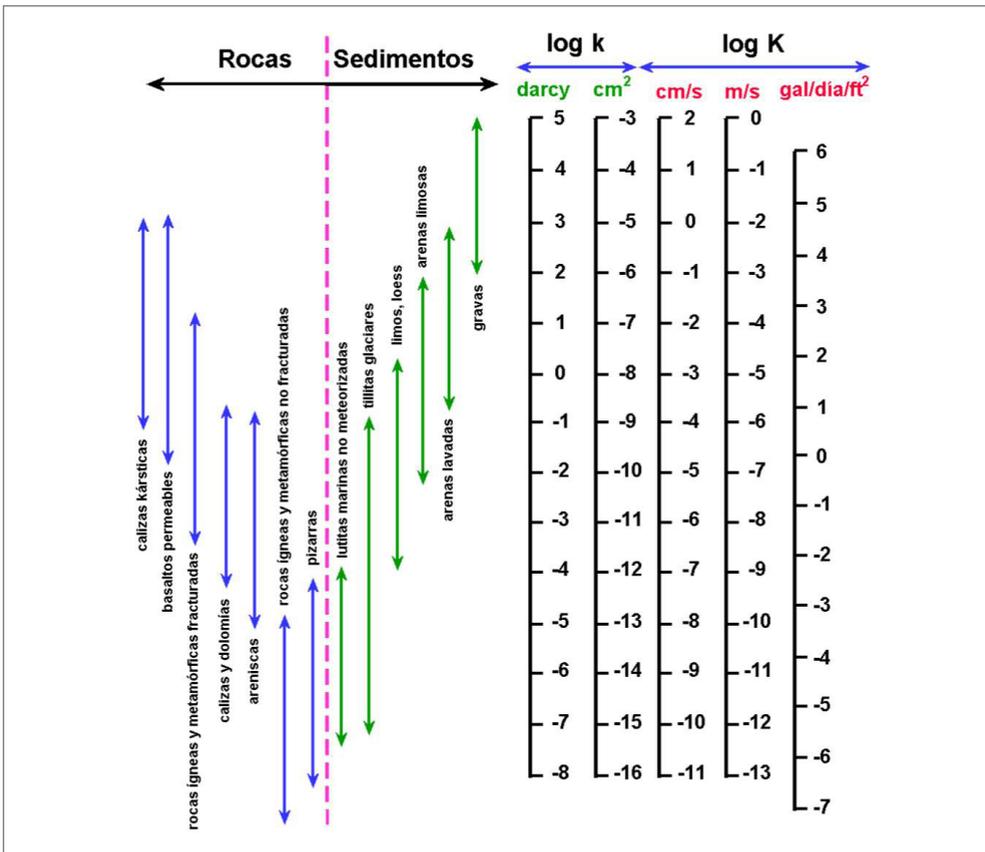


Figura 10. Conductividad hidráulica (log K) para distintos tipos de rocas y sedimentos (Freeze & Cherry, 1979)

Se ha incluido también la *profundidad del nivel freático* (P_{NF}) como criterio de selección, a pesar de que muchos de los métodos para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos incluyen este factor. Tal y como se recoge en la **Tabla 5**, quedan excluidos de la selección los huecos de excavación en los que la profundidad media del nivel freático sea menor o igual a 2 m, o que éste pueda alcanzar dicha cota en un período húmedo o la capa de impermeabilización del relleno, de acuerdo con lo establecido por el Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001 para vertederos de inertes. Flores Martínez *et al.* (2010) establecen una clasificación de la aptitud del rechazo (tamaño zahorra < 30 mm) del proceso de reciclado de los RCD para la restauración minera según tipología: hormigón (tipo 1) y cerámico-mixto (tipo 2), en función de la litología del hueco receptor y la profundidad del nivel freático (**Tabla 7**). Estos especialistas proponen, en el caso de gravas y arenas limpias, muy permeables, el relleno con material de rechazo de hormigón cuando el nivel freático se localiza a más de 3 m de profundidad, y el cerámico-mixto a partir de más de 10 m. Consideran además que ambas tipologías de RCD son aptas para el relleno en litologías más o menos impermeables (arcillas, limos arcillosos, rocas masivas no karstificadas), cuando la profundidad del nivel freático es mayor de 0,5 m. Por el contrario, en calizas débilmente karstificadas y fisuradas sólo admiten ambos tipos de material cuando la capa freática se encuentra a más de 5 m de profundidad, y en calizas y yesos muy karstificados a más de 10 m. Asimismo, otros autores recogen como valor de referencia para la ubicación de vertederos, una profundidad del nivel freático superior a 3 m (Josimovic & Maric, 2012; García-Piñón *et al.*, 2008; Blanco Fernández, 2011).

PERFIL GEOLÓGICO	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO	TIPO DE RCD RECOMENDADA		
Gravas y arenas limpias	≤ 3m	--	--	--
	>3m y ≤ 10m	TIPO 1	--	--
	>10 m	TIPO 1	TIPO 2	
	Gravas secas <i>Sin nivel freático en las gravas. Se atenderá a las condiciones de las rocas subyacentes</i>	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Gravas y arenas con matriz limo-arcillosa	≤ 0,5m	--	--	--
	>0,5m y ≤ 3m	TIPO 1		
	>3m y ≤ 10m	TIPO 1	TIPO 2	
	>10 m	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3



PERFIL GEOLÓGICO	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO	TIPO DE RCD RECOMENDADA		
Arcillas y limos arcillosos Rocas masivas no karstificadas (esquistos, pizarras, margas, calizas no karstificadas).	≤ 0,5m	--	--	--
	>0,5m y ≤ 3m	TIPO 1	TIPO 2	
	>3m	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Yesos masivos no karstificados	≤ 0,5m	--	--	--
	>0,5m	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Calizas y yesos karstificados (con cavidades y huecos bien desarrollados, grietas abiertas)	≤ 10m	TIPO 1	--	--
	>10 m	TIPO 1	TIPO 2	--
Calizas débilmente karstificadas y fisuradas	≤ 1m	--	--	--
	>1m y ≤ 5m	TIPO 1	--	--
	>5 m	TIPO 1	TIPO 2	

Rechazos gestión RCD: Tipo 1. Hormigón; Tipo 2. Ladrillos, tejas y materiales cerámicos; Tipo 3. Aglomerados

Tabla 7. Recomendación del uso de RCD en rellenos mineros en función de las características geológicas y posición del nivel freático en la zona ocupada por la explotación minera (Flores Martínez *et al.*, 2010)

En la **Tabla 8** se muestra la valoración adoptada para este criterio (P_{NF}). Se ha considerado la situación más óptima, desde el punto de vista de la protección de las aguas subterráneas, cuando el nivel freático se encuentra a más de 10 m de profundidad, o a más de 3 m en litologías totalmente impermeables.

Por último, para la determinación del factor hidrogeológico, se ha considerado además la *distancia a captaciones de agua para abastecimiento o consumo humano* (manantiales, pozos, etc.) (M_{SUB}) que proporcionen un volumen diario de agua de 10 o más metros cúbicos, o abastezcan a más de 50 personas (núcleos de población, etc.), así como las zonas o perímetros de protección de aguas minerales o termales aprobados por la legislación específica, incluidos en el Registro de Zonas Protegidas según la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE). Teniendo en consideración algunas metodologías de evaluación de riesgos aplicada a sue-

los contaminados o residuos mineros (National Classification System for Contaminated Sites (CCME, 2008); PRA.MS (EEA, 2005); Alberruche *et al.*, 2014, etc.), se han excluido, tal y como se muestra en la **Tabla 8**, los huecos mineros con algunos de estos elementos expuestos a menos de 100 m aguas abajo, o en la dirección del flujo de agua subterránea si se conoce. Por otra parte, no existe un consenso en la bibliografía científico-técnica respecto a las distancias de protección entre vertederos o explotaciones restauradas con RCD y captaciones para abastecimiento de la población. No obstante, destacan como referencias las del Departamento de Protección Ambiental del Estado de Maine (EE.UU) que establece una distancia restrictiva respecto a manantiales de 1000 pies (305 m) (DEP, 2015), y que ha sido aplicada para vertederos de inertes en Dakota del Norte (EE.UU)²; el Departamento del Agua del Gobierno de Australia Occidental recomienda, sin embargo, una distancia de 100 m con vegetación en este tipo de depósitos con residuos inertes (Department of Water, 2015). En algunas metodologías para la localización de vertederos se establecen distancias de protección respecto a pozos para abastecimiento urbano de 500 m (Josimovic & Maric, 2012; Issa & Shehhi, 2012, etc.). Los criterios adoptados en esta Guía se muestran en la **Tabla 8**.

El **factor hidrogeológico (AG_{SUB})** es evaluado finalmente mediante la suma ponderada de los componentes: *características hidrogeológicas del hueco de explotación (H_{SUB})*; *vulnerabilidad de las masas de agua subterránea (V_{SUB})*; *profundidad del nivel freático (P_{NF})*; y *distancia a captaciones de agua para abastecimiento (M_{SUB})* de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$AG_{SUB} = 0,3 * H_{SUB} + 0,3 * V_{SUB} + 0,3 * P_{NF} + 0,1 * M_{SUB}$$

CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
FACTOR HIDROGEOLÓGICO (AG _{SUB})	
AG _{SUB} = 0,3 * H _{SUB} + 0,3 * V _{SUB} + 0,3 * P _{NF} + 0,1 * M _{SUB}	
<i>Características hidrogeológicas del hueco de explotación</i>	H _{SUB}
Calizas, dolomías y yesos muy karstificados con cavidades o huecos bien desarrollados.	Exclusión
Permeabilidad alta: arenas limpias, gravas	1
Permeabilidad moderada: calizas, dolomías y yesos débilmente kárstificados o fisurados; rocas ígneas y metamórficas fracturadas; arenas limosas.	2
Permeabilidad baja: areniscas, calizas, dolomías y yesos masivos; limos; limos arenosos; arcilla limosa.	3
Permeabilidad muy baja: arcillas y margas compactas; rocas ígneas y metamórficas masivas; pizarras; tillitas.	4

2. <http://www.ndhealth.gov/wm/publications/Guideline16OperationOfInertWasteLandfills.pdf>



CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
FACTOR HIDROGEOLÓGICO (AG_{SUB})	
$AG_{SUB} = 0,3 \cdot H_{SUB} + 0,3 \cdot V_{SUB} + 0,3 \cdot P_{NF} + 0,1 \cdot M_{SUB}$	
<i>Vulnerabilidad de las masas de agua subterránea</i>	V_{SUB}
Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación Alta o Muy Alta	1
Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación Media	2
Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación Baja	3
Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación Muy Baja	4
<i>Profundidad del nivel freático</i>	P_{NF}
≤ 2 m	Exclusión
$> 2 - 3$ m	1
$> 3 - 5$ m	2
$> 5 - 10$ m	3
> 10 m	4
> 3 m en litologías impermeables.	4
Sin nivel freático	4
<i>Distancia a captaciones de agua para abastecimiento</i>	M_{SUB}
< 100 m	Exclusión
$100 - < 200$ m	1
$200 - < 500$ m	2
$500 - < 1.000$ m	3
≥ 1.000 m	4

Tabla 8. Criterios de valoración del factor hidrogeológico (AG_{SUB})

b) Proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP})

Otro aspecto considerado es el factor de proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP}) que evalúa la posible afección de las mismas por efluentes y escorrentías procedentes de áreas mineras, restauradas con RCD. La distancia disminuye la probabilidad de que

dichos efluentes puedan alcanzar cuerpos de agua superficial. Al mismo tiempo, favorece una reducción de la carga de sólidos en suspensión y contaminantes, en este caso sulfatos, por: infiltración, deposición, precipitación y otros procesos de atenuación natural al interactuar con el terreno. Investigaciones sobre riesgos ambientales en minería abandonada postulan que la máxima afectación sobre corrientes de agua superficiales se produce cuando éstas se localizan a menos de 30 ó 50 m, aguas abajo, de una zona minera (Turner *et al.*, 2011; Shevenell *et al.*, 1997; Alberruche *et al.*, 2014) o un vertedero (Calvo, 2003; Garrido Vergara, 2008), y se reduce significativamente a partir de 500 m. Algunas normativas sobre vertederos de inertes en EEUU han establecido distancias de protección similares, de 30,5 m (100 pies) en el estado de Washington³ o 61 m (200 pies) en Dakota del Norte⁴. En esta Guía, se han excluido los huecos mineros situados a menos de 30 m de cursos de agua superficiales para su restauración con RCD. Por otra parte, diversos estudios y metodologías sobre ubicación de vertederos proponen una distancia superior a 500 m, para garantizar la protección de las aguas superficiales (EPA South Australia, 2007; Josimovic & Maric, 2012; Eskandari *et al.*, 2015, etc.). En la **Tabla 9** se muestra el valor de este factor.

CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
FACTOR DE PROXIMIDAD A MASAS DE AGUAS SUPERFICIALES (PA _{SUP})	
<i>Distancia del hueco a una masa de agua superficial</i>	PA _{SUP}
< 30 m	Exclusión
30 – 100 m	1
> 100 – 500 m	2
> 500 – 1.000 m	3
> 1.000 m	4

Tabla 9. Criterios de valoración del factor de proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP})

El riesgo de salinización por efluentes de RCD, con elevadas concentraciones de sulfatos, dependerá de la naturaleza hidroquímica y del caudal o capacidad de dilución de las masas de agua receptoras. La magnitud del impacto será menor en aguas sulfatadas y caudalosas. Sin embargo, estos factores no han sido contemplados en la metodología porque exigen un nivel de conocimiento que va más allá de un análisis de carácter preliminar, adoptándose un criterio conservador de máxima vulnerabilidad a todas las masas de agua superficiales expuestas.

3. <http://apps.leg.wa.gov/WAC/default.aspx?cite=173-350-400>

4. <http://www.ndhealth.gov/wm/publications/Guideline16OperationOfInertWasteLandfills.pdf>



c) **Grado de erosión de los taludes del hueco y/o la presencia de inestabilidades (ER_{EST})**

40

El grado de erosión de los taludes del hueco y/o la presencia de inestabilidades (ER_{EST}) pueden incrementar significativamente los costes económicos derivados del acondicionamiento y saneado del mismo, para poder llevar a cabo las operaciones de relleno en condiciones de seguridad o garantizar la estabilidad geotécnica y la protección ambiental tras la restauración. Los criterios de valoración de este factor en suelos y rocas blandas, se han basado en la clasificación de estados erosivos de los taludes de depósitos de residuos mineros abandonados diseñada para la evaluación del riesgo de este tipo de instalaciones (Alberruche *et al.*, 2014), quedando expuestos en la **Tabla 10**. Algunos ejemplos de taludes de huecos mineros excavados en este tipo de materiales con distintos grados de erosión e inestabilidades se muestran en las **Figuras 11 y 12**, respectivamente.



Figura 11. Distintos grados de erosión en taludes de huecos mineros

Por el contrario, en taludes de huecos de excavación en rocas duras van a ser más significativos los problemas de inestabilidad asociados a las discontinuidades del macizo rocoso, frente a los derivados de la alteración o meteorización del mismo (**Figura 13**). En este tipo de taludes, al igual que en el caso anterior, se proponen criterios de valoración que pueden ser obtenidos



Figura 12. Grietas verticales y desprendimientos en una gravera (izquierda). Grietas de tracción en cabecera de un talud de una explotación de arcillas (derecha)

directamente en el sitio mediante una simple inspección visual (**opción 1ª de la Tabla 10**). No obstante, es posible el uso de criterios basados en clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso de base empírica como: la clasificación RMR (Rock Mass Rating) desarrollada por Bieniawski (1973, 1979 y 1989), que considera diferentes aspectos como la resistencia de la roca matriz, las condiciones de diaclasado y su posición relativa respecto a la excavación y el efecto del agua (Ayala Carcedo y Andreu, 2006; González de Vallejo *et al.*, 2006); o bien, la clasificación SMR (Slope Mass Rating) que es una adaptación de la clasificación de Bieniawski para taludes (Romana, 1995). Sin embargo, el uso de este tipo de clasificaciones supone un conocimiento de campo mucho más exhaustivo y la realización de ensayos *in situ*. La valoración del factor ER_{EST} mediante algunos de estos índices quedan reflejados en la **Tabla 10 (opción 2ª)**. En cualquier caso, la asignación de los valores ER_{EST} parte de la premisa de que un mayor grado de erosión o gravedad de los problemas de estabilidad detectados, implica por lo general la aplicación de técnicas más complejas y/o una mayor inversión económica en las labores de acondicionamiento de los huecos de excavación, lo que representa un valor de este factor desde el punto de vista de la idoneidad más bajo y viceversa.



Figura 13. Taludes de huecos excavados en rocas duras con distinto grado de fracturación y alteración



CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
GRADO DE EROSIÓN DE LOS TALUDES DEL HUECO Y/O PRESENCIA DE INESTABILIDADES (ER_{EST})	
<i>Huecos excavados en suelos y rocas blandas</i>	ER_{EST}
- Erosión hídrica extrema con abundantes regueros y cárcavas tanto grandes como pequeñas, frecuentes fenómenos de tubificación, y/o presencia de movimientos de masa (deslizamientos, etc.)	1
- Abundantes regueros con frecuentes cárcavas (alguna grande, de > 1 m de profundidad) y algunos fenómenos de tubificación. O presencia de grietas de tracción verticales y en cabecera significativos desde el punto de vista de la estabilidad del talud	2
- Erosión con regueros frecuentes o abundantes con pocas cárcavas pequeñas (de 30 cm a 1 m de profundidad)	3
- Erosión laminar o erosión con pocos regueros (< 30 cm de profundidad)	4
<i>Huecos excavados en rocas duras (opción 1ª)</i>	ER_{EST}
- Roturas generalizadas del talud o afección a uno o varios bancos en macizos rocosos muy fracturados y alterados	1
- Macizo rocoso moderadamente fracturado y alterado. Riesgo de algún pequeño desprendimiento	2
- Macizo rocoso ligeramente fracturado y meteorizado. Riesgo de caída de algún bloque pequeño aislado	3
- Macizo rocoso inalterado sin fracturación o muy poco fracturado	4
<i>Huecos excavados en rocas duras (opción 2ª)</i>	ER_{EST}
<i>CLASIFICACIÓN RMR (Bieniawski, 1973; 1979; 1989)</i>	
- Macizo rocoso de clase IV y V de calidad mala y muy mala (RMR ≤ 40)	1
- Macizo rocoso de clase III de calidad media (RMR entre 41 y 60)	2
- Macizo rocoso de clase II de calidad buena (RMR entre 61 y 80)	3
- Macizo rocoso de clase I de calidad muy buena (RMR entre 81 y 100)	4
<i>CLASIFICACIÓN SMR (Romana, 1995)</i>	
- Talud totalmente inestable o inestable (SMR ≤ 40)	1
- Talud parcialmente estable (SMR entre 41 y 60)	2
- Talud estable (SMR entre 61 y 80)	3
- Talud totalmente estable (SMR entre 81 y 100)	4

Tabla 10. Criterios de valoración del grado de erosión de los taludes del hueco y/o presencia de inestabilidades (ER_{EST})

d) Evaluación de los condicionantes técnico-mineros (C_{MIN})

El componente condicionantes técnico-mineros (C_{MIN}) es evaluado finalmente mediante la agregación ponderada de todos los factores descritos anteriormente: factor hidrogeológico (AG_{SUB}), factor de proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP}) y grado de erosión de los taludes del hueco y/o presencia de inestabilidades (ER_{EST}), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$C_{MIN} = 0,7*AG_{SUB} + 0,2*PA_{SUP} + 0,1*ER_{EST}$$

Los huecos mineros que presentan los valores C_{MIN} más altos serán aquellos que se localicen en zonas menos vulnerables o que proporcionen la máxima protección sobre las aguas subterráneas y superficiales, faciliten las operaciones de relleno en condiciones de seguridad y garanticen la estabilidad geotécnica del mismo con el menor coste técnico y económico, y viceversa.

2.2.1.2. Coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})

Para la determinación de la idoneidad se ha contemplado el componente coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM}), cuya valoración va a depender de la distancia de los huecos mineros a los núcleos urbanos (D_{NUC}) y del potencial de producción de RCD de los mismos (P_{NUC}).

a) Distancia a centros de producción de RCD (D_{NUC})

La *distancia a centros de producción de RCD* (D_{NUC}), es decir, a núcleos urbanos o a centros gestores autorizados, tiene por objeto evaluar la viabilidad de las restauraciones en función del coste del transporte. La naturaleza de este tipo de residuos de elevado volumen propicia que este sea alto y condicione el uso de los mismos en la rehabilitación minera. En el primer Plan Nacional de Residuos de Construcción 2001-2006, se hace referencia al “principio de proximidad” como uno de los principales principios de gestión de los RCD. En dicho plan se recoge la previsión de una red de centros de transferencia en un radio de 25 km alrededor de los núcleos urbanos, y de 15 km en el caso de núcleos de población importantes. La “Guía técnica para el relleno de canteras con materiales naturales de excavación” (IHOBE, 2005), utiliza esta última distancia a centros urbanos, como criterio de selección, además de otros. Sin embargo, para muchos autores, la distancia considerada crítica para el transporte de RCD desde los centros de producción a los vertederos o instalaciones de gestión, o transferencia en su caso, es de 30 km (Moreno Cayuela, 2000; IHOBE, 2012; etc.). Esta distancia crítica ha quedado recogida también en diversos planes autonómicos sobre RCD como es el caso de la Comunidad Autónoma de Madrid, Castilla-La Mancha, Comunidad Foral de Navarra, etc. Se ha tomado también como referencia la explotación de un recurso mineral de bajo valor económico como es el caso de los áridos, que se encuentra muy condicionada por los elevados costes del transporte. En este caso, a partir de 40 km se considera que la extracción de áridos no es viable económicamente (ANEFA, 2008; Casado, 2010), salvo excepciones. En cualquier caso, los costes por este concepto se elevan notablemente a partir de 50 km (SIEMCALSA, 2008; Mel *et al.*, 2014). Teniendo en cuenta que el precio del material de rechazo del proceso de reciclado de los RCD es más barato que los áridos naturales, es posiblemente el coste del transporte el principal factor económico que va a condicionar



el uso de estos residuos en la restauración minera. Es por ello, que en esta Guía, los huecos situados hasta un radio de 15 km de los centros productores de RCD sean considerados como los más idóneos de acuerdo con este concepto.

b) Tamaño de población de los núcleos urbanos (P_{NUC})

El *tamaño de población de los núcleos urbanos* (P_{NUC}) evalúa el potencial de producción de RCD de los mismos en función del número de habitantes, y por lo tanto, el potencial de disponibilidad de material para garantizar el relleno de los huecos mineros próximos. En 2015, la producción media española de RCD por habitante era de 0,435 t/hab/año (FERCD, 2017). En España, sólo 6 municipios tenían más de 500.000 habitantes: Málaga, Zaragoza, Sevilla, Valencia, Barcelona y Madrid. Y sólo estas dos últimas ciudades tenían una población de más de un millón de habitantes. Estas grandes urbes junto con sus áreas metropolitanas constituyen importantes centros generadores de RCD en nuestro país. En este estudio, se ha asignado a los núcleos de población de más de 500.000 habitantes el valor más alto respecto al potencial suministro de RCD para restauración minera (**Tabla 11**).

c) Evaluación del coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})

Finalmente, el factor **coste de transporte y suministro de RCD** (CT_{SUM}) es evaluado integrando ambos componentes: *distancia a centros de producción de RCD* (D_{NUC}) y *tamaño de población de los núcleos urbanos* (P_{NUC}), que son valorados de acuerdo con los criterios recogidos en la **Tabla 11**, según la siguiente ecuación:

$$CT_{SUM} = 0,7 * D_{NUC} + 0,3 * P_{NUC}$$

CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
FACTOR COSTE DE TRANSPORTE Y SUMINISTRO DE RCD (CT_{SUM})	
$CT_{SUM} = 0,7 * D_{NUC} + 0,3 * P_{NUC}$	
<i>Distancia a centros de producción de RCD</i>	D_{NUC}
> 50 km	1
> 30 – 50 km	2
> 15 – 30 km	3
≤ 15 km	4
<i>Tamaño de población de los núcleos urbanos</i>	P_{NUC}
< 10.000 habitantes	1
10.000 – 100.000 habitantes	2
>100.000 – 500.000	3
> 500.000	4

Tabla 11. Criterios de valoración del factor coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})

2.2.1.3. *Prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST})*

Otro factor contemplado en la evaluación es el de prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST}). La prioridad de rehabilitación va a depender de la sensibilidad de los espacios y/o ecosistemas afectados y grado de conservación, la calidad del paisaje y la incidencia visual de la alteración minera.

d) **Calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje (C_{AMB})**

La urgencia en la rehabilitación es expresada en primer lugar a través del componente *calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje (C_{AMB})*. Se considera que los espacios naturales más sensibles o ecosistemas de más alto valor, o de una elevada calidad visual del paisaje, son los más prioritarios para su restauración. En este caso, la rehabilitación de estos espacios contribuye a mejorar, conservar o proteger el patrimonio natural más valioso.

e) **Accesibilidad visual (A_{VIS})**

Para evaluar la incidencia visual de las zonas degradadas solo se ha considerado la *accesibilidad visual (A_{VIS})* o visibilidad del impacto paisajístico generado por la minería desde las zonas más frecuentadas por la población o con mayor potencial de observadores, es decir, núcleos urbanos y vías de comunicación (Alberruche *et al.*, 2015). No se ha considerado la fragilidad visual intrínseca o capacidad de absorción visual de las alteraciones mineras por el entorno, adoptando un criterio conservador de máxima fragilidad visual en todos los casos. La accesibilidad visual ha sido valorada en función del tamaño de población de los núcleos urbanos y/o vías de comunicación, según intensidades medias diarias de tráfico o el sistema jerárquico de la red de carreteras, desde donde las zonas mineras son visibles. A mayor accesibilidad visual mayor prioridad de recuperación de un espacio degradado. Los criterios de valoración asignados son abiertos, pudiendo en algunos casos incluir en la evaluación nuevos elementos con alto potencial de observación (ferrocarril de cercanías de grandes ciudades con un elevado tránsito de viajeros, usos recreativos y de ocio con gran afluencia de visitantes, etc.). En la **Tabla 12** se recogen los criterios que definen las clases de accesibilidad visual.

CLASE	CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE LA CLASE DE ACCESIBILIDAD VISUAL (A_{VIS})
BAJA	No visible desde vías de comunicación o núcleos de población
MEDIA	Visible desde núcleos de población de < 5.000 habitantes Visible desde carreteras de la red local y autonómica Visible desde vías con IMD < 5.000*
ALTA	Visible desde núcleos de población de entre 5.000 y 50.000 habitantes Visible desde carreteras de la Red del Estado (RCE) Visible desde vías con IMD entre 5.000 y 10.000 vehículos*
MUY ALTA	Visible desde núcleos de > 50.000 habitantes Visible desde autopistas y autovías (independientemente de la titularidad) Visible desde vías con IMD de más de 10.000 vehículos*

* IMD (*Intensidad Media Diaria medida en vehiculos/día*). Si se dispone de datos de estaciones de aforo de tráfico, primará este criterio respecto al de titularidad de la carretera

Tabla 12. Definición de las clases de accesibilidad visual (A_{VIS})



f) **Evaluación de la prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST})**

El factor de prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST}) es valorado a partir de los componentes: *calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje* (C_{AMB}) y *accesibilidad visual* (A_{VIS}), evaluados ambos de acuerdo con los criterios recogidos en la **Tabla 13**, y aplicando la siguiente ecuación:

$$PR_{REST} = 0,6 * C_{AMB} + 0,4 * A_{VIS}$$

CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
FACTOR PRIORIDAD DE RESTAURACIÓN DE ESPACIOS DEGRADADOS POR MINERÍA (PR_{REST})	
$PR_{REST} = 0,6 * C_{AMB} + 0,4 * A_{VIS}$	
<i>Calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje</i>	C_{AMB}
Espacios muy degradados ambientalmente y calidad visual del paisaje baja o muy baja	1
Espacios moderadamente degradados y/o calidad visual del paisaje media	2
Ecosistemas bien conservados y/o calidad visual del paisaje alta	3
Áreas sensibles o espacios naturales protegidos y/o calidad visual del paisaje muy alta	4
<i>Accesibilidad visual</i>	A_{VIS}
Baja	1
Media	2
Alta	3
Muy Alta	4

Tabla 13. Criterios de valoración del factor prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST})

2.2.1.4. *Índice de idoneidad del hueco para su rehabilitación con RCD (ID)*

El índice de idoneidad (ID) será función de todos estos componentes descritos anteriormente: condicionantes técnico-mineros (C_{MIN}), coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM}) y prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST}). La determinación del mismo se lleva a cabo aplicando la siguiente ecuación:

$$ID = 0,6 * C_{MIN} + 0,3 * CT_{SUM} + 0,1 * PR_{REST}$$

El índice de idoneidad se aplica sobre todos los huecos mineros considerados susceptibles de ser rehabilitados con RCD, y que **no han sido previamente excluidos por la concurrencia de alguno de los criterios de exclusión** definidos anteriormente. Este índice pone de manifiesto, por lo tanto, la aptitud del hueco minero para el relleno con este tipo residuos en función de la vulnerabilidad del medio, el esfuerzo técnico y el coste económico necesarios para garantizar la protección ambiental, la viabilidad del uso de estos materiales en función del coste de transporte y distancia a los centros productores de RCD, y la prioridad social de protección y mejora del patrimonio natural y paisajístico más valiosos.

Los huecos mineros menos idóneos para su relleno con RCD ($ID \leq 1$) serán aquellos que presentan un mayor riesgo ambiental lo que implica una mayor inversión económica en tecnología para su eliminación, así como un elevado gasto en transporte por situarse lejos de áreas urbanas importantes, en zonas degradadas de escasa incidencia visual cuya restauración no se considere prioritaria. Mientras que los más idóneos ($ID > 3$), serán aquellos otros localizados en las proximidades de los principales centros productores de RCD donde el impacto ambiental pueda minimizarse con el mínimo coste técnico y económico, y cuya rehabilitación contribuya de forma significativa a la protección y mejora del patrimonio natural más valioso, incluyendo los paisajes de calidad con una alta incidencia visual.

Este índice de idoneidad de carácter multifactorial se inscribe, por lo tanto, en el contexto de un análisis de carácter preliminar que tiene como objetivos: a) la selección de huecos mineros aptos para el relleno con RCD. b) Y la valoración, clasificación y ordenación de los mismos según grados de idoneidad a fin de establecer prioridades de actuación respecto a la recuperación de espacios mineros degradados, con este tipo de residuos de construcción y demolición. En la **Tabla 14**, a modo de síntesis, se recogen todos los índices paramétricos que integran la metodología propuesta.

ÍNDICES DEFINIDOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD		
Código	Concepto	Expresión de cálculo
ID	Índice de idoneidad del hueco minero para su rehabilitación con RCD	$ID = 0,6 \cdot C_{MIN} + 0,3 \cdot CT_{SUM} + 0,1 \cdot PR_{REST}$
C_{MIN}	Condicionantes técnico-mineros	$C_{MIN} = 0,7 \cdot AG_{SUB} + 0,2 \cdot PA_{SUP} + 0,1 \cdot ER_{EST}$
CT_{SUM}	Coste de transporte y suministro de RCD	$CT_{SUM} = 0,7 \cdot D_{NUC} + 0,3 \cdot P_{NUC}$
PR_{REST}	Prioridad de restauración de espacios degradados por minería	$PR_{REST} = 0,6 \cdot C_{AMB} + 0,4 \cdot A_{VIS}$
AG_{SUB}	Factor hidrogeológico	$AG_{SUB} = 0,3 \cdot H_{SUB} + 0,3 \cdot V_{SUB} + 0,3 \cdot P_{NF} + 0,1 \cdot M_{SUB}$
H_{SUB}	Características hidrogeológicas del hueco de explotación	



ÍNDICES DEFINIDOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD		
Código	Concepto	Expresión de cálculo
V_{SUB}	Vulnerabilidad de las masas de agua subterránea	
P_{NF}	Profundidad del nivel freático	
M_{SUB}	Distancia a captaciones de agua para abastecimiento o consumo humano	
PA_{SUP}	Proximidad a masas de agua superficiales	
ER_{EST}	Grado de erosión de los taludes del hueco y/o la presencia de inestabilidades	
D_{NUC}	Distancia a centros de producción de RCD	
P_{NUC}	Tamaño de población de los núcleos urbanos	
C_{AMB}	Calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje	
A_{VIS}	Accesibilidad visual	

Tabla 14. Índices definidos para la determinación de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD

Cabe la posibilidad, en algunos casos, de la consideración de criterios de planificación territorial, políticos o de interés social a la hora de establecer una estrategia de recuperación de espacios degradados por la minería o prioridades de actuación, independientemente de los resultados obtenidos de la aplicación del índice de idoneidad, siempre y cuando, no concurren ninguno de los supuestos de exclusión recogidos en la metodología.

2.2.2. Idoneidad de los huecos mineros según tipología de explotaciones mineras a cielo abierto

Todas las tipologías de huecos mineros pueden ser o no ser susceptibles de rehabilitación con RCD, siendo siempre necesaria una evaluación de la aptitud de cada hueco de excavación caso por caso. Sin embargo, de una forma generalista y simplificadora, se ha asignado una idoneidad potencial a cada una de las principales tipologías de huecos mineros, tal y como se muestra en la **Tabla 15**.

En la mayoría de las grandes cortas de minería metálica que presentan un hueco de gran volumen, salvo excepciones, es poco factible el relleno del mismo con RCD debido a criterios de viabilidad técnico-económica fundamentalmente. Entre los factores que contribuyen al fuerte encarecimiento del proyecto de relleno cabe citar: el control de la erosión y el alto volumen de agua de escorrentía con arrastre de sólidos procedentes del lavado de las bermas especialmente en climas húmedos, así como de agua procedente de fracturas, fallas o minados antiguos que inundan el hueco y que es necesario bombear desde el fondo de corta. La presencia de inestabilidades asociadas a procesos gravitacionales (deslizamientos, desprendimientos, cuñas, etc.) en los taludes, y que hay que eliminar o sanear por razones geotécnicas y de seguridad. El elevado coste económico del proceso de carga y transporte que representa la bajada y subida de camiones a través de pistas de largo recorrido, desde el nivel superior al fondo de corta. La formación de aguas ácidas en aquellas cortas de sulfuros polimetálicos sin presencia de carbonatos que neutralicen las mismas, entre otros factores. Por otro lado, la mayor parte de las cortas cerradas y/o abandonadas se encuentran actualmente inundadas. No es de extrañar, por lo tanto, que la solución adoptada para la rehabilitación de este tipo de huecos haya sido en muchos casos la creación de lagos o zonas húmedas *versus* relleno con residuos mineros o de otro tipo. Asimismo, la posible existencia de reservas de mineral cuya explotación puede ser viable en función de un incremento coyuntural de precios, y su localización en zonas por lo general alejadas de los grandes centros de producción de RCD, condicionan y limitan el uso de estos residuos para el relleno del hueco de este tipo de explotaciones (Moreno Cayuela, 2000). No obstante, existe algún ejemplo de vertedero autorizado de RCD inertes en cortas de minería metálica como es el caso de la Corta Emilia, en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Rodríguez *et al.* 2006). Sin embargo, el R.D. 105/2008 que regula la producción y gestión de los RCD no considera este tipo de uso una operación de valorización o de restauración ambiental.

El uso de RCD en la remodelación de los huecos de cortas, descubiertas, terrazas o minería de contorno en explotaciones de carbón, que suelen ser menos profundos o de menor volumen, es por lo general más viable que en el caso anterior. Pueden presentar también, aunque en menor medida, problemas semejantes a los descritos en las cortas de minería metálica. De hecho, muchas cortas de carbón suelen acabar inundadas tras el cierre o el abandono de la explotación como es el caso de las cortas de Peñarroya (Córdoba). Por lo tanto, el posible uso de estos residuos para el relleno del hueco de excavación en este tipo de explotaciones dependerá del balance costo-beneficio en cada caso.

Por todo ello, se ha asignado una aptitud potencial baja a las grandes cortas de minería metálica y de carbón. Mientras que en el caso concreto de la minería de carbón por transferencia (descubiertas, terrazas, etc.) y minicortas, la aptitud potencial asignada varía entre baja y media (**Tabla 15**).

Las explotaciones de rocas industriales y ornamentales pueden presentar condiciones más o menos aptas para su rehabilitación con RCD, según los casos. De hecho, los RCD representan en muchas ocasiones la única alternativa posible para la remodelación topográfica de los huecos residuales en aquellas explotaciones que generan pocos residuos mineros, especialmente en el sector de rocas industriales (áridos naturales, arcillas, yesos, etc.). *A priori*, tal



vez sean las explotaciones de arcillas para la industria ladrillera o la fabricación de tejas las que presenten el mayor potencial de uso de los RCD para restauración, por varias razones: a) la escasez de residuos mineros propios disponibles para el relleno de los huecos excavados en este tipo de explotaciones, hace necesario el uso de material inerte externo; b) la naturaleza impermeable de las arcillas, que actúan de barrera geológica frente a la infiltración de lixiviados que pudieran contaminar las aguas subterráneas, representa una mayor protección ambiental y supone una reducción significativa de los costes de impermeabilización y acondicionamiento del hueco; y c) la amplia distribución geográfica de estas explotaciones en nuestro país, presentes en todas las grandes cuencas terciarias del Ebro, Duero, Tajo y Guadalquivir, así como en otras depresiones terciarias de menor entidad (Calatayud-Teruel, Guadalix-Baza, Alcoy, etc.). La mayoría de ellas están localizadas en las proximidades de núcleos urbanos, algunos de ellos con poblaciones importantes como es el caso de Toledo, Madrid o Sevilla entre otros muchos ejemplos (Sanfeliu y Cepriá, 2001). Esto implica un ahorro importante en los costes de transporte y garantiza la disponibilidad de material de relleno para llevar a cabo la rehabilitación minera con residuos de construcción y demolición, sobre todo en caso de proximidad a una gran ciudad o centro productor de RCD.

De acuerdo con todo lo expuesto, son las canteras de rocas industriales y ornamentales cuyos huecos de explotación han sido excavados en macizos rocosos masivos impermeables o suelos de baja permeabilidad las que muestran una mayor idoneidad, que puede oscilar en un rango de valor de media a muy alta según los casos (**Tabla 15**). Entre los principales factores que contribuyen a ello, destacan: el efecto protector de la barrera natural geológica por su baja permeabilidad frente a los contaminantes que pudieran afectar a las aguas subterráneas; y la reducción de los costes de transporte por la proximidad de este tipo de explotaciones a los centros urbanos que son los principales generadores de RCD. Por el contrario, la idoneidad de las situadas en macizos fisurados o karstificados de permeabilidad baja o media será, por lo general, baja debido a la alta vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos que pudieran verse afectados.

Por último, las graveras suelen presentar una idoneidad baja por la elevada probabilidad de afección a las masas de agua subterránea, especialmente las situadas en aluviales y terrazas bajas. En el caso de las graveras que explotan áridos granulares de terrazas más antiguas (medias y altas), debido a una mayor profundidad del nivel freático, pueden llegar a presentar en algunos casos una idoneidad media.

TIPOLOGÍA DE HUECOS MINEROS		IDONEIDAD POTENCIAL			
		BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
GRANDES CORTAS DE MINERÍA METÁLICA Y CARBÓN					
MINICORTAS DE CARBÓN					
MINERÍA POR TRANSFERENCIA: DESCUBIERTAS, TERRAZAS, ETC.					
MINERÍA DE CONTORNO					
CANTERAS	ROCAS ORNAMENTALES				
	ROCAS INDUSTRIALES				
GRAVERAS	ROCAS INDUSTRIALES				
	GRAVERAS EN ALUVIALES Y TERRAZAS BAJAS				

Tabla 15. Valoración simplificada de la idoneidad potencial de los huecos mineros según tipología para su rehabilitación con RCD

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RCD PARA RELLENO DE HUECOS MINEROS

El R.D. 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras permite el uso de residuos de procedencia no minera (art. 13.1.d), incluyendo los RCD, para el acondicionamiento y relleno de los huecos de explotación de acuerdo con las prescripciones del R.D. 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) se caracterizan por su gran heterogeneidad, pues incluye una amplia variedad de materiales de diferente naturaleza (**Figura 14**), tal y como se recoge en el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006: el 75% en peso respecto a la producción total está constituido por escombros (ladrillos, azulejos y cerámicas (54%), hormigón (12%), piedras (5%) y arena, grava y otros áridos (4%)). El 25% en peso restante está integrado por materiales diversos (basura (7%), asfalto (5%), madera (4%), metales (2,5%), vidrios (0,5%), plásticos (1,5%), papel (0,3%), y otros materiales (4%)). La composición varía en función de la procedencia del residuo (tipo de infraestructura o edificación, etc.) y refleja en sus componentes mayoritarios, además, el tipo y distribución porcentual de las materias primas que utiliza el sector de la construcción (Romero, 2006). Es posible, por lo tanto, cierta variabilidad en la composición de los RCD en función de las características de los recursos geológico-mineros utilizados como materiales de construcción, según las diferentes regiones.

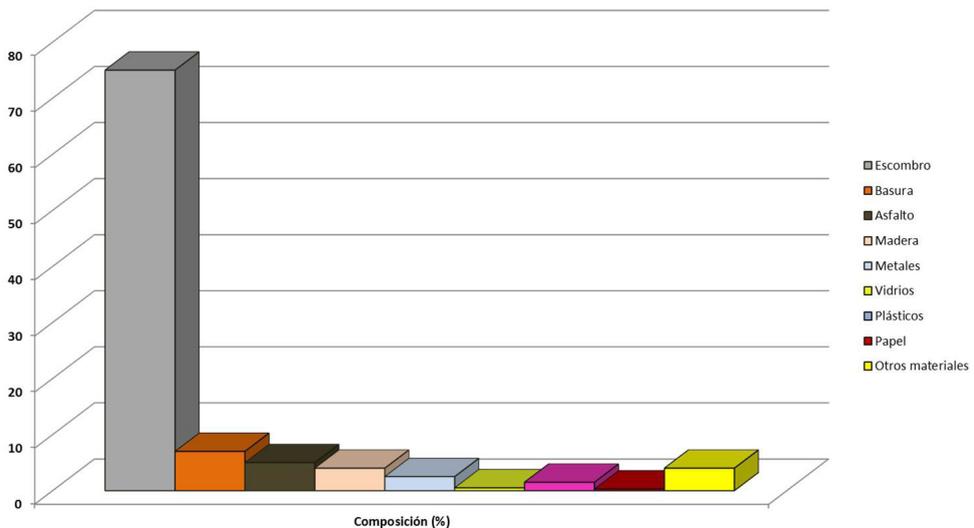


Figura 14. Composición de los residuos de construcción y demolición (%)

En cuanto al origen de este tipo de residuos, en el año 2015, un 32% de los RCD generados procedían de obras de licitación pública, un 24,6% de reformas y rehabilitaciones, un 18,6% de obra nueva de tipo residencial y un 5,3% de carácter no residencial, un 6,1% de ampliaciones de obra, y un 12,5% de actuaciones que no exigían visado (FERCD, 2017).



Respecto a la valorización de estos residuos, la mayoría de las plantas de reciclaje autorizadas como “gestores recicladores de RCD” con emplazamiento fijo presentan generalmente una o dos líneas de producción de áridos reciclados dependiendo de los materiales o RCD procesados: hormigón y escombros mixtos o cerámicos (**Figura 15**). Estos últimos suelen proceder de la demolición de estructuras de edificación o de obras menores de reparación domiciliaria, siendo común que lleguen mezclados sin haber sido sometidos a una separación selectiva en origen. En España, al igual que en otros países mediterráneos (De Brito *et al.*, 2005), el mayor volumen de RCD generados pertenecen a esta categoría.



Figura 15. RCD de hormigón (Izq.) y mixto-cerámicos (Dcha.) acopiados en la zona de descarga antes de la separación de elementos reutilizables (plásticos, madera, etc.) y otros elementos contaminantes

En general, el proceso de reciclaje en estas plantas suele constar de las siguientes fases (**Figura 16**):

- a) *Control de admisión de los residuos* que incluye procedimientos como el pesaje en báscula, identificación y evaluación del material a través de la inspección visual y documental, y registro de entrada. Esta fase tiene por objeto garantizar que el material cumpla las condiciones de admisibilidad y trazabilidad.
- b) *Clasificación o triaje primario* que tiene como finalidad separar, en la zona de descarga, los materiales voluminosos no pétreos reutilizables (madera, plásticos, metales, etc.) de los pétreos, así como aquellos materiales que puedan ser contaminantes o peligrosos mediante procedimientos manuales o mecánicos (martillos hidráulicos, palas y retroexcavadoras, etc.). La fracción pétreo, previo fraccionamiento de los grandes bloques hasta un tamaño adecuado con martillos hidráulicos o cizallas, se incorpora al resto del proceso de reciclaje a través de sistemas de alimentación (tolvas, alimentador precribador, etc.).
- c) *Precribado* que tiene por objeto la separación de: a) fracciones pétreas excesivamente grandes para el equipo de trituración a través de un alimentador precribador; b) o fracciones muy finas mediante diversos sistemas (trómeles, cribas, etc.). En el precribado de finos se produce un rechazo de material pétreo (tamaño entre 0-20 mm o 0-40 mm), de calidad inferior a la zahorra que se obtiene tras el proceso de trituración por el alto



Figura 16. Esquema básico del proceso de reciclaje de RCD en plantas fijas de gestores autorizados



contenido de tierra y arena (GERD, 2012). Este material se suele emplear para usos poco exigentes como relleno de jardines, camas de asiento de tuberías, etc., aunque por lo general es difícilmente comercializable siendo eliminado en vertedero o acopiado en las plantas de tratamiento (**Figura 17**). El volumen de material pétreo rechazado en el precibado de finos en la línea de producción de áridos reciclados mixto-cerámicos es muy elevado; se estima *grosso modo* que se encuentra en torno al 50% del total de este tipo de RCD que ingresa en las plantas de reciclaje, tal y como señalan la mayoría de los gestores consultados próximos a núcleos urbanos con una elevada producción de RCD. Por el contrario, el rechazo de la línea de hormigón suele ser muy bajo, y en la mayoría de los casos suele comercializarse en su totalidad. La valorización de estos materiales de rechazo del precibado de finos mediante su empleo en la restauración minera es uno de los principales objetivos de esta Guía.



Figura 17. Material de rechazo del precibado de finos acopiado en planta de reciclaje

- d) *Trituración* o proceso mecánico de reducción del tamaño del material pétreo a determinadas fracciones. En algunos casos solo se realiza un único tratamiento primario de trituración empleándose normalmente trituradoras de mandíbula; o en una misma línea de producción se puede incorporar además una trituración secundaria con trituradoras de impacto o de cono.
- e) *Clasificación y limpieza* que tiene por objeto una separación más fina de materiales no pétreos o impropios, algunos de los cuales pueden ser reutilizados o reciclados, a través del uso de electroimanes para la captación de elementos férricos, cabinas de triaje (plástico, madera, etc.) y sistemas de limpieza con flujo de aire (sopladores o ciclones) o agua (lavadoras, etc.). Estos sistemas de clasificación y limpieza pueden localizarse antes o después del proceso de trituración o en ambas partes.

- f) Cribado es el proceso de separación y clasificación del material procesado según granulometrías específicas a través de cribas y cintas transportadoras que van distribuyendo el mismo en distintos acopios.

3.1. Caracterización básica y geotécnica del material de rechazo del precibado de finos

Esta Guía propone, como ya se ha señalado anteriormente, la “valorización” de los rechazos pétreos de la fase de precibado de finos (**Figura 18**), mediante su uso en la rehabilitación de espacios degradados por minería. Estos RCD presentan elevados volúmenes de material que son acopiados en las plantas de reciclaje con escasas posibilidades de comercialización o eliminados en vertederos, reduciendo el espacio disponible y/o la capacidad de dichas instalaciones. Sin embargo, estos RCD pueden ser una alternativa viable para la restitución topográfica de aquellos huecos mineros que carezcan de estériles suficientes para ello.

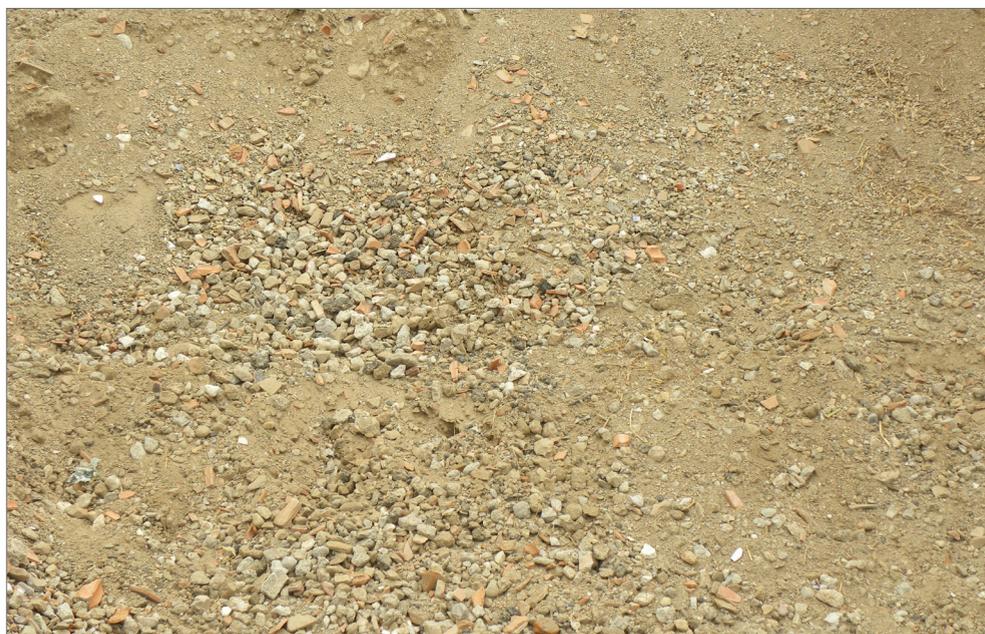


Figura 18. Material de rechazo del precibado de finos de RCD mixto-cerámicos (0-40 mm)

Con el objeto de llevar a cabo una caracterización básica de estos materiales, se han realizado en laboratorios acreditados los ensayos de lixiviabilidad y la determinación de los parámetros orgánicos propuestos en la Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, sobre 30 muestras de este tipo de RCD obtenidas *in situ* en plantas de reciclaje de gestores autorizados distribuidos por diversas Comunidades Autónomas (**Figura 19**). Estos rechazos pétreos proceden mayoritariamente del precibado de residuos mixto-cerámicos (90% de las muestras) y en menor medida de residuos de hormigón (10% de las muestras).



Figura 19. Comunidades Autónomas (CCAA) de dónde se han obtenido muestras de RCD de gestores autorizados

Asimismo, se ha realizado una caracterización geotécnica de dichos materiales granulares para su uso en el relleno y remodelación topográfica de los huecos mineros, teniendo en consideración los resultados obtenidos en algunos de los ensayos propuestos en el *Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes* o PG-3 para rellenos tipo terraplén (Orden FOM/1382/2002), el ensayo de compactación Proctor normal y otras pruebas complementarias.

En el **Anexo 1. Caracterización de los RCD de Precibado** se describe de forma pormenorizada la selección, distribución y recogida de dichas muestras, los ensayos realizados y la evaluación de los resultados obtenidos en los mismos. En el **Anexo 2. Inventario de muestras de RCD**, en forma de fichas, se recoge información sobre: la lixiviabilidad del residuo y la presencia de contaminantes orgánicos en el mismo, parámetros geotécnicos, composición mineralógica, así como información gráfica de cada una de las muestras estudiadas. Cabe destacar que aunque en las fichas se recoja el análisis de contaminantes orgánicos, este solamente debería solicitarse en el caso de que todos los parámetros medidos en la lixivabilidad den como resultado un residuo inerte, si los resultados de Carbono Orgánico Total y/o Carbono Orgánico Disuelto resultaran elevados, o si hubiera indicios de paso de maquinaria u otra actividad que pudiera dar como resultado la contaminación de los RCD, a juicio del organismo competente en materia de medio ambiente de la Comunidad Autónoma correspondiente. Aunque la determinación de la composición mineralógica mediante difracción de rayos X (DRX) ha

proporcionado información de interés; sin embargo, este tipo de análisis no es necesario para la caracterización de estos residuos por lo que no deberá ser requerido al gestor.

A continuación, a modo de síntesis, se señalan los aspectos más relevantes de estos RCD para su uso en rellenos mineros.

3.1.1. Caracterización básica del residuo de precibado

Los aspectos más relevantes del análisis de lixiviabilidad de estos residuos de precibado, de acuerdo con la Orden AAA/661/2013, han sido los siguientes: a) únicamente, algo menos de una cuarta parte del total de muestras analizadas de este tipo de RCD cumplían los valores límite de lixiviación de: metales pesados y metaloides, sales solubles (cloruros, fluoruros y sulfatos), índice de fenol, carbono orgánico disuelto (COD) y sólidos totales en disolución (STD) establecidos por dicha orden para residuos “inertes”. b) Mientras que el resto de las muestras de este material, la mayor parte de ellas, debían ser calificadas como residuos “no peligrosos” según la normativa debido a:

- El elevado contenido de sulfatos y sólidos totales disueltos presentes en el lixiviado de muchas de ellas fundamentalmente, y muy especialmente en las muestras obtenidas del residuo de precibado de RCD mixto-cerámico, e incluso de hormigón, de gestores autorizados de la Comunidad de Madrid.
- La presencia de concentraciones de antimonio (Sb) en el eluato ligeramente por encima del valor límite establecido para residuos inertes, en muestras obtenidas de gestores de RCD del País Vasco, Cantabria, Comunidad Valenciana y Cataluña.

Por otra parte, de las treinta muestras recogidas, sólo se analizaron los contenidos totales de COT (Cárbono Orgánico Total), BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos), PCB (Policlorobifenilo, 7 congéneres), HPA (Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos, 16 congéneres) y aceite mineral (C10 a C40) en diez muestras (30% del total) procedentes de plantas de reciclaje de RCD de la Comunidad de Madrid. El resultado en todos los parámetros orgánicos analizados, fueron contenidos totales en todos ellos por debajo del valor límite fijado por la Orden AAA/661/2013 para residuos inertes.

3.1.2. Caracterización geotécnica del residuo de precibado para relleno de huecos mineros

De acuerdo con el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), este tipo de RCD es equiparable, desde el punto de vista granulométrico, a los suelos para rellenos tipo terraplén. Asimismo, según diversos criterios como: el contenido de materia orgánica, sales solubles y yesos; granulometría; plasticidad del material; colapsabilidad o expansividad del suelo, entre otros, estos materiales de rechazo pueden ser clasificados desde el punto de vista de su uso en terraplenes como suelos “tolerables” o “marginales”, según los casos, debido fundamentalmente al contenido de sales solubles (**Figura 20**). No obstante, dos muestras de este tipo de material han sido calificadas como suelos “adecuados” para este tipo de rellenos; ambas se corresponden con residuos de precibado de hormigón de carácter inerte y mixto-cerámico con concentraciones de sulfato muy bajas, respectivamente.

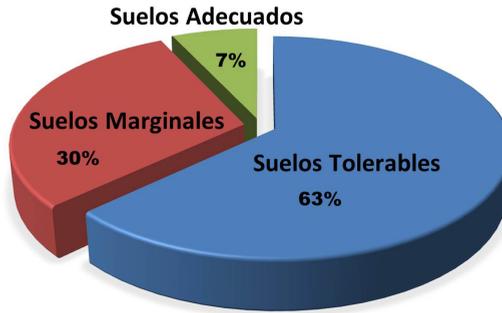


Figura 20. Clasificación de las muestras del material de rechazo del precribado de finos obtenidas de gestores autorizados según tipos de suelos para terraplenes, de acuerdo con el PG-3

Por otra parte, el índice CBR calculado mediante la fórmula empírica propuesta por la AASHTO (NCHRP, 2001) en todas las muestras, indican una capacidad portante de estos materiales que puede considerarse aceptable para su uso en rellenos de huecos mineros y terraplenes (CBR entre 19 y 54 para los RCD de precribado mixto-cerámicos; y CBR entre 35 y 43 para los de hormigón). Estos residuos son, además, no colapsables ni expansivos. Y, según el ensayo Proctor normal se puede alcanzar en este tipo de material densidades secas por compactación de entre 1,6 y 2 g/cm³, con una humedad óptima que puede oscilar entre el 11% y el 19,6%. Todas estas características geotécnicas resultan favorables para la estabilidad geomecánica de los rellenos realizados con este tipo de RCD.

3.1.3. Composición mineralógica de los residuos de precribado

Los RCD mixto cerámicos de precribado (incluyendo mezclas de cerámicos y hormigón) suelen presentar la siguiente composición mineralógica: feldespato potásico (microclina), cuarzo, plagioclasa (albita), filosilicatos (moscovita, y en algunas ocasiones clorita) y en menor medida yesos; en algunas muestras se ha observado la presencia de dolomita. Los rechazos del precribado de hormigón presentan los mismos componentes, aunque con un peso mayor de cuarzo y calcita (**Figura 21**).

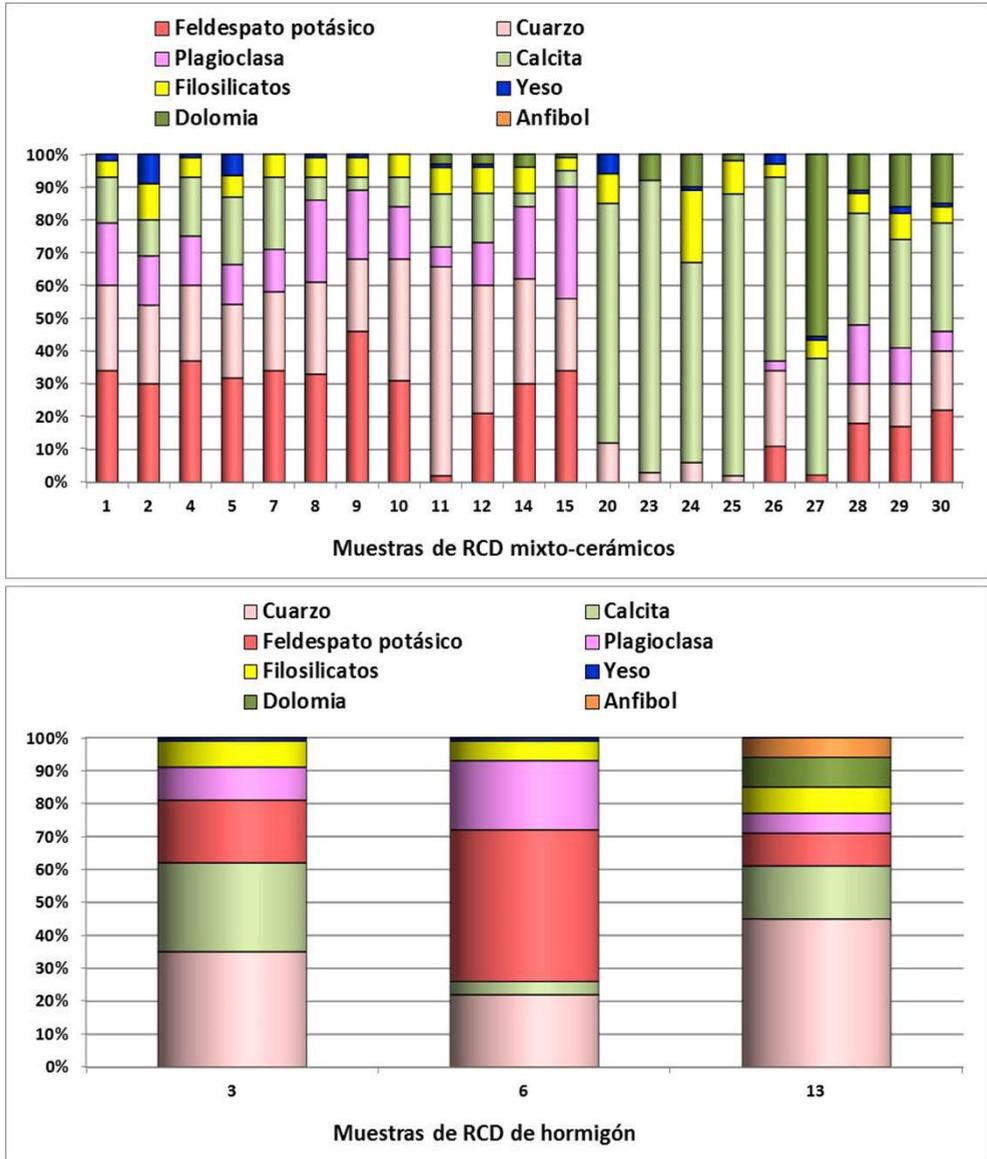


Figura 21. Composición mineralógica de muestras de material de rechazo del precribado de RCD mixto-cerámicos y de hormigón determinada por Difracción de Rayos X (análisis semi-cuantitativo)

4. RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL RELLENO Y REHABILITACIÓN DE UN HUECO MINERO CON RCD

En este apartado se realizan una serie de recomendaciones sobre diversos aspectos que deberían contemplarse en cada fase de un proyecto de relleno y rehabilitación de un hueco minero con RCD. La *Fase preparatoria* o preoperacional del proyecto incluye el estudio del emplazamiento, el remodelado y acondicionamiento del hueco, la estanqueidad físico-química del mismo, los sistemas de drenaje de las aguas infiltradas (así como la captación y tratamiento de lixiviados) y de desvío de escorrentías superficiales, etc. En la *Fase de Relleno*, además del protocolo de admisión de los residuos, se proponen distintas acciones a realizar durante el proceso de relleno, así como en la *Fase de Clausura*. Por último, se señalan algunas medidas para la rehabilitación del hueco de explotación.

4.1. Fase Preparatoria: Caracterización del emplazamiento

Todos los proyectos de restauración de áreas afectadas por labores mineras deberán incluir siempre una caracterización y una descripción detallada del emplazamiento, tal y como recoge el R.D. 975/2009 (Capítulo III, Parte I del Plan de Restauración).

Teóricamente, en el momento de inicio de la redacción de un proyecto de rehabilitación de un hueco minero con residuos de construcción y demolición se dispondrá de la información que ha tenido que ser recopilada y valorada para establecer la idoneidad de dicho hueco como receptor de los residuos. Esta información, previa a la elaboración del proyecto, analiza los principales condicionantes técnico económicos de un proyecto de relleno, para garantizar la protección de la población y el medio ambiente, y la vulnerabilidad del medio ante el impacto que pudiera generar el uso de estos residuos, entre otros. En cualquier caso, la valoración de la idoneidad previa a la propuesta de redacción de un proyecto de relleno de un hueco minero habrá considerado los criterios de exclusión propuestos en esta guía. El conjunto de factores evaluados en el estudio de idoneidad es muy relevante, aunque no estén incluidos todos los que deben contemplarse en análisis más detallados del emplazamiento y caracterización del hueco de excavación, y constituye un punto de partida que facilitará la selección de datos que pueden ser necesarios recabar. Convendrá seguir una cierta sistemática para completar la información que normalmente es necesaria para obtener un conocimiento lo más completo posible del estado inicial del proyecto. En este sentido, la información puede agruparse en tres bloques:

- Datos administrativos, de localización y delimitación.
- Características del hueco minero:
 - Características geométricas y capacidad.
 - Condicionantes derivados del tipo de explotación minera.
 - Infraestructuras asociadas a la explotación minera.
- Análisis del medio natural:
 - Topografía y relieve.
 - Geología y geomorfología.



- Hidrogeología.
- Climatología.
- Hidrología.
- Edafología.
- Medio biótico.
- Paisaje e incidencia visual.
- Usos del suelo y afecciones territoriales.

Como es lógico, en la caracterización de un determinado hueco minero, los aspectos hidrogeológicos y geotécnicos tienen especial importancia para el diseño del relleno con RCD, mientras que en la fase de restauración pueden tener mucho mayor peso los aspectos climáticos, el medio biótico y el paisaje. Por ello, los diferentes factores que son necesarios conocer con detalle tendrán una utilidad diferente, según la fase del proyecto.

4.1.1. Datos administrativos, de localización y delimitación

Los datos relativos a la situación administrativa de la explotación minera a la que pertenece el hueco seleccionado han de conocerse mediante consulta en la Delegación Territorial correspondiente de la consejería u organismo autonómico competente en minería. Interesarán, sobre todo los datos relativos a la delimitación del correspondiente proyecto minero, así como los relacionados con el Plan de Restauración aprobado para esa explotación minera. Otros aspectos de importancia son: la fecha de finalización del proyecto minero, el estado administrativo y la titularidad de los terrenos. Obviamente, cuando la titularidad de la explotación y la propiedad de los terrenos no correspondan a la misma entidad o persona, se necesitará la aceptación de ambas.

Es conveniente conocer con exactitud el término o términos municipales afectados por el hueco y sus infraestructuras asociadas, así como los nombres locales del paraje o parajes de su entorno. La delimitación del hueco y la ubicación de puntos de referencia mediante coordenadas UTM (ETRS89), también pueden ser de utilidad. Así mismo resulta oportuno que la localización quede bien reflejada en un plano de situación a escala 1:25.000, tomado del Mapa Topográfico Nacional, y sobre otro a escala 1:10.000. Igualmente, es importante describir la situación del área del proyecto con respecto a carreteras y caminos. Todos los detalles sobre la localización y delimitación son imprescindibles para determinar con exactitud la posición relativa de los límites del emplazamiento con respecto a zonas de peligrosidad sísmica, zonas inundables, embalses y cuencas vertientes a embalses, canalizaciones de riego, calificaciones urbanísticas, servidumbres de paso, límites de figuras de protección, etc.

Es importante también proporcionar una medida exacta de las diferentes superficies afectadas por el proyecto (plaza de cantera, taludes, accesos, pistas interiores, superficies ocupadas por instalaciones, etc.), así como los desniveles o diferencias de cotas existentes entre ellas. Para dichas superficies se debe hacer una descripción de todos aquellos aspectos relevantes que no pueden conocerse a través del mapa topográfico. Por ejemplo, para los accesos, interesa conocer sus características constructivas y el estado en el que se encuentran.

4.1.2. Tipología y características geométricas del hueco minero

La tipología de hueco minero depende del tipo de yacimiento mineral y del método de explotación a cielo abierto aplicado en la extracción de los recursos minerales. La tipología de la explotación suele llevar asociada una serie de particularidades que ya han sido comentadas y que condicionan la aptitud de los huecos. Todas las tipologías de huecos mineros pueden ser o no ser susceptibles de rehabilitación con RCD, siendo siempre necesaria tal y como se ha señalado en apartados anteriores una evaluación de la aptitud de cada hueco de excavación caso por caso. En definitiva, si se ha evaluado previamente la idoneidad de plantear un relleno en un hueco minero concreto, mediante lo que se ha denominado índice de idoneidad (ID), los aspectos importantes asociados a la tipología habrán sido valorados. En caso contrario, será necesario hacerlo.

La geometría de partida del hueco minero condiciona la capacidad o volumen de RCD que puede acoger, el diseño del relleno y la planificación de las diferentes fases del mismo. Igualmente, la geometría determina la relación espacial del hueco con el sustrato geológico, así como las condiciones geotécnicas y de drenaje del relleno a realizar (IHOBE, 2005). Las dimensiones que definen la geometría de un hueco son: perímetro y superficie total excavada, diferencia máxima de cota entre coronación del frente y el fondo o plaza de la explotación, superficie de la plaza, número de bancos, pendiente y altura de bancos, anchura de bermas, y pendiente general de los taludes. También es importante describir los accesos y las pistas interiores a la explotación, en especial su anchura y pendiente.

El mejor modo de mostrar las características geométricas y la capacidad del hueco minero es un plano topográfico detallado, a escala 1:1.000, 1:500 o la que sea más adecuada, según el caso. Acompañando al mapa topográfico detallado deben aportarse perfiles o secciones longitudinales y transversales del terreno en el momento inicial, antes de iniciarse el relleno; y un análisis de *cubicación* que determine el volumen total de RCD que pueden depositarse en el hueco. El mapa topográfico detallado debe representar una superficie lo suficientemente amplia como para reconocer en él elementos referenciales de valor (carreteras, caminos, acequias, arroyos, ríos, etc.), los cuales deberán ser convenientemente identificados.

Normalmente, el plano topográfico detallado será la base topográfica más adecuada para todos aquellos otros mapas temáticos de interés para el proyecto. En particular, y como colofón de los estudios previos que se deben realizar, puede ser de gran valor presentar una sectorización sobre dicho mapa, atendiendo a factores como litología o material superficial, pendiente, posición con respecto a pistas y accesos, presencia de elementos singulares, etc.

4.1.3. Infraestructuras asociadas a la explotación minera

De todas las infraestructuras asociadas a la explotación minera, las que presentan mayor interés son los accesos y pistas interiores y los posibles sistemas de drenaje superficial existentes (canales o zanjas de derivación y cunetas). Si estas infraestructuras están en buen estado pueden tener utilidad. Sin embargo, lo normal es que sea necesario algún tipo de tratamiento de reparación o mejora. En el caso de encontrar pistas o canales sin utilidad, convendrá analizar si pueden o no interferir con las operaciones de relleno.



En ocasiones es posible encontrar restos de instalaciones, móviles o fijas, que fueron empleadas para la extracción, transporte y tratamiento del recurso minero. Otras veces existen edificaciones asociadas a plantas de tratamiento, cargaderos, almacenes, estacionamientos de maquinaria, laboratorios, oficinas y edificios diversos, que se localizan habitualmente fuera del hueco. Interesa una buena descripción de todas estas instalaciones auxiliares. Convendrá analizar si pueden ofrecer alguna utilidad para las fases de relleno o restauración, aunque sea como almacén, siempre y cuando se encuentren en condiciones de uso. En caso contrario deberán ser demolidas (salvo que su valor como patrimonio histórico-minero aconseje su preservación), cumpliendo en la producción y gestión de RCD todas las prescripciones establecidas en el R.D. 105/2008.

Igualmente, importante es reconocer y situar todos aquellos depósitos de materiales asociados a la explotación minera o de origen distinto: materiales de desmonte, estériles mineros o rechazos del tratamiento del recurso minero, acopios de recurso, acopios de horizontes edáficos o de suelos, vertidos de materiales procedentes del exterior de la explotación minera. Si los hubiera, cada uno de ellos merecerá un estudio orientado a reconocer su posible utilidad o su capacidad de interferencia con el proyecto de relleno.

4.1.4. Análisis del medio físico

4.1.4.1. Topografía y relieve

Considerando que el relleno de huecos mineros con RCD se justifica en buena parte por la posibilidad de mejorar la integración morfológica y paisajística, es necesario analizar la fisiografía y relieve del entorno cercano. Al margen de proporcionar una mayor estabilidad general, el relleno puede proporcionar una restitución topográfica del terreno, así como unas condiciones más favorables para la revegetación e integración en el paisaje, siempre y cuando se ajuste al relieve que le rodea. Por otro lado, si se busca una adecuación de los objetivos finales de rehabilitación con los usos del suelo o la vegetación del entorno cercano, es importante considerar la pendiente, junto a otros factores del medio, para comprender la distribución actual de esos usos del suelo. En efecto, la pendiente del terreno es un factor determinante de la productividad primaria y condiciona los riesgos de erosión. Desde el punto de vista descriptivo, a partir del mapa topográfico básico, es posible reconocer los rasgos fisiográficos más relevantes del entorno del hueco minero. Básicamente interesa dar una descripción de aquellos aspectos relacionados con el relieve que pueden ser importantes para el proyecto: complejidad topográfica, altitudes y desniveles, accesibilidad natural, pendientes, exposición, etc.

En huecos situados en ladera o divisoria de aguas, la adecuación de las pendientes exteriores de los taludes del relleno con respecto a las que están presentes en su entorno se deberá realizar teniendo en consideración el mapa de pendientes. En la actualidad, estando generalizado el empleo de sistemas de información geográfica (SIG), puede ser aceptable exigir la presentación de un mapa de pendientes generado por medios automáticos a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Los mapas de pendientes muestran una serie de contornos que delimitan superficies comprendidas entre intervalos de valores de pendiente. En la leyenda del mapa se asignan tramas o colores a cada uno de los intervalos de pendiente prefijados. No existe una leyenda que pudiera considerarse de aplicación universal y válida

para cualquier clase de propósito, puesto que existe una enorme variedad de clasificaciones de pendientes, con enfoques diferentes. Dependiendo de la localización o del uso posterior que se quiera asignar, puede ser más conveniente emplear una u otra, entre las muchas posibles. No obstante, en la **Tabla 16** se muestra una leyenda de clases de pendiente que puede ser de aplicación en nuestro país, teniendo en consideración las características de su relieve y el aprovechamiento del suelo.

CLASE DE PENDIENTE	INTERVALO (%)	INTERVALO (° sex.)
Llana o de pendiente muy suave	<5	<2° 52'
Pendiente suave	5-10	2° 52'-5° 43'
Pendiente moderada	10-15	5° 43'-8° 32'
Pendiente acentuada	15-20	8° 32'-11° 19'
Pendiente fuerte	20-30	11° 19'-16° 42'
Pendiente muy fuerte	30-50	16° 42'-26° 34'
Pendiente escarpada	>50	>26° 34'

Tabla 16. Clases de pendientes propuestas para el análisis fisiográfico y topográfico

La justificación de los intervalos de pendiente propuestos se basa en consideraciones de aptitud para el aprovechamiento agrícola o forestal de los terrenos. Hasta 5% de grado de pendiente, no existen prácticamente limitaciones para el cultivo agrícola, y el riesgo de erosión es ligero, incluso para suelos erosionables. Entre 5 y 10%, es deseable que se apliquen buenas prácticas de cultivo. Desde el punto de vista de la posibilidad de mecanización de labores, en terrenos de 0% a 15% de pendiente se puede mecanizar en curva de nivel con tractor agrícola normal. En el intervalo entre 15 y 20% se encuentran aquellos terrenos que, como mucho, sólo pueden soportar cultivo ocasional. Con pendiente superior a 15%, el riesgo de erosión es severo, incluso con suelos de baja erodibilidad, y por encima de 20%, los terrenos tienen claramente vocación pascícola, forestal o reserva de vegetación natural. Entre 15 y 30% de pendiente las labores mecanizadas requieren normalmente el empleo de tractores de cadenas. Un grado de pendiente de 30% se suele considerar el máximo admisible en pastizales con buen estado vegetativo. Por encima de un 30% de pendiente, las tareas de implantación de vegetación pueden ser ya bastante complicadas, aumentando enormemente la intensidad de las medidas que pueden ser necesarias. Por último, se suele aceptar que los terrenos con pendiente superior a 50% son altamente limitantes para llevar a cabo una repoblación forestal.

El mapa de pendientes y su orientación, incluyendo la propia configuración topográfica del terreno a la finalización del proyecto, pueden permitir la estimación de las posibles modificaciones que este aspecto ejerce sobre la insolación (con consecuencias sobre la temperatura); factor que debe considerarse en la revegetación y en la integración paisajística (zonas iluminadas o en penumbra). Para ello puede aplicarse la metodología de Gandullo (1974), que también está explicada y resumida en cuadros en la publicación de VV.AA. (2007).



4.1.4.2. Geología, geomorfología y geotecnia

Se puede afirmar que el sustrato geológico tiene dos funciones fundamentales en un proyecto de relleno de huecos mineros con RCD. Por un lado, determina la estabilidad, tanto durante las operaciones de relleno, como en situación final o de clausura. Por otro, constituye la primera barrera natural entre las aguas de percolación a través del relleno y las aguas subterráneas, o frente a la entrada de aguas freáticas que pudieran alcanzar y saturar el relleno (IHOBE, 2005).

El estudio previo para determinar la idoneidad del emplazamiento puede considerarse como una primera aproximación a algunos aspectos importantes relacionados con la geología y la geomorfología. En particular, el reconocimiento de la presencia o ausencia de áreas inestables con peligro significativo, situadas a 100 m o menos del perímetro del hueco minero, normalmente servirá para establecer la necesidad de estudios de mayor detalle en el entorno cercano. Lo normal, es que para el estudio de idoneidad se hayan considerado todos aquellos fenómenos de inestabilidad no compatibles con la operación segura del relleno, el mantenimiento de la integridad de los elementos de sellado y recogida de lixiviados o la estabilidad general final, tales como: áreas con suelos compresibles, materiales con capacidad de hinchamiento, fenómenos de lavado, arrastre de finos o sifonamientos, áreas con suelos con baja resistencia, suelos arcillosos hinchables, suelos sujetos a subsidencias como arcillas no consolidadas, laderas sujetas a movimientos en masa, caída de bloques, etc.

De acuerdo con lo establecido en el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001, con- vendrá elaborar un mapa del emplazamiento y su entorno para representar cartográficamente las unidades litológicas y su distribución estructural. La cartografía interesará que se adecúe, en escala, al mapa topográfico detallado, según las características y complejidad del emplazamiento. Se apoyará en una interpretación geomorfológica previa, preferentemente a escala 1:5.000. La cartografía geológica se acompañará de cortes geológicos y columnas estratigráficas representativas del emplazamiento y del entorno. En el caso que sea preciso, se pueden emplear técnicas geofísicas de apoyo. La cartografía geológica debe complementarse con las correspondientes leyendas y memorias explicativas que deben centrarse en correlacionar de manera clara los datos geológicos (litológicos, estratigráficos, estructurales, mineralógicos, etc.) con los aspectos geotécnicos, de estabilidad, hidrogeológicos, edafológicos, etc. A partir de ella, debe resultar sencillo confeccionar un mapa geomorfológico, delimitando las geoformas, siguiendo, por ejemplo, la sistemática de Zinck (2012). Este mapa, por sencillo que sea, puede tener mucho interés para abordar los aspectos edafológicos, como más adelante se comenta.

Por otro lado, si durante la realización del estudio geológico se comprueba la evidencia de fallas neotectónicas con desplazamientos en el Holoceno en las proximidades de la ubicación del hueco minero (a menos de 100 m del perímetro), será necesario justificar la ausencia de riesgos de inestabilidad. Para ello, se puede consultar la base de datos *Quaternary Active Faults Database of Iberia* (QAFI) del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). En relación con las limitaciones sobre ubicación de vertederos establecidas en el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001, será obligatorio tener en cuenta los criterios de análisis incluidos en la Norma de Construcción Sismorresistente (NCS) en vigor. Además, será

necesario considerar los datos y criterios de referencia del IGME y/o del Instituto Geográfico Nacional (IGN) respecto a la zonificación de áreas sísmicas. Los detalles sobre cómo se han de considerar los criterios de la citada NCS, se detallan en el apartado correspondiente a limitaciones de ubicación del Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001.

Lógicamente, el estudio de la geología de detalle del hueco minero y su entorno cercano es la base de la caracterización de los condicionantes geotécnicos y de estabilidad de los taludes. Obviamente, la información que pudiera haberse generado durante la actividad extractiva puede ser de inestimable valor. En este sentido, es interesante considerar la posibilidad de realizar consultas con el personal técnico de la explotación minera, si fuera posible hacerlo, además de la que pudiera obtenerse a través de los servicios de minas.

Hay que advertir que, desde el punto de vista de la estabilidad de los taludes del hueco, interesa un reconocimiento de tipo geotécnico orientado por el estudio geológico y geomorfológico. En primer lugar, se deben reconocer litotipos, es decir, grupos de materiales con las mismas propiedades geomecánicas. Interesa caracterizar las variaciones, profundidad, parámetros específicos, extensión y características de los materiales que forman el hueco destinado a recibir los residuos. Debe constatarse especialmente la existencia de frentes o bolsadas de alteración (como por ejemplo rellenos de productos de descalcificación). A este reconocimiento inicial debe sumarse un análisis estructural, analizando la estratificación, la esquistosidad, la fracturación o la presencia de cualquier clase de discontinuidades que puedan incidir en el comportamiento geotécnico de los taludes (**Figura 22**).



Figura 22. Discontinuidad geológica en un talud vertical en los límites de una cantera de mármol comercial (Sierra de las Andaluzas, Murcia). Se distingue un cambio neto de la roca competente (gris) a un material mucho más blando y deleznable (beige)



También es necesario identificar y caracterizar las acumulaciones de suelos y otros depósitos que pudieran estar presentes, con objeto de asignarles el uso más adecuado. Se considera obligatorio, además, una prospección orientada a identificar las posibles evidencias de inestabilidad de taludes: grietas de tracción en cabecera, caída de bloques, zonas extraplomadas, deslizamientos, fenómenos de erosión interna, etc., así como las posibles causas. Como es lógico, para realizar el estudio geotécnico, es imprescindible el conocimiento geomecánico de los materiales que forman los taludes que delimitan el hueco minero. A partir de aquí se podrán analizar los posibles modelos o mecanismos de rotura que están teniendo lugar, o puedan tenerlo, y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades (IHOBE, 2005).

De acuerdo con las recomendaciones del documento Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001 (APÉNDICE 1), se considera necesario realizar calicatas (de hasta 5 m de profundidad), en los puntos donde afloran suelos y materiales asimilables a suelos, así como sondeos de tipo geotécnico. En el mencionado documento se recomienda que las calicatas se distribuyan en una malla que cubra el área del emplazamiento, con un mínimo de seis unidades para emplazamientos de superficie igual o inferior a 2 hectáreas, y un mínimo de 3 calicatas por hectárea para los de superficie mayor. Esta densidad de muestreo puede reducirse, siempre que se pueda compensar gracias a información que pudiera estar disponible por el hecho de tratarse de huecos mineros. Las calicatas deberán realizarse de modo que cubran tanto el fondo del hueco minero como la zona circundante en aras de evaluar las condiciones edafológicas del entorno.

Siguiendo con las recomendaciones del Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001 (APÉNDICE 1), de cada calicata se debe obtener una descripción sistemática de los materiales presentes, realizada y registrada por personal competente en un estadiillo, en el que se recogerán igualmente: las coordenadas, la cota del punto, la fecha y la identificación del autor del reconocimiento. Es interesante que la parte superior de las calicatas sea descrita también en términos edafológicos, muestreando los horizontes de diagnóstico visibles en los perfiles. Se tomarán las medidas oportunas durante la campaña para no deteriorar la calidad de la barrera geológica natural existente, así como las pertinentes medidas de seguridad ante posibles derrumbes durante la descripción y el muestreo.

Para los sondeos, el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001 (APÉNDICE 1) recomienda una densidad mínima de tres por cada 5.000 m² de extensión en emplazamientos homogéneos, con una distribución y profundidad que defina adecuadamente la distribución en profundidad de los niveles geotécnicos. La profundidad de los sondeos debe ser tal que permita por un lado valorar la inexistencia de problemas de índole geotécnica debidos al relleno y, adicionalmente, facilite la caracterización geológica del material del sustrato en aras de valorar el grado de cumplimiento de los requisitos de barrera geológica exigibles a este tipo de construcciones. Al menos uno de estos sondeos debe realizarse con testificación continua para obtener información precisa de los materiales del subsuelo. Se admite que la profundización se pueda interrumpir si se alcanza antes un sustrato impermeable de gran potencia conocido en la zona. El conjunto de los sondeos permitirá conocer la columna estratigráfica representativa de las zonas de apoyo inferior y laterales del hueco. Como mínimo se empotrará cada sondeo 5 m en dicha formación de apoyo inferior. En suelos se tomarán muestras inalteradas cada 3 m de profundidad para los ensayos y análisis de laboratorio y se

realizarán ensayos de penetración estándar o SPT con la misma frecuencia, como mínimo uno por cada nivel geotécnico. En suelos arcillosos se pueden efectuar de modo complementario ensayos *in situ* de penetración con penetrómetro manual o de molinete, cada metro. Si la zona es geológicamente compleja o de más de 5.000 m² de extensión, se deben realizar ensayos de permeabilidad y sondeos adicionales para poder identificar las variaciones estratigráficas, estructurales y geotécnicas. Al menos se recomienda efectuar dos sondeos adicionales por cada unidad geológica identificada en cartografía y no caracterizada por los sondeos iniciales o uno por cada 5.000 m² de incremento en la superficie ocupada por el relleno.

De los sondeos se debería obtener información sobre la clasificación de los materiales asimilables a suelos, con atención a la textura, color, mineralogía, humedad, grado de alteración, procedencia, etc. Las descripciones visuales de los testigos deberán acompañarse de ensayos de laboratorio sobre muestras representativas de cada horizonte estratigráfico. La identificación de niveles de agua, zonas de alta permeabilidad o muy fracturadas es fundamental. Las rocas testificadas se clasificarán de acuerdo con su litología, mineralogía, color, tamaño de grano, grado de cementación y de alteración, índice RQD (Rock Quality Designation), densidad y orientación de fracturas y otras características físicas. En cuanto al desarrollo de la operación de perforación es importante registrar las características técnicas y las posibles incidencias tales como: tipo de revestimiento y método de perforación, tipo y volumen de los fluidos o aditivos usados, resistencia a la penetración, intervalos de muestreo y porcentaje de recuperación, posibles contaminaciones, registro de pérdidas de lodos u otras dificultades encontradas. De cada sondeo se debe obtener una descripción sistemática de los materiales presentes, realizada y registrada por personal competente en un estadillo, en el que se recogerán igualmente: las coordenadas, la cota del punto, la fecha, el diámetro de perforación y la profundidad, la identificación de la compañía perforadora y del técnico responsable del sondeo, y el autor de la descripción.

En laboratorio se determinarán los siguientes parámetros sobre muestras de suelos: a) *de identificación*: granulometría por tamizado y sedimentación, límites de Atterberg, humedad natural, densidad real y aparente. b) *de compactación, resistencia y deformabilidad*: Proctor modificado, curvas de compactación, ensayo edométrico, expansividad, ensayos de resistencia (compresión simple, corte directo, triaxial) e hinchamiento Lambe (sólo en materiales arcillosos). Los ensayos de identificación se efectuarán en un mínimo del 50% de las muestras obtenidas, y los de compactación, resistencia y deformabilidad en un mínimo del 25%. Se dispondrá en cualquier caso de un mínimo de tres analíticas completas. Los ensayos se adecuarán a la naturaleza de cada suelo.

Con toda la información obtenida se deberá tener una buena capacidad de predicción sobre el comportamiento de los materiales situados en el fondo del hueco. Igualmente, con los datos obtenidos se deberán realizar análisis de estabilidad de los taludes, seleccionando los perfiles adecuados, utilizando software específico.

4.1.4.3. Hidrogeología

El estudio hidrogeológico es de vital importancia en la caracterización del hueco minero, enfocado fundamentalmente a valorar las posibilidades de entrada de aguas subterráneas y la infiltración de lixiviados desde el relleno hacia los sistemas acuíferos.



Una primera aproximación a la hidrogeología se puede obtener mediante la elaboración de un mapa hidrogeológico realizado en la fase de valoración de la idoneidad de un determinado hueco de explotación o de selección de alternativas. La escala deberá ser la más adecuada a cada caso, pero puede ser suficiente 1:25.000, abarcando una zona comprendida en un mínimo de 10 km de radio alrededor del hueco minero. Dicho mapa debe representar las unidades hidrogeológicas, la piezometría, la dirección de flujo y la localización de los puntos de descarga conocidos. Igualmente, si las indagaciones destinadas a valorar la idoneidad del hueco se han realizado con suficiente rigor, debería tenerse un conocimiento aproximado del nivel freático en relación con el fondo del vaso, apoyado por la información obtenida sobre captaciones de agua. Ambas informaciones son necesarias para confrontarlas con los criterios de exclusión que se han propuesto. Si se considera, además, el estudio geológico y la información obtenida durante los reconocimientos geotécnicos, se dispondrá de buena parte de los datos necesarios para elaborar el estudio hidrogeológico. Todo lo anterior podría permitir una reinterpretación de la cartografía geológica para obtener, de manera relativamente simple, un mapa de unidades hidrogeológicas sobre la base del mapa topográfico de detalle del emplazamiento.

En los mapas deben situarse todos los puntos de agua conocidos dentro del área representada, es decir, todos los manantiales, sondeos, pozos, excavaciones o piezómetros que permiten tener acceso a las aguas subterráneas. Los datos referidos a dichos puntos pueden obtenerse a partir de los bancos de datos de puntos de agua existentes, seleccionando aquellos de mayor relevancia para el proyecto. Lo verdaderamente importante es comprender la posible conexión hidráulica entre la unidad o unidades hidrogeológicas afectadas por el hueco minero y los puntos de agua. Según las recomendaciones de IHOBE (2005) puede ser necesario incorporar en la cartografía hidrogeológica, los elementos significativos desde el punto de vista del funcionamiento hidrogeológico: bordes de descarga, de recarga y de nivel constante, bordes impermeables, superficies de recarga y recarga lateral entre unidades. Todos estos elementos, unidos a los datos climáticos, facilitarán la comprensión y la representación del funcionamiento del modelo conceptual del balance hídrico del hueco minero.

IHOBE (2005) también recomienda tener un control de la piezometría desde las primeras fases de proyecto, empleando los datos de puntos de agua del entorno del hueco. Si por falta de información no se conociera con certeza la posición del nivel freático, se recomienda la realización de un sondeo piezométrico en el entorno inmediato del emplazamiento que sirva para el control del nivel y como punto de la red de control y vigilancia. La idea es que la información obtenida durante el período de estudio del medio permita observar el comportamiento de los niveles freáticos en estiaje y en épocas de recarga, los tiempos de respuesta durante los episodios de recarga, etc.

Por otra parte, conociendo la distribución de los puntos de agua directamente relacionados con la unidad hidrogeológica donde se localiza el hueco minero, se pueden seleccionar los más convenientes para llevar a cabo un control de calidad de aguas. Al margen de que pueda existir información de las características físico-químicas del agua en esos puntos, resulta conveniente la realización de un muestreo previo a cualquier tipo de actuación que sirva para definir un estado preoperacional. Dichos puntos además pueden pasar a ser puntos de

control periódico de la calidad de las aguas durante todas las fases del proyecto y el periodo de vigilancia. La caracterización de la calidad de las aguas en dichos puntos de control debe incluir: pH, oxígeno disuelto, As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, cloruro, fluoruro, sulfatos, índice de fenol, sólidos totales disueltos (STD) y carbono orgánico disuelto (COD).

4.1.4.4. *Climatología*

El análisis del clima en el emplazamiento del hueco que se pretende rellenar debe estar enfocado de modo que se cubran aquellos aspectos que tengan interés en la evaluación y ejecución del proyecto (Almorox, 2003). En el caso del relleno de un hueco minero, el análisis climático tiene dos aplicaciones fundamentales. Por un lado, ha de servir de base para el estudio de la hidrología y el diseño de infraestructuras de drenaje. Por otro, es la base para la clasificación climática y fitoclimática, permitiendo una primera aproximación al conocimiento de la potencialidad climática para la implantación de vegetación.

Para el estudio del clima en el lugar del emplazamiento del hueco minero lo ideal sería disponer de una estación termo-pluviométrica en las proximidades, a cota semejante, y con la misma orientación. Normalmente este caso no se dará nunca, por lo que será necesario seleccionar estaciones situadas en un entorno que puede ser más o menos amplio según la región. Como mínimo, se considera que deben obtenerse datos procedentes de tres estaciones termo-pluviométricas, completas o automáticas, preferiblemente situadas de modo que el emplazamiento se ubique dentro del polígono formado uniendo las posiciones que ocupan en un mapa. Si existen varias opciones, es preferible elegir aquellos observatorios cuyos datos cubren periodos más recientes y completos. En la práctica, se aconseja tomar al menos 30 años para precipitaciones, 15 años para temperaturas y 10 años para el resto de elementos (vientos, meteoros, etc.). Los datos básicos de mayor interés para el tipo de proyecto al que se refiere esta Guía son las temperaturas, precipitaciones y, en menor medida, vientos. Excepcionalmente pueden tener interés estadísticas relacionadas con meteoros, tales como: número de días de lluvia, nieve y granizo. Los datos de interés de las estaciones seleccionadas pueden solicitarse a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Sin embargo, cada vez es más fácil encontrar datos de las estaciones que puedan tener interés o estudios climáticos completos en trabajos publicados o documentos inéditos. En este caso, es deseable que también se cumplan los requisitos anteriores sobre localización y periodos de observación cuando se utilice información ya elaborada.

Puede ser interesante obtener una visión del régimen de vientos (intensidad y frecuencia) aunque sea con información obtenida en estaciones más alejadas. Una forma de obtener una visión general de la posible incidencia del viento sobre el emplazamiento es la consulta del Mapa Eólico Nacional, desarrollado por el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), al que se puede acceder vía web (<http://www.globalwindmap.com/VisorCENER/>). En algunos puntos, además, dicha herramienta cartográfica ofrece información gráfica de rosas de los vientos (distribución de velocidades y de frecuencias de direcciones) e histogramas de distribución de velocidades de viento por rangos (**Figura 23**). Otra alternativa para obtener este tipo de información es la aplicación del Atlas Eólico de España desarrollada por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA) (<http://atlaseolico.idae>).



[es/meteosim/](#)). La velocidad media del viento corregida a una altura de 9,1 metros, junto con el índice precipitación- evaporación de Thornthwaite (ver más adelante), son dos de los cinco factores de la ecuación de Woodruff & Siddoway (1965) para el cálculo de la tasa de erosión del viento. Dado que nunca será posible obtener los datos necesarios para alimentar dicha ecuación en el propio emplazamiento, puede que sea suficiente una valoración más general sobre el riesgo de erosión eólica y/o emisión fugitiva de polvo por la acción del viento durante la fase de relleno por ejemplo, mediante la propuesta de Alberruche *et al.* (2014) en la que junto a otros factores, se emplea el valor medio de la velocidad del viento obtenido de la citada página del CENER y el Índice de Aridez de De Martonne (ver más adelante).

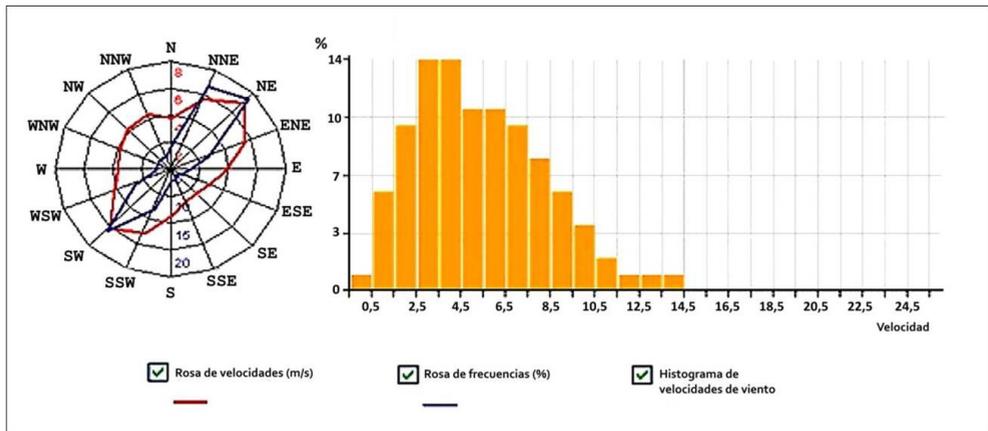


Figura 23. Rosas de velocidades (m/s) y frecuencias (%) e histograma de velocidades medidas en m/s de Cartagena (Murcia), obtenidos del Mapa Eólico Nacional (CENER)

En cuanto a las temperaturas, de los datos disponibles, ya sean obtenidos en la AEMET o en estudios climáticos cuyo ámbito geográfico cubra la localización del hueco minero, se deberá extraer, de acuerdo con la terminología empleada por Almorox (2003), para una serie de “n” años y para un mes (medio de esos “n” años), la siguiente información:

- Media de máximas absolutas (T'_a): media de las temperaturas máximas.
- Media de máximas (T): media de las temperaturas medias de máximas.
- Media (t_m): media de las temperaturas medias.
- Media de mínimas (t): media de las temperaturas medias de mínimas.
- Media de mínimas absolutas (t'_a): media de las temperaturas mínimas.

Puede ser interesante adjuntar gráficos de los valores mensuales de estas temperaturas, para facilitar la visualización de su variación a lo largo del año. El análisis de los datos debe intentar explicar las diferencias entre las estaciones seleccionadas, debido a su altitud y orientación, así como lo que la variación debida a estos factores puede suponer para el emplazamiento.

Se analizarán, si es posible los datos sobre heladas (sólo los registran las estaciones completas), de los observatorios considerados (períodos invernales). En aquellas estaciones meteorolo-

lógicas en las que no se registren los datos de heladas se obtendrán los períodos de ocurrencia de heladas mediante algún método de estimación indirecta, como el de Emberger (Almorox, 2003). Asimismo, también es posible estudiar a partir de las temperaturas registradas, la continentalidad del clima mediante la aplicación de diversos índices, recomendándose el índice de Kerner (Almorox, 2003).

Los datos de precipitación de mayor interés son los de pluviometría media mensual, estacional y anual, así como la precipitación máxima en 24 h o máxima diaria (P_d). El análisis de los datos debe intentar explicar las diferencias encontradas entre las estaciones seleccionadas en función de la situación que ocupan, intentando comprender cómo afectaría este aspecto al hueco seleccionado para el relleno. En el reparto de las precipitaciones en España influye notoriamente la altitud y la orientación de las cadenas montañosas con respecto a la circulación de los frentes de lluvia, a lo que también hay que añadir el efecto de las tormentas producidas en montañas (Almorox, 2003). La variación de las precipitaciones a lo largo del año también se puede mostrar de manera gráfica. Si los datos de precipitación de las estaciones se obtienen directamente de las series proporcionadas por la AEMET, puede ser interesante recopilar de manera separada los datos de temperaturas y precipitaciones mensuales de los años más seco y más húmedo de la serie, al margen de que esos datos intervengan en el cálculo de los valores medios.

El interés de conocer la precipitación máxima en 24 h para un determinado periodo de retorno es la aplicación al cálculo de caudales máximos a desaguar. La serie anual es fácil de obtener a partir de los datos recogidos de precipitación diaria máxima en la serie mensual a lo largo del periodo disponible de años, medidos en los pluviómetros existentes en las estaciones cercanas al emplazamiento. En este caso, puede ser de gran interés indicar: el número de años de la serie analizada y el intervalo, así como, para cada mes, el número de veces que la precipitación mensual se aproxima o iguala a la máxima, para conocer en qué meses se suelen producir las precipitaciones diarias mayores. El cálculo de precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retorno puede hacerse por el método de Gumbel, a partir del análisis de distribución de frecuencias. La otra opción es partir de los datos publicados y/o de la aplicación desarrollada por la Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento, 1999), que permite obtener directamente o calcular las precipitaciones máximas diarias para diferentes periodos de retorno, realizando a partir de ellas el cálculo de caudales, como más adelante se comenta en el apartado de hidrología.

La evolución conjunta de los datos de temperaturas medias y precipitaciones medias mensuales puede mostrarse en los llamados diagramas ombrotérmicos de Gaussen (Almorox, 2003). Dichos diagramas permiten obtener una primera aproximación a la incidencia de la intensidad y duración del periodo seco en un año medio, en un determinado observatorio o localización.

Otro elemento de análisis importante para evaluar la incidencia del clima es la evapotranspiración, ya sea la evapotranspiración potencial (ETP) calculada por métodos como los de Thornthwaite, Turc o Blaney-Criddle; o la evapotranspiración para un cultivo de referencia (ETr) calculada por métodos como los propuestos por Hargreaves, o Penman-Monteith adaptada y adoptada por la FAO (Allen *et al.*, 1998) de interés para el diseño de la revegetación.



Sin embargo, lo normal, para la mayoría de observatorios o cuando se utilizan estudios climáticos ya elaborados es que se disponga sólo de datos de temperatura. En tal caso, interesa calcular la ETr de Hargreaves, por su buena correlación general con la de Penman-Monteith, y la de Thornthwaite, por su interés para la clasificación climática y la posibilidad de comparar los resultados con muchas estaciones de nuestra geografía. En Almorox (2003) se describen todos los métodos comentados. Además, existen algunas ecuaciones de correlación entre las distintas metodologías (Hontoria, 1995).

Teniendo valores medios de precipitación y evapotranspiración, es posible elaborar balances hídricos, siguiendo el método de Thornthwaite. Los parámetros que intervienen son (mm):

- P, precipitación media mensual.
- P-ETP, pérdidas o adiciones potenciales de humedad en el suelo
- ETP, evapotranspiración potencial mensual calculada por el método de Thornthwaite.
- PPA, pérdida potencial acumulada.
- R, reserva.
- VR, variación de la reserva.
- ETA, evapotranspiración actual o real.
- F, falta.
- Ex, exceso.
- D, drenaje.

Originalmente, Thornthwaite y Mather (1955, 1957) emplearon valores de reserva del suelo entre 50 y 400 mm, aunque la clasificación de Thornthwaite emplea balances realizados con una reserva de referencia de 100 mm. Un ejemplo se muestra en la **Tabla 17**.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO
P	135,9	110,3	130,8	141,3	105,2	67,0	48,2	77,3	83,2	128,8	157,4	151,0	1336,4
ETP	23,8	27,2	37,3	47,2	69,9	93,0	112,8	103,9	84,2	60,0	36,0	26,2	721,4
P-ETP	112,1	83,1	93,5	94,1	35,3	-26,0	-64,6	-26,6	-1,0	68,8	121,4	124,8	615,0
PPA						26,0	90,6	117,2					
R	100	100	100	100	100	74,0	9,4	0	0	68,8	100	100	
VR	0	0	0	0	0	-26,0	-64,6	-9,4	0	68,8	31,2	0	
ETA	23,8	27,2	37,3	47,2	69,9	93,0	112,8	86,7	83,2	60,0	36,0	26,2	703,3
F	0	0	0	0	0	0	0	17,2	1	0	0	0	18,2
Ex	112,1	83,1	93,5	94,1	35,3						90,2	124,8	633,1
D	98,5	90,8	92,2	93,1	64,2						45,1	85,0	

Tabla 17. Balance hídrico realizado por el método directo o de Thornthwaite de la estación de Torrelavega (Cantabria)

Este método de cálculo permite obtener una aproximación al balance hídrico de la zona, aunque, evidentemente, no se ajusta a la realidad de un punto concreto, donde la posición topográfica puede hacer variar el agua aportada por escorrentía, la reserva del suelo puede ser distinta de 100 mm y la ETP puede ser mayor o menor, debido a la exposición y el tipo de vegetación. Sin embargo, nada impide hacer simulaciones a partir de los datos de temperaturas y precipitaciones de los años más seco y más húmedo de la serie, si se dispone de ellos. Igualmente, se pueden emplear los valores de evapotranspiración calculados o estimados por otros métodos, o ajustar la reserva a las condiciones del suelo o al conjunto de capas de suelo que mejor refleje las características consideradas para la clausura y rehabilitación, asumiendo que la capacidad para retener agua es la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y en el punto de marchitamiento, ambos estimados a partir de la granulometría.

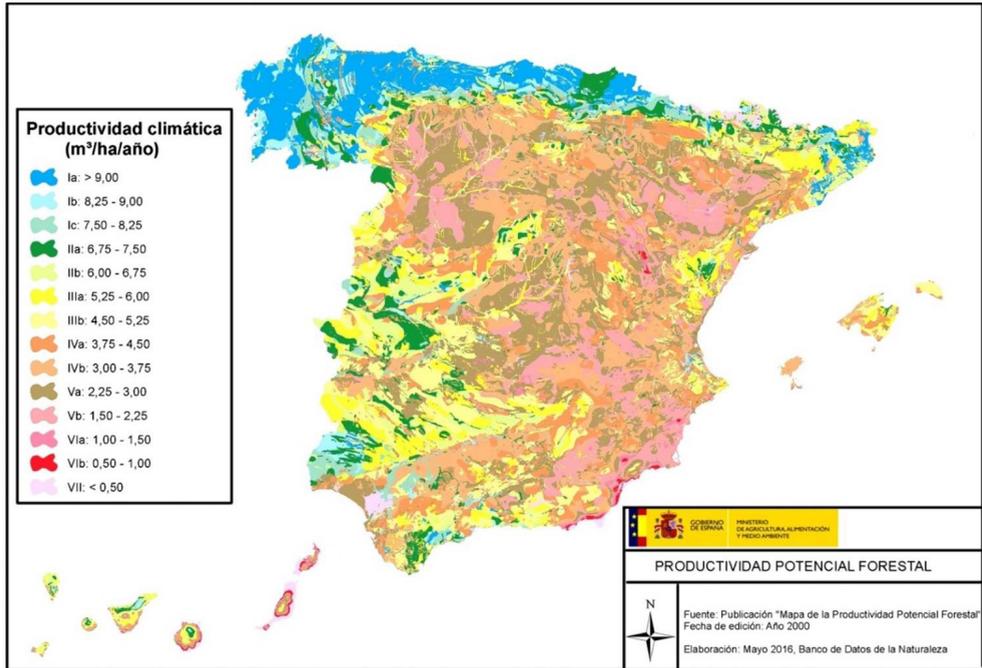
Con todo lo anterior, es posible realizar algunos ejercicios de síntesis para caracterizar el clima del emplazamiento. En primer lugar, interesa conocer la aridez, empleando, por ejemplo, el índice de aridez de De Martonne o aplicando los criterios de la UNESCO. El índice de aridez de De Martonne emplea la temperatura media anual en °C y la precipitación media anual en mm. Según los criterios de la UNESCO, se clasifican las zonas áridas a partir de la precipitación, la evapotranspiración (estimada por el método de Penman-Monteith), la temperatura, el número de meses secos y el período de sequía.

Otros índices y clasificaciones climáticas que podrían ser de interés son:

- El índice de Emberger, que se obtiene considerando la precipitación media anual, la temperatura media de las máximas del mes más cálido y la temperatura media de las mínimas del mes más frío.
- La clasificación de Thornthwaite, basada en la consideración de la eficacia térmica, dada por la ETP del mismo autor, y la humedad disponible, expresada como índices de humedad y de aridez a partir del balance hídrico.
- Índice de productividad vegetal (CPV de Paterson), denominado así por ser exponente del clima, la productividad y la vegetación de la estación para la que se calcula. En su componente climática, utiliza los datos de precipitación media anual, la temperatura media del mes más cálido, la temperatura media de las mínimas del mes más frío, la temperatura media de las máximas del mes más cálido, la duración de período vegetativo en meses y un factor de radiación o insolación (**Figura 24**). Cuando el valor del índice es 25 o menor se considera que no existe posibilidad de recuperación forestal natural.

El cálculo de todos estos índices está explicado en la mayoría de las publicaciones dedicadas a la climatología, como por ejemplo en Almorox (2003).

Por último, puede ser interesante incluir la Clasificación Bioclimática de Rivas Martínez. Siguiendo los criterios de esta clasificación, en primer lugar, se ha de establecer si el lugar estudiado pertenece o no al clima Mediterráneo. Por otro lado, se analiza el termoclima, el cual puede ser descrito a través de los pisos bioclimáticos, los cuales se ordenan en una cliserie que pueden ser altitudinal o latitudinal. Los tipos climáticos delimitados en función de la temperatura se denominan termotipos, para los que suele utilizarse como sinónimo el término



Ia (sin limitaciones graves); Ib (sin limitaciones graves); II (limitaciones débiles); III (limitaciones moderadas); IV (limitaciones moderadamente graves) V (limitaciones graves); VI (limitaciones muy graves); VII (impedido el bosque productivo)

Figura 24. Mapa de productividad potencial forestal, elaborado a partir del Índice de Paterson, modificado en función de la presencia de distintos substratos litológicos

de pisos bioclimáticos. Las divisiones entre pisos bioclimáticos se delimitan en función del valor que adquiere el llamado índice de termicidad, que es la suma algebraica de la temperatura media anual, la temperatura media de mínimas del mes más frío, y la temperatura media de máximas del mes más frío multiplicada por 10. A su vez, dentro de cada termotipo es posible reconocer horizontes. En función de la precipitación, es posible distinguir, además, diversos tipos de vegetación que corresponden de un modo bastante aproximado con otras tantas unidades ombroclimáticas. En Rivas-Martínez (1990, 2004) es posible obtener toda la información necesaria para aplicar la caracterización bioclimática del emplazamiento, además de que existen muchas publicaciones sobre este aspecto que cubren buena parte del territorio nacional.

4.1.4.5. Hidrología superficial

Una primera aproximación al estudio de la hidrología superficial es la identificación y descripción, a modo de inventario, de todas las formas en las que está presente el agua superficial en el entorno cercano del hueco de explotación: ríos, arroyos, lagunas, manantiales, etc. A partir de aquí, no resulta complicado localizar en un mapa dichas formas, empleando la fotointerpretación y el recorrido en campo.

Si se han seguido los criterios de valoración de la idoneidad de los huecos mineros, el hueco seleccionado quedará fuera de la zona de policía (100 m) y fuera de la zona de inundación

para periodos de retorno de 100 años de los cauces que pudieran estar presentes en las cercanías. Cumplidos estos requisitos, es poco probable que existan cauces importantes en las inmediaciones. No obstante, si se considera que en el entorno cercano existe algún cauce de cierta importancia convendrá analizar la relación del hueco minero con respecto a la zona de inundación para un período de retorno de 500 años.

Para la mejor comprensión de la hidrología superficial en el entorno del hueco seleccionado, es exigible una cartografía (a escala 1:5.000 o de mayor detalle) en la que se destaquen los cauces (permanentes o no) presentes en el entorno cercano y la delimitación de las cuencas hidrográficas de todos ellos, poniendo especial cuidado en definir las vertientes al hueco minero, para poder evaluar las posibles entradas de aguas de escorrentía. En base a la posición del hueco con respecto a la topografía circundante, y considerando a las líneas de flujo que lleguen al mismo, será posible hacer una estimación de la cantidad de agua de escorrentía que la cuenca podría llegar a aportar al hueco, tanto regularmente, a lo largo de un periodo de tiempo más o menos extenso (año climático), como súbitamente tras un determinado periodo de lluvias de especial intensidad. Para esta tarea, aparte del mapa topográfico y la fotointerpretación tradicional de imágenes aéreas, puede resultar de enorme utilidad el manejo de datos LIDAR. El procedimiento resulta, además, relativamente sencillo: partiendo de un archivo LIDAR que tenga de base una ortoimagen aérea, a través de un software de modelado digital del terreno es posible obtener un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). En un segundo paso, a través de las herramientas de modelado hidrológico, es posible la delimitación en el MDE de las diferentes cuencas hidrográficas encontradas, así como de las líneas de flujo superficial de dicho modelo en forma de mapas (la mayoría de los SIG incorporan todas estas funciones). Dado que la cartografía generada tiene de base ortoimágenes aéreas es fácil ubicar el hueco minero y evaluar el flujo de entrada de aguas de escorrentía superficial, así como la procedencia de la misma dentro del área hidrográfica definida. La determinación de las superficies que drenan hacia el hueco de cantera, son fundamentales ya que deberán ser interceptadas y desviadas en el proyecto, de modo que el drenaje del relleno solo evacue las aguas de lluvia caídas sobre el propio relleno (IHOBE, 2005). También son importantes las superficies receptoras de escorrentía que afecten o puedan afectar a pistas y accesos.

El mapa de cuencas vertientes y cauces facilitará la descripción del funcionamiento hidrológico y el recorrido de las escorrentías desde las zonas de cabecera hasta los cauces y zonas de recarga de las unidades acuíferas por infiltración difusa o concentrada (sumideros), así como su relación con el hueco minero, con manantiales o con zonas encharcadas (IHOBE, 2005).

Conocida la precipitación máxima en 24 h, representativa de la posición geográfica del hueco minero, se deben evaluar, para diferentes periodos de retorno, los caudales que pueden desaguar las diferentes vías de drenaje en el entorno del hueco minero. Dichos caudales pueden calcularse mediante el método racional. El método racional permite un cálculo bastante confiable de los valores de escorrentía máxima en lugares donde no existen estaciones pluviométricas cercanas o los registros están limitados en el tiempo. El método racional ha sido adaptado en sucesivas ocasiones (MOPTMA, 1987; Instrucción de carreteras 5.2-IC "Drenaje superficial", 1990, 2016), para el cálculo de caudales en pequeñas cuencas. Estos cálculos deben ser la base para el dimensionamiento de canales de guarda o de intercepción



aguas arriba de los taludes del hueco minero. El Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001 señala que para el diseño de dichas conducciones deberá considerarse el caudal máximo para un período de retorno como mínimo de 25 años (es recomendable diseñar los canales de guarda exteriores para una vida útil de 50 años). Por otro lado, se han de calcular los caudales a desaguar correspondientes a las precipitaciones caídas directamente dentro de los límites del hueco, que se infiltrarán en los residuos.

El estudio hidrológico deberá incluir una caracterización de la calidad de las aguas en aquellos puntos situados aguas arriba y abajo de la posición del hueco que razonablemente puedan verse influidos por el proyecto y tengan agua. Los parámetros a controlar deben ser: pH, oxígeno disuelto, As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, cloruro, fluoruro, sulfatos, índice de fenol, sólidos totales disueltos (STD) y carbono orgánico disuelto (COD).

4.1.4.6. Edafología

La rehabilitación posterior al relleno del hueco minero se puede beneficiar enormemente del conocimiento de los suelos en el entorno cercano. El estudio de los suelos en el entorno del emplazamiento debe iniciarse con una revisión minuciosa de la información que pueda estar disponible. En particular, el análisis de los factores formadores, especialmente el clima (edafoclima) puede ser de gran utilidad para orientar la prospección edafológica. En cuanto a la información cartográfica sobre suelos, lamentablemente en España es bastante limitada a escalas detalladas, por lo que la identificación de las unidades geomorfológicas mediante fotointerpretación será, normalmente, la base para elaborar la cartografía de suelos o de unidades geomorfoedáficas en el entorno del proyecto. Aunque de modo intuitivo es posible asignar tipologías de suelos a las unidades geomorfoedáficas, partiendo de una buena revisión bibliográfica, los tipos de suelos presentes en el entorno del hueco han de ser definidos y clasificados de acuerdo con las propiedades que pueden ser observadas o medidas en perfiles de suelos. La descripción de perfiles de suelos resulta necesaria para conocer y clasificar los suelos, por lo que se considera imprescindible la descripción de un perfil, como mínimo, por cada unidad geomorfoedáfica definida. Como es sabido, el perfil de un suelo es un corte vertical en profundidad que permite observar la capa superficial y todas las capas internas del suelo (horizontes), las cuales son sensiblemente paralelas a la superficie. En principio, la parte superior de todas las calicatas que pudieran hacerse para la caracterización geotécnica pueden servir para el estudio de los suelos desde la perspectiva edafológica. El personal que se ocupe de estas tareas debe estar entrenado en la descripción y toma de muestras de perfiles de suelos. La descripción debe seguir un método sistemático como, por ejemplo, el que se expone en FAO (2009). Las calicatas específicamente realizadas para el conocimiento de los suelos desde la perspectiva edafológica serán normalmente de un metro de profundidad o algo más, salvo que se encuentren impedimentos a menor profundidad. La calicata es el tipo de aproximación al conocimiento del perfil de mayor calidad, por lo que todas las que se realicen deben ser muestreadas, horizonte por horizonte. Como se ha mencionado, el número mínimo de perfiles descritos y muestreados debe ser uno por cada unidad geomorfoedáfica. Además, el número total de perfiles debe ser como mínimo de una por cada hectárea de terreno representado en el mapa. Esto quiere decir que no todos los perfiles descritos han de serlo en paredes de calicatas, pues a los perfiles descritos en calicatas se pueden añadir obser-

vaciones y sondeos edafológicos. Las observaciones se realizarán escarbando someramente la superficie visible en cunetas, ribazos o taludes ya excavados, como los de los propios frentes del hueco minero, siempre que sea factible desde el punto de vista de la seguridad. Estos puntos se suelen describir, pero no muestrear, puesto que para que el muestreo sea correcto la muestra de suelo debe ser fresca y, en general, los taludes suelen llevar mucho tiempo a la intemperie. Los sondeos edafológicos son agujeros cilíndricos excavados con sondas manuales o barrenas también limitados a profundidades pequeñas que rara vez superarán 1 m. Este sistema permite describir y también muestrear perfiles, si lo realiza personal entrenado. Es recomendable que la suma de calicatas, sondeos y observaciones alcance el valor de tres por cada hectárea de terreno.

Con toda la información, las unidades geomorfoedáficas originales, pueden verse modificadas en número y delimitación. Las que se consideren definitivas agruparán normalmente tipos de suelos clasificados siguiendo alguna de las clasificaciones más comunes en España: *Soil Taxonomy* o FAO (IUSS, 2007; *Soil Survey Staff*, 2014b). Lo normal es que las unidades cartográficas no sean puras, desde el punto de vista taxonómico. Se admite que las unidades cartográficas representarán consociaciones de tipos de suelos si un tipo determinado supera el 75% de la superficie de la unidad. Estas unidades pueden contener, por tanto, las llamadas inclusiones: suelos ocasionales dentro de la unidad, que no deberían ocupar más del 25% del área. Se puede admitir que algunas unidades cartográficas representen asociaciones: unidades complejas, conformadas por más de una clase de suelo en proporciones semejantes. También es previsible que aparezcan las llamadas áreas misceláneas (zonas sin suelo), que pueden aglutinar superficies muy diversas: polígonos industriales, afloramientos rocosos, estériles mineros, etc.

En cuanto a las muestras de suelos tomadas, los análisis que deben aportarse han de incluir:

- Porcentaje de elementos gruesos (>2 mm).
- Porcentaje de humedad después de secado en estufa.
- Análisis granulométrico de la fracción tierra fina (tamizado en seco, más método de la pipeta de Robinson o automatizado) para determinar las fracciones según criterio USDA-SCS.
- Contenido en materia orgánica.
- pH en suspensión suelo/agua 1:2,5 o 1:1.
- Capacidad de intercambio catiónico.
- Cationes ácidos de cambio (acidez cambiante).
- Cationes básicos de cambio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ de cambio).
- Prueba previa de salinidad (conductividad eléctrica en extracto suelo/agua 1/5).
- Determinación de la capacidad de retención de agua disponible: capacidad de retención de humedad a 33 kPa (0,33 atm) y 1500 kPa (15 atm) en la fracción tierra fina.
- Contenido en sulfato soluble medido mediante el ensayo EN 12457 4.

La selección de los métodos de análisis del complejo de cambio debe estar orientada y justificada por el pH. Opcionalmente, y dependiendo de la localización y circunstancias



del emplazamiento, puede ser interesante añadir otros ensayos, tales como estabilidad de agregados, conductividad eléctrica en extracto de saturación, contenido en carbonato cálcico, contenido en yeso, disponibilidad de nutrientes principales, contenido en elementos traza totales por digestión ácida y solubles (EN 12457 4), así como algunos destinados a valorar aspectos biológicos del suelo, como por ejemplo: grado de descomposición de la materia orgánica y ensayo de respiración. Para todo lo relacionado con los análisis mencionados se recomienda la consulta de los documentos referenciados como *Soil Survey Staff* (2014a) y ECS (2002).

La clasificación edafológica debe traducirse para que pueda tener utilidad. Estas valoraciones van desde características específicas tales como erodibilidad, espesor útil, capacidad de retención de humedad, a valoraciones de carácter más global sobre la calidad del suelo o la vulnerabilidad. La interpretación práctica de la información básica de suelos en términos evaluativos puede aportar elementos de juicio a un proceso de toma de decisiones sobre rehabilitación. Esta interpretación deberá hacerse para cada una de las unidades geomorfoedáficas reconocidas.

4.1.4.7. Medio biótico

Como primera medida para conocer el medio biótico en el entorno del emplazamiento, interesa recabar la información existente sobre hábitats de interés comunitario. La Directiva 92/43/CEE (modificada y adaptada por la Directiva 97/62/CE) tiene como objetivo el mantenimiento o el restablecimiento, en un estado de conservación adecuado, de los hábitats naturales y de las especies silvestres de la fauna y de la flora de interés comunitario. Dicha Directiva establece en su Anexo I los hábitats de interés comunitario y los de interés prioritario, para los cuales deben establecerse determinadas medidas de conservación. La identificación de los hábitats presentes en la zona del proyecto puede proporcionar información importante para la toma de decisiones. Igualmente, la constatación de una total ausencia de hábitats de interés, y la explicación razonada de tal ausencia, es una información valiosa. Del mismo modo, interesa recabar información sobre zonas sensibles y espacios protegidos, aunque estén situados a una distancia que impida su delimitación en el mapa topográfico básico.

Por otro lado, es necesario conocer la distribución de la vegetación natural existente en el entorno del proyecto. La vegetación es de gran significado ecológico (como hábitat) y paisajístico, y juega un papel fundamental por las relaciones que establece con el resto de elementos y factores bióticos y abióticos del medio. La vegetación natural existente en un territorio, incluso en los más antropizados, permite obtener mucha información sobre el potencial del medio. Una primera aproximación al conocimiento de la vegetación natural propia del entorno de un proyecto de relleno de un hueco minero es el encuadre del mismo en términos bioclimáticos (fitoclimáticos). Existen varias subdivisiones del territorio español basadas en el análisis del clima como factor determinante de la distribución de la vegetación. Una de las fórmulas para sectorizar las áreas de distribución de la vegetación española, en base al estudio de datos climáticos, es el trabajo de Allue-Andrade (1990). Otra aproximación, muy extendida en nuestro país, es la ya comentada subdivisión bioclimática de Rivas Martínez (1990, 2004), por lo que es posible encontrar documentación referida a muchas

localizaciones, al margen de que los datos climáticos permiten realizar el análisis particular de los observatorios seleccionados.

Además del análisis bioclimático, convendrá realizar un esfuerzo de consulta bibliográfica entre la ya abundante bibliografía existente sobre la vegetación natural, actual y potencial, de la práctica totalidad del territorio español, lo que puede facilitar la descripción general del contexto en el que se encuentra un determinado emplazamiento. Sin embargo, una vez establecido esa especie de marco general, lo que verdaderamente puede interesar a un proyecto de relleno y rehabilitación de un hueco minero es la búsqueda de lo que se ha venido en llamar un ecosistema de referencia. Por otro lado, cuanto mayor es la gravedad de la perturbación más cuestionable resulta emprender acciones dirigidas a recomponer un ecosistema histórico o recuperar un estado previo a la perturbación (es decir, “volver al pasado”) (Hilderbrand *et al.*, 2005; Harris *et al.*, 2006; Choi, 2007). Este es el caso de un hueco minero, posteriormente rellenado de RCD, clausurado y finalmente cubierto de un suelo que será normalmente artificial. De hecho, la mayoría de los proyectos de restauración llevan a cabo una aproximación a las condiciones teóricamente anteriores a la alteración que es congruente con el paisaje existente en las inmediaciones (Cairns & Heckman, 1996). Por ello, sin descartar que la información sobre usos del suelo pueda participar también en la toma de decisiones sobre el objetivo final de rehabilitación, el estudio de la vegetación natural que puede estar presente en el entorno es fundamental en el análisis de alternativas del ecosistema de referencia. Particularmente importante puede ser el reconocimiento de formaciones de matorral o bosque (dominadas por especies leñosas), cuando presenten alta cobertura del suelo y naturalidad.

Se han propuesto diferentes protocolos para la localización y estudio de estos ecosistemas de referencia. Una opción relativamente sencilla, está basada parcialmente en la propuesta por Jorba y Vallejo (2010), para la localización de lo que dichos autores denominan paisaje de referencia:

- Definir un cinturón de unos 5 km de anchura alrededor del hueco minero seleccionado. La anchura de esta zona se podrá ajustar en función de la topografía o los usos del suelo de zonas adyacentes, pero debe ser representativa de la región geográfica.
- Identificar a partir de fotografías aéreas recientes y cartografía las diferentes unidades de paisaje de esta zona, en función de la cubierta vegetal y la topografía, y su distribución espacial (dimensiones medias, separación, etc.).
- Comprobar la clasificación hecha en el apartado anterior, y definir una clasificación y estructura definitiva a partir de visitas de campo y de la consulta de otra información disponible (por ejemplo, mapas litológicos, inventarios de especies, consultas locales, etc.).
- A partir de la información anterior, describir las características de las diferentes unidades de vegetación en base a su composición florística, estructura y presencia de especies y poblaciones emblemáticas, raras o en peligro de extinción.

En el caso de que el entorno del emplazamiento esté dominado por zonas urbanizadas, explotaciones mineras, zonas agrícolas, etc. puede ser necesario buscar las referencias de



vegetación natural en lugares más distantes. La delimitación de unidades que se haga puede orientar la rehabilitación, en el caso de que se opte por establecer vegetación natural, identificando las unidades que se desee representar, distribuyéndolas en el espacio de acuerdo con las características de una sectorización basada en las características del terreno.

Como es sabido, la fauna silvestre terrestre y de aguas continentales está ligada a su medio de vida (la vegetación y las aguas). El conocimiento de la fauna, en lo que respecta al tipo de proyecto al que se refiere esta Guía, puede limitarse al reconocimiento de los valores faunísticos y la comprensión de su importancia en el contexto general. El punto de partida puede ser la consulta del Inventario Español del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, depositado en el Banco de Datos de la Naturaleza (<http://sig.mapama.es/bdn/>). De acuerdo con IHOBE (2005), es recomendable realizar una descripción a partir de bibliografía específica, prestando especial atención a la fauna protegida y, más concretamente, a la avifauna que pueda nidificar en el área de actuación del proyecto. No obstante, puede ser recomendable también la consulta de expertos para establecer relaciones entre biotopos y especies en el entorno del proyecto.

4.1.4.8. Paisaje e incidencia visual

El paisaje constituye la expresión externa del territorio y puede definirse como la percepción polisensorial y subjetiva del medio (González Bernáldez, 1981). El paisaje es un recurso natural y cultural que debe ser preservado, especialmente aquellos de alta calidad visual. El estudio del paisaje y de la incidencia visual debe hacerse en la situación preoperacional, pudiendo simularse también un análisis de la fase posterior a la rehabilitación.

La base del análisis del paisaje suele ser una delimitación cartográfica de unidades de paisaje. La cartografía de paisaje puede hacerse a una escala algo menos detallada que la empleada para el mapa topográfico básico, para permitir una visualización más amplia del entorno. Una escala de 1:5.000 ó 1:10.000 puede ser razonable en la mayoría de los casos.

Las unidades de paisaje son sectores básicos del territorio que presentan una cierta homogeneidad en sus características perceptuales, así como cierto grado de autonomía visual, y sobre las que se realiza el proceso de evaluación. Son zonas homogéneas desde el punto de vista de la percepción, en las que uno o varios elementos del medio actúan como definitorios (Gómez Orea, 1994). Los componentes del paisaje que suelen ser considerados en la definición de las unidades paisajísticas son: el relieve, la vegetación, la presencia de agua, el grado de antropización y los usos del suelo, etc.

Sobre cada unidad de paisaje se puede hacer una valoración de la calidad visual o el grado de excelencia de éste para ser preservado. Suele ser el resultado del valor atribuido a los componentes y características visuales que la definen. La calidad visual global de cada una de las unidades de paisaje es función de su calidad visual intrínseca y de su potencial de vistas (calidad visual adquirida o extrínseca).

Existen diversos métodos de valoración de la calidad visual del paisaje: directos, indirectos y mixtos (VV.AA., 2007). La valoración de la calidad visual intrínseca del paisaje se realiza en base a la calidad visual y singularidad de los componentes biofísicos y biológicos que lo

integran: relieve, vegetación y usos del suelo, agua y elementos artificiales, y sus características visuales y estéticas. La calidad visual intrínseca representa una evaluación de la unidad de paisaje como emisora de vistas. Por ejemplo, un método aplicable es el que se explica en Alberruche *et al.*, (2015), el cual consiste en la desagregación de la calidad visual en componentes cuya evaluación individualizada dará, por agregación, el valor total. Este método consta de las siguientes fases:

- Identificación de los componentes que definen la calidad visual, hasta el nivel de desagregación que sea necesario.
- Evaluación individualizada de cada componente en una escala homogénea.
- Determinación del peso o importancia relativa de cada componente respecto al valor total de calidad visual.
- Obtención del valor agregado de calidad visual mediante la suma ponderada de los valores de los componentes que la integran. La asignación de los coeficientes de ponderación puede hacerse siguiendo trabajos anteriormente publicados o basándose en la opinión experta del equipo de trabajo, aunque se pueden aplicar otros métodos como la consulta a paneles de expertos (método Delphi), etc.

Otro aspecto fundamental es el análisis de la incidencia visual de la alteración minera. La incidencia visual va a depender: de la fragilidad visual intrínseca o capacidad de absorción visual de dichas alteraciones por el medio; y de su visibilidad o accesibilidad visual desde zonas frecuentadas por la población o con mayor potencial de observadores (núcleos urbanos, vías de comunicación, etc.). La determinación de la accesibilidad visual se basa en el análisis de cuencas visuales. La cuenca visual se define como la zona que es visible desde un punto o conjunto de puntos. En el análisis se asume que la cuenca visual es la receptora de la alteración paisajística pues los observadores que se encuentren en la misma podrán visualizarla desde cualquiera de los puntos que la forman, con mayor o menor nitidez en función de la distancia. Por otra parte, la accesibilidad visual de un punto del territorio, en este caso del hueco minero, aumenta con la posibilidad que tiene de ser visto desde puntos potenciales de observación (VV.AA., 2007). La frecuencia de observación, por lo tanto, puede incorporarse también al análisis de visibilidad como un factor cuantitativo de ponderación.

La aplicación de una metodología como la de Alberruche *et al.* (2015), basada en la aplicación de un índice paisajístico, puede permitir la evaluación del impacto residual sobre el paisaje, una vez finalizada la fase de relleno, o estimar el resultado del proceso de rehabilitación, así como en diversos momentos del proceso de seguimiento posterior, empleando los resultados reales que se vayan produciendo.

4.1.4.9. Usos del suelo y afecciones territoriales

La cartografía de usos del suelo intenta describir cómo el territorio es utilizado o aprovechado por el hombre. Dicha descripción es, a su vez, el reflejo de cómo han sido percibidas las potencialidades y limitaciones del territorio a lo largo de la historia. El aspecto que ofrecería una cartografía de usos o coberturas de suelo, de no haberse producido ninguna modificación por parte del hombre, se relacionaría con la distribución espacial de las formaciones



vegetales originales. Sin embargo, como ocurre en amplias áreas de la cuenca mediterránea, en España, las transformaciones sufridas por el paisaje original vienen de antiguo, siendo algunas de ellas milenarias.

Conviene que la cartografía de usos del suelo en el entorno cercano, delineada sobre el mapa topográfico básico, se elabore de acuerdo con la leyenda del SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España). El SIOSE está integrado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT), cuyo objetivo es generar una base de datos de Ocupación del Suelo para toda España a escala de referencia 1:25.000. La correspondiente hoja a escala 1:25.000 en la zona del emplazamiento, debe ser el punto de partida para realizar el mapa de usos u ocupación del suelo, desagregando aquellas unidades que lo permitan mediante fotointerpretación y reconocimiento del terreno. Las razones de esta propuesta son diversas. Por un lado, es previsible que cualquier cartografía disponible, o cualquier actualización a escalas más detalladas en nuestro país, haga uso de la misma leyenda. Además, es interesante destacar que la reciente norma para el cálculo del drenaje superficial en pequeñas cuencas, Norma 5.2-IC (Orden FOM/298/2016), introduce una adaptación para la asignación del umbral de escorrentía mediante tablas en las que se proporcionan valores a dicho parámetro según las diversas clases de coberturas de suelo del proyecto CORINE *Land Cover*, recogiendo de este modo la propuesta de Ferrer Juliá *et al.* (2006). La leyenda del SIOSE, que se propone como modelo para el estudio de la distribución de usos del suelo, es coherente con la del CORINE *Land Cover*, y son muy fácilmente traducibles.

Por otro lado, el marco legal del suelo, determinado por disposiciones legales, administrativas o de planeamiento, condiciona de tal forma el uso del suelo y, por consiguiente, la localización de las actividades, que cualquier proyecto debe haberlo contemplado previamente. Por ello, interesa investigar todas aquellas afecciones territoriales o normativas con incidencia territorial que pudieran tener alguna relación sobre el proyecto, o marcar pautas para la selección de los objetivos de rehabilitación. Estas afecciones tienen su origen en la legislación sobre ordenación del territorio y urbanismo, conservación y protección del patrimonio natural y cultural, y otras normas de carácter sectorial. Puede ser suficiente conocer las afecciones territoriales que se comentan más abajo dentro de la representación cartográfica a escala 1:10.000.

Si se han seguido los criterios de idoneidad para seleccionar la ubicación del hueco minero, el entorno cercano del proyecto estará fuera de alguna de las siguientes figuras de protección: humedales RAMSAR, o incluidos en el Inventario Español de Zonas Húmedas u otros Inventarios de las Comunidades Autónomas; Lugares de Interés Geológico (LIG), Bienes de Interés Cultural (BIC) u otra figura de protección similar, y correspondiente perímetro de protección. No obstante, habrá que comprobar la posible existencia de las siguientes figuras de protección:

- Espacios naturales protegidos por el Estado o las Comunidades Autónomas, en sus diferentes categorías: Parques Nacionales, Reservas Integrales, Monumentos Naturales, Paisajes Protegidos, Parques Naturales, etc.
- Elementos de la Red Natura 2000. Dicha red fue creada por la Directiva 92/43/CE relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres (o

Directiva Hábitats), con el objeto de garantizar el mantenimiento o, en su caso, el restablecimiento, en un estado de conservación favorable de los hábitats naturales y hábitats de determinadas especies en su área de distribución natural considerados de interés comunitario, mediante el establecimiento de Zonas Especiales de Conservación (ZEC), incluyendo además las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) designadas en virtud de la Directiva 79/409/CEE relativa a la conservación de las aves silvestres (o Directiva Aves) (derogada por la 2009/147/CE). El procedimiento para la declaración de una ZEC conlleva previamente su aprobación como Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) por la Comisión Europea, a propuesta del Estado español y de la correspondiente Comunidad Autónoma.

- Hábitats de interés. La Directiva Hábitats (92/43/CEE) considera “hábitat natural” aquellas zonas terrestres o acuáticas diferenciadas por sus características geográficas, abióticas y bióticas, tanto si son enteramente naturales como seminaturales. La Directiva enumera en su Anexo I, distintos tipos de hábitats existentes en el territorio de la Unión Europea considerados de interés comunitario. Dentro de este conjunto de hábitats de interés comunitario, la Directiva distingue como “prioritarios” desde el punto de vista de la aplicación de medidas de conservación a aquellos hábitats amenazados de desaparición.
- Áreas protegidas por convenios internacionales. Se incluye en esta categoría las figuras de protección asignadas a algunos espacios naturales por Convenios y Acuerdos internacionales suscritos por España, tales como Reservas de la Biosfera declaradas por la UNESCO, Humedales de Importancia Internacional del Convenio RAMSAR, etc.
- Cualquier espacio afectado por otra figura de protección o reconocido por su valor desde el punto de vista de la conservación, tales como zonas de interés para aves esteparias, montes de especial protección, montes de utilidad pública y montes protectores, etc.

El punto de partida para reconocer la existencia de algún espacio o lugar con alto valor para la conservación puede ser la consulta del Inventario Español del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, depositado en el Banco de Datos de la Naturaleza (<http://sig.mapama.es/bdn/>).

Otro aspecto a tener en cuenta es la posible existencia en el entorno del proyecto de elementos inventariados pertenecientes al Patrimonio Histórico, y muy especialmente los declarados Bienes de Interés Cultural (BIC). Los bienes pertenecientes al Patrimonio Histórico Español, están regulados por una normativa específica fundamentalmente contenida en la Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español. No obstante, casi todas las Comunidades Autónomas han redactado su propia legislación sobre la protección del Patrimonio Histórico con sus correspondientes figuras de protección.

Igualmente interesará conocer la posible existencia en el entorno del hueco seleccionado de vías pecuarias. La Ley estatal 3/1995, de 23 de marzo, de Vías Pecuarias, expresamente señala que éstas constituyen un valioso patrimonio natural y cultural que, pese a su deterioro,



siguen prestando servicio al tránsito ganadero y contribuyendo a la preservación de la flora y fauna silvestres, y potencialmente pueden resultar muy útiles para el fomento de los usos turísticos recreativos y desarrollo rural. Esta Ley crea la Red Nacional de Vías Pecuarias, en las que se integran las Cañadas y otras Vías Pecuarias de carácter supracomunitario, a las que han de sumarse las que hayan sido reconocidas por las Comunidades Autónomas.

Por último, se considera imprescindible conocer en qué medida pueden afectar al proyecto cualquier tipo de instrumentos de ordenación (Planes de Ordenación, Planes Directores, etc.), así como el planeamiento urbanístico municipal (planes generales de ordenación urbana, normas subsidiarias, etc.). En concreto, los huecos seleccionados deberán respetar una distancia mínima de 500 m con respecto a zonas urbanizables y reservadas para equipamientos educativos o sanitarios, según el planeamiento en vigor, respetando igualmente esa distancia con respecto a núcleos urbanos.

4.2. Fase preparatoria: Remodelado y acondicionamiento del hueco

El acondicionamiento del hueco minero incluye una serie de operaciones destinadas a la limpieza, a mejorar la estabilidad de los taludes del hueco y regularizar la superficie del fondo del mismo.

La limpieza puede ser necesaria cuando en huecos abandonados existen vertidos de diversa naturaleza, o restos del material que fue explotado. En función de la naturaleza de esos materiales habrá que gestionarlos. Los materiales acumulados que, estando en el hueco minero, proceden de la propia explotación, siempre que sean inertes, pueden tener alguna utilidad como materia prima que deberá estudiarse.

Conociendo el comportamiento geotécnico de los materiales que constituyen los taludes del hueco minero, y habiendo reconocido detalladamente los mismos, es posible definir las tareas a realizar para su saneado por zonas. Estas zonas deben ser descritas y localizadas correctamente en el mapa topográfico básico. Los tipos de actuaciones que habitualmente suelen ser necesarias son:

- Retaluzado, apropiado para corregir formas de inestabilidad de taludes con círculos de deslizamiento poco profundos. El retaluzado se puede efectuar mediante dos técnicas hasta alcanzar la pendiente predeterminada que asegure la estabilidad: por recorte o por relleno del talud. Mediante el recorte (con explosivos) se consigue disminuir las fuerzas que tienden al movimiento de la masa del talud reduciendo el volumen de la parte superior del deslizamiento, mientras que el relleno consigue aumentar la resistencia al corte del terreno mediante el incremento de las tensiones normales en la zona inferior de la superficie de rotura.
- Retranqueo de talud para crear bermas, en determinados puntos de la coronación de los huecos, normalmente mediante retroexcavadora, siempre que sea segura la operación.
- Saneo selectivo, aplicado a zonas más puntuales, que puede incluir la retirada de bloques situados en la cresta o talud. El acceso condicionará la operación, pudiendo ser necesario el empleo de una grúa de alcance adecuado, utilizando como medios gatos hidráulicos o martillos rompedores.

- Limpieza de las bermas originales, de modo que sea posible acceder a puntos inaccesibles, primero con la maquinaria empleada en el saneo y a continuación con vehículos de mantenimiento, y en su caso, los que precisen circular posteriormente durante el relleno.

Las labores de saneo deben realizarse de arriba hacia abajo. Las posibles labores de retranqueo implicarán la excavación de materiales edáficos que deberán ser preservados. **En general todo material extraído durante el saneo, deberá considerarse para su posible utilización en rellenos o construcción de infraestructuras.**

Una vez realizadas las operaciones de acondicionamiento, conviene rehacer el mapa topográfico básico y dibujar perfiles o secciones longitudinales y transversales del terreno de la nueva situación, pues se habrá alcanzado la situación previa al inicio del relleno. En el caso de que, además del saneo, haya que hacer una regularización previa del hueco receptor antes de iniciarse el relleno propiamente dicho, ésta deberá quedar bien establecida en el plano de curvas de nivel. De acuerdo con IHOBE (2005), a partir de esa topografía se realizará la definición de las fases de relleno y las cubriciones correspondientes. También quedarán definidos con esta topografía las zonas de paso y los accesos a las diferentes plataformas de vertido. En particular, deberán quedar bien establecidos los puntos siguientes:

- Cota máxima de relleno.
- Capacidad de relleno total y de cada fase (volumen bruto y volumen ocupado por las infraestructuras de impermeabilización y drenaje).
- Zonas de acceso y transporte interior.
- Cotas de acceso.
- Cota base del sistema de drenaje.

De igual modo, los viales interiores deberán acondicionarse para facilitar el tránsito de maquinaria durante las labores de restauración. Este aspecto resulta de especial interés en aquellas explotaciones que llevan mucho tiempo abandonadas y cuyas infraestructuras no han experimentado un adecuado acondicionamiento. Así pues, el plano topográfico básico deberá incluir el delineado de los viales a utilizar durante las labores de relleno del hueco minero en sus diferentes fases.

4.3. Fase preparatoria: Estanqueidad físico-química del hueco y sistemas de drenaje internos

En general, para establecer las condiciones técnicas que deben garantizar la estanqueidad físico-química y las condiciones que deben tener las capas drenantes y los sistemas de drenaje del hueco receptor se asume lo establecido en el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001.

4.3.1. Barrera geológica natural e impermeabilización del hueco

Conocidas las características geológicas del hueco con detalle, es necesario evaluar los materiales del fondo y los taludes con objeto de saber si son suficientes para impedir la contami-



nación del suelo, de las aguas subterráneas o de las aguas superficiales y garantizar la recogida eficaz de los lixiviados.

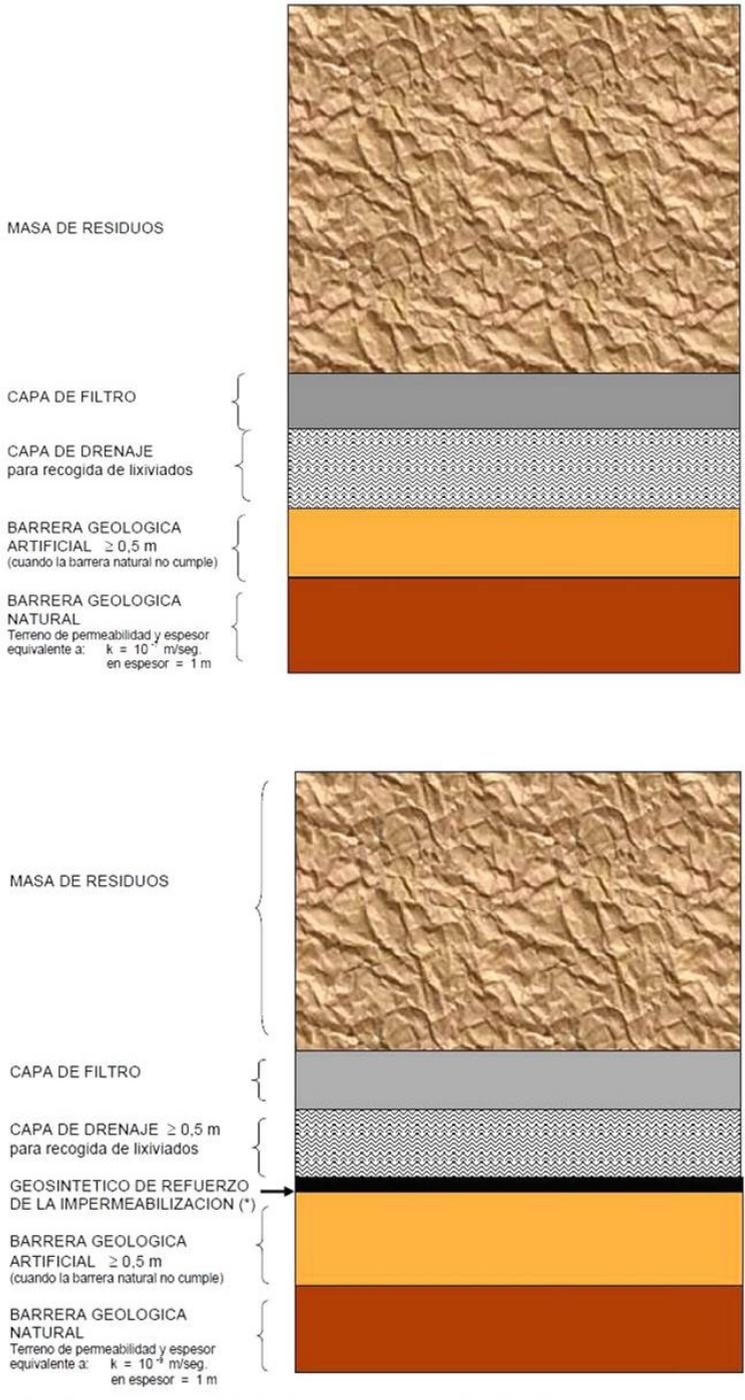
Para garantizar la estanqueidad, los materiales del fondo del hueco deberán cumplir unas condiciones de permeabilidad y espesor cuyo efecto combinado sea equivalente como mínimo al siguiente:

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

Cuando la barrera geológica natural no cumpla las condiciones antes mencionadas, dichas características deberán alcanzarse añadiendo una barrera geológica artificial, que consistirá en una capa mineral de un espesor no inferior a 0,5 m. Además de las barreras geológicas descritas, en el caso de rellenos con residuos no peligrosos, deberá añadirse como refuerzo un geosintético (geomembrana) de impermeabilización. La **Figura 25** muestra las soluciones de referencia para los dos tipos de RCD admisibles en el relleno de huecos mineros.

El órgano competente en minería de la Comunidad Autónoma en donde se ubique el hueco minero podrá, en casos bien justificados, reducir o modificar los requisitos exigidos en las soluciones de referencia, siempre y cuando la autoridad ambiental competente de la Comunidad Autónoma esté de acuerdo y lo refleje en su informe preceptivo del Plan de Restauración. **No obstante, esta restauración con RCD al considerarse una operación de valorización, siempre debe contar con la autorización y condicionantes prescritos por la autoridad ambiental competente de la Comunidad Autónoma antes del inicio de la misma.** Las características adoptadas para las capas de impermeabilización y de drenaje deberán incluirse en la autorización correspondiente, debiendo justificarse mediante un estudio de evaluación de riesgos que demuestre que el relleno del hueco minero plantea un nivel de riesgo aceptable para el suelo, las aguas superficiales y subterráneas. Una situación propicia a la relajación de las exigencias relativas a la solución de impermeabilización es, por ejemplo, la selección de un hueco minero de una explotación de yesos, para el caso de residuos considerados no peligrosos como consecuencia de sobrepasar el límite de sulfatos medidos en el correspondiente ensayo de lixiviación. Con el fin de mantener en un mínimo la acumulación de lixiviados en la base del hueco minero, se dispondrá de un sistema de recogida de lixiviados. Por otra parte, cuando una evaluación basada en la ubicación y configuración del hueco de explotación y en los tipos de residuos que se admitan para el relleno del mismo, muestre que dicha operación de restauración con RCD presenta un riesgo admisible para el medio ambiente, las autoridades competentes podrán decidir que no se disponga del sistema de recogida de lixiviados.

En relación con la barrera geológica natural, los valores especificados del coeficiente de permeabilidad se deben comprobar mediante métodos representativos, atendiendo a la dirección de flujo y a sus características geológicas e hidrogeológicas. Para caracterizar hidrogeológicamente el emplazamiento es necesario acometer los ensayos hidrogeológicos pertinentes que informen sobre la dirección y gradiente de flujo del agua subterránea. Se requerirá la disposición de al menos cuatro sondeos hidrogeológicos en los que se puedan medir estos parámetros. En el caso que se encuentre el agua subterránea a gran profundidad (>10 m bajo



(*) Se dispondrá un geotextil protector encima del geosintético de refuerzo.

Figura 25. Solución de referencia para rellenos con RCD calificados como inertes y no peligrosos (Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001. Anexos I y III)



el fondo del vaso), si se justifica su no afección de forma detallada, no será preciso alcanzarla en el reconocimiento.

En las zonas no saturadas habrá que determinar la conductividad hidráulica mediante ensayos de campo; precisar la porosidad y grado de humedad de los suelos no saturados por medio de ensayos de laboratorio o técnicas geofísicas, así como evaluar la variación espacial y temporal de estas propiedades. En las zonas saturadas habrá que determinar la conductividad hidráulica de todas las zonas saturadas y de los niveles acuíferos identificados por medio de ensayos de campo. Según las características y necesidades habrá que determinar los siguientes parámetros de los acuíferos:

- Permeabilidad.
- Transmisividad.
- Niveles piezométricos y gradiente.
- Dirección y cantidad de flujo.
- Gradiente vertical entre niveles acuíferos.
- Porosidad eficaz o coeficiente de almacenamiento.
- Conductividad hidráulica de los acuitardos por medio de ensayos de campo o laboratorio.
- Calidad del acuífero. Composición química.

Para determinar los parámetros señalados se aprovecharán los sondeos y calicatas ejecutadas, efectuando en ellos ensayos *in situ* hidrodinámicos o bien ensayos de laboratorio sobre muestras, según proceda.

Para la obtención de la permeabilidad se pueden efectuar diversos ensayos:

- Infiltración en sondeos. Aprovechando los sondeos, se pueden ejecutar ensayos *in situ* de infiltración, tanto en zona saturada como no saturada. En este ensayo se medirá la infiltración del agua en los distintos tramos característicos de la columna del sondeo, la superficie de infiltración podrá ser el fondo de la perforación o bien los laterales del tramo ensayado. En la zona donde se sitúe la barrera geológica natural se efectuará un ensayo por metro en cada sondeo. En el resto, como mínimo, se realizará un ensayo por nivel hidrogeológico.
- Permeámetro autoperforador. En niveles muy impermeables (permeabilidad inferior a 10^{-9} m/s), puede ser necesario el empleo de este equipo más especializado. Consiste en la introducción de un volumen de agua limitado, midiendo el tiempo que tarda el agua en infiltrarse. Para mediciones sistemáticas de la conductividad hidráulica en paquetes de arcillas compactadas, que exige la realización de numerosos ensayos *in situ*, se suele utilizar el denominado permeámetro BAT por la rapidez del ensayo (menos de 60 minutos).
- Doble infiltrómetro. Aprovechando las calicatas efectuadas se podrá ejecutar en su fondo este ensayo. Consiste en la medición de la infiltración de un volumen de agua en un infiltrómetro de doble anillo. Los resultados de este ensayo pueden complementar a los otros ensayos de infiltración.

- Ensayos de Laboratorio. Medida de la permeabilidad en ensayo triaxial sobre muestras de suelo obtenidas generalmente de los sondeos. En el tramo correspondiente a la barrera geológica natural se efectuará una determinación cada metro en cada sondeo. Para obtener un valor representativo de la permeabilidad en la barrera geológica natural se dispondrá de un número mínimo de cuatro sondeos. Se indicará la presencia de niveles más permeables u otras que pudieran deteriorar la calidad de dicha barrera.
- Ensayos de bombeo. En el caso de ser necesario se efectuarán en las capas acuíferas ensayos de bombeo. Los valores obtenidos en este ensayo serán los más representativos.

Para la determinación del valor de la permeabilidad de la barrera geológica natural, se aplicará la metodología de ensayos de laboratorio, salvo que se disponga de la técnica *in situ* del permeámetro autoperforador que se admite como el método más exacto. En el caso de una barrera geológica artificial la determinación de laboratorio será el método más apropiado. Con los ensayos efectuados se adoptará un valor característico en el emplazamiento. Si la barrera geológica natural es homogénea (en su permeabilidad) y no presenta fisuración los datos de laboratorio serán representativos. En el caso que no sea así, se adoptará un factor multiplicador (coeficiente de seguridad) que se justificará en cada caso, con el apoyo de los ensayos de campo. Este factor nunca será menor de 10. En el APÉNDICE 2 del Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001 se describen en detalle los métodos aplicables a suelos arcillosos.

Cuando la barrera geológica natural sea suficiente, puede ser necesario un perfilado de la superficie. En el caso contrario, cuando se necesite una barrera artificial, IHOBE (2005) recomienda que se aporte una primera capa de regularización, formada por materiales granulares compactados del tipo zahorras, cuyo objetivo es regularizar la base sobre la que se asentará la primera capa de arcilla. El espesor requerido para la regularización puede ser variable y nunca inferior a 0,10 m. Esta capa permitiría configurar la morfología de detalle y las pendientes locales del sistema.

La barrera geológica artificial deberá tener una densidad seca como la correspondiente al 95% del Ensayo Proctor modificado, como mínimo, y su humedad se encontrará en el intervalo -1, +3 con relación a la humedad óptima del ensayo. Algunos valores recomendables para diversos parámetros de esta capa son: porcentaje de finos que pasa por el tamiz de 0,08 mm superior al 30% en peso, índice de plasticidad entre 10 y 30, y partícula máxima menor de 2 cm. Además, es deseable que el contenido en elementos mayores de 2 mm sea inferior al 40%, y que el contenido en materia orgánica no supere el valor de 1%, en peso. La resistencia al corte de la capa cumplirá las especificaciones requeridas para garantizar la estabilidad de la masa de vertido. Se evaluará que la composición química de los lixiviados no pueda afectar a la estructura de la capa de arcilla. En IHOBE (2005) se recomienda la creación de un terraplén experimental para validar las condiciones de compactación y definir el tipo de maquinaria de compactación a utilizar y su peso, el número de pasadas a realizar y, en su caso, las modificaciones necesarias mediante la variación del contenido en humedad del suelo, de la granulometría o de la composición del suelo. También se recomienda un espesor máximo por tongada de 20 cm después de cada operación de compactación. Es admisible que las soluciones de referencia se puedan sustituir por combinaciones de capas de materiales natu-



rales y sintéticos que proporcionen el mismo nivel de impermeabilización. Por ejemplo, en el caso de no encontrar materiales adecuados cerca del emplazamiento, puede plantearse el empleo de mezclas de suelo-bentonita u otro aditivo, de modo que se alcancen los objetivos de impermeabilidad.

Cuando los residuos sean no peligrosos, la impermeabilización con arcilla debe complementarse con una geomembrana. La geomembrana de impermeabilización es una barrera geosintética polimérica (GBR-P) cuya permeabilidad y capacidad de absorción de sustancias son muy bajas. El material más empleado suele ser polietileno de alta densidad (PEAD), aunque se pueden emplear otros. La barrera geosintética polimérica (GBR-P) deberá disponer de marcado CE con las características que indica la norma UNE-EN 13492 “*Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de vertederos, estaciones de transferencia o recintos de confinamiento secundario para residuos líquidos*”. Para la obtención del marcado CE, este tipo de barrera geosintética deberá cumplir una serie de propiedades físicas, hidráulicas, mecánicas, térmicas, de durabilidad y resistencia química evaluadas mediante ensayos específicos que han sido establecidas en la norma UNE-EN 13492.

La geomembrana deberá ser capaz de soportar su propio peso en los taludes del hueco. Igualmente, deberá tenerse en cuenta la carga que ejerce el residuo a medida que aumenta su altura de apilado. La capacidad de carga de la lámina es función de su espesor, por ello, con objeto de calcular la tensión que puede soportar, deberá reflejarse claramente la densidad de la membrana, ángulo de fricción, espesor y límite elástico. A la hora de efectuar el citado cálculo deberán tenerse en cuenta los posibles asentamientos del residuo. En el diseño se tendrán en cuenta las siguientes condiciones:

- Se tomará un factor de seguridad de 3 a la hora de evaluar la relación entre la tensión máxima y la de trabajo.
- El espesor mínimo, para láminas de polietileno de alta densidad será 2 mm.
- La membrana flexible se colocará directamente sobre la capa de arcilla.
- Sobre la membrana flexible deberá colocarse un geotextil con objeto de ofrecer una protección adecuada frente a punzonamiento.
- Cuando la lámina tenga inserciones de superficie para aumentar el rozamiento, en ningún caso tendrá menor peso/m² que la original del mismo espesor nominal. La resistencia a tracción en dos direcciones perpendiculares no variará en más del 10% respecto a los nominales (del mismo espesor).

La baja o nula disponibilidad de arcillas en las cercanías del proyecto puede aconsejar prescindir de ellas, pudiendo ser apropiado utilizar una capa de arcillas geosintéticas (también denominada “barrera geosintética de arcilla (GBR-C)”). Habitualmente, consta, de una capa de bentonita entre dos geotextiles o bien una combinación de bentonita y geomembrana. El medio de conexión entre ambos geosintéticos es fundamental, al condicionar su resistencia al corte. Se suministrará dicha capa lo más seca posible antes de su instalación (humedad < 20%). Estas barreras geosintéticas de arcilla (GBR-C) deberán disponer de marcado CE, con las características y propiedades establecidas por la norma UNE-EN 13492. Además, será estrictamente necesario que exista una masa de fibras en la bentonita que ligue ambos

geotextiles, impidiendo la pérdida y movimiento de bentonita, y que los geotextiles no estén perforados para que no fluya la bentonita por esos huecos al hidratarse.

4.3.2. Sistemas de drenaje interno

En cuanto a las capas de drenaje, éstas se conforman con una pendiente mínima del 2% (tras los máximos asientos previsibles). El nivel de lixiviados ha de ser siempre inferior al espesor de la capa drenante. Estas capas deben cubrir el fondo y los taludes del hueco minero y su instalación no debe dañar a las capas inferiores, al tiempo que debe resistir las cargas generadas por el relleno. Los elementos de drenaje pueden ser: capas de gravas, geosintéticos de drenaje o geodrenes, y tuberías.

De modo general, la capa drenante consistirá en una capa de gravas. Sus características deben cumplir:

- El coeficiente de permeabilidad hidráulica será mayor de 10^{-2} m/s.
- El contenido de finos (<0,08 mm) no sobrepasará el 5%.
- El coeficiente de uniformidad será menor de tres.
- El tamaño de árido se encontrará preferentemente en el rango de 2 a 4 cm.
- Si su ubicación se hace sobre una geomembrana impermeable, protegida con geotextil, el árido que esté en contacto con ella cumplirá las condiciones de resistencia a punzonamiento.

La autoridad competente puede autorizar soluciones de diseño distintas de la de referencia. Por ejemplo, se pueden emplear geodrenes, los cuales son geosintéticos simples o compuestos diseñados para la evacuación de fluidos. Estos geodrenes deberán tener marcado CE según la norma UNE-EN 13252 “*Geotextiles y productos relacionados. Características requeridas para su uso en sistemas de drenaje*”. Probablemente, en los taludes de un hueco minero (sobre la impermeabilización) resulte más sencillo emplear este tipo de geosintéticos que construir una capa drenante a base de gravas. Se tendrá en cuenta la presión vertical sobre el geosintético cuando se evalúe la capacidad hidráulica, así como la potencial precipitación de los efluentes en su interior, que supondrá una disminución de su capacidad hidráulica.

Otro de los elementos fundamentales del drenaje inferior al relleno, son las tuberías de drenaje. Se recomienda la colocación de tuberías ranuradas uniformemente repartidas en la capa de drenaje para la extracción del lixiviado, cumpliendo los siguientes requisitos:

- La pendiente mínima de dichas tuberías será del 2% después de los asentamientos previsibles.
- El diámetro mínimo de las conducciones de lixiviados debe ser de 150 mm.
- Las tuberías se distanciarán aproximadamente 20 m como máximo unas de otras, minimizándose su longitud.
- El material con que esté fabricado el tubo garantizará que el sistema de drenaje no perderá su funcionalidad debido a las acciones físicas, químicas o biológicas (durante la fase de relleno, clausura y posclausura).



- Los registros mantendrán un espaciado que permita la limpieza de las instalaciones de los canales de lixiviado. El acceso a la red de las conducciones de drenaje deberá ser posible desde ambos extremos de los colectores de drenaje.

El sistema de drenaje interno del relleno estará conectado con tuberías de evacuación que llevarán los lixiviados hasta la balsa de lixiviados (activa durante la etapa de relleno del hueco) o bien a pozos de registro. Sus características han de ser las mismas que las especificadas en el punto anterior, sólo que serán conductos ciegos.

Tanto los materiales de drenaje como las tuberías de evacuación deben ser protegidos mediante un material filtrante, contra la invasión de partículas finas que puedan ocasionar su colmatación. Para ello deberá usarse un material con menores aberturas que las de los materiales de drenaje, de modo que cumpla la condición de filtro. Los materiales de filtro pueden ser de dos tipos: geotextiles o arenas. Es más recomendable acomodar las tuberías en arena que recubrirlas con geotextiles.

Los geotextiles tienen la ventaja de que ocupan un espacio vertical muy reducido, son fáciles de instalar y no sufren alteraciones al trabajar bajo carga. Los geotextiles están formados por fibras o filamentos poliméricos. Los espacios entre las fibras o filamentos deben ser suficientemente amplios para permitir el paso del flujo de líquido y lo bastante pequeños para evitar su atasco por partículas que penetren en ellos. Las características principales de estos materiales serán:

- Deberán ser químicamente resistentes al lixiviado.
- Los geotextiles deberán ser suficientemente resistentes para reforzar las aperturas de los materiales de drenaje a los que protegen.
- La resistencia al desgarramiento y a la perforación serán, al menos, el doble que las de las membranas a las que protegen.

Los geotextiles tienen que tener marcado CE, y deben haber sido evaluadas las propiedades para filtro que marca la norma armonizada UNE-EN 13252.

En el diseño del filtro granular con arena se requiere conocer la distribución granulométrica de las gravas de drenaje y de las partículas que puede contener el lixiviado. Los límites de granulometría de la arena para alcanzar un flujo y unas retenciones adecuadas han de ser:

- Flujo adecuado: el D_{85} (tamaño de malla por el que pasa el 85%) de la arena debe ser mayor que cinco veces el D_{15} (tamaño de malla por el que pasa el 15%) de las gravas drenantes.
- Retención adecuada: el D_{15} de la arena debe ser menor que cinco veces el D_{85} de los finos arrastrados por el lixiviado.

Se valorará la oportunidad de intercalar capas de drenaje operacionales. En este caso es fundamental considerar los potenciales asientos del nivel de apoyo, que pueden afectar la operatividad del drenaje, así como la impermeabilidad de la barrera. Sus especificaciones serán las mismas que se han comentado. El espesor de la capa de drenaje será como mínimo de 0,3 m.

En el caso de rellenos con RCD, y siempre que una evaluación basada en la ubicación y configuración del hueco minero, así como en el conocimiento de los residuos que se admiten, muestre que éste presenta un riesgo admisible para el medio ambiente, las autoridades competentes podrán decidir que no se disponga de un sistema de recogida final de lixiviados, tal y como se ha comentado anteriormente. En cualquier otro caso, los lixiviados y todas las aguas que entren en contacto con los residuos se tratarán antes de su vertido, de modo que cumplan los límites de vertido a cauce fijados en la autorización. Para ello, es necesario recogerlos balsas de almacenamiento (durante la fase de construcción) o pozos de registro (durante la fase de mantenimiento). En el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001 se detallan algunas recomendaciones sobre las características de los materiales a emplear para la construcción de este sistema final de recogida de lixiviados.

Todos los aspectos anteriormente tratados, relativos a las características materiales de los sistemas de impermeabilización y drenaje deberán detallarse en el correspondiente Plan de Restauración (Parte II: Medidas previstas para la rehabilitación del espacio natural afectado por la explotación de recursos minerales). En el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001 se describen consideraciones y condiciones que deben cumplir los materiales en el momento de su puesta en obra, así como sobre los preparativos para la compactación, el proceso propio de compactación, las normas de referencia sobre geosintéticos, la correcta colocación, soldadura y anclaje de geomembranas, etc.

4.3.3. Aspectos constructivos de los sistemas de impermeabilización y drenajes internos

Se comentan a continuación algunos aspectos relativos al proceso de construcción del sistema de impermeabilización interno y de drenaje de los huecos receptores.

Cuando no se cumplan los criterios de barrera geológica natural y sea preciso construir una capa impermeable acorde con las prescripciones normativas, puede ser necesario preparar el terreno, previamente, mediante una capa de regularización. Esta capa podría construirse con el mismo material impermeabilizante, pero en aquellos huecos de fondo muy irregular, llevaría a un aumento significativo de las necesidades de dicho material. Por ello parece más razonable combinar un movimiento interno de materiales de la propia explotación minera (restos de material explotado, derrubios de talud, y materiales excavados durante el saneamiento) con un aporte de material de regularización externo. Idealmente, con este conjunto de operaciones debe obtenerse en la parte más superficial una capa uniforme de 0,10 m de espesor de materiales granulares tipo zahorra compactada, sobre la que se asentará la primera capa de arcilla.

La primera tongada de arcilla debe extenderse de tal modo que se impida la circulación de camiones sobre ella. Lo más adecuado será extenderla mediante buldócer de cadenas. Las nuevas tongadas se deben extender empujando sobre los nuevos vertidos, volcados al frente, sin circular sobre la tongada inferior. La compactación de las capas de material impermeabilizante debe hacerse con compactadores tipo “pata de cabra”, que penetren totalmente el espesor de cada tongada (de unos 20 cm), con un peso mínimo de 18 t. Para mezclas tipo suelo-bentonita los compactadores vibratorios convencionales pueden ser adecuados. Como se mencionó, interesa ejecutar una pista o terraplén de ensayo. So-



bre taludes, siempre que se supere el ángulo de 3H:1V (18-19°), convendrá realizar la compactación sobre capas horizontales apoyadas sobre el talud. Para los taludes interiores de la explotación minera, que normalmente serán de mayor inclinación, puede ser interesante el sellado mediante caballones de arcilla apoyados en el talud. El primero de ellos puede construirse mientras se inicia la construcción de la capa de drenaje haciéndolo de una altura igual al espesor de la misma. Los sucesivos recrecimientos de los caballones de arcilla y de materiales drenantes apoyados en los taludes se pueden hacer progresivamente coordinados con el proceso de relleno, teniendo en cuenta que para residuos no peligrosos es necesario intercalar una geomembrana entre los cuerpos impermeable y drenante. La colocación de la geomembrana en taludes debe ser un proceso independiente de la del fondo. La geometría del hueco es importante para definir la anchura del primer caballón de arcilla, la cual condiciona toda la geometría del sistema de impermeabilización y drenaje en la zona de taludes interiores.

Convendrá estudiar en qué medida el empleo de geocompuestos bentoníticos y geocompuestos drenantes, en sustitución de materiales granulares naturales, puede facilitar el proceso constructivo del sistema de impermeabilización y drenaje en los taludes de la explotación minera.

El sistema constructivo mediante caballones de arcilla, también debe emplearse para construir el cierre del hueco, cuando el hueco minero esté abierto por algún lado. En tal caso, los taludes externos que conformarán dicho cierre del relleno, se deben construir con una inclinación máxima hacia el exterior del relleno de 3H:1V (18-19°), sin incluir bermas. Idealmente, deben ser de menor inclinación, para minimizar la posibilidad de deslizamiento de las capas de suelo que se instalen sobre ellos. Además, el proyecto de relleno se justifica como medio para facilitar la integración paisajística y ésta, a su vez, se ve enormemente posibilitada cuanto menor sea la pendiente. En huecos situados en laderas de pendiente mayor, podría estar justificada una mayor inclinación de taludes externos, pero, aun así, no resulta conveniente superar el máximo anteriormente recomendado. Hay que tener en cuenta que, como ya se comentó, con pendientes naturales superiores a 30% las tareas de implantación de vegetación pueden ser ya bastante complicadas.

Una vez finalizada la fase de sellado del fondo del hueco, se iniciará la construcción del sistema de drenaje, compuesto por una capa de gravas y arenas que englobará unos sistemas de tuberías. Las tuberías se colocarán formando preferentemente un esquema en espina de pez, distanciadas 20 m como máximo unas de otras. Lo ideal es que tengan un único punto de salida del hueco minero, donde existirá una arqueta de registro, en la que se conectarán con los drenajes externos hasta una balsa de lixiviados (en actividad durante la falle del relleno del hueco minero). Lo lógico es que ese punto se ubique en la mínima cota del perímetro del hueco. Cuando el hueco esté totalmente cerrado por un macizo rocoso natural, se buscará la salida en el punto de menor diferencia de cota entre el fondo del hueco y el terreno natural circundante. En ese punto, IHOBE (2005) recomienda rematar la red de drenaje de aguas infiltradas en un pozo recrecible (pozo de control de registro), el cual permita el muestreo de las aguas infiltradas y, posteriormente, proceder al relleno del mismo hasta alcanzar la altura de la salida por gravedad.

4.3.4. Sistemas de captación, tratamiento y control de lixiviados: balsas de almacenamiento y pozos de registro.

Las balsas de almacenamiento estarán en funcionamiento durante la etapa de relleno del hueco minero, previa a su sellado, en previsión de que durante dicho periodo de actividad la entrada de aguas de pluviometría será mayor. Posteriormente dicha estructura podrá ser desmantelada, dado que una vez el vertedero resulte sellado la cantidad de lixiviado generada resultará mínima, pudiendo ser gestionada a través del pozo de registro.

Este tipo de instalación se deberá diseñar para la recepción de un volumen suficiente de lixiviados en cualquier época del año de acuerdo a las máximas estimaciones pluviométricas. Su volumen estará duplicado para facilitar el mantenimiento y prevenir fallos de operación. Los cálculos del dimensionamiento mínimo de la balsa de lixiviados se justificarán en función de la cantidad de materia orgánica, pluviometría, evapotranspiración, recubrimientos, etc. También se calcularán los riesgos de una posible avenida de tormentas, de 24 h, para periodos de recurrencia de cómo mínimo 25 años, dotando a la balsa de la superficie libre suficiente para absorberlas. Los cálculos del dimensionamiento también contemplarán la posibilidad de tratamiento de los lixiviados y las restricciones en las distintas operaciones estacionales. Este tipo de infraestructura deberá cumplir con los siguientes requerimientos, según el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001:

- Los costados y el fondo se recubrirán de un material sintético impermeabilizante cuyas características deberán ser similares a la geomembrana del fondo del vaso de vertido.
- Se instalará un sistema de drenaje perimetral y se diseñará un sistema de inspección para la detección de cualquier fuga o filtración al terreno.
- La balsa podrá cubrirse, bien de manera permanente, o bien de forma temporal, si las condiciones meteorológicas lo requieren.
- El sistema de detección de lixiviados se localizará en la base de las balsas de almacenamiento para determinar la profundidad de los lixiviados y la de los líquidos residuales.

En esta Guía se recomienda siempre el sellado del relleno con RCD, especialmente cuando son RCD no peligrosos. De esta forma la generación y volumen de lixiviados será mucho menor, así como las exigencias de mantenimiento de las instalaciones para la captación y tratamiento de dichos efluentes. De esta manera una vez se proceda al sellado del vertedero se podrá desmantelar dicha balsa, reconduciendo el drenaje hasta el pozo de control de registro que quedará como puntos de acceso al posible lixiviado remanente. A partir del sellado del hueco se establecerá un **control de la cantidad de lixiviado generado y su composición** en el propio pozo de registro.

Tanto las aguas almacenadas en la balsa durante la fase de construcción como las aguas de los pozos de registro durante la fase de mantenimiento recibirán tratamiento, si se considera necesario, para cumplir los límites de vertido a cauce fijados en la autorización.

4.4. Fase preparatoria. Obras auxiliares

Las circunstancias concretas de cada hueco minero determinarán el tipo de obras auxiliares que puede ser necesario llevar a cabo. Además de los equipamientos de servicios, cerra-



mientos de instalaciones asociadas al control de accesos y recepción de los residuos, es muy probable que en todos los casos se requiera un acondicionamiento de los propios viales de acceso y pistas interiores, así como un sistema de control de la escorrentía superficial exterior al hueco.

El diseño y construcción, o el acondicionamiento y reparación, que se requieran para el conjunto de pistas y accesos debe considerar lo establecido en la ITC 07.1.03 “Desarrollo de labores” (BOE núm. 103, de 30 de abril de 1990) en lo referente a estas infraestructuras: anchura, pendientes, curvas y conservación. Hay que tener en cuenta que el trazado de las pistas interiores debe garantizar la llegada de los camiones a todos y cada uno de los puntos de vertido en la fase de relleno, así como el espacio necesario para efectuar maniobras. Los trazados deberán quedar reflejados en el mapa topográfico básico. Para los accesos es interesante aportar perfiles acotados. Los viales presentarán siempre una anchura mínima de 10 m, una pendiente longitudinal máxima del 10% y una pendiente transversal del 2% hacia cunetas de recogida y drenaje de aguas pluviales, de forma que se permita la circulación en periodos de lluvias (IHOBE, 2005).

Debe evitarse o minimizarse la entrada de agua procedente de la escorrentía generada en el terreno circundante al hueco minero. Esto puede redundar en una reducción de la posibilidad de generación de lixiviados, una mejora de las condiciones de estabilidad, mayor facilidad de operación de la maquinaria durante el proceso de relleno, y una reducción de los procesos erosivos en fases posteriores a la clausura. El control de esa escorrentía se consigue mediante canales perimetrales o de guarda. Los canales de guarda (tal y como suelen denominarse en el ámbito minero) son aquellos canales diseñados y calculados para impedir la llegada de escorrentía superficial desde terrenos aledaños al hueco minero. Su objetivo, por tanto, es interceptar esta escorrentía y conducirla hasta la red natural de drenaje en un punto en el que ya no represente un problema para la instalación. Parecida consideración merece el conjunto de bermas y bancos de la explotación minera que pudieran quedar al margen del relleno, cuando sea el caso, o cuando por el gran tamaño del hueco no vayan a ser rellenados hasta pasado un tiempo prolongado. En los taludes externos al hueco, que formarán el cierre del mismo, puede interesar que las bermas tengan una contrapendiente que permita la recogida del agua de la misma en la línea de unión con los caballones superiores, donde han de situarse los canales de drenaje. Dichos canales han de tener salida por los dos lados del hueco, por lo que, desde la mitad aproximada de la línea de unión caballón-berma, ha de darse a los mismos pendiente hacia los laterales.

Sobre el plano que muestra la hidrografía superficial y la delimitación de cuencas vertientes deben dibujarse los trazados de los canales de guarda y cunetas que sean necesarios. Se deben incluir también los drenajes asociados a todas las superficies individualizadas (sectorizadas) correspondientes a superficies generadoras de escorrentía: instalaciones, pistas y accesos, etc. Como es sabido, las obras de control de la escorrentía se diseñan para una determinada vida útil, dependiendo de la función que debe cumplir la obra. Es recomendable diseñar los citados canales de guarda exteriores para una vida útil de 50 años. El resto de canales y cunetas necesarios se pueden diseñar para periodos de retorno de 25 años. Para el cálculo hidrometeorológico de los caudales a desaguar se recomienda seguir la Instrucción de carre-

teras 5.2-IC “Drenaje superficial” (2016). Todas las infraestructuras de drenaje que guarden una relación directa con el hueco minero, al igual que las que se destinen a la recogida de lixiviados, deben contar con caudalímetros que permitan, junto con otros datos, ir refinando un modelo conceptual de balance hídrico para el relleno.

Además de los planos es importante diseñar todas las singularidades que puedan ser necesarias para la conducción segura de los caudales hasta el punto o puntos de conexión con la red de drenaje natural. Debe cuidarse muy especialmente el diseño de estructuras de disipación de energía. El diseño de estas estructuras, al igual que para los canales en general, debe estar orientado a la larga duración y mínimas necesidades de mantenimiento. Dónde sea necesario, deben incluirse estructuras de protección de los lechos de cursos de agua, así como trampas de sedimentos o balsas de decantación, donde se considere oportuno. Deben incluirse planos de detalle de todas las estructuras hidráulicas.

El diseño y planificación de las operaciones que se requieren para la construcción de pistas permanentes, canales de conducción, diques, terrazas, balsas de decantación, cerramientos, etc. deben estar íntimamente ligados a la rehabilitación ecológico-paisajística y, es más, los criterios de integración ecológica deben ser aplicados también a las obras de ingeniería que se requieran, pudiendo desarrollarse desde fases tempranas del proyecto.

4.5. Fase de relleno y clausura

En esta fase se incluyen todas las operaciones que se desarrollan durante el relleno del hueco minero hasta su clausura, encaminadas a garantizar una adecuada disposición de los residuos admitidos.

4.5.1. Procedimiento y criterios de admisión de RCD para el relleno del hueco minero

El proceso se iniciará con el Protocolo de Aceptación y la identificación de los residuos, previa a su admisión. **No se podrán admitir RCD que no se acompañen de un certificado que acredite que los mismos han sido sometidos a un tratamiento previo u operación de valorización por un Gestor Autorizado de RCD.** Solo se admitirá para el relleno del hueco minero RCD pétreos limpios de impropios (plásticos, madera, metales, etc.) y otros elementos contaminantes (materia orgánica, sustancias peligrosas, etc).

La producción de áridos reciclados en nuestro país presenta una gran variedad de granulometrías. De acuerdo con la “Guía española de áridos reciclados procedentes de RCD” (GERD, 2012), las principales fracciones granulométricas producidas por las plantas de reciclaje fueron las siguientes: a) fracción todo uno, que podía alcanzar un tamaño máximo de 100 mm en áridos mixto-cerámicos y de 50 mm en los de hormigón; b) fracción fina de tamaño 0-5 mm; c) fracción media entre 4 y 80 mm; d) fracción gruesa entre 4 y 250 mm en áridos mixto-cerámicos; y entre 32 y 200 mm en áridos de hormigón. Según dicha guía, el tipo de áridos reciclados empleados en rellenos para restauración de espacios degradados era fundamentalmente mixto-cerámico de fracción todo uno y media (gravilla y grava).

En esta “Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)” se recomienda para el relleno de los huecos mineros de RCD la



fracción “todo uno” hasta un tamaño máximo de 100 mm, considerándose tal vez las fracciones de 0-20 mm o de 0-40 mm las más óptimas. Los RCD de precibado mixto-cerámicos y de hormigón cumplen dichas condiciones por lo que constituye un material apto para su uso en el relleno de huecos de explotación minera.

4.5.2. Procedimiento de relleno del hueco con RCD

Uno de los objetivos necesarios en esta fase será limitar la producción de lixiviados. Esta restricción se conseguirá no solamente fijando el porcentaje de humedad de los residuos que son admitidos, sino la cantidad absoluta de agua que entre en el hueco y relleno. Además de estas precauciones, debe minimizarse en lo posible el contacto de las aguas de lluvia con los residuos. El relleno se realizará, por tanto, cuidando especialmente la cubrición de los residuos y disponiendo éstos en capas controlables de forma que sea posible realizar esta cubrición con facilidad, incluyendo tanto la parte superior como el frente de los mismos.

En el caso de requerirse la impermeabilización de los taludes, las labores de relleno del hueco se deberán realizar necesariamente en fases secuenciales. Dichas fases contarán con alturas de entre 2,5 m y 3,5 m; y se iniciarán siempre con el vertido del material impermeabilizante cubriendo el talud (junto a la instalación de capas de regularización, capas drenantes, etc.), para proceder posteriormente al vertido del material de relleno desde el talud hacia el interior del hueco. No será necesario esperar al relleno completo del hueco en la correspondiente fase para proceder al levantamiento de la siguiente; bastará esperar a que el material con que se haya rellenado la fase anterior haya ganado integridad estructural suficiente para garantizar un buen soporte para el inicio de la siguiente fase, nuevamente con la impermeabilización del talud (**Figura 26**).

De modo general, en todas las fases, los materiales deberán depositarse en tongadas de espesor entre 20 y 50 cm, aunque se recomienda 30 cm, una vez compactadas. La compactación puede realizarse, en principio, mediante rodillos lisos; debiéndose alcanzar en el material una densidad Proctor del 95% (se recomienda la construcción de una pista de ensayo para fijar estos aspectos de acuerdo con lo establecido por el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001). Las tongadas, además, deberán quedar con una pendiente transversal que facilite la evacuación de las aguas pluviales y evite la creación de puntos bajos por donde se pueda infiltrar el agua.

Tal y como se ha señalado anteriormente, durante todo el proceso de relleno, se cuidará especialmente la gestión de las aguas superficiales de escorrentía y las aguas que hayan podido estar en contacto con los residuos y los lixiviados, de modo que se optimice su tratamiento en función de su calidad. Por otra parte, las aguas pluviales que hayan entrado en contacto con los residuos se recogerán y se conducirán a la balsa correspondiente para su tratamiento de acuerdo con la calidad que presenten, aunque se tenderá a reducir al máximo esta posibilidad. Cuando sea totalmente preciso minimizar esta situación, se puede plantear acciones extraordinarias como cubrición inmediata de los residuos con tierras, láminas lastradas, etc.

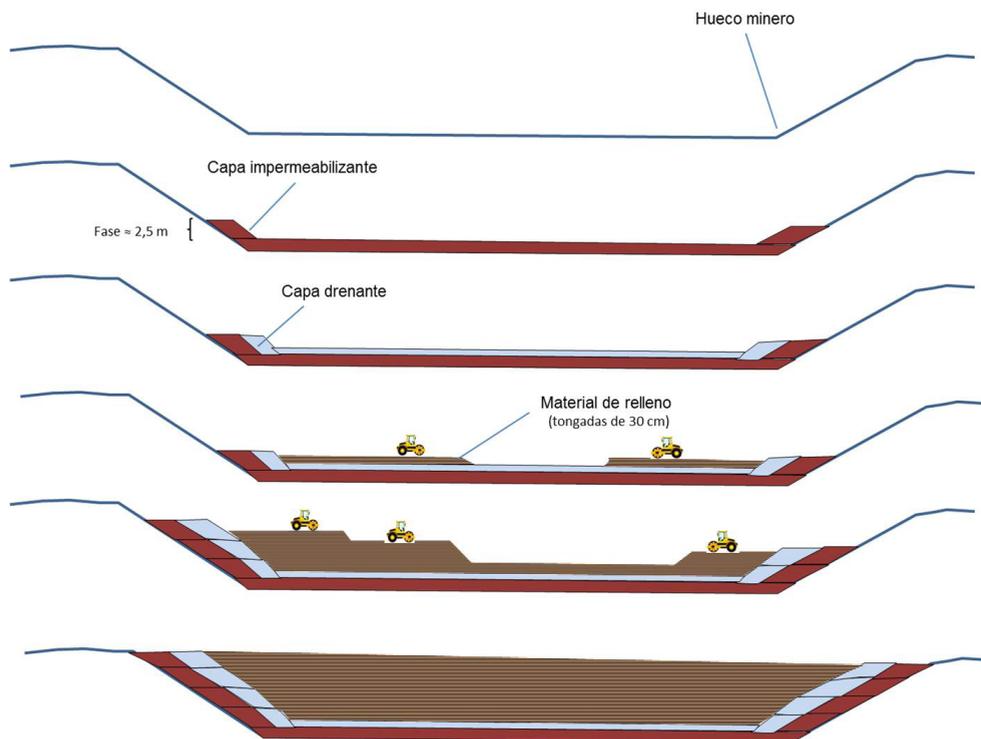


Figura 26. Proceso de relleno del hueco minero con impermeabilización de huecos y taludes del mismo

Asimismo, durante el extendido de la primera capa de residuos a disponer se cuidará especialmente que se empleen los equipos adecuados y que se tengan las protecciones precisas para no dañar los elementos presentes en la impermeabilización de fondo. Esta acción se extenderá a las celdas que estén en contacto con los taludes excavados del hueco minero.

El talud de relleno, en sus límites no confinados por el hueco minero permitirá su ejecución con adecuada seguridad, considerando su estabilidad y la erosión de las aguas de escorrentía. Como se comentó, no debe superar nunca el valor de 18° , siendo preferible limitarlo a 15° para facilitar las tareas de rehabilitación. Conforme se vaya incrementando la altura de relleno, es conveniente disponer bermas, con un máximo desnivel entre ellas no superior a 20 m, de modo que mejore la estabilidad de la masa de vertido y se facilite el acceso. Su anchura será superior a 4 m.

De acuerdo con lo especificado en el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001, el conjunto formado por el terreno y el relleno del hueco minero será una estructura estable e íntegra a lo largo del tiempo, que garantizará la estabilidad de la masa de residuos. Del mismo modo los asentamientos previstos, tanto en la capa de impermeabilización como en el sellado, han de ser compatibles con su integridad, función impermeable y drenante, sobre todo cuando el terreno de apoyo sea muy deformable. Respecto a la estabilidad se efectuarán al menos las siguientes comprobaciones:



- Estabilidad del conjunto relleno del hueco minero-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 relleno del hueco minero – impermeabilización de fondo, si procede, por deslizamiento entre distintos elementos de la capa impermeable.

Para estas comprobaciones se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- Se evaluará la resistencia al corte de los residuos considerando su origen. De ser preciso se efectuarán ensayos a gran escala.
- Se considerará el ritmo de relleno, sobre todo en materiales impermeables, que puede generar presiones intersticiales que se introducirán en la evaluación.
- La resistencia al deslizamiento entre geosintéticos y geosintéticos-suelo empleada en el cálculo se comprobará de modo obligatorio, con un número suficiente de ensayos, con los geosintéticos específicos que se vayan a utilizar en la obra. Del mismo modo se efectuará la comprobación de la capacidad drenante de un geocompuesto de drenaje, en función de su nivel de carga en dirección perpendicular al plano de drenaje.
- Los parámetros resistentes del resto de materiales empleados en el cálculo estarán igualmente justificados a partir de los reconocimientos y ensayos pertinentes. Dado que el comportamiento tensodeformacional es muy diferente para los distintos materiales (residuos, geosintéticos, terreno) se justificarán los parámetros resistentes a emplear en función de los niveles de deformación estimados, por lo que se podrán emplear distintos parámetros dependiendo del cálculo efectuado.

Para los cálculos de estabilidad se deben seguir las prescripciones del Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001 en lo referente a coeficientes de seguridad y análisis de hipótesis de sismicidad y obturación de drenajes. En particular, los coeficientes de seguridad mínimos aplicables variarán desde 1,3 para residuos inertes y riesgo bajo (sólo posibles daños materiales), hasta 1,5 en residuos no peligrosos y riesgo medio (posibles daños significativos para el medio ambiente).

4.5.3. Fase de clausura

El sistema de clausura o sellado final estará formado por una serie de capas de materiales seleccionados con el objetivo de reducir el periodo en el cual el relleno puede suponer un riesgo significativo para las personas y el medio ambiente, e inducir procesos de estabilización deseables sobre la masa de residuos. El diseño del sistema de clausura y, en su caso, sellado de la superficie del relleno responderá a las características de los residuos, las condiciones de compactación, la climatología, el uso previsto para el terreno ocupado por el hueco una vez rellenado, la impermeabilización de fondo, y las condiciones químicas de los suelos y aguas en el entorno. Obviamente, al igual que ocurría para los sistemas de impermeabilización y drenaje, los órganos competentes serán los que autoricen la propuesta de un determinado tipo de clausura o sellado. Cuando se trata de RCD inertes y, sobre todo, en un entorno cuyas características químicas no corran riesgo de verse afectadas por los lixiviados que pudieran

generarse, será posible prescindir de capas de regularización, impermeabilización y drenaje. En tal caso, sería admisible recubrir sólo los residuos con una capa de cobertura destinada a ser el soporte de la vegetación o el uso del suelo más conveniente. Dicha capa final debe tener una ligera pendiente en la superficie, de modo que permita el desalojo de escorrentía hacia vías de drenaje construidas sobre ella y conectadas con el resto de drenajes donde sea más conveniente. En otros casos, la solución de diseño adoptada puede basarse en las propuestas como soluciones de referencia para residuos inertes o residuos no peligrosos con contenido en materia orgánica menor o igual al 15%, recomendadas en el Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001. En estos casos, la capa drenante deberá tener una base ligeramente inclinada para permitir el flujo de agua hacia sistemas de drenaje internos conectados con los drenajes exteriores en los puntos donde sea más conveniente. Para aquellas situaciones en las que durante el proceso de relleno se produce un aprendizaje sobre la generación real de lixiviados y sus características, sería aceptable modificar la solución final de clausura y sellado aplicando la filosofía conocida como manejo adaptativo (Pastorok *et al.*, 1997), basada en el plan de control y vigilancia. Para ello, será necesaria la obtención de datos de lluvias, caudales, medidas piezométricas, calidad de aguas, etc. Ya se mencionó que lo ideal sería que la instalación dispusiera de una estación propia de registro automatizado de datos meteorológicos que permitiera aplicar, de manera preferiblemente automatizada, una metodología para calcular el balance hídrico general. Cuando no sea así, la correlación de datos obtenidos en observatorios cercanos con los caudales producidos puede dar lugar a un mejor conocimiento del balance hídrico teórico. Este último, junto al adecuado control de datos de caudales y calidades de agua, proporcionarían la base para justificar, si se considera conveniente, la modificación del diseño de las capas de clausura y sellado, facilitando a las autoridades competentes los elementos de juicio suficientes para autorizar dicha modificación.

4.6. Técnicas y medidas correctoras para la rehabilitación de los huecos mineros

En este apartado se recogen los aspectos relacionados con la estabilización y acondicionamiento de la cobertura final del relleno tras las clausura o sellado del mismo; así como los objetivos y posibles usos finales de la rehabilitación del hueco minero.

4.6.1. Estabilización y acondicionamiento de la cobertura final del relleno

El relleno del hueco con RCD supone la recuperación de la topografía original en gran medida, por lo que la rehabilitación y la integración paisajística serán mucho más sencillas, siempre y cuando las condiciones de suelo tengan un mínimo de calidad. En términos generales, la estabilización de las capas de clausura y/o sellado mediante vegetación es el medio más económico, además de que proporciona una capacidad de evapotranspiración beneficiosa desde el punto de vista de la minimización de entradas de agua hacia cuerpo del relleno. Para el establecimiento de vegetación han de crearse capas superiores de cobertura pensadas para permitir el establecimiento de la vegetación, que deben superar 1 m de espesor en el caso de los residuos no peligrosos.

Como se mencionó, la inspección del hueco minero debe proporcionar información sobre todos aquellos materiales de desmonte, estériles mineros, acopios de recurso, acopios de



horizontes edáficos o de suelos, que pudieran estar presentes en el hueco minero seleccionado. Los materiales procedentes de la excavación por debajo de los perfiles edáficos no tendrán estructura edáfica y, normalmente presentarán graves limitaciones en cuanto a la disponibilidad de nutrientes. Las características físicas y químicas de todos ellos pueden ser más o menos favorables, desde la perspectiva de emplearlos como sustitutos de suelo. En el mejor de los casos, existirán acopios de suelo (“tierra vegetal”) que llevarán años como tales. Lo normal es que estos materiales edáficos hayan sido sometidos a mezcla de horizontes al ser retirados y, casi con seguridad, habrán visto alterada su estructura e integridad físicas. Es seguro además que, durante los períodos de almacenamiento, pueden haber tenido lugar en mayor o menor grado los procesos siguientes: pérdida de materia orgánica; interrupción de los procesos biológicos; severos disturbios en las poblaciones de fauna y microflora; paulatina reducción de la viabilidad de semillas, propágulos, esporas y estructuras de resistencia; reducción de la mineralización de nutrientes y pérdidas por lavado, desnitrificación, etc. Por ello, a pesar de todos los inconvenientes enumerados, todos aquellos materiales no edáficos con cierto potencial para servir como cobertura del relleno y soporte de la vegetación deben ser considerados. Ciertamente, aunque muchos de los trabajos de rehabilitación realizados sobre terrenos mineros parten de la reposición de tierra vegetal, muchos otros se han realizado prescindiendo de ella. Esto viene a significar que, en ocasiones, es posible proporcionar mejoras al material de partida, de modo que sea capaz de realizar las funciones que realiza un suelo. Por tanto, las propiedades de los materiales geológicos no consolidados, capas de suelo, o ambos, que se utilicen para crear una secuencia vertical de mayor o menor calidad y espesor, determinarán las posibilidades de utilización futura del terreno y su capacidad para sostener vegetación. En cualquier caso, si no se cubren las necesidades con los materiales que puedan estar presentes, los materiales para la cobertura final tendrán que ser importados. Cualquier material susceptible de ser utilizado para construir la cubierta final se debe valorar en función de cuatro necesidades básicas para las plantas (Bradshaw, 1985): propiedades físicas que permitan el enraizamiento; adecuado suministro de agua; adecuado suministro de nutrientes, y pH apropiado y ausencia de toxicidad. Para ello, es recomendable estudiar los siguientes parámetros:

- Porcentaje de elementos gruesos (>2 mm).
- Porcentaje de humedad después de secado en estufa.
- Análisis granulométrico de la fracción tierra fina (tamizado en seco, más método de la pipeta de Robinson o automatizado) para determinar las fracciones según criterio USDA-SCS.
- Contenido en materia orgánica.
- pH en suspensión suelo/agua 1:2,5 ó 1:1.
- Capacidad de intercambio catiónico.
- Cationes ácidos de cambio (acidez cambiabile).
- Cationes básicos de cambio (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ de cambio).
- Prueba previa de salinidad (conductividad eléctrica en extracto suelo/agua 1/5).

- Determinación de la capacidad de retención de agua disponible: capacidad de retención de humedad a 33 kPa (0,33 atm) y 1500 kPa (15 atm) en la fracción tierra fina.
- Contenido en sulfato soluble medido mediante el ensayo EN 12457 4.
- Contenido “total” en elementos traza medido por digestión ácida.

Es recomendable aplicar la batería de ensayos analíticos cada 5.000 m³ de material o en cada cambio de tipo de material. Los materiales que se analicen deben ser evaluados y comparados con los datos obtenidos en los suelos del entorno cercano. Esta comparación será la que determine la idoneidad de los materiales, sin perder de vista que algunas propiedades pueden ser mejoradas empleando prácticas agronómicas, tales como la enmienda orgánica, la fertilización, el abonado en verde, etc. Salvo cuando la comparación con los valores obtenidos en suelos del entorno justifique su aceptación, deberán rechazarse aquellos materiales con:

- Más de 60% de elementos gruesos.
- Textura USDA excesivamente arenosa, arcillosa o limosa.
- pH < 5,5 o pH > 8,5.
- Menos de 1% de materia orgánica.
- Saturación del complejo de cambio por Al superior al 60%.
- Saturación del complejo de cambio por Na superior al 15%.
- Capacidad de intercambio catiónico inferior a 10 cmol(+)/kg.
- Salinidad como máximo ligera.
- Máximo contenido en sulfatos solubles de 1000 mg/kg medidos mediante el ensayo EN 12457 4.
- Contenido en elementos traza superior al Nivel Genérico de Referencia establecido para “otros usos” en la Comunidad Autónoma correspondiente.

En determinados casos, y siempre con la autorización de la autoridad competente, pueden usarse RCD inertes como materiales básicos para la construcción de las coberturas edáficas, preferiblemente en capas no superficiales. Para ello, han de tener propiedades adecuadas y cumplir todos los requisitos anteriores (**Figura 27**)

Cada vez está más extendida la opinión de que en aquellos terrenos degradados en los que no existe un elevado riesgo de erosión, y en los que puede estar presente un razonable banco de semillas o yemas vegetativas, es preferible que la vegetación se recupere o evolucione por sí misma. Sin embargo, muy probablemente, en las coberturas edáficas finales a emplear en un proyecto de relleno de un hueco minero ese banco no estará presente o será insuficiente, por lo que, siempre que se busque obtener una cubierta vegetal, será necesario recurrir a la siembra o plantación. Independientemente del objetivo final a alcanzar con la rehabilitación, la implantación rápida de cubiertas herbáceas para el control de la erosión ha sido la principal justificación histórica de las siembras (o hidrosiembras) en procesos de rehabilitación de



Figura 27. Acopio de materiales de rechazo del precribado de finos en desuso durante años en Burgos, completamente colonizado por vegetación herbácea de forma natural

terrenos mineros. En la gran mayoría de los casos, la implantación de esa cubierta herbácea, normalmente mixta de gramíneas y leguminosas, se ha considerado como un medio y no como un fin. Una vez que las condiciones del terreno han mejorado, suele plantearse el avance progresivo en la sucesión ecológica, u otras opciones basadas en la intervención humana de cara a la consecución de una cubierta vegetal autosostenible, que no tiene porqué ser ya exclusivamente herbácea.

La selección de materiales adecuados para la creación de la cobertura final es determinante para la implantación de dicha cubierta herbácea. También es importante no sobrepasar la pendiente de los taludes externos del hueco, que se deben construir con una inclinación máxima hacia el exterior del relleno de 3H:1V (18-19°), sin incluir bermas. Como ya se mencionó, cualquier inclinación menor favorecerá las operaciones de establecimiento de la vegetación. Conviene destacar que el tratamiento de estabilización de los taludes externos debe iniciarse una vez concluido el primer par de talud y berma superior, avanzando progresivamente cada vez que se culmine otro par. Si se considera interesante, puede trabajarse la remodelación y naturalización de las formas de dicho conjunto de berma-talud, siempre y cuando esas labores no impliquen elevar la pendiente, sino más bien lo contrario. Cuando se ejecuta una remodelación topográfica, puede ser interesante comprobar la respuesta de las nuevas formas, si se conocen las propiedades de los materiales que quedarán en la superficie, aplicando modelos como la “RUSLE 1.06 for mined lands, construction sites and reclaimed lands” (Toy & Foster, 1998) o algunas herramientas o programas de diseño disponibles para la restauración geomorfológica y paisajística de zonas afectadas por la actividad extractiva, como los recogidos en:

- www.restauraciongeomorfologica.com
- http://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/waste/documents/MWEI_BREF_Draft.pdf

No obstante, cualquiera que sea la pendiente y la forma de los taludes externos, esta primera fase de rehabilitación debe incluir un capítulo dedicado a la aplicación de medidas de control de la erosión para esos taludes, hasta que la vegetación sea capaz de estabilizar la superficie. Para ello se pueden aplicar y combinar diferentes prácticas de control de la erosión tales como: laboreo siguiendo curvas de nivel, caballones, barreras de sacos, barreras de balas de paja, acolchados, empedrados, etc. Las condiciones climáticas y la pendiente son los principales factores a tener en cuenta para el diseño de este tipo de medidas. Conviene destacar que el tratamiento de estabilización de los taludes externos debe iniciarse una vez concluido el primer par de talud y berma superior, avanzando progresivamente cada vez que se culmine otro par.

La hidrosiembra (**Figura 28**), es una posibilidad interesante para el tratamiento de los taludes externos. Consiste en la aplicación a presión de un chorro que transporta las semillas, las cuales son normalmente acompañadas de otros productos como mulch, estabilizadores y abono. En España para llevar a cabo una hidrosiembra lo normal es contratar los servicios de empresas especializadas que se ocupan del diseño y planificación de todas las operaciones que implica, si bien el proyectista puede orientarse con la Norma Tecnológica sobre Hidrosiembras NTJ 08 (COITAPAC, 1996).

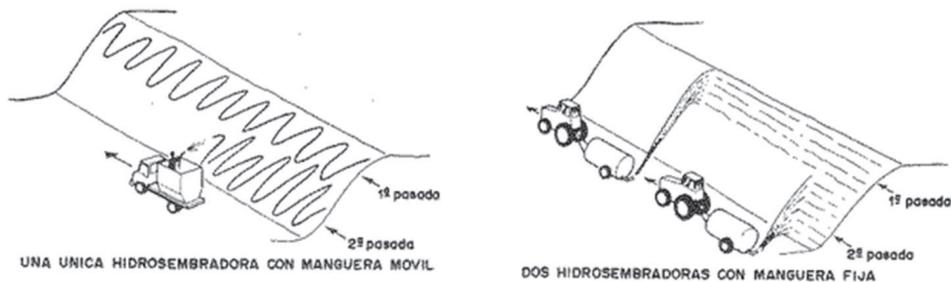


Figura 28. Técnicas de hidrosiembra en taludes (IGME, 1989)

En la actualidad, los catálogos comerciales ofrecen mezclas de semillas de gramíneas y leguminosas expresamente publicitadas para su empleo en restauración de terrenos, incluyendo, de forma cada vez más habitual, elementos de otras familias. La selección de las especies a sembrar ha de basarse en las características del medio, como es lógico, y en los objetivos posteriores de la rehabilitación. Por ejemplo, si se pretende posteriormente establecer vegetación forestal o vegetación leñosa autóctona de carácter integrador y estabilizador, convendrá que las especies herbáceas sembradas no sean muy competitivas. El proceso de selección debe abordar, entre otros, la valoración comparativa de las especies respecto a su adecuación al medio, el potencial que ofrecen para la consecución de los objetivos, y las premisas o directrices bajo las que se concibe la rehabilitación, de forma que la especie o especies elegidas sean las que optimicen el máximo de objetivos que se plantean. De hecho, son tantas las incertidumbres sobre el grado de cumplimiento de los objetivos por parte de las diferentes especies o combinaciones de especies posibles que sería recomendable partir de una preselec-



ción amplia, bien documentada en información lo más ajustada posible a las características del lugar de actuación, incluyendo la de carácter local relativa a posibilidades de obtención de semilla. También sería ideal realizar ensayos, por ejemplo en pequeñas parcelas, variando tratamientos, mezclas y dosis. Una vez conocida la combinación de herbáceas que mejores resultados proporcione, puede ser recomendable mantenerla a propósito durante algunos años (hasta 3), mediante prácticas culturales, antes de avanzar hacia los objetivos finales de rehabilitación.

4.6.2. Objetivos finales de la rehabilitación

Como se ha mencionado, el establecimiento de una cubierta protegida por vegetación herbácea debe considerar también la asignación correcta de usos para ese terreno, con vistas a su estabilización a más largo plazo, haciendo intervenir factores económicos, sociales y legales, además de los medioambientales. En efecto, las posibles controversias que pueden darse durante la toma de decisiones necesarias para diseñar el modelo de rehabilitación para el relleno con RCD de un hueco minero surgirán de las diversas posibilidades existentes, que pueden ser muy amplias, por lo que la opinión pública puede y debe jugar un papel importante. Aunque no es del todo descartable plantear soluciones finales en las que el uso del suelo futuro sea totalmente artificial, no parece ser lo más recomendable. La planificación de este tipo de aprovechamientos está condicionada fuertemente por la situación geográfica y socioeconómica del entorno, y especialmente por la proximidad de núcleos urbanos o industriales. Puede darse la circunstancia de que determinados casos ofrezcan interés para la implantación de aprovechamientos alternativos, menos o nada dependientes de la capacidad productiva del terreno, tales como los usos recreativos. Estos espacios, normalmente, exigirán algunos esfuerzos para ser habilitados, siendo prioritarias aquellas operaciones que garanticen la seguridad física de los posibles visitantes, junto a algunas otras que sirvan para embellecer o integrar en el paisaje el espacio en cuestión. Incluso en este caso, la introducción de vegetación, aunque sólo sea en parte de la superficie total, puede jugar un papel de integración y control ambiental, o como simple tratamiento final de carácter estético, siendo imprescindible en las áreas ocupadas por taludes externos.

En relación con la asignación de un uso del suelo para el terreno que representa el hueco minero relleno y clausurado, es muy importante observar los usos existentes en su entorno cercano. La existencia de los mismos implica, por un lado, que el medio natural es capaz de soportarlos y, por otro, que la población, probablemente, los acepta. Así pues, siempre que las capas de cobertura final sean capaces de proporcionar un medio de crecimiento para la vegetación similar al que proporcionan los suelos del entorno cercano, la selección del uso del terreno basada en los existentes en el entorno puede ser acertada y sostenible. No obstante, la artificialidad del medio autoriza a abordar el problema desde la perspectiva de establecer ecosistemas nuevos (*novel ecosystems*). Estos consisten en nuevas combinaciones de atributos físicos y biológicos, que son el resultado deliberado o no de la intervención humana, y son viables en las condiciones nuevas sin posterior mantenimiento (Hobbs *et al.*, 2006).

Cualquier propuesta de uso del suelo final en la que resulte determinante el desarrollo de vegetación (agrícola, forestal, o vegetación silvestre), debe existir una planificación que se

derive del análisis de las características de los factores o elementos del medio, entre los que destacan los nuevos suelos, el clima, la topografía, la vegetación actual y la teóricamente potencial. Se puede considerar que si se han seguido hasta aquí todas las recomendaciones se tendrá un conocimiento suficiente sobre los suelos y el clima. La topografía y la orientación también serán perfectamente conocidas, siendo fundamentales para la subdivisión del terreno en sectores de actuación de cara a la implantación de vegetación y a la vigilancia y control.

Para las zonas culminantes del relleno, es muy posible que se pueda plantear aprovechamientos agrícolas. Las áreas en las que se quiere instaurar un uso agrícola han de tener una pendiente máxima de 5° (10%), y menos de un 40% de elementos gruesos inicialmente. Convendrá tener un perfil de suelo de un metro o más y realizar labores de descompactado. En estas áreas es posible poner en práctica los métodos agrícolas convencionales mecanizados de siembra o la plantación para las especies leñosas. Las siembras se realizarán entonces con maquinaria específica en función del tipo de semilla de cultivo que se quiera implantar. Evidentemente, habrán de estar libres de problemas relativos a toxicidad por metales pesados y salinidad, con pH entre 5,6 y 7,8, preferiblemente. Por razones de sustentabilidad, además, puede exigirse un contenido mínimo superior al 0,15% de N, más de un 2% de materia orgánica, una capacidad de intercambio catiónico mayor de 15 cmol(+)/kg y un nivel que pueda ser considerado, como mínimo, medio en P y K asimilables. Estos niveles se pueden conseguir partiendo de un material seleccionado adecuado y/o aportando enmiendas y fertilizantes. Salvo que se opte por conformar las superficies culminantes con una topografía más accidentada (sin superar los criterios de pendiente de taludes ya expuestos anteriormente), en la mayoría de los casos, las características topográficas serán favorables para el aprovechamiento agrícola. Sin embargo, puede que no se tenga previsto darles este uso, ya sea por la pequeña superficie, o porque están enclavadas en zonas no agrícolas o en las que la agricultura se esté abandonando. En ellas será posible realizar labores convencionales agrícolas para la implantación de vegetación, incluyendo siembra mecanizada, aunque el objetivo final no sea la agricultura.

Para el establecimiento de pastizales mejorados la limitación de pendiente es ya de 25% (unos 15°), valor que a su vez marca aproximadamente el límite para el empleo de una sembradora de pratenses. Aunque habrán de pasar algunos años para que el sistema se establezca, el posible aprovechamiento posterior para la producción de heno se debe limitar a una pendiente máxima del 18% (10-11°). Con este tipo de aprovechamientos puede aceptarse hasta un 50% de elementos gruesos. El rango de pH más adecuado para mantener a niveles óptimos la actividad microbiana del suelo (aspecto importante desde el punto de vista de la sustentabilidad en este tipo de usos) debe estar entre 6,6 a 7,3, por lo que puede ser necesario encalar en suelos ácidos. Los niveles de elementos fertilizantes deberán ser como mínimo medios, y el mantenimiento de los mismos o su mejora dependerán de la composición florística y el nivel de explotación al que vayan a ser sometidos.

La recuperación de un uso forestal en aquellos huecos que afectaron a terrenos originalmente forestales o que se encuentran rodeados de ellos, parece adecuado, aunque los beneficios que se pueden obtener de este uso, tanto económicos como de conservación del suelo y la vida silvestre asociada, se generan a más largo plazo y el establecimiento de especies arbóreas o arbustivas ha sido visto tradicionalmente, por los responsables, como un coste añadido de rehabilitación



(Davidson & Graves, 1987). Como máximo la pedregosidad debe ser del 60%. En lugares favorables a la plantación forestal, los factores biológicos pueden ser más limitantes que los factores físicos y químicos. Por ejemplo, la cubierta herbácea que pueda estar establecida puede generar problemas diferentes a la simple competencia, como pueden ser la proliferación de animales dañinos y plagas. Con carácter general, la implantación de vegetación forestal requerirá un seguimiento prolongado (más de 10 años), y el empleo de mulches o cubiertas herbáceas compatibles. La simple plantación puede no ser una solución definitiva. En general, la mecanización de las plantaciones puede no ser recomendable por ser un método poco cuidadoso con la planta y que no permite introducir mejoras en el hoyo de plantación. Es favorable en estos casos una cierta rugosidad superficial y bajos niveles de compactación. Aunque estrictamente no es aplicable al tipo de proyectos a los que hacen referencia esta Guía, puede ser conveniente consultar el protocolo técnico sobre criterios orientadores para su aplicación en la redacción de proyectos de repoblación y restauración forestal (Iglesias *et al.*, 2012), así como otros trabajos citados en dicha referencia bibliográfica. Como es sabido, las plantaciones de tipo forestal pueden estar justificadas con el objetivo de conservación de aguas y suelos, si bien, es deseable que además cumplan otras funciones que, en términos generales, se asocian con las formaciones leñosas maduras. En tal caso, para asegurar la sostenibilidad, la selección de especies leñosas para la reforestación debe estar basada, tanto como sea posible, en la vegetación natural representativa de etapas finales de la teórica sucesión y en las características ambientales del sitio (Vallejo *et al.*, 2005). El proceso de selección de especies para la reforestación puede beneficiarse de la abundante literatura fitosociológica existente y, en menor medida, de los conocimientos sobre autoecología de las especies forestales. Algunas pautas útiles sobre el proceso de selección pueden encontrarse en Vallejo *et al.* (2003) y en Pemán *et al.* (2006), así como en las referencias aportadas en estos trabajos.

Llegados a este punto, es necesario recalcar que, en gran parte de los proyectos de rehabilitación de huecos mineros rellenos con RCD, puede ser deseable orientar las actuaciones a otros objetivos, tales como: introducir especies autóctonas, mejorar la estructura de la comunidad, favorecer el funcionamiento de los procesos ecológicos, proporcionar integración en su entorno y en el paisaje, y aumentar la auto-sostenibilidad (SER, 2004). Con tales objetivos, adquiere mayor peso el conocimiento que pudiera adquirirse sobre la vegetación natural del entorno, especialmente la arbórea y arbustiva. En todas las áreas modificadas por el hombre, los árboles y los grandes arbustos pueden desempeñar un papel importante -como bioindicadores- en la historia de los bosques y la vegetación y también deben usarse para determinar las mejores opciones, metas y procedimientos para la conservación y restauración ecológica (Aronson *et al.*, 2002). Ciertamente, para asegurar una rehabilitación a largo plazo, en la mayoría de los casos es necesario introducir especies leñosas. Para garantizar la sostenibilidad, la selección de especies leñosas para la rehabilitación debe basarse, en la medida de lo posible, en la vegetación natural propia de estados identificados como propios de la sucesión teórica tardía en la zona y en las características ambientales del lugar. En tal caso, hay que poner especial cuidado en introducir especies de árboles y arbustos diferenciando bien las diferentes áreas o sectores del lugar, para acomodar mejor sus adaptaciones para ciertos aspectos de pendiente, orientación y requerimientos de agua (proximidad a drenajes). Puede interesar realizar tempranamente (por ejemplo, en taludes externos) la introducción de vegetación

leñosa en núcleos de dispersión que a medio plazo aceleren la colonización espontánea de la vegetación y la fauna (Jorba y Vallejo, 2010). Conviene reseñar que la diversificación de las plantaciones con especies arbustivas y arbóreas autóctonas es cada vez más factible, pudiéndose encontrar cada vez una mayor oferta comercial y algunas referencias bibliográficas altamente recomendables (e.g.: Ruiz de la Torre *et al.*, 1996; Sigüero Llorente, 1999).

Los trabajos de revegetación y reforestación no deben limitarse a las siembras y plantaciones. Es necesario realizar un seguimiento y tener previsto la reposición de fallos, así como la modificación de la selección de especies en función de los primeros resultados. Lo ideal sería supervisar los resultados hasta tener la seguridad de que el sistema es productivo y estable o, si evoluciona, lo hace en una dirección adecuada y acorde con los objetivos marcados. Más adelante se abordan estos aspectos. Con todo, es sensato considerar la revegetación (y la rehabilitación en su conjunto) como un experimento a largo plazo, en el que el monitoreo y la gestión adaptativa son esenciales, ya que las incertidumbres en la planificación de la rehabilitación nunca pueden ser superadas totalmente.

4.7. Programa de vigilancia y control ambiental

Para el diseño del programa de vigilancia y control ambiental en proyectos de rehabilitación de huecos mineros con RCD se ha tenido en consideración, además del Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001, algunas de las propuestas recogidas en la “Guía técnica para el relleno de canteras con materiales naturales de excavación del Gobierno Vasco” (IHOBE, 2005), y otros manuales sobre restauración minera o ecológica (IGME, 1989; Vogel, 1997; Tongway *et al.*, 1997; Tongway & Hindley, 2003; Heneghan *et al.*, 2008; Humphries, 2015; etc.).

El programa de vigilancia y control ambiental tiene como objetivos: comprobar que los RCD admitidos cumplen los criterios de admisión fijados para su uso en la rehabilitación minera y que la ejecución del relleno del hueco de explotación se produce en la forma deseada; garantizar el cumplimiento de las actuaciones preventivas, correctoras y de restauración planteadas en el proyecto; verificar si la aplicación de dichas medidas han cumplido las previsiones esperadas y mejorar su efectividad si fuera necesario; e identificar aquellas acciones del plan que pudieran dar lugar a efectos ambientales adversos distintos a los previstos, para los que sería necesario diseñar y aplicar nuevas medidas.

El programa de vigilancia y control ambiental incluye las siguientes fases: establecimiento de la red de vigilancia (localización de los puntos de control y determinación de los parámetros que deben ser medidos); obtención de datos preoperativos referidos a la situación previa al relleno con RCD; programa de vigilancia y control durante la fase de explotación o relleno del hueco; y programa de mantenimiento, vigilancia y control durante las fases de clausura y posclausura.

4.7.1. Determinación de la situación preoperacional. Establecimiento de la Red de Control

La determinación de la situación preoperacional es fundamental para llevar a cabo el control y vigilancia del relleno de los huecos mineros con RCD, tanto en la fase de explotación como en la de clausura y posclausura, sentando las líneas de base de los elementos que deben ser vigilados.



Para ello, es necesario disponer de una Red de Control que permitirá obtener, como mínimo, información correspondiente a datos meteorológicos, calidad de las aguas superficiales y subterráneas y topografía de la zona de vertido.

a) Datos meteorológicos

Para la obtención de esta información se podrán dar como válidos la recopilación de datos meteorológicos de estaciones de organismos oficiales cuando las estaciones de referencia correspondientes al ámbito regional del relleno puedan suministrar los datos necesarios para el balance hídrico. Se podrá emplear los datos de una única estación completa cuando, siendo esta la más próxima, se justifique que el hueco minero se encuentra dentro del ámbito de estudio de la misma bajo condiciones geográficas semejantes (respecto a altitud y latitud), no existan accidentes relevantes del terreno que puedan dar lugar a comportamientos climáticos diferenciados y la estación disponga de un registro de datos de duración (en años) suficientemente representativo de acuerdo a los criterios de la AEMET. En los demás casos se ponderarán los datos convenientemente a partir de los obtenidos de las tres estaciones más próximas que representen un comportamiento climático semejante al de la situación del hueco de explotación y formen un triángulo en el que quede inscrito el mismo. En cualquier caso, deben ser estaciones completas como mínimo. En la práctica, se aconseja tomar al menos 30 años para precipitaciones, 15 años para temperaturas y 10 años para el resto de elementos (vientos, meteoros, etc.). En el caso en que no existieran estaciones de referencia que fueran representativas del área del relleno, se deberá realizar la adquisición de los datos meteorológicos a partir de una estación de medida automatizada instalada en la zona del relleno. Los datos que se han de obtener diariamente durante la fase de ejecución son: precipitaciones medias y máximas, régimen de temperaturas, humedad, presión atmosférica, lluvia útil, insolación, evaporación, vientos dominantes, así como realizar un estudio de precipitaciones máximas en 24 h para diferentes periodos de retorno, por el método de Gumbel. Con estos datos se puede realizar el cálculo de la evapotranspiración de referencia según el método Penman-Monteith, dato que será utilizado para el estudio del balance hídrico. En el caso de que no se dispusiese de todos los datos necesarios, se pueden utilizar otras metodologías que necesitan de datos más sencillos y disponibles, como las de Hargreaves y Thornthwaite (Almorox, 2003), pudiéndose establecer correlaciones entre estos valores y los de Penman-Monteith según Hontoria (1995).

b) Calidad de aguas

Para la caracterización del estado inicial o preoperacional se deberá determinar: la composición de las aguas subterráneas y nivel freático en al menos tres puntos por cada unidad hidrogeológica que pudiera ser afectada por el relleno del hueco minero; la composición de las aguas superficiales pertenecientes a cauces expuestos en al menos dos puntos por cauce, y en las masas de agua o humedales (al menos un punto por elemento). Además de los niveles piezométricos, o los caudales en el caso de aguas superficiales, la caracterización de la composición tanto de las aguas subterráneas y superficiales deberá realizarse mediante el análisis de los parámetros analíticos que se enumeran en el apartado 4.7.2.1.

4.7.2. Programa de vigilancia y control ambiental: Fase de explotación o relleno del hueco minero

La vigilancia y el control ambiental en la fase explotación se centra en el análisis de los principales aspectos técnicos y medioambientales del proceso de relleno (admisión de residuos, avance de las operaciones, ruido, polvo, vertidos, riesgos geológicos) y de los elementos del medio potencialmente afectados (agua, atmósfera, suelo, vegetación y paisaje).

4.7.2.1. Vigilancia y control de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas

La vigilancia de la calidad de las aguas tiene por objetivo controlar que la explotación del relleno no afecta a las aguas superficiales o subterráneas. De forma previa a la puesta en marcha del programa de vigilancia es necesario el diseño de la red de piezómetros de control y la localización de los puntos de toma de muestras de aguas superficiales y lixiviados. Las recomendaciones mínimas a considerar en este apartado son las siguientes:

- a) **Puntos de muestreo.**- La red de muestreo de aguas superficiales considerará cada uno de los cauces que drenen el vaso de vertido, las masas de agua situadas en un ámbito de 1.000 m y puntos de descarga de la red de desvío de pluviales. Se establecerán un mínimo de dos puntos de toma de muestras (uno aguas arriba del hueco y otro aguas abajo, a unos 50 m de los puntos de vertido) en el caso de las aguas superficiales asociadas a cauces; un punto para las masas de agua independientes situadas aguas abajo. Con respecto a los drenes de aguas superficiales, el primer punto de muestreo de interés es el situado en el último punto de descarga de cada tramo independiente de la red de desvío de aguas pluviales, aunque de cara al vertido de estas aguas el lugar de interés es el propio punto de vertido al cauce. En ocasiones, entre ambos puntos el agua no sufre modificaciones (no hay aportaciones de otras partes de la actividad como las pistas) y es indiferente tomar la muestra en un punto u otro. Sin embargo, si existe algún sistema de depuración (por ejemplo, un decantador) entre ambos puntos o un aporte de aguas, se recomienda tener dos puntos de muestreo diferentes.

En caso de que sea necesaria la evacuación de lixiviados, la red de control de los mismos deberá incluir dos puntos de control. Las balsas superficiales de almacenamiento de lixiviados y los pozos de registro podrán ser utilizadas como puntos de muestreo en el caso de que dispongan de sistemas para la prevención de los cambios de composición por pérdida o entrada de aguas o líquidos. En su caso, Las instalaciones con tratamiento de lixiviados deberán disponer de puntos de control de la cantidad y calidad de los lixiviados a la entrada y la salida de la unidad de tratamiento.

Cuando el relleno esté instalado sobre un acuífero, puede ser necesario realizar además un control de la calidad de las aguas subterráneas, muestreando en los puntos determinados en la red de control para la calidad de las aguas subterráneas.

- b) **Parámetros analíticos.** Previamente al análisis de la composición de las aguas, es necesario aportar información acerca del volumen de lixiviados, caudal de aguas superficiales y nivel de las aguas subterráneas o niveles freáticos. En cuanto a la determinación de la composición de las aguas, superficiales y subterráneas, los parámetros característicos



suelen ser los siguientes: pH, conductividad eléctrica, temperatura, sólidos en suspensión, turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), aceites y grasas, amonio (NH_4^+), sulfato (SO_4^{2-}) y caudal, puesto que son los parámetros para los que existen niveles umbrales para los vertidos al Dominio Público Hidráulico (R.D. 849/86 y R.D. 606/2003 y R.D. 9/2008). A los que habría que añadir parámetros tales como metales y metaloides (As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn), y cualquier otro parámetro que sea objeto de un umbral de calidad en el correspondiente Plan Hidrológico.

En el caso de las muestras tomadas a la salida del dren de aguas infiltradas, se deberán añadir las analíticas especificadas en la Orden AAA/661/2013 para los lixiviados, para su posterior comparación con los umbrales determinados en dicha normativa (As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, cloruro, fluoruro, índice de fenol, COD y STD).

c) Periodicidad.- Las recomendaciones para la periodicidad del control de los parámetros anteriormente relacionados y las analíticas correspondientes, son las siguientes:

- Medida del caudal de aguas superficiales. Periodicidad trimestral.
- Cuantificación del volumen de lixiviados. Periodicidad mensual.
- Medida del nivel de aguas subterráneas o niveles freáticos. Periodicidad semestral.
- Composición de aguas superficiales, subterráneas y lixiviados. Periodicidad trimestral.

No obstante, el promotor podrá, lógicamente, hacer muestreos adicionales para controlar su propia explotación, pudiendo realizar medidas sencillas, sobre todo en lo que a lixiviados se refiere, con periodicidad menor, apoyándose en medidas *in situ* como la conductividad eléctrica.

d) Toma de las muestras.- La toma de muestras y su preservación se realizará según las normas UNE-EN 25667-2 “Calidad del agua. Muestreo. Parte 2: Guía para las técnicas de muestreo (ISO 5667-2)” y UNE-EN ISO 5667-3 “Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Guía para la conservación y manipulación de las muestras de agua (ISO 5667-3)”. Las muestras deberán ser adecuadamente etiquetadas e identificadas, indicando el código del punto de muestreo y la fecha del muestreo. En una ficha se describirán brevemente las condiciones del muestreo, caudal, climatología del día, tiempo desde el último aguacero, incidencias internas o externas y cualquier otra anotación que se considere relacionada con las aguas en el punto de muestreo. Siempre se deberá aportar el informe completo de resultados analíticos emitido por el laboratorio que los ha realizado y un plano con la localización del punto de toma de muestras.

e) Niveles de alarma.- Se tomará como nivel de alarma el 95% del valor umbral definido en la legislación anteriormente mencionada y los planes hidrológicos de cuenca. En caso de tener un punto de vertido, y que se produzca una contaminación superior a lo establecido, se suspenderá inmediatamente el vertido hasta que se subsanen las causas que lo han motivado y el vertido accidental deberá ser comunicado inmediatamente a la autoridad ambiental competente.

4.7.2.2. *Control y vigilancia de la red de drenajes de desvío de aguas superficiales y, en su caso, de evacuación de lixiviados*

Tanto en términos de operatividad, así como formando parte de la vigilancia y control de la calidad de las aguas superficiales se tendrá en cuenta la observación del estado de la red de drenaje y las balsas de decantación, en el caso que se hayan construido, y su entorno inmediato con el fin de minimizar el arrastre de sólidos en suspensión de las aguas superficiales en la zona del proyecto. Deberán hacerse reconocimientos visuales del estado de los canales perimetrales al objeto de detectar obstrucciones en su sección hidráulica y proceder a su limpieza. Y en su caso reparar o retirar los materiales que obstruyan el cauce. Es especialmente importante realizar esta inspección tras la ejecución de los canales, durante o inmediatamente después de precipitaciones especialmente intensas (ya que se pueden producir desbordamientos) y tras periodos de fuertes vientos en zonas boscosas (por la posibilidad de que hayan caído ramas y hojas al canal). Además, se deberá observar si han caído accidentalmente materiales transportados por los camiones de obra. Se observará también la existencia de escorrentías sin canalizar por las zonas de paso de maquinaria y camiones, procediendo a la reparación de canales y/o a la retirada de los materiales implicados. Con respecto al sistema de limpieza de vehículos, se controlará el correcto funcionamiento del circuito de agua y se realizará una limpieza periódica del sistema.

4.7.2.3. *Calidad atmosférica: Polvo y ruido*

Los parámetros atmosféricos que deben controlarse durante la fase de explotación son el polvo y el nivel sonoro. El objetivo principal del programa de vigilancia ambiental con respecto a la calidad atmosférica es proteger la salud y la seguridad de los trabajadores y habitantes y el medio natural en el entorno de la explotación minera.

- **Vigilancia y control de las emisiones de polvo**

Las principales medidas para minimizar las emisiones de polvo existentes en la operación de relleno son el riego de las pistas activas, acopios y zonas de carga y la instalación de lavarruedas en la zona de salida de vehículos. Los límites umbral que deben cumplirse en cuanto a los niveles de material particulado (PM) son los establecidos en la legislación vigente en materia de calidad del aire o los establecidos en sus competencias por la legislación autonómica. Se tomará como nivel de alarma el 95% del valor umbral.

En el caso de que el proyecto de relleno sea prolongado en el tiempo, la medición de inmisión de partículas se realizará según el método de referencia para el muestreo y análisis de PM10 definido en el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. En el Anexo VII, se hace referencia a la norma UNE-EN 12341 “Calidad del aire -Determinación de la fracción PM10 de la materia particulada en suspensión-Método de referencia y procedimiento de ensayo de campo para demostrar la equivalencia de los métodos de medida de referencia”. Se utilizará un captador de alto volumen para determinación de partículas en inmisión, con recogida de muestra sobre filtro y determinación gravimétrica en laboratorio, expresando los resultados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



- Vigilancia y control del ruido

En principio no será necesaria la realización de un control sistemático del ruido para la realización de proyectos de relleno, dado que no existen instalaciones con emisión sonora continua. No obstante, dependiendo de la distancia de núcleos de población, aunque estos sean pequeños, o de poblamiento disperso en las proximidades, y de la orientación del hueco rellenado respecto a ellos, se podrá contemplar la realización de mediciones de control del ruido en la zona del proyecto y en sus inmediaciones.

El objetivo del control de ruidos es garantizar el correcto funcionamiento de las medidas adoptadas para asegurar las condiciones de sosiego público, debido a los niveles sonoros, de manera que queden registradas las medidas sonoras ambientales y se compruebe la inexistencia de molestias.

- a) **Niveles umbral.**- El indicador utilizado será el nivel continuo equivalente sonoro (Leq) diurno (NED) y, en su caso, nocturno (NEN). Los niveles umbrales serán los determinados por la legislación estatal (Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas) o autonómica en la materia.
- b) **Niveles de referencia.**- Por lo general no existirá ningún nivel de referencia anterior al comienzo del relleno. Por lo tanto, se realizará una medición a partir de la fecha de comienzo y se incluirán los registros realizados para su seguimiento.
- c) **Periodicidad y puntos de muestreo.**- Se definirán en función de cada emplazamiento y las características topográficas del hueco donde se ubique el relleno. En principio, la frecuencia de medición de sonometría será semestral.
- d) **Técnica de medida.**- La primera medición se efectuará en todos los puntos determinados cuando no haya actividad en el centro de trabajo. La segunda y tercera medición, se realizarán en un intervalo de dos horas cada medición y cuando haya actividad. La cuarta medición se debe medir en el periodo de la comida (inactividad del centro de trabajo). La quinta y sexta medición, se realizarán en un intervalo de dos horas cada medición y cuando haya actividad. La última medición se efectuará cuando finalice la jornada de trabajo y en periodo de inactividad. Se realizarán tres mediciones en cada punto de muestreo. En cada punto de medición, se deben de tomar 5 muestras de 1 minuto. El tiempo entre muestras debe de ser de 5 minutos. En cada una de las mediciones se deben anotar los siguientes parámetros: $Leq60$, Fast, Peak, nivel de ruido, nivel de actividad de la fuente, fecha, hora, lugar de medida, velocidad del viento, humedad y temperatura. La medida se realiza al aire libre, con el aparato situado a una distancia mínima de 1,5 m sobre el suelo y manteniendo una distancia horizontal de 3,5 m como mínimo respecto a cualquier elemento próximo que pueda distorsionar la señal recibida, como por ejemplo los taludes del hueco. El micrófono debe mantenerse a 1 m como mínimo fijándolo a un trípode. La medición no debe de realizarse bajo ciertas condiciones: velocidad de viento muy elevada, lluvia, nevadas, existencia de personas o animales emitiendo ruidos cerca del instrumento, existencia de fuentes ajenas que excepcionalmente producen niveles muy altos de ruido, heladas o ambiente muy húmedo ($T^a < 2^{\circ}C$; Humedad $>90\%$).

4.7.2.4. *Gestión de residuos*

Como consecuencia de la ejecución del relleno se pueden producir una serie de residuos que no son admisibles. Entre estos los más habituales son: tierras contaminadas por derrames accidentales de aceites, grasa o combustibles; envases o recipientes que hayan contenido sustancias peligrosas, tales como latas de aceite de motor, botes de líquido de frenos, algunos anticongelantes, depósitos de combustible, etc.; u otros residuos tales como filtros de aceite, trapos impregnados en aceites u otras sustancias, vehículos al final de su vida útil, etc. Estos residuos se retirarán y llevarán a un gestor autorizado para tal fin cumplimentando los documentos que requiera la normativa en cada caso. El proceso de gestión de los residuos comienza con su clasificación y separación en origen, para lo cual deberán definirse los lugares de depósito y el tipo de contenedores a utilizar.

4.7.2.5. *Seguimiento de la formación y estructura del relleno con RCD*

Se replantearán sobre el terreno los límites del relleno y mensualmente se controlará topográficamente que los taludes se ajustan a lo proyectado y autorizado. Se instalarán estaquillas o marcas visuales que permitan conocer los límites del relleno durante su ejecución.

Se debe realizar una descripción del relleno, que incluya los siguientes parámetros: superficie ocupada por residuos, peso (en toneladas), volumen de residuos depositados (en m³) y composición de los residuos.

Durante el proceso de relleno del hueco se llevarán a cabo comprobaciones relativas al grado de compactación alcanzado por los RCD vertidos, que deberá alcanzar como mínimo el 95% de la densidad del Proctor normal medido en laboratorio, para dichos materiales.

Mensualmente se sacarán fotografías de la evolución del relleno, de los materiales depositados y del funcionamiento de los sistemas de control. Las fotografías se guardarán con su fecha.

4.7.2.6. *Estabilidad e integridad del relleno con RCD y de la capa de impermeabilización*

El conjunto formado por el terreno y el relleno del hueco minero será una estructura estable e íntegra a lo largo del tiempo. Se deberá comprobar la estabilidad interna de los residuos y de los sistemas de impermeabilización y capas de sellado, así como la estabilidad del conjunto del relleno del hueco minero y el terreno. Para ello, se evaluarán los siguientes aspectos:

- Resistencia al corte de los residuos.
- Información sobre el ritmo de relleno o explotación (por ejemplo, el porcentaje del hueco que ha sido rellenado).
- Resistencia al deslizamiento entre los geosintéticos empleados y entre los geosintéticos y el suelo, mediante ensayos específicos con los geosintéticos que se vayan a utilizar en la obra.
- Comprobación de la capacidad drenante de las capas de drenaje, en función de su nivel de carga en dirección perpendicular al plano de drenaje.



En los cálculos de estabilidad se considerará la situación más desfavorable (obturación de los drenajes).

Los elementos de control de la estabilidad consistirán en un mínimo de 10 puntos de medida. En rellenos parciales del hueco minero que presenten taludes frontales de altura superior a 24 m o pendientes mayores de 2,5H : 1V, deberán contar como mínimo con dos secciones de control (una en la zona de pie y otra en la zona de coronación). Los elementos de control y su periodicidad serán, como mínimo, los siguientes:

- Control de asientos y subsidencias. Frecuencia trimestral en el caso de residuos no peligrosos y frecuencia semestral en el caso de residuos inertes.
- Control de movimientos horizontales. Frecuencia semestral.
- Reconocimientos e inspecciones de grietas, hundimientos y erosiones. Frecuencia mensual.
- Levantamiento de la topografía, estructura y composición del hueco minero. Frecuencia anual.

El programa de vigilancia y control deberá definir previamente las secciones permanentes de instrumentación de asientos, los elementos de instrumentación de movimientos horizontales, así como los puntos de identificación e inspección de indicadores externos de inestabilidad o rotura.

4.7.2.7. Señalización y cerramientos

Se deberá realizar comprobación de que todas las pistas y demás zonas accesorias, como el parque de maquinaria, estén perfectamente señalizadas a los efectos de que las actividades que se desarrollen durante la fase de explotación se circunscriban a dichos límites. Asimismo, se deberá comprobar el estado del cerramiento (vallado) del perímetro del hueco. La periodicidad de las revisiones se podrá ajustar a las inspecciones encaminadas a reconocer indicios de inestabilidad (grietas, hundimientos, indicios de erosión), es decir, con carácter mensual. Se deberá asegurar el control de acceso al emplazamiento con el fin de disuadir el vertido ilegal en el emplazamiento.

En la **Tabla 18**, a modo de síntesis, se recogen los factores y las acciones de vigilancia y control, así como la frecuencia de dichas acciones.

4.7.3. Programa de mantenimiento, vigilancia y control durante las fases de clausura y posclausura

4.7.3.1. Programa de mantenimiento.

Más allá del estricto control del cumplimiento de las prescripciones técnicas del proyecto, es necesario incluir en el proyecto de relleno una fase de mantenimiento destinada a comprobar la correcta aplicación de las medidas y a corregir o reparar los posibles defectos constructivos o desperfectos de origen impredecible que pueden afectar a los resultados a corto plazo. Este mantenimiento debe aplicarse a las capas de clausura y sellado y a la

cubierta vegetal implantada sobre ellas. Durante esta fase, todos los elementos del proyecto que ya son objeto de atención del plan de vigilancia, seguirán siendo controlados, e incluso lo seguirán estando después. Este plan de mantenimiento deberá estar justificado en base a las circunstancias concretas del emplazamiento. Los elementos sometidos a este mantenimiento pasarán a ser parte del plan de vigilancia y control posclausura una vez terminado el mismo. **La administración competente en materia de minería fijará el plazo para esta fase de mantenimiento, pero es recomendable que su duración sea de al menos tres años.**

Para las capas de clausura y sellado, se debe comprobar la existencia de asientos y movimientos, que serán perceptibles en superficie aunque el origen pueda estar a mayor profundidad que el sistema de clausura. Se ha de tener previsto que puede ser necesario efectuar rellenos, especialmente si los asentamientos modifican la circulación de la escorrentía superficial. En casos más extremos se debe reconstruir la secuencia de capas del sistema de clausura sobre un relleno de materiales apropiados efectuado por debajo del mismo, de modo que se recupere la funcionalidad de las capas de impermeabilización y drenaje. Igualmente debe comprobarse el estado de la superficie del terreno en lo que se refiere a posibles procesos erosivos, desde la finalización de la construcción del sistema de clausura. La revisión de las superficies para valorar los efectos de la erosión tendrá continuidad hasta el plazo fijado para la vigilancia y control de la rehabilitación, pero en el tiempo que transcurra hasta la implantación de la vegetación deberá dar lugar a respuestas rápidas de corrección de los posibles procesos erosivos que se presenten. Otro aspecto importante es todo lo relacionado con el estado de conservación de canales y drenajes construidos en la fase de clausura. Todas las decisiones sobre tareas de mantenimiento se han de realizar en base a revisiones periódicas de la superficie, cuya periodicidad conviene que sea mensual, si bien interesará inspeccionar el terreno siempre que se produzcan lluvias intensas.

Desde el momento en el que se realice la última operación previa al establecimiento de vegetación convendrá tener un control de los parámetros edáficos tenidos en cuenta para el diseño de las capas superficiales del nuevo suelo, añadiendo valoraciones sobre el contenido en N, P y K disponibles. Para ello, puede ser suficiente el muestreo de muestras compuestas representativas de diferentes sectores establecidos sobre la superficie total del hueco relleno. La obtención de muestras compuestas en el horizonte superficial, haciendo uso de procedimientos estandarizados de obtención de las submuestras con diversos tipos de palas, o mediante el empleo de sondas, son muy empleados para establecer el estado nutricional del suelo y el nivel de materia orgánica en terrenos agrícolas. Las recomendaciones que tradicionalmente hacen públicas numerosas agencias de extensión agraria en todo el mundo, admiten que cada muestra compuesta ha de representar una unidad de terreno de características uniformes y que la hacen diferente de las demás unidades que pueden reconocerse con criterios tales como: pendiente, aspecto superficial del suelo, posición con respecto a drenajes, etc. Sólo si algunas unidades resultan muy extensas en comparación con el resto se recomienda dividir las, en general, hasta que el tamaño de las subunidades resulte del mismo orden que las definidas según las premisas iniciales, o siempre que se supere un valor prefijado. Otra posibilidad es tomar un mínimo de tres muestras por cada uno de los sectores o subdivisiones delimitadas en el terreno. Los datos obtenidos



con este estudio previo al establecimiento de vegetación pueden servir para comprobar el efecto de todas las medidas adoptadas y si es necesario adoptar alguna otra antes de abordar el establecimiento de la vegetación. Estos datos también ayudarán a explicar los resultados que con posterioridad se obtengan en la fase de implantación de vegetación herbácea de carácter protector y permitirán adoptar medidas, si son necesarias, hasta la correcta implantación de esta. Como se dijo, es recomendable que la formación herbácea (que puede incluir un cultivo mixto de cereal-leguminosa) se mantenga durante tres años. Para ello, puede ser necesario sembrar o intercalar otras operaciones, siempre a la vista de los resultados obtenidos, con el apoyo de los datos climáticos que se vienen controlando desde fases anteriores. La valoración de los resultados ha de basarse en observaciones sistemáticas, efectuadas por sectores, sobre la germinación, crecimiento, cobertura o falta de ella, y aspecto general de la superficie del suelo (compactación, erosión, presencia de sales, etc.). Especialmente interesantes serán las valoraciones efectuadas sobre los taludes y bermas inferiores (cuando existan), en los que las operaciones orientadas a la creación de una cobertura edáfica protegida por la vegetación se deben hacer mientras continúan las operaciones de relleno del hueco en cotas superiores.

La formación herbácea implantada deberá inspeccionarse por sectores con una periodicidad marcada por los ciclos vitales de las especies presentes. Las inspecciones servirán para orientar las labores que pudieran ser necesarias para el mantenimiento de la cubierta herbácea. Las inspecciones han de continuar en la fase siguiente de implantación de vegetación. Por ejemplo, pueden incluirse aquí las clásicas valoraciones sobre éxito de siembras o plantaciones efectuadas para introducir vegetación con el objetivo de alcanzar un uso del suelo predeterminado. Estas inspecciones también orientarán sobre la posible necesidad de nuevas labores, así como para evaluar las necesidades de resiembras o reposición de marras. A partir de este momento, aunque no es descartable que sean necesarias nuevas actuaciones, estas pueden considerarse asociadas al plan de vigilancia propio de la posclausura, orientado a controlar el proceso de consecución y/o adaptación de los objetivos finales.

4.7.3.2. Programa de vigilancia y control durante las fases de clausura y posclausura

La mayoría de los factores que han sido objeto de vigilancia durante la fase de explotación o relleno deberán seguir siendo controlados durante la fase de clausura y posclausura (**Tabla 18**).

FACTOR DE VIGILANCIA Y CONTROL	ACCIÓN	FRECUENCIA	
		FASE EXPLOTACIÓN	FASE POSCLAUSURA
Emisiones de polvo y ruido	Análisis, en su caso, de PM10	Según marque la autorización en función de las características del proyecto y su entorno	
	Medida, en su caso, del nivel sonoro continuo equivalente		

FACTOR DE VIGILANCIA Y CONTROL	ACCIÓN	FRECUENCIA	
		FASE EXPLOTACIÓN	FASE POSCLAUSURA
Calidad de las aguas superficiales y subterráneas	Medida del caudal de aguas superficiales	Trimestral	Semestral
	Cuantificación del volumen de lixiviados	Mensual	Semestral
	Medida del nivel de aguas subterráneas o niveles freáticos	Trimestral	Semestral
	Composición de aguas superficiales, subterráneas y lixiviados.	Trimestral	Semestral/Anual según los casos
Red de drenajes de desvío de aguas superficiales y, en su caso, de evacuación de lixiviados	Reconocimientos visuales del estado de los canales perimetrales y, en su caso de los sistemas de recogida de lixiviados y balsas de decantación. Identificación de escorrentías sin canalizar	Mensual Tras la ejecución de las infraestructuras, durante o inmediatamente después de precipitaciones especialmente intensas y tras periodos de fuertes vientos en zonas boscosas	Mensual Después de precipitaciones especialmente intensas y tras periodos de fuertes vientos en zonas boscosas
Seguimiento de la formación y estructura del relleno con RCD	Control topográfico de taludes	Mensual	
	Descripción del relleno (superficie ocupada, peso, volumen de residuos, porcentaje del relleno acometido, origen de los residuos)	Semestral	
	Control compactación (como mínimo el 95% de la densidad del ensayo Proctor normal)	Semestral	
	Capacidad restante del depósito	Semestral	
	Fotografías del relleno	Semestral	



FACTOR DE VIGILANCIA Y CONTROL	ACCIÓN	FRECUENCIA	
		FASE EXPLOTACIÓN	FASE POSCLAUSURA
Estabilidad e integridad de la masa de residuos y de la capa de impermeabilización	Control de asientos y subsidencias	Trimestral	Semestral
	Control de movimientos horizontales	Semestral	Semestral
	Reconocimientos e inspecciones de grietas, hundimientos e indicios de erosión	Mensual	Trimestral
	Levantamiento de la topografía, estructura y composición del hueco minero	Anual	
Señalización y cerramientos	Comprobación de la señalización	Mensual	
	Estado del cerramiento	Mensual	
	Control de acceso	Continuo	

Tabla 18. Factores de vigilancia y control, acciones y frecuencia de las mismas durante las fases de relleno del hueco minero o de explotación y posclausura

Por otra parte, desde el momento en el que se dispone de una cobertura de suelos sobre la que ya se han realizado siembras y/o plantaciones orientadas a alcanzar un objetivo final de carácter estable y permanente, o de persistencia a largo plazo, conviene tener en cuenta una serie de elementos importantes que van a permitir el control de las prácticas de rehabilitación. En efecto, los trabajos desarrollados para rehabilitar o restaurar el terreno no deben terminar con la última operación de siembra o plantación. Lo ideal sería supervisar los resultados hasta tener la seguridad de que el sistema es estable o, si evoluciona, lo hace en una dirección adecuada y acorde con los objetivos marcados. Los parámetros o indicadores que conviene controlar dependerán de cada caso concreto, aunque puede ser preferible obtener series suficientemente largas y sistemáticas de valores de control, obtenidas para pocos parámetros bien elegidos, que series de muchos parámetros limitadas a unos pocos años. Idealmente, deben tener las siguientes características: poseer validez científica; poseer la suficiente importancia desde el punto de vista de los objetivos del proyecto; ser de adquisición e interpretación sencillas; tener una relación costo-efectividad bajo, y proporcionar resultados reproducibles.

Por un lado, puede ser conveniente continuar durante un tiempo (hasta, por lo menos 10 años) algunos parámetros que permitan valorar la evolución de la calidad del nuevo suelo. El concepto de calidad de suelo ha sido ocasionalmente criticado, pero es incuestionablemente útil en procesos de restauración o rehabilitación. Dicho concepto fue concebido simplemente como una herramienta para evaluar la sostenibilidad de las prácticas de manejo del suelo y para guiar las decisiones de uso de la tierra. Dado que se basa en principios básicos de la edafología y la ecología del suelo, el concepto de la calidad del suelo está embebido del conocimiento ecológico del suelo y, por lo tanto, puede servir como una herramienta útil para guiar la rehabilitación de un ecosistema (Heneghan *et al.*, 2008). Los parámetros de control más tradicionales han sido los siguientes: la densidad aparente, la estabilidad de agregados, el pH, el contenido en materia orgánica, la relación C/N, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico, y la disponibilidad de elementos como N, P y K. Los aspectos microbiológicos se han ido incorporando con el tiempo, pudiendo ser controlados también por seguimiento mediante mediciones de actividades enzimáticas o, indirectamente, por respirometría, realizadas sobre la superficie del nuevo suelo. Estos parámetros se pueden obtener de muestras compuestas tomadas en los diferentes sectores en los que puede subdividirse el terreno, o concentradas en parcelas control, establecidas para representar la variabilidad superficial (tantas como sectores diferentes, por ejemplo). Otra posibilidad es adquirir un mínimo de tres muestras por cada sector diferenciado.

En cuanto a la vegetación, existen dos fórmulas básicas para evaluar el desarrollo y evolución de la misma: la comparación de parámetros escogidos con valores estándar de productividad y/o crecimiento, o la comparación con áreas de referencia (Vogel, 1987). Las dos aproximaciones pueden ser combinadas. Posiblemente, la primera aproximación sea más valiosa para terrenos en los que se pretende alcanzar una productividad económica (de grano, de forraje, de madera, etc.). La segunda parece adaptarse mejor al control del desarrollo y evolución de una vegetación silvestre o natural, que servirá para proporcionar servicios ecosistémicos. Humphries (2015) proporciona valiosos comentarios sobre el empleo de parámetros de control y la comparación con áreas de referencia aplicables a la rehabilitación de bosques nativos en terrenos mineros.

Cuando los usos establecidos tienen un carácter productor, la productividad por unidad de superficie, medida en parcelas representativas de las diferentes situaciones posibles en el terreno rehabilitado, se pueden comparar con las que se generan en situaciones semejantes de pendiente y orientación en el entorno cercano. El control de este tipo de indicador puede realizarse una vez al año durante 10 años, para usos agrícolas y de pastos, o durante 15 años para usos forestales productivos. La medida en usos agrícolas o de pastos es sencilla, cosechando en parcelas representativas de superficie conocida. Para producciones de tipo forestal, los indicadores más extendidos están basados en la altura (altura total dominante o altura total media) de los árboles como índice de calidad de estación forestal, pues se sabe que la altura de los árboles de una masa coetánea para una especie y edad determinada está altamente correlacionada con la capacidad productiva. Otros indicadores son el diámetro normal o el número de árboles vivos.

Cuando el tipo de vegetación implantada es de carácter silvestre y el objetivo es obtener una cobertura vegetal protectora, estable, natural y diversa, es normal añadir otro tipo de indica-



dores tales como: presencia de especies pertenecientes a la comunidad vegetal de referencia, presencia de especies invasoras, presencia de individuos procedentes de regeneración espontánea (nacidos de semilla), diversidad de especies, cobertura, etc. Estas medidas pueden realizarse una vez al año durante por lo menos 15 años. En estos casos, también puede ser conveniente utilizar para el seguimiento la metodología conocida como Análisis Funcional de Ecosistemas (*Ecosystem Function Analysis*). Dicha metodología mide el funcionamiento de un ecosistema como un sistema biofísico. Utiliza indicadores simples, visuales y rápidamente evaluados que se centran en los procesos de la superficie del suelo. En esto difiere de los seguimientos convencionales basados en el reconocimiento de la presencia y/o abundancia de biota seleccionada. El marco conceptual puede conocerse a través de los trabajos de Tongway *et al.* (1997) y, especialmente en Tongway & Hindley (2003). Los datos se recogen en transectos lineales orientados en la dirección del movimiento de recursos, que suele ser descendente. Hay dos escalas de recopilación de datos. En la escala más gruesa o en pendiente, el transecto de línea se diferencia en zonas donde los recursos tienden a acumularse (parches) y zonas donde los recursos tienden a ser transportados (interparches). También se mide la anchura de los parches en el contorno. Estos datos producen un conjunto de indicadores de organización que pueden utilizarse para el seguimiento a lo largo del tiempo.

Para terminar, es importante resaltar que el plan de vigilancia y control debe funcionar como un sistema abierto con capacidad para modificar, cambiar o adaptar el proyecto o las situaciones que se planteen (IGME, 1989). Esto viene a ser lo mismo que admitir que el conjunto de acciones a desarrollar puedan requerir algunas modificaciones con posterioridad a su ejecución, a la luz de la evolución seguida, incorporando lo que se denomina manejo adaptativo (Pastorok *et al.*, 1997), lo que puede llevar a replantear objetivos y metas, y a rediseñar algunas de las soluciones propuestas.

5. CONCLUSIONES

La “Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)” recoge una serie de criterios básicos para el uso de estos residuos en el relleno y en las labores de restauración de los huecos generados por la actividad extractiva, de acuerdo con las orientaciones propuestas en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 relativas a la recuperación de espacios degradados por la minería con RCD.

Hay que señalar, en primer lugar, que el relleno de huecos mineros con RCD sólo se justifica ante la falta o escasez de residuos mineros propios o la inviabilidad técnico-económica del uso de los mismos para poder llevar a cabo dicha remodelación topográfica (R.D. 975/2009).

Por otra parte, de acuerdo con la normativa, la restauración minera solo se considera una operación de valorización cuando ésta se realiza con “RCD inertes” (R.D. 105/2008). Sin embargo, la rehabilitación de huecos mineros con “RCD no peligrosos” tratados adecuadamente, y mediante la aplicación de buenas prácticas ambientales, debería ser considerada también una operación de valorización y no de vertido o de eliminación de residuos en vertedero. En cualquier caso, para que un proyecto de restauración sea reconocido como una operación de valorización de estos residuos, será necesaria siempre **la preceptiva y vinculante declaración y autorización de “operación de valorización de RCD” por la autoridad competente en medio ambiente, además del Plan de Restauración aprobado por la autoridad minera, de la correspondiente Comunidad Autónoma.** El explotador o entidad minera deberá, por lo tanto, solicitar dicha autorización a la autoridad ambiental con un proyecto donde se recojan todas las medidas adoptadas de valorización. Asimismo, en el caso de que no se hubiera contemplado en el Plan de Restauración el uso de RCD, además de la modificación del mismo, deberá obtenerse también la correspondiente autorización de operación de valorización para conseguir dicho reconocimiento previa solicitud.

En la Guía se propone, además, una metodología de evaluación preliminar de la idoneidad de los huecos de explotación para su rehabilitación con RCD mediante la aplicación de un índice multiparamétrico, que incluye criterios relacionados con condicionantes técnico-económicos (hidrogeológicos, hidrológicos y geotécnicos), con el coste de transporte y la garantía de suministro de los RCD a la explotación minera, y con la prioridad de restauración en función de la calidad ambiental y/o paisajística del entorno donde se ubica el hueco minero y su incidencia visual. Este índice de idoneidad puede ser aplicado para el diseño de medidas prioritarias de actuación y planes de recuperación de espacios mineros degradados, con una concentración importante de huecos de explotación abandonados y sin restaurar. El PEMAR recoge y propone el desarrollo de acuerdos o convenios sectoriales entre las industrias extractivas y las Comunidades Autónomas, con objeto de promover la valorización de los RCD mediante la recuperación de estos espacios mineros abandonados por lo que dicha metodología puede ser una herramienta de utilidad para la consecución de dicho fin.

El cálculo de este índice de idoneidad, según lo descrito en la Guía y el **Anexo 3**, proporciona además una información preliminar sobre la viabilidad técnico-económica y ambiental del uso de los RCD en la rehabilitación de un determinado hueco minero. Por ello, debería constituir la información base para el diseño del Plan de Restauración y el estudio de evalua-



ción de impacto ambiental que debe elaborar la entidad minera, y que deberán ser evaluados por los organismos competentes en minería y medio ambiente, respectivamente.

El Plan de Restauración deberá recoger, entre otros muchos aspectos, además de la capacidad del hueco y el volumen de RCD necesarios para su relleno y la remodelación del terreno, una lista de los gestores autorizados de RCD como potenciales proveedores, la cantidad de residuos que podrán aportar cada uno de ellos y un cronograma con los plazos de tiempo de provisión. De esta forma, se garantiza que se dispondrá del suministro de material suficiente para poder llevar a cabo las labores de rehabilitación en los plazos contemplados en dicho plan.

Asimismo, **sólo se podrán admitir en la rehabilitación de huecos mineros los RCD pétreos inertes y no peligrosos que hayan sido sometidos a un tratamiento previo u operación de valorización por un Gestor Autorizado de RCD**, limpios de impropios (plásticos, madera, metales, etc.) y otros elementos contaminantes. En esta Guía se recomienda además la fracción “todo uno” hasta un tamaño máximo de 100 mm, considerándose tal vez las fracciones de 0-20 mm o de 0-40 mm las más óptimas para el relleno de estos huecos. Además, el protocolo de admisión de dicho material exigirá la presentación de un certificado por parte del Gestor Autorizado de RCD a la entidad minera que deberá incluir datos identificativos (nombre de la empresa y su responsable, dirección completa, correo electrónico, teléfono, etc.), naturaleza de los residuos, código LER y tratamiento al que han sido sometidos, fotografía o imagen de los mismos, los volúmenes de material parciales y totales suministrados a la explotación minera, así como una caracterización básica de los residuos sobre la lixiviabilidad de algunos componentes. La presencia de determinados contaminantes orgánicos, tal y como establece la Orden AAA/661/2013, sólo ha resultado determinante en casos realmente excepcionales, por tanto requerir la obtención de estos parámetros quedará a juicio del organismo competente en materia de medio ambiente de la Comunidad Autónoma correspondiente, recomendándose su solicitud solamente en los casos de que todos los parámetros medidos en la lixiviabilidad den como resultado un residuo inerte, si los resultados de Carbono Orgánico Total y/o Carbono Orgánico Disuelto resultaran elevados, o si hubiera indicios de paso de maquinaria u otra actividad que pudiera dar como resultado la contaminación de los RCD. Asimismo, es necesario incluir en el mismo cierta caracterización geotécnica del material (**Anexos 1 y 2**), especialmente en lo referente a su compacidad mediante la inclusión de los resultados del ensayo Proctor normal o modificado que será fundamental de cara a la puesta en obra. La caracterización aportada relativa al análisis mineralógico realizado (incluida en el **Anexo 2**) se considera información adicional aportada con fines científico-académicos, y no se considera necesaria su realización para este tipo de proyectos.

La entidad minera que recibe los RCD deberá verificar *in situ* la documentación aportada por el Gestor Autorizado de RCD a fin de comprobar si se ha llevado a cabo la caracterización básica y geotécnica de los residuos; e inspeccionará visualmente la carga de los mismos, antes y después de su descarga en el hueco, para comprobar que el aspecto de los RCD coincide con la información y el reportaje fotográfico facilitado por el proveedor. Además, y de acuerdo con el R.D. 975/2009, registrará y certificará el origen y naturaleza

de los residuos que van a ser usados en la restauración y sus principales características, de acuerdo con la información suministrada por el Gestor de los RCD, en el correspondiente Libro de Registro que estará a disposición de las autoridades competentes en medio ambiente y minería. En el mismo, se indicará también el volumen total de RCD necesarios para la rehabilitación del hueco; y se deberán señalar, además, con cada descarga de RCD registrada: el volumen de RCD descargados, el volumen total de relleno hasta ese momento y el volumen de hueco que queda por rellenar, así como las medidas de control del cumplimiento de los requisitos de admisión del material que se realicen.

En la Guía se establecen además una serie de recomendaciones técnicas para las diferentes fases de un “Proyecto de Rehabilitación de un Hueco Minero con RCD”, y que se muestran a modo de síntesis en la **Tabla 19** y **Tabla 20**. Dichas recomendaciones pueden resultar de interés tanto para la entidad minera responsable del diseño y ejecución del proyecto, como para las autoridades minera y medioambiental que deben autorizar y/o realizar un seguimiento del mismo.

Una de las principales aportaciones de esta Guía, es la propuesta de “valorización” de los rechazos pétreos que se generan en la fase de precibado de finos de los RCD mixto-cerámicos en las plantas de tratamiento, mediante su uso en la rehabilitación de espacios degradados por minería. Estos residuos de precibado calificados como “no peligrosos” (aunque en algunos casos pueden ser también de carácter inerte) debido a sus características básicas, geotécnicas y mineralógicas (**Anexo 1**); así como al elevado volumen de material disponible, pueden ser una alternativa viable para la restitución topográfica de aquellos huecos mineros que carezcan de estériles suficientes para ello. De esta manera, se contribuye a valorizar un residuo con muy escasa salida comercial y cuyo destino es su eliminación en vertedero.

Las canteras de rocas industriales son las explotaciones mineras más abundantes en nuestro país, encontrándose muchas de ellas abandonadas y sin restaurar. La escasa generación de residuos mineros en muchas de estas explotaciones imposibilita el relleno de los huecos de explotación. En estos casos, y ante la falta de tierras limpias, esta Guía ofrece la posibilidad de rehabilitación de los mismos con el material de rechazo procedente del precibado de finos de los RCD mixto-cerámicos, siempre y cuando se cumplan las prescripciones descritas en este documento. Para ello, las Administraciones competentes en minería como las ambientales deberán trabajar de una manera coordinada para que el uso de los mismos en restauración minera sea también considerado una operación de puesta en valor de dichos residuos. De esta forma, las propuestas y recomendaciones de esta Guía contribuyen a lograr el objetivo de valorización del 70% en peso de los RCD no peligrosos generados en nuestro país para el año 2020, propuesto por la Directiva Marco de Residuos (Directiva 2008/98/CE); y recogido en nuestro ordenamiento jurídico en la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados y el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022 (PEMAR). Por último, y no por ello menos importante, el uso de estos RCD posibilita la rehabilitación de estos espacios mineros de una forma satisfactoria.

ESTUDIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO		ACCIONES DEL PROYECTO			
INFORMACIÓN RELEVANTE	ANÁLISIS/ ENSAYOS	FASE PREPARATORIA	FASE DE RELLENO	FASE DE CLAUSURA	FASE DE REHABILITACION
EXPLOTACIÓN MINERA	Datos administrativos Localización y delimitación	Autorización o modificación del Plan de restauración con RCD Autorización ambiental de la operación de valorización con RCD	Protocolo admisión RCD Libro de Registro		Asignación uso final
HUECO MINERO	Geometría y capacidad Condiciones derivadas del tipo de explotación minera	ACONDICIONAMIENTO DEL HUECO Retaluzado y retranqueo de taludes Limpieza y sanco de bermas y taludes. Regularización de la superficie del fondo del hueco	Los materiales se depositan en tongadas de espesor entre 20 y 50 cm, aunque se recomienda 30 cm, una vez compactadas	Varias opciones: - Sellado o - Capas de cobertura, que deben tener más de 1 m de espesor en el caso del relleno con RCD no péligrosos, para soporte de la vegetación	Aprovechamiento tierra vegetal acopiada Cobertura final debe permitir el enraizamiento de la vegetación, adecuado suministro de agua y nutrientes, pH adecuado y ausencia de toxicidad
	Infraestructuras auxiliares: - accesos y pistas interiores - instalaciones existentes - sistemas drenaje Materiales acumulados	Cubicación Plano topográfico detallado	Acondicionamiento de accesos o nuevo trazado Demolición, conservación o restauración de las instalaciones Desmantelamiento o mejora de los sistemas de drenaje existentes Retirada y gestión de los materiales acumulados		
TOPOGRAFÍA	Fisiografía y relieve del entorno cercano	Mapa de pendientes Mapa de orientaciones	Restauración geomorfológica		
GEOLOGÍA	Unidades litológicas Análisis estructural	ESTANQUEIDAD HUECO Barrera geológica natural (sin actuación) Sellado de zonas de fracturación, etc.			
		Columnas litoestratigráficas Cortes geológicos Sondeos y calicatas (detalles en Tabla 20)			

ESTUDIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO		ACCIONES DEL PROYECTO			
INFORMACIÓN RELEVANTE	ANÁLISIS/ ENSAYOS	FASE PREPARATORIA	FASE DE RELLENO	FASE DE CLAUSURA	FASE DE REHABILITACIÓN
GEOTECNIA	Caracterización macizo rocoso Análisis estabilidad taludes Materiales tipo suelo Parámetros geotécnicos	Sondeos geotécnicos y calcatas Ensayos geotécnicos en laboratorio Ensayo <i>in situ</i> resistencia al corte (detalles en Tabla 20)	Preparación de las condiciones de seguridad de la operación de relleno -Saneamiento y estabilidad de taludes -Mejora estabilidad en suelos - etc.	Operación de relleno en condiciones de seguridad	Remodelado y disminución de pendientes de los taludes finales. Revegetación taludes Drenaje de la capa de sellado
HIDROGEOLOGÍA	Unidades hidrogeológicas Vulnerabilidad acuíferos Permeabilidad Posición nivel freático Parámetros hidrogeológicos y dirección del flujo. Balance recursos subterráneos Puntos de agua Control calidad aguas	Sondeos hidrogeológicos Ensayos de permeabilidad (laboratorio o permeámetro autopercutor) (detalles en Tabla 20)	ESTANQUEIDAD DEL HUECO Barrera geológica natural (sin actuación) Barrera geológica artificial Barreras geosintéticas poliméricas Barreras geosintéticas de arcilla	Drenaje o evacuación de las aguas dentro del material de relleno Minimización de las aguas de infiltración	Asegurar la protección de las aguas subterráneas
PLAN DE VIGILANCIA (Tabla 18)					

Tabla 19. Síntesis de recomendaciones técnicas para las diferentes fases de un proyecto de rehabilitación de un hueco minero con RCD

ESTUDIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO		ACCIONES DEL PROYECTO			
INFORMACIÓN RELEVANTE	ANÁLISIS/ENSAYOS	FASE PREPARATORIA	FASE DE RELLENO	FASE DE CLAUSURA	FASE DE REHABILITACIÓN
HIDROLOGÍA Red de drenaje, cauces naturales, subcuencas externas y funcionamiento hidrológico Caudales punta Subcuencas internas y balance hidrológico del hueco Calidad aguas (aguas arriba y aguas abajo del hueco minero)	Toma de muestras de agua y análisis físico-químico	Red de cunetas de viales Canales perimetrales de desvío de escorrentías Sistemas de drenaje de fondo e internos: - Capas de gravas - Geodrenes - Tuberías Sistemas de captación y tratamiento de lixiviados: balsas de almacenamiento y pozos de registro	Drenaje o evacuación de las aguas dentro del material de relleno Minimización de las aguas de infiltración Restauración geomorfológica Captación y tratamiento de lixiviados, y vertido a cauce		Drenaje de la superficie final y de la capa de sellado Integración en la red de drenaje natural Asegurar la protección de las aguas superficiales
CLIMATOLOGÍA Clasificación climática y fitoclimática Parámetros climáticos (Tª medias, Precipitaciones mensuales y anuales, Pmáx, 24 horas, ETP y ET, vientos, etc.) Índices de aridez, productividad vegetal, etc.	Diagramas ombrotérmicos Balances hídricos				Selección de especies adaptadas a las condiciones climáticas
EDAFOLOGÍA Tipos de suelos o unidades geomorfoedáficas Parámetros edáficos	Perfil suelo por unidad geomorfoedáfica 3 calicatas y/o sondos edafológicos por ha. Ensayos humedad, mat. orgánica, sulfatos, granulométricos, etc.				Enmiendas y mejora de las condiciones edáficas
MEDIO BIÓTICO Unidades de vegetación Biotopos Fauna protegida		Mantenimiento de los acopios de tierra vegetal retirados antes de la explotación Minimización de la retirada de cubierta vegetal	Control del polvo, ruido, tráfico, etc. durante la fase de relleno		Integración ambiental de la revegetación

ESTUDIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO		ACCIONES DEL PROYECTO			
INFORMACIÓN RELEVANTE	ANÁLISIS/ENSAYOS	FASE PREPARATORIA	FASE DE RELLENO	FASE DE CLAUSURA	FASE DE REHABILITACIÓN
PAISAJE Unidades de paisaje Calidad visual y visibilidad	Análisis de cuencas visuales		Pantallas visuales, etc.		Integración paisajística
USOS DEL SUELO Y AFECCIONES TERRITORIALES Usos del suelo del entorno Marco legal del suelo: urbanismo, espacios naturales protegidos, Red Naturaleza 2000, habitats, patrimonio histórico, etc.			Control del polvo, ruido, tráfico, etc. o cualquier otro impacto que pudiera afectar a un espacio de valor ecológico o cultural, durante la fase de relleno		Contribuir a la mejora y conservación de los espacios protegidos o del patrimonio cultural
PLAN DE VIGILANCIA (Tabla 18)					

Tabla 19 (cont). Síntesis de recomendaciones técnicas para las diferentes fases de un proyecto de rehabilitación de un hueco minero con RCD

Número / Periodicidad del ensayo	Levantamiento de columna litostratigráfica	Sondeos	Calicatas ¹	Ensayos de permeabilidad ²	SPT	Penetrómetro manual ³	Vane Test ³	Toma de muestras ⁴
	1 / cantera	3 / 5.000 m ² Al menos uno debe realizarse con testificación continua	<ul style="list-style-type: none"> • 6 si la superficie ≤ 2 ha • 3/ha si la superficie > 2 ha. Debe cubrir tanto la plaza de cantera como la zona circundante	2 / ha	1 cada 3 m de profundidad o por nivel geotécnico en cada sondeo	2 / ha Debe tomarse tanto en frente como en plaza de cantera	2 / ha Debe tomarse tanto en frente como en plaza de cantera	muestras inalteradas cada 3 m de prof. en cada sondeo
Geología de detalle	X	X*	X					X
Hidrología y nivel piezométrico		X**						
Sustrato				X				X
	Permeabilidad							X
	Compresión simple				X	X		X
Resistencia al corte					X			X

¹ Las calicatas se utilizarán adicionalmente para observaciones edafológicas del entorno de la cantera. Adicionalmente podrán utilizarse sondeos edafológicos para complementar la información obtenida a través de las mismas.

² Permeámetro autopropulsado; Infiltrómetros; Ensayos triaxiales; Ensayos de bombeo.

³ Opcionales, para suelos arcillosos.

⁴ Sobre cada muestra inalterada se realizarán los siguientes ensayos: a) de identificación: granulometría por tamizado y sedimentación, límites de Atterberg, humedad natural, densidad real y aparente. Y b) de compactación, resistencia y deformabilidad: Proctor modificado, curvas de compactación, ensayo edométrico, expansividad, ensayos de resistencia (compresión simple, corte directo, triaxial) e hinchamiento Lambe (sólo en materiales arcillosos). Los ensayos de identificación se efectuarán en un mínimo del 50% de las muestras obtenidas, y los de compactación, resistencia y deformabilidad en un mínimo del 25%. Se dispondrá en cualquier caso de un mínimo de tres analíticas completas.

*Se realizarán sondeos adicionales si se considera que la zona resulta geológicamente compleja y no todas las unidades estratigráficas quedan suficientemente representadas a través de los sondeos existentes.

**Si no se puede justificar la posición del freático en el entorno de la explotación se elaborarán 4 sondeos hidrogeológicos adicionales.

Tabla 20. Síntesis de los ensayos recomendados para los proyectos de rehabilitación de un hueco minero con RCD

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alberruche, E., Arranz, J.C. Rodríguez, R., Vadillo, L., Rodríguez, V., Fernández, F.J. 2014. *Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas*. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural e IGME. 318 p.
- Alberruche, M.E., Arranz, J.C., Rodríguez, V., Fernández, F.J., Rodríguez, R., Vadillo, L. 2015. Metodología para la evaluación del impacto paisajístico residual de una mina de carbón a cielo abierto en el Valle de Laciana (España). *DYNA*, 82 (190): 60-69.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. Rome. 15 p.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. and Hackett, G. 1987. *DRASTIC a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting*. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK. EPA Report 600/2-87-035; 1-455. 641 p.
- Allue-Andrade J.L. 1990. *Atlas Fitoclimático de España. Taxonomías*. INIA. Madrid. 221 p.
- Almorox, J. 2003. *Climatología aplicada al medioambiente y agricultura*. Servicio de Publicaciones. ETSIA. Madrid. 201 p.
- ANEFA. 2008. *Día de los árboles y los áridos. Conoce una cantera o una gravera*. 3 de abril de 2008. Folleto. 4 p.
<http://conocelosaridos.org/pdfs/folletoAyA.pdf>
- Aronson, J., Le Floch, E., Ovalle, C. 2002. Semi-arid woodlands and desert fringes. In: Perrow, M.R., Davy, A.J. (Eds.). *Handbook of Ecological Restoration, vol. 2. Restoration in Practice*. Cambridge University Press, Cambridge. 466-485.
- Auge, M. 1995. Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental. *UBA*: 1-65. Buenos Aires. 38 p.
- Ayala Carcedo, F.J., Andreu, F.J. 2006. *Manual de Taludes*. Serie: Geotecnia. IGME. 456 p.
- Bieniawski, Z. T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions, South African Inst. of Civil Engineers*, 15 (12): 335-344.
- Bieniawski, Z. T. 1979. The geomechanics classification in rock engineering application. *Proc. 4th International Conference on Rock Mechanics*. Montreaux. Balkema. vol. 2: 41-48.
- Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley and Sons. Inc. 272 p.
- Blanco Fernández, D. 2011. *Diseño de metodología para la ubicación de vertederos de construcción y demolición y para cuantificar los residuos a gestionar: aplicación a la provincia de*



Castellón. Tesis Doctoral. Universitat Jaume I y Universidad Tecnológica Metropolitana del Estado de Chile. 522 p.

- 136
- BGR-LÄNDER. 1995. *Concept for the determination of the protective effectiveness of the cover above the groundwater against pollution*. Adhoc Working Group on Hydrogeology, Hannover. 28 p.
- Bradshaw, A.D. 1985. The Reclamation of Derelict Land and the Ecology of Ecosystems. In: Jordan III, W.R., Gilpin, M.E. and Aber, J.D. (Eds.). *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Research*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Cairns, J., Jr., Heckman, J. 1996. Restoration ecology: the state of an emerging field. *Annual Review of Energy and the Environment*, 21: 167–189.
- Calvo, F. 2003. *Metodología de diagnóstico y caracterización ambiental de vertederos de residuos urbanos para su control, cierre, sellado y reinserción al medio*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil. Área de Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Granada.
- Casado, L.M. 2010. *Estudio de viabilidad económica del negocio de reciclaje de residuos de construcción y demolición en la Comunidad de Madrid y diseño de planta de reciclaje*. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Carlos III de Madrid. 240 p.
- CCME. 2008. *National Classification System for Contaminated Sites*. Guidance Document. PN-1403. Canadian Council of Ministers of the Environment. Winnipeg. 15 p.
- Choi Y.D. 2007. Restoration ecology to the future: a call for new paradigm. *Restoration Ecology*, 15: 351–353.
- Civita M., Chiappone, A., Falco, M., Jarre, P. 1990. Preparazione della carta di vulnerabilità per la rilocalizzazione di un impianto Pozzi dell'acquedotto di Torino. *Proceedings First Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi*. Morano sul Parnaro. Vol 2: 461-462.
- COITAPAC (Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas y Peritos Agrícolas de Cataluña). 1996. *Hidrosiembras*. Normas Tecnológicas de Jardinería y Paisajismo NTJ 08H. Barcelona.
- Davidson, W.H., Graves, D.H. 1987. Opportunities for Forestry Practices on Reclaimed Surface Mines. In: *Proceedings of 1987 Symposium on Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation Univ. Kentucky*. Lexington, KY. 327-330.
- De Brito, J., Pereira, A.S., Correia, J.R. 2005. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concret Composites* 27(4): 429-433.
- DGOHCA-IGME. 2002. *Cartografía de vulnerabilidad de acuíferos subterráneos a la contaminación en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir*. Informe inédito. IGME. Madrid.

- DEP (Department of Environmental Protection). 2015. *Maine solid waste management rules: chapter 401. Landfill siting, design and operation*. 85 p.
- Department of Water. 2015. *Landfilling with inert materials. Water quality protection note n° 24*. Government of Western Australia. September 2015. 12 p.
- Doerfliger, N., Zwahlen, F. 1997. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: Gunay and Jonshon (eds), *Int. symp. on karst waters and environment impacts*. Antalya. Turkey, Balkema, 117-123.
- ECS (European Committee for Standardization). 2002. *EN 12457-2 Standard: Characterization of waste-Leaching-Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges-Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with high solid content and with particle size below 4 mm (without or with size reduction)*.
- EPA South Australia. 2007. *EPA guidelines for environmental management of landfill facilities (municipal solid waste and commercial and industrial general waste)*. 94 p.
- Eskandari, M., Homae, H., Mahmoodi, Pazira, E., Van Genuchten, M. Th. 2015. Optimizing landfill site selection by using land classification maps. *Environmental Science and Pollution Research* (2015) 22: 7754-7765. Springer. DOI 10.1007/s11356-015-4182-7
- EEA (European Environment Agency). 2005. *Towards an EEA Europe-wide assessment of areas under risk for soil contamination. Volume III. PRA.MS: scoring model and algorithm*. Final version, April 2005. 84 p.
http://www.eionet.europa.eu/software/prams/release1/PRAMS3_Methodology.pdf
- FAO. 2009. *Guía para la descripción de perfiles de suelos*. Cuarta edición. FAO, Roma. 111 p.
- FERCD (Federación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición). 2017. *Informe de Producción y Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España, Periodo 2011-2015*. Madrid, 1 de mayo de 2017. 52 p.
- Ferrer Juliá, M., Blanco, J., Ramírez, J. 2006. Propuesta metodológica para la adaptación del parámetro del número de curva a las nuevas fuentes de datos. *III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*. Zaragoza.
- Flores Martínez, F., Alegría, A., Lamata, J., Mallada, M.J., Martínez, A., De Miguel, P., García, S.L. 2010. Rehabilitación de espacios mineros con rellenos procedentes de la gestión de RCDs. Presentación Power Point. *Jornada Técnica sobre Sostenibilidad y Minería en la Rioja*. Logroño, 22 de Junio de 2010.
http://www.larioja.org/territorio/es/minas/jornadas-estudios-publicaciones-tecnicas/jornada-tecnica-sostenibilidad-mineria-rioja.ficheros/651359-524900_2-Rehabilitacion-FERNANDO.pdf
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. and Van Waegeningh, H.G. (Eds.) *Vulnerability of*



- soil and groundwater to pollutants*. TNO Committee on hydrological research, 38: 69-86. The Hague
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall. 604 p.
- Gómez Orea, D. 1994. *Ordenación del territorio. Una aproximación desde el medio físico*. ITGE y Ed. Agrícola Española, SA. Madrid. 238 p.
- Gandullo, J.M. 1974. Ensayo de evaluación cuantitativa de la insolación en función de la orientación y de la pendiente del terreno. Anales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. *Serie Recursos Naturales* 1, 95-107.
- González Bernáldez, F. 1981. *Ecología y paisaje*. Editorial Blume, Madrid.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2006. *Ingeniería Geológica*. Pearson. Prentice Hall. 715 p.
- García-Piñón, F., Sanfeliu, T., Meseguer, S., Jordán, M.M. 2008. Comparativa de revestimientos de base en vertederos en España y Chile. *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Castellón, 23-24 de julio de 2008. REDISA'2008. 10 p.
- Garrido Vergara, M.E. 2008. *Metodología de diagnóstico ambiental de vertederos, adaptación para su informatización utilizando técnicas difusas y su aplicación en vertederos de Andalucía*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil. Área de Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Granada. 523 p.
- GERD. 2012. *Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD*. Fueyo Editores. 292 p.
- Harris, J.A., Hobbs, R.J., Higgs, E., Aronson, J. 2006. Ecological restoration and global climate change. *Restoration Ecology*, 14: 170-176.
- Herrera Herbert, J. 2006. *Métodos de minería a cielo abierto*. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. Ingenieros de Minas. 119 p.
http://oa.upm.es/10675/1/20111122_METODOS_MINERIA_A_CIELO_ABIERTO.pdf
- Heneghan, L., Miller, S.P., Baer, S., Mac Callaham, A., Montgomery, J., Pavao-Zucherman, M., Roades, C.C., Richardson, S. 2008. Integrating soil ecological knowledge into restoration management. *Restoration Ecology*, 16 : 608-17.
- Hilderbrand, R.H., Watts, A.C. and Randle, A.M. 2005. The myths of restoration ecology. *Ecology and Society*, 10(1): 19.
- Hobbs, R.J., Arico, S., Aronson, J., Baron, J.S., Bridgewater, P, Cramer, V.A., Epstein, P.R., Ewel, J.J., Klink, C.A., Lugo, A.E., Norton, D., Ojima, D., Richardson, D.M., Sanderson, E.W., Valladares, F., Vila, M., Zamora, R., Zobel, M. 2006. Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Global Ecology and Biogeography*, 15: 1-7

- Hontoria, C. 1995. *El régimen de humedad de los suelos de la España Peninsular*. Tesis doctoral. Departamento de Edafología, ETSI Agrónomos. UPM. Inédito. http://oa.upm.es/22316/1/CHIQUINQUIRA_HONTORIA_FERNANDEZ.pdf
- Humphries, R.N. 2015. Use of reference sites in the evaluation of some rehabilitated native forests on surface mines in Australia. *Journal American Society of Mining and Reclamation*, Vol.4, No.2. <http://www.asmr.us/Portals/0/Documents/Journal/Volume-4-Issue-2/Borthwick-Al.pdf>
- Iglesias, S, Nicolás, J.L., Alía, R., Peñuelas, J.L., Prada, M.A., San Juan, A., Calvo, J.M., Rueda, E.J., Mallofret, E., Pérez, V., Samaniego, B., Vallejo, M., Martín, E., Villanueva, I., Fernández, G. 2012. *Protocolo técnico a aplicar en lo relativo al material forestal de reproducción en la redacción y ejecución de proyectos de repoblación y restauración forestal*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Madrid. 90 p.
- IGME. 1989. *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*. Serie Guías y Manuales, nº 2. Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 359 p.
- IGME. 2004. *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería* (nueva edición). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Guías y Manuales, nº 2. 359 p.
- IHOBE. 2005. *Guía Técnica para el Relleno de Canteras con Materiales Naturales de Excavación*. (Ley 1/2005 para prevención y corrección de la contaminación). Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 324 p.
- IHOBE. 2012. Manual IHOBE para redacción e implantación del plan de gestión de residuos de construcción y demolición y buenas prácticas gremiales. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Gobierno Vasco. Octubre 2012. 142 p.
- IHOBE. 2015. *Documento guía para la realización de balances hídricos en vertederos*. IHOBE Sociedad Pública de Gestión Ambiental-Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco. 203 p.
- Issa, S.M., Shehhi, B. Al. 2012. A Gis-based multi-criteria evaluation system for selection of landfill sites: a case study from Abu Dhabi, United Arab Emirates. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B2, 2012. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia. 133-138.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jiménez Madrid, A. 2011. *Estudio metodológico para el establecimiento de zonas de salvaguarda de masas de agua subterránea en acuíferos carbonatados utilizadas para consumo humano. Aplicación de la Directiva Marco del Agua*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Tesis Doctorales nº 20.



- Jorba, M., Vallejo, V.R. 2010. *Manual para la restauración de canteras de roca caliza en clima mediterráneo*. Àrea d'Avaluació i Restauració d'Activitats Extractives. Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya. 108 p.
- Josimovic, B., Maric, I. 2012. Methodology for the regional landfill site selection. Sime Curkovic (ed). *Sustainable Development – Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management*. Chapter 22: 513-538.
- Mel, J., Del Caño, A., De la Cruz, M.P. 2014. Sostenibilidad en la producción de árido granítico en el noroeste de España: consumo energético y emisiones de CO₂. *18th International Congress on Project Management and Engineering*. Alcañiz. 16-18th July 2014. 486-497.
- MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo). 1987. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Tecnología de Carreteras. Secretaría de Publicaciones. Madrid. 96 p.
- Ministerio de Fomento. 1999. *Máximas lluvias diarias en la España peninsular*. Serie monografías Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes, Dirección General de Carreteras. 19 p.
- Moreno Cayuela, F. 2000. Vertederos de Residuos Inertes. En: Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía (Ed). *Técnicas de prevención en la generación de suelos contaminados: La gestión de los residuos peligrosos*. Tomo I. Capítulo 13: 535-565.
- NCHRP. 2001. *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final Document. Appendix CC-1: Correlation of CBR values with soil index properties*. 204 p.
- NRC (National Research Council), 1993. *Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty*. National Academies Press. 204 p.
- Pastorok, R.A., MacDonald, A., Sampson, J.R., Wilber, P., Yozzo, D.J., Titre, J.P. 1997. An ecological decision framework for environmental restoration projects. *Ecological Engineering*, 9: 89-107.
- Pemán J., Navarro R., Serrada R. 2006. Elección de especies en las repoblaciones forestales. Contribuciones del profesor Ruiz de la Torre. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15(1): 87-102.
- Rivas-Martínez, S. 1990. *Bioclimatic belts of West Europe (relations between Bioclimate and Plant Ecosystems)*. Commission of the European Communities, European School of Climatology and Natural Hazards, Course on Clímate and Global Change, Arles (Rh8ne), 4-12 April 1990, 22 p.
- Rivas-Martínez, S. 2004. *Worldwide Bioclimatic Classification System*. Phytosociological Research Center, Spain.
www.globalbioclimatics.org

- Rodríguez, R., García, C., Manteca, J.I. 2006. *Cartografía Temática e Inventario en Zonas Mineras*. En Roberto Rodríguez y Ángel García Cortés (Eds.). Los Residuos Minero-Metalúrgicos en el Medio Ambiente. IGME. Madrid. 27-66.
- Romana, M. (1995) "The geomechanics classification SMR for slope correction". *Proc. 8th Int. ISRM Congress* (Fujii ed.).
- Romero, E. 2006. *Residuos de Construcción y Demolición*. Máster de Ingeniería Ambiental 2006-2007. Universidad de Huelva. 25 p.
- www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos%20Construccion.pdf
- Rubio Navas, J., Baltuille Martín, J.M., Alberruche del Campo, E., Bel-lan Ballester, A., Corral Lledó, M.M., Marchán Sanz, C., Pérez Cerdán, F. 2007. *Libro Blanco de la Minería de Aragón*. Departamento de Industria, Comercio y Turismo. Dirección General de Energías y Minas. Servicio de Ordenación Minera (Gobierno de Aragón) e IGME. 581 p.
- Ruiz de la Torre, J., Carreras Egaña, C., García Viñas, J.I. y Ortí Moris, M. 1996. *Manual de la Flora para la Restauración de Áreas Críticas y Diversificación en Masas Forestales*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Sanfeliu, T., Cepriá, J.J. 2001. Arcillas de uso cerámico. *XVI Reunión Científica de la Sociedad Española de Arcillas*. Curso de materias primas y métodos de producción de materiales cerámicos. Sociedad Española de Arcillas, Universidad Internacional de Andalucía, CSIC, Universidad de Jaén. Baeza (Jaén) del 22 al 26 de Octubre de 2001. 4-20.
- Shevenell, L.A., Henry, C.D., Christensen, L. 1997. *A ranking scheme developed to assess the relative potential of abandoned mine sites in Nevada to result in surface water and ground water degradation*. Nevada Bureau of Mines and Geology Open-File report 97-3. 49 p.
- SER (Society for Ecological Restoration). 2004. *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration. Washington, DC.
- SIEMCALSA. 2007. *Proyecto y análisis comparativo entre explotaciones de pizarra a cielo abierto y subterránea*. Junta de Castilla y León. 71 p.
- SIEMCALSA. 2008. *Los áridos en Castilla y León*. Junta de Castilla y León. 22 p.
- Siguero Llorente, P. L. 1999. *Manual de reforestación con especies autóctonas*. Siguero Llorente, P. L. (ed.). Madrid. 224 p.
- Soil Survey Staff. 2014a. *Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Soil Survey Staff. 2014b. *Claves para la Taxonomía de Suelos*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.



- Subdirección General de Calidad Ambiental. 2003. Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001 (ANEXOS I y III). Rv. 07. Documento de Trabajo. 86 p.
- Thornthwaite, W., Mather, J.R. 1955. The water balance. *Publications in climatology* VIII(1). Laboratory of Climatology, Centerton, 104 p.
- Thornthwaite, W., Mather, J.R. 1957. Instructions and tables for the computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in climatology* X(3). Laboratory of Climatology, Centerton, 311 p.
- Tongway, D.J., Hindley, N.L., Ludwig, J.A., Kearns, A.J., Barnett, G. 1997. Early indicators of ecosystem rehabilitation on selected minesites. In: Demonstrating Environmental Excellence 97. *Proceedings of the 22nd Annual Environmental Workshop* 12-17 October 1997, Adelaide, South Australia. Minerals Council of Australia, Dickson 494-505.
- Tongway, D., Hindley, N.L. 2003. *Indicators of Ecosystem Rehabilitation Success: Stage 2 – Verification of EFA Indicators*. Final report. Australian Centre for Mining Environmental Research, Darra.
- Toy, T.J., Foster, G.R. (Eds). 1998. Guidelines for the use of the Revised Universal Soil Loss Erosion Equation (RUSLE), version 1.06 on Mined Lands, Construction Sites and Reclaimed Lands. USDI- Office of Surface Mining. Denver, CO
- Turner, A.J.M., Braungardt Ch. and Potter, H. 2011. Risk-Based Prioritisation of Closed Mine Waste Facilities Using GIS. In: Rüde, Freund and Wolkersdorfer (Eds.). *Proceedings from the IMWA 2011: Mine Water-Managing the Challenges*. Aachen Germany, 667-672.
- Vadillo, L., Rodríguez, V. 2012. *Manual de gestión de residuos de industrias extractivas*. IGME – Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Inédito (Centro de Documentación IGME). 75 p.
- Vallejo, R., Cortina, J., Vilagrosa, A., Seva, J.P., Alloza, J.A. 2003. Problemas y perspectivas de la utilización de leñosas autóctonas en la restauración forestal. En: Rey Benayas, J.M., Espigares Pinilla, T. y Nicolau Ibarra (Eds.). *Restauración de ecosistemas mediterráneos*. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. 11-42.
- Vallejo, V.R., Aronson, J., Pausas, J., Cortina, J. 2005. Restoration of Mediterranean Woodlands. In: Van Andel, J. and Aronson, J. (Eds.). *Restoration Ecology. Chapter 14. The New Frontier*. Blackwell Publ., Oxford.
- VV.AA. 2007. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente. Madrid. 1250 p.
- Van Stempwoort, D. Ewert, L., Wassenaar, L. 1992. *AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada*. PPWD pilot project, Sept. 1991

– March 1992. Groundwater and Contaminants Project., Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute.

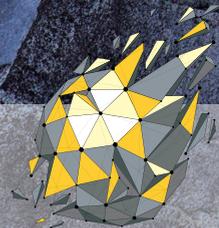
Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., Jiménez, P. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability zapping in carbonat (karstic) aquifers: The COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal* 14: 912-925.

Vogel, W. 1997. *A manual for training reclamation inspectors in the fundamentals of soils and vegetation*. USDA-Forest Service. 194 p.

Woodruff, N.P., and Siddoway, F.H. 1965. A wind erosion equation. *Soil Science Society of American Proceedings*, 29(5): 602-608.

Zinck, J.A. 2012. *Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. ITC Special Lecture Notes Series. ITC, Enschede, The Netherlands.

ANEXO 1



CARACTERIZACIÓN DE LOS RCD DE PRECRIBADO



	Pág.
1. CARACTERIZACIÓN DE LOS RCD DE PRECRIBADO PARA LA REHABILITACIÓN DE HUECOS MINEROS	153
1.1. Selección y recogida de muestras de gestores autorizados	153
1.2. Criterios y ensayos para la determinación del carácter inerte de los RCD	155
1.3. Caracterización básica de los RCD de precibado: lixiviabilidad y parámetros orgánicos (Orden AAA/661/2013)	158
1.3.1. Lixiviabilidad de las muestras de RCD	158
1.3.1.1. Metales pesados y metaloides	163
1.3.1.2. Sales y sólidos totales disueltos (STD)	164
1.3.1.3. Índice fenol y carbono orgánico disuelto (COD)	165
1.3.2. Parámetros orgánicos de las muestras de RCD	165
1.4. Caracterización geotécnica de los RCD de precibado	168
1.4.1. Caracterización de los RCD como relleno (PG-3)	168
1.4.2. Ensayo de compactación PROCTOR Normal.	173
1.4.3. Composición mineralógica (DRX)	174
2. BIBLIOGRAFÍA	177

	Pág.
Figura 1. Plantas de reciclaje de gestores autorizados donde se han recogido muestras de RCD y área de influencia (50 km)	154
Figura 2. Acopios de material de precibado de hormigón y mezcla hormigón-cerámicos de donde se han recogido muestras para la caracterización de la lixiviabilidad y la realización de otros ensayos	158
Figura 3. Acopios de material de precibado mixto-cerámicos de donde se han recogido las muestras para la caracterización de la lixiviabilidad y la realización de otros ensayos	159
Figura 4. Diagrama de cajas para la representación de la distribución de las concentraciones (mg/kg) de los metales lixiados de las muestras de precibado de RCD analizadas	163
Figura 5. Toma de muestras de material de rechazo (precibado) mixto-cerámico para determinación de contenidos totales de parámetros orgánicos (BTEX, PCB, aceites minerales y HPA)	165
Figura 6. Toma de muestras de material de rechazo (precibado) de hormigón y mezcla hormigón-cerámicos para determinación de parámetros orgánicos (BTEX, PCB, aceites minerales y HPA)	166
Figura 7. Criterios para la clasificación de suelos para rellenos tipo terraplén según criterios del PG-3	168
Figura 8. Empleo de tipos de suelos según las distintas zonas de un relleno tipo terraplén (PG-3)	171
Figura 9. Valor de los índices CBR calculados (AASHTO) para todas las muestras de RCD	172
Figura 10. Resultados del ensayo de compactación PROCTOR Normal en muestras de RCD	173
Figura 11. Análisis comparativo de la humedad de las muestras de RCD y la humedad óptima de compactación que se debe alcanzar según el ensayo PROCTOR Normal	174
Figura 12. Composición mineralógica del precibado de residuos de RCD mixto-cerámicos y de hormigón determinada por Difracción de Rayos X (análisis semicuantitativo)	175

	Pág.
Tabla 1. Número de plantas de gestores autorizados y muestras recogidas de RCD	154
Tabla 2. Valores límite de lixiviación para residuos inertes establecidos en la Orden AAA/661/2013	156
Tabla 3. Valores límite de contenido total de parámetros orgánicos para residuos inertes establecidos en la Orden AAA/661/2013	157
Tabla 4. Caracterización de la lixiviabilidad (ensayo UNE-EN 12457-4) de muestras de precibado (rechazo) obtenidas de gestores de RCD de la Comunidad Autónoma de Madrid	160
Tabla 5. Caracterización de la lixiviabilidad (ensayo UNE-EN 12457-4) de muestras de precibado (rechazo) obtenidas de gestores de RCD de las Comunidades Autónomas de Andalucía, Extremadura, Cantabria y País Vasco	161
Tabla 6. Caracterización de la lixiviabilidad (ensayo UNE-EN 12457-4) de muestras de precibado (rechazo) obtenidas de gestores de RCD de las Comunidades Autónomas de Castilla y León, Comunidad Valenciana, Aragón, Región de Murcia y Cataluña	162
Tabla 7. Contenido total de parámetros orgánicos en muestras de precibado (rechazo) obtenidas de gestores de RCD de la Comunidad Autónoma de Madrid	167
Tabla 8. Clasificación de las muestras de RCD para rellenos tipo terraplén según criterios del PG-3	169

1. CARACTERIZACIÓN DE LOS RCD DE PRECRIBADO PARA LA REHABILITACIÓN DE HUECOS MINEROS

La mayoría de las plantas de reciclaje autorizadas como “gestores recicladores de RCD” con emplazamiento fijo presentan generalmente una o dos líneas de producción de áridos reciclados dependiendo de los materiales o RCD procesados: hormigón y escombros mixtos o cerámicos. Estos últimos suelen proceder de la demolición de estructuras de edificación o de obras menores de reparación domiciliaria, siendo común que lleguen mezclados sin haber sido sometidos a una separación selectiva en origen. En España, al igual que en otros países mediterráneos (De Brito *et al.*, 2005), el mayor volumen de RCD generados pertenecen a esta categoría. En ambas líneas de producción, en la fase de precribado de finos, proceso previo al de trituración y clasificación, se produce un rechazo de material pétreo (tamaño entre 0-20 mm o 0-40 mm), de calidad inferior a la zahorra que se obtiene tras el proceso de trituración por el alto contenido de tierra y arena (GERD, 2012). Este material es difícilmente comercializable y es, por lo general, eliminado en vertedero o en algunos casos acopiado en las plantas de tratamiento. El volumen de material pétreo rechazado en la línea de producción de áridos reciclados mixto-cerámicos es muy elevado, se estima *grosso modo* que se encuentra en torno al 50% del total de este tipo de RCD que ingresa en las plantas de reciclaje, tal y como señalan la mayoría de los gestores consultados próximos a núcleos urbanos con una elevada producción de RCD. Por el contrario, el rechazo de la línea de hormigón suele ser muy bajo y en la mayoría de los casos suele comercializarse en su totalidad. La valorización de estos materiales mediante su empleo en la restauración, acondicionamiento y relleno de huecos mineros es el objetivo fundamental de la presente Guía.

1.1. Selección y recogida de muestras de gestores autorizados

Con el objeto de llevar a cabo una caracterización básica de los materiales finos de rechazo obtenidos en la fase de pretratamiento o precribado (GERD, 2012) se han realizado, en laboratorios acreditados, los ensayos propuestos en la Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, sobre 30 muestras obtenidas *in situ* en plantas de reciclaje de diversos gestores autorizados de RCD distribuidos por todo el territorio español. En la **Tabla 1** se muestra: el número de plantas, muestras recogidas en cada una de ellas y su tipología (hormigón, mixto o cerámicos y hormigón-mixto), y la CCAA en la que se ubican. Los rechazos pétreos de las plantas de tratamiento proceden mayoritariamente del precribado de residuos mixto-cerámicos, tal y como se ha comentado. Por ello, el ochenta y siete por ciento de las muestras recogidas han sido de dicho material. Mientras que los rechazos de la línea de reciclado del hormigón suelen ser escasos y tienen un carácter muy marginal, de ahí que representen tan solo el diez por ciento de las muestras analizadas. En la **Figura 1** se muestra de forma gráfica la localización de las instalaciones de reciclaje visitadas y sus áreas de influencia (50 km).

Por otra parte, la caracterización geotécnica de dichos materiales se ha realizado teniendo en consideración los resultados obtenidos en algunos de los ensayos propuestos en el *Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes* o PG-3 para rellenos (Orden



FOM/1382/2002), el ensayo de compactación Proctor normal y otras pruebas complementarias.

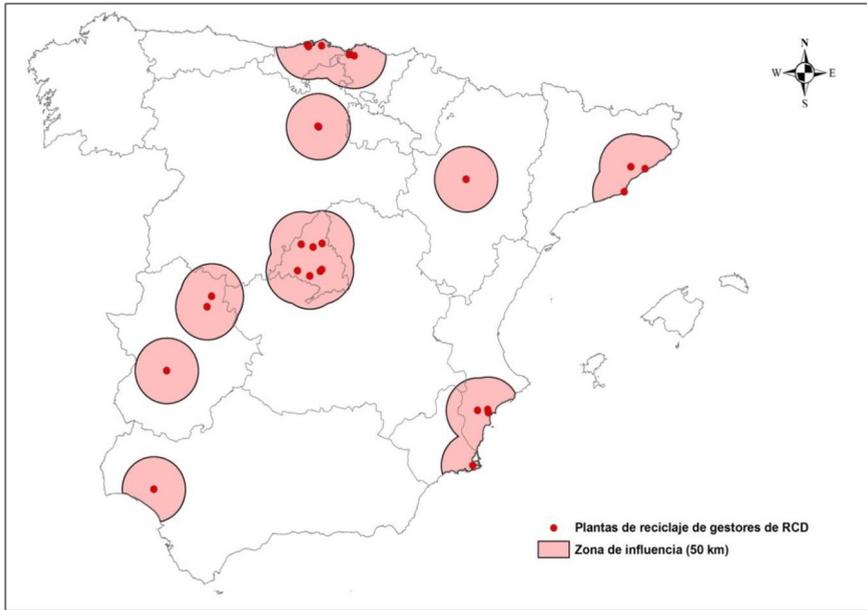


Figura 1. Plantas de reciclaje de gestores autorizados donde se han recogido muestras de RCD y área de influencia (50 km)

COMUNIDAD AUTÓNOMA	Nº Plantas	Nº Total Muestras	TIPOLOGÍA MUESTRA		
			Hormigón	Mixto cerámicos	Hormigón/Mixto
ANDALUCÍA	1	1		1	
ARAGÓN	1	1		1	
CANTABRIA	3	3		3	
CASTILLA Y LEÓN	2	2		2	
CATALUÑA	3	3		3	
COMUNIDAD VALENCIANA	3	3		3	
COMUNIDAD DE MADRID	7	10	2	7	1
EXTREMADURA	3	4	1	3	
MURCIA	1	1		1	
PAÍS VASCO	2	2		2	
	26	30	3	26	1

Tabla 1. Número de plantas de gestores autorizados y muestras recogidas de RCD

1.2. Criterios y ensayos para la determinación del carácter inerte de los RCD

El R.D. 1481/2001 define los residuos inertes como: *“aquellos residuos no peligrosos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente ni de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana. La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes de los residuos y la ecotoxicidad del lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas”* (art. 2 b).

Los criterios, procedimiento y pruebas a realizar para la determinación de la idoneidad y carácter inerte de los RCD susceptibles de ser utilizados en restauración minera serán los propuestos en la Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, y en donde se establecen los criterios de admisión o requisitos que deben cumplir los residuos para ser admitidos en vertederos de inertes (Anexo II, apartado 2.1). La caracterización básica de los RCD para el relleno de huecos mineros tendrá por objeto asegurar el carácter inerte de los mismos para dicho fin. Dicha caracterización incluye información relativa a: la fuente y origen del residuo, información del proceso que genera el residuo, grado de homogeneidad, aspecto, composición química y lixiviabilidad si procede o la fracción en peso de los componentes cuando se trata de mezclas de residuos inertes, u otro tipo de datos que les sean de aplicación, tal y como se describe en el apartado 1 de dicha orden, o en algunas de las Guías o manuales reseñados en la revisión bibliográfica.

De acuerdo con lo establecido en la Orden AAA/661/2013 cuando los residuos no hayan sido previamente seleccionados, no procedan de un flujo único (única fuente) de un único tipo de residuo, existan evidencias de contaminación con sustancias peligrosas (ya sea tras una inspección visual, ya sea por el origen del residuo) o simplemente cuando existan dudas sobre el carácter inerte de los residuos, será necesaria la realización de pruebas o ensayos de laboratorio para la caracterización de la lixiviabilidad de los residuos y la determinación del contenido total de ciertos parámetros orgánicos, para su posterior comparación con los umbrales o valores límite establecidos en dichos ensayos para los residuos inertes. En el caso de los RCD de rechazo destinados a restauración de huecos mineros, tanto por la definición del residuo en sí como en base a los resultados obtenidos en las muestras evaluadas -como posteriormente se reseñará muchas de las muestras de RCD mixtos evaluadas e incluso algunas muestras de RCD de hormigón han resultado ser residuos no inertes no peligrosos- se considera necesaria la caracterización previa del residuo.

La Orden AAA/661/2013 establece valores límite de lixiviación de determinados componentes obtenidos mediante el método de ensayo UNE-EN 12457-4 *“Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño)”*. Dichos valores están expresados en mg/kg de materia seca, y se muestran en la **Tabla 2**. En ocasiones, por decisión del órgano ambiental competente de la Comunidad Autónoma



o cuando se supere el valor límite de lixiviación establecido en el anterior ensayo para los sulfatos por ejemplo, se deberán considerar además los valores límite de lixiviación establecidos mediante el método prEN 14405 “*Prueba de comportamiento de lixiviación: ensayo de percolación del flujo ascendente (ensayo de percolación del flujo ascendente para componentes inorgánicos)*”, para la columna C_0 (primer eluato del ensayo de percolación con una relación líquido sólido de 0,1 l/kg). Estos valores límite están expresados en mg/l, y se recogen en la **Tabla 2**.

Componente	Ensayo de lixiviación UNE-EN 12457-4 L/S = 10 l/kg (mg/kg de materia seca)	Ensayo de percolación prEN 14405 C_0 (mg/l)
As	0,5	0,06
Ba	20	4
Cd	0,04	0,02
Cr Total	0,5	0,1
Cu	2	0,6
Hg	0,01	0,002
Mo	0,5	0,2
Ni	0,4	0,12
Pb	0,5	0,15
Sb	0,06	0,01
Se	0,1	0,04
Zn	4	1,2
Cloruro	800	450
Fluoruro	10	2,5
Sulfato	1.000*	1.500
Índice de fenol	1	0,3
COD**	500	160
STD***	4.000	--

* Aunque el residuo no cumpla este valor correspondiente al sulfato, podrá considerarse que cumple los criterios de admisión si la lixiviación no supera ninguno de los siguientes valores: 1500 mg/l en C_0 con una relación entre líquido y sólido (L/S) igual a 0,1 l/kg y 6000 mg/kg con una relación L/S = 10 l/kg. Será necesario utilizar el ensayo de percolación para determinar el valor límite con una relación L/S = 0,1 l/kg en las condiciones iniciales de equilibrio, mientras que el valor con una relación L/S = 10 l/kg se podrá determinar, bien mediante una prueba de lixiviación por lotes, bien mediante un ensayo de percolación en condiciones próximas al equilibrio local.

** Si el residuo no cumple estos valores de carbono orgánico disuelto (COD) con su propio pH, podrá alternativamente probarse con una relación L/S = 10 l/kg y un pH entre 7,5 y 8. El residuo podrá considerarse conforme a los criterios de admisión de COD si el resultado de esta determinación no es superior a 500 mg/kg. (Existe un proyecto de método basado en la prenorma prEN 14429).

*** Los valores de sólidos totales disueltos (STD) podrán utilizarse como alternativa a los valores de sulfato y cloruro.

Tabla 2. Valores límite de lixiviación para residuos inertes establecidos en la Orden AAA/661/2013

Los RCD para ser considerados inertes deberán tener además contenidos totales de COT (carbono orgánico total), BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos), PCB (policlorobifenilo, 7 congéneres), aceite mineral (C10 a C40) y HPA (hidrocarburos policíclicos aromáticos, 16 congéneres) por debajo de los valores límite recogidos en la **Tabla 3**.

Parámetro	Valor límite (mg/kg de materia seca)
COT (carbono orgánico total)	30.000*
BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos)	6
PCB (policlorobifenilo, 7 congéneres)	1
Aceite mineral (C10 a C40)	500
HPA (hidrocarburos policíclicos aromáticos, 16 congéneres)**	55

* En el caso de la tierra, previa conformidad del órgano ambiental competente de la Comunidad Autónoma podrá aplicarse un valor límite más alto siempre que el carbono orgánico disuelto (COD) alcance un valor máximo de 500 mg/Kg a L/S = 10 l/kg, bien con el pH propio del residuo o con un pH situado entre 7,5 y 8.

** Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno.

Tabla 3. Valores límite de contenido total de parámetros orgánicos para residuos inertes establecidos en la Orden AAA/661/2013

Para la determinación de algunos de los parámetros orgánicos, la Orden AAA/661/2013 propone los siguientes métodos de ensayo:

- UNE-EN 13137. Caracterización de residuos. Determinación del carbono orgánico total (COT) en residuos, lodos y sedimentos.
- UNE-EN 15308. Caracterización de residuos. Determinación de bifenilos policlorados (PCB) seleccionados en residuos sólidos utilizando cromatografía gaseosa capilar con detección por captura de electrones o espectrometría de masas.
- UNE-EN 15527. Caracterización de residuos. Determinación de hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) en residuos por cromatografía en fase gaseosa/espectrometría de masas (CG/EM)

En relación con las pruebas y análisis para las que todavía no se disponga de métodos aprobados según una norma EN, se podrán utilizar el proyecto de norma CEN cuando se disponga en formato prEN, o bien otras normas y procedimientos que garanticen la obtención de resultados equivalentes a los métodos citados, previa aprobación por los órganos ambientales competentes de las Comunidades Autónomas.



1.3. Caracterización básica de los RCD de precibado: lixiviabilidad y parámetros orgánicos (Orden AAA/661/2013)

158

1.3.1. Lixiviabilidad de las muestras de RCD

La lixiviabilidad ha sido determinada mediante el ensayo de lixiviación UNE-EN 12457-4. La determinación de las concentraciones en mg/kg de materia seca de los componentes considerados en la Orden AAA/661/2013 para residuos inertes (**Tabla 2**), que pudieran estar presentes en los lixiviados generados en dicha prueba, se ha llevado a cabo aplicando diversos métodos normalizados. Todos estos ensayos han sido realizados en los Laboratorios del IGME, y han sido sometidos a controles de calidad internos. El análisis de lixiviabilidad se ha llevado a cabo sobre la totalidad de las muestras recogidas, mostrándose en las **Figuras 2 y 3** algunos de los acopios de donde se han obtenido las mismas. Por último, los resultados obtenidos quedan reflejados en las **Tablas 4 a 6**, siendo descritos a continuación.

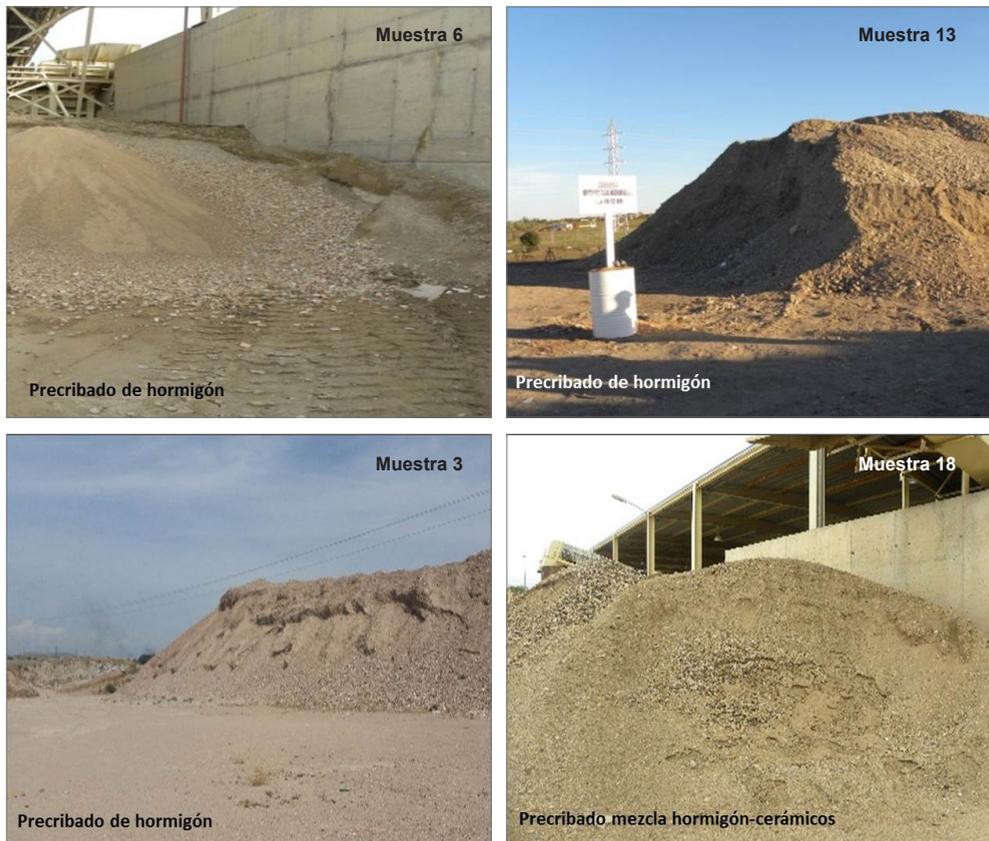


Figura 2. Acopios de material de precibado de hormigón y mezcla hormigón-cerámicos de donde se han recogido muestras para la caracterización de la lixiviabilidad y la realización de otros ensayos

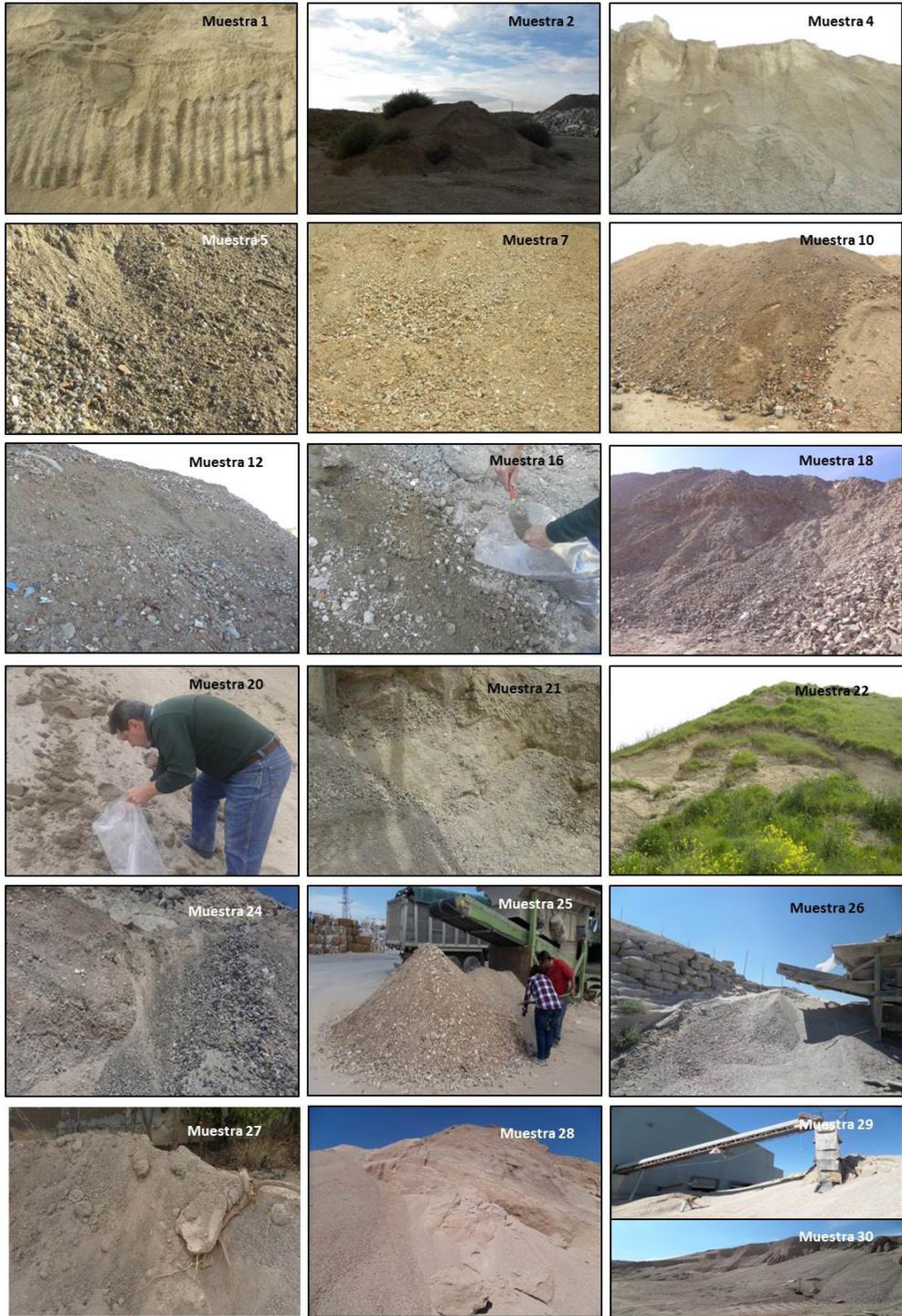


Figura 3. Acopios de material de precrizado mixto-cerámicos de donde se han recogido las muestras para la caracterización de la lixiviabilidad y la realización de otros ensayos

ENSAYO DE LIXIVIACIÓN UNE-EN 12457-4 Orden AAA/661/2013		COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID										HORMI- GÓN/ CERÁMICOS (mg/kg)
		MATERIAL DE PRECIBADO (RECHAZO)										
		HORMIGÓN (mg/kg)					MIXTO-CERÁMICOS (mg/kg) MEZCLA					
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	MUESTRA 3	MUESTRA 6	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 4	MUESTRA 5	MUESTRA 7	MUESTRA 9	MUESTRA 10	MUESTRA 8	
As	0,5	0,028	0,063	0,035	0,091	0,0793	0,1	0,183	0,042	0,103	0,197	
Ba	20	0,725	0,0429	0,504	0,403	0,449	0,442	0,198	0,45	0,112	0,402	
Cd	0,04	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Cr Total	0,5	0,067	0,0571	0,244	0,043	0,0393	0,064	0,0417	0,04	0,054	0,0848	
Cu	2	0,12	0,0517	0,146	0,039	0,0447	0,19	0,873	0,05	0,05	0,0575	
Hg	0,01	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*	<0,05*	
Mo	0,5	0,043	0,0334	0,0695	0,112	0,0265	0,022	0,0241	0,039	0,023	0,0255	
Ni	0,4	0,058	<0,05	0,234	<0,05	<0,05	<0,05	0,063	0,176	0,072	0,119	
Pb	0,5	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	
Sb	0,06	0,023	0,0125	0,0632	0,029	0,0176	0,019	0,0167	0,015	0,008	0,0311	
Se	0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,0547	
Zn	4	0,14	0,182	0,249	0,425	0,712	0,269	0,644	0,721	0,264	0,263	
Cloruro	800	50	10	90	140	10	310	10	40	10	20	
Fluoruro	10	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
Sulfato	1.000	8.840	280	15.100	18.700	6.079	7.520	1.169	13.793	2.796	13.696	
Índice Fenol	1	0,07	0,08	0,06	0,07	0,10	0,14	0,10	0,09	0,07	0,11	
COD	500	165	64	121	82	54	112	78	66	84	71	
STD	4.000	14.656	1.310	21.238	24.798	10.780	13.078	3.040	21.166	5.478	17.928	
TIPO DE RESIDUO		No Peligroso	Inerte	No Peligroso	No Peligroso	No Peligroso	No Peligroso	No Peligroso	No Peligroso	No Peligroso	No Peligroso	

* Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución

Tabla 4. Caracterización de la lixiviabilidad (ensayo UNE-EN 12457-4) de muestras de precibado (rechazo) obtenidas de gestores de RCD de la Comunidad Autónoma de Madrid

ENSAYO DE LIXIVIACIÓN UNE-EN 12457-4 Orden AAA/661/2013		MATERIAL DE PRECIBADO (RECHAZO)													
		HORMI- GÓN (mg/kg)	MIXTO-CERÁMICOS (mg/kg)												
			EXTRE- MADURA	ANDALU- CIA	EXTREMADURA			CANTABRIA			PAÍS VASCO				
PARÁME- TROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	MUESTRA 13	MUESTRA 11	MUESTRA 12	MUESTRA 14	MUESTRA 15	MUESTRA 16	MUESTRA 17	MUESTRA 18	MUESTRA 19	MUESTRA 20				
As	0,5	0,042	0,048	0,043	0,041	0,023	0,007	0,013	0,019	0,035					
Ba	20	0,235	0,381	0,464	0,089	0,038	0,342	0,501	0,374	0,860					
Cd	0,04	<0,002	<0,004	<0,004	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002					
Cr-Total	0,5	0,089	0,009	0,212	0,060	0,015	0,041	0,098	0,039	0,088					
Cu	2	0,043	0,065	0,023	0,033	0,034	0,069	0,134	0,013	0,170					
Hg	0,01	<0,005	<0,001	<0,001	<0,005	<0,005	<0,005	<0,01	<0,005	<0,01					
Mo	0,5	0,043	0,226	0,068	0,020	0,045	0,065	0,168	0,037	0,113					
Ni	0,4	0,005	0,01	0,012	0,007	<0,005	0,006	0,022	<0,005	0,044					
Pb	0,5	0,004	0,011	0,008	0,002	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	0,005					
Sb	0,06	0,025	0,026	0,021	0,031	0,046	0,147	0,046	0,070	0,097					
Se	0,1	<0,005	<0,001	0,011	<0,005	<0,005	0,009	0,016	0,008	0,024					
Zn	4	0,006	0,186	0,178	0,043	0,020	<0,01	0,012	<0,01	0,153					
Cloruro	800	7	5	23	5	5	<1	9	<1	18					
Fluoruro	10	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,64	0,66	0,64	0,96					
Sulfato	1.000	129	812	800	69	55	205	104	268	2.440					
Índice Fenol	1	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005	0,006	<0,005	<0,005					
COD	500	17	23	17	10	17	40	68	19	13					
STD	4.000	283	1.266	1.285	151	220	340	423	402	2.501					
TIPO DE RESIDUO		Inerte	Inerte	Inerte	Inerte	Inerte	No Peligroso	Inerte	No Peligroso	No Peligroso					

Tabla 5. Caracterización de la lixiviabilidad (ensayo UNE-EN 12457-4) de muestras de precibado (rechazo) obtenidas de gestores de RCD de las Comunidades Autónomas de Andalucía, Extremadura, Cantabria y País Vasco

ENSAYO DE LIXIVIACIÓN UNE-EN 12457-4 Orden AAA/661/2013		MATERIAL DE PRECIBADO (RECHAZO)											
		MIXTO-CERÁMICOS (mg/kg)											
		VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	CASTILLA Y LEÓN		COMUNIDAD VALENCIANA			ARAGÓN		R. MURCIA		CATALUÑA	
MUESTRA 21	MUESTRA 22		MUESTRA 23	MUESTRA 24	MUESTRA 25	MUESTRA 26	MUESTRA 27	MUESTRA 28	MUESTRA 29	MUESTRA 30	MUESTRA 29	MUESTRA 30	
As	0,5	0,013	0,041	0,012	0,011	0,012	0,013	0,050	0,010	0,012	0,028	0,028	
Ba	20	0,752	0,876	0,445	0,860	1,128	1,020	1,428	0,971	1,140	0,551	0,551	
Cd	0,04	<0,004	<0,004	<0,002	<0,002	<0,004	<0,004	<0,002	<0,002	<0,002	<0,004	<0,004	
Cr Total	0,5	0,176	0,009	0,106	0,010	0,226	0,423	0,037	0,414	0,201	0,155	0,155	
Cu	2	0,061	0,051	0,074	0,020	0,107	0,204	0,032	0,026	0,081	0,165	0,165	
Hg	0,01	<0,01	<0,01	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,005	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	
Mo	0,5	0,068	0,050	0,274	0,083	0,220	0,067	0,106	0,101	0,094	0,161	0,161	
Ni	0,4	0,018	<0,01	<0,005	<0,005	0,010	0,018	0,008	<0,005	0,013	0,018	0,018	
Pb	0,5	<0,004	<0,004	<0,002	0,003	0,004	0,006	0,005	<0,002	<0,002	<0,004	<0,004	
Sb	0,06	0,007	0,038	0,177	0,022	0,049	0,003	0,047	0,017	0,022	0,222	0,222	
Se	0,1	<0,01	<0,01	0,007	0,004	0,014	0,018	0,005	0,009	0,009	0,019	0,019	
Zn	4	<0,02	0,366	<0,01	0,065	0,086	<0,02	0,242	<0,01	<0,01	0,032	0,032	
Cloruro	800	8	<1	3	41	40	19	26	26	30	27	27	
Fluoruro	10	<0,5	<0,5	0,76	1,66	0,55	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	
Sulfato	1.000	1.500	2.130	362	362	1.780	1.690	988	552	730	1.520	1.520	
Índice Fenol	1	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,090	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	
COD	500	66	37	46	20	1416	210	324	47	48	61	61	
STD	4.000	1.734	2.403	545	595	2.421	2.581	1.195	837	1.115	2.176	2.176	
TIPO DE RESIDUO		No Peligroso	No Peligroso	No Peligroso	Inerte	Peligroso	No Peligroso	Inerte	Inerte	Inerte	No Peligroso	No Peligroso	

Tabla 6. Caracterización de la lixiviabilidad (ensayo UNE-EN 12457-4) de muestras de precibado (rechazo) obtenidas de gestores de RCD de las Comunidades Autónomas de Castilla y León, Comunidad Valenciana, Aragón, Región de Murcia y Cataluña

1.3.1.1. Metales pesados y metaloides

Las concentraciones de metales pesados y metaloides: arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), antimonio (Sb) y cinc (Zn) en el lixiviado obtenido de las muestras de RCD, tras aplicar el ensayo de lixiviación UNE-EN 12457-4, se han determinado mediante un análisis multielemental con ICP-MS (*Espectrometría de Plasma Acoplado Inductivamente-Espectrometría de Masas*). En muestras con elevadas concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) ha sido necesaria una mayor dilución para el análisis por ICP-MS. Debido a ello, esta técnica ha presentado un límite de detección para el mercurio (Hg) de 0,05 mg/kg en todas las muestras de la Comunidad de Madrid, por encima del valor límite normativo de 0,01 mg/kg para este metal en residuos inertes. Por lo tanto, en estos casos no ha sido posible realizar un análisis comparativo.

Las concentraciones de metales y metaloides en los lixiviados de todas las muestras analizadas, considerados en la Orden AAA/661/2013, se encuentran por debajo de los valores límite establecidos por dicha norma para los residuos inertes. A excepción del antimonio (Sb) que presenta en algunas muestras de RCD del País Vasco, Cantabria, Cataluña y Comunidad Valenciana concentraciones entre 0,07 y 0,22 mg/kg, por encima del valor de 0,06 mg/kg establecido

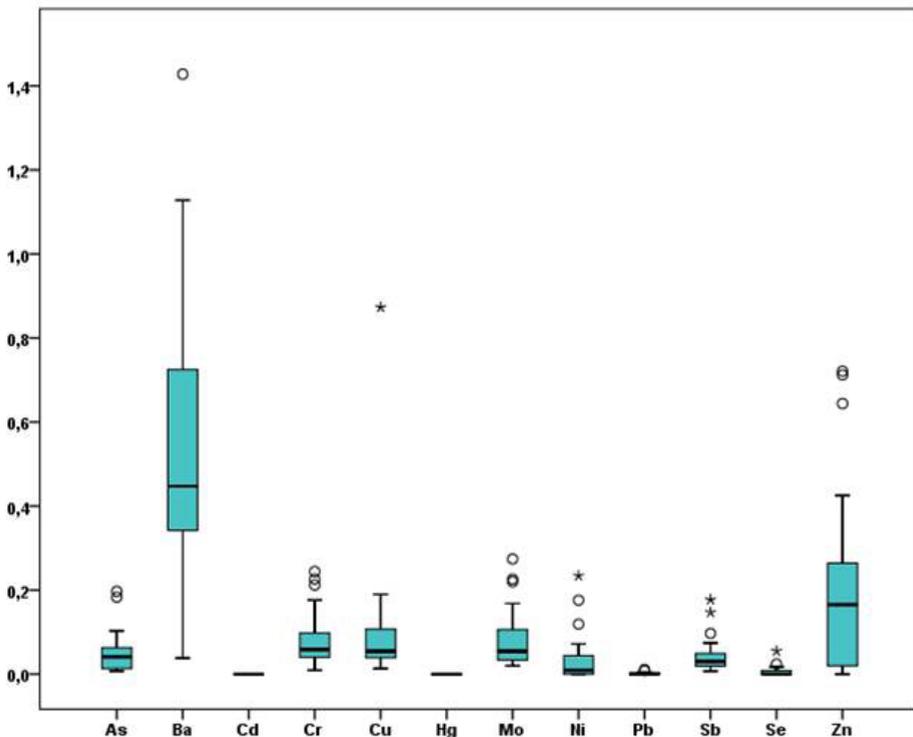


Figura 4. Diagrama de cajas para la representación de la distribución de las concentraciones (mg/kg) de los metales lixiviados de las muestras de precibado de RCD analizadas



para ese elemento (**Tablas 4 a 6**). Como consecuencia de ello, estas últimas muestras deben ser calificadas como *residuos no peligrosos*. No obstante, dichas concentraciones de Sb no son muy elevadas, y están lejos de superar el umbral de 0,7 mg/kg a partir del cual se considerarían residuos peligrosos por la anterior normativa.

El análisis estadístico del rango intercuartil ($Q_1 - Q_3$) que, en este caso, expresa la diferencia entre los valores que representan el 25% (Q_1) y 75% (Q_3) de los valores de concentración medidos de un determinado metal en los lixiviados del conjunto de muestras de precibado analizadas, y que en el diagrama de caja y bigotes queda reflejado por el tamaño de ésta (**Figura 4**), pone de relieve la mayor variabilidad de las concentraciones de bario (Ba) y cinc (Zn) en los RCD estudiados con respecto al resto de metales y metaloides que han sido considerados en el análisis.

1.3.1.2. Sales y sólidos totales disueltos (STD)

La determinación de las concentraciones de aniones como cloruros, sulfatos y fluoruros en el lixiviado obtenido tras el ensayo de lixiviación UNE-EN 12457-4, se ha realizado mediante: *Espectrofotometría de Absorción Ultravioleta-Visible (UV-Vis)* en el caso de cloruros y sulfatos; y *Cromatografía Iónica con un Electrodo Selectivo de Iones* en el caso de los fluoruros.

En líneas generales, los eluatos de la mayoría de las muestras presentaban contenidos de cloruros (Cl^-) y fluoruros (F^-) dentro de los límites establecidos por la norma para materiales de carácter inerte (800 mg/kg y 10 mg/kg, respectivamente). En todas ellas se quedaba muy por debajo del umbral de 150 mg/kg, por encima del cual, los residuos son considerados como *peligrosos*.

En cuanto a los sulfatos, casi la mitad de las muestras de RCD estudiadas tenían concentraciones de SO_4^- en los lixiviados por encima del umbral normativo fijado para residuos inertes (1000 mg/kg). Tal vez lo más significativo, es que la mayoría de estas muestras eran material de precibado mixto-cerámico y procedían de gestores autorizados de la Comunidad de Madrid (30% del total de muestras), tal y como puede observarse en las **Tablas 4 a 6**. Por este motivo, se ha realizado un análisis estadístico mediante el programa SPSS 22.0 con el fin de detectar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en el contenido de sulfatos de las muestras, en función de su distribución geográfica o Comunidad Autónoma en la que se obtuvieron; para ello, se ha utilizado la prueba de análisis de la varianza (ANOVA) utilizando la distribución de Fisher (F). El análisis muestra que las diferencias observadas en el contenido de sulfatos en los residuos mixto-cerámicos son estadísticamente significativas para ($F= 3,250$ $p=0,026$), presentando los residuos de la Comunidad de Madrid los valores más altos y claramente diferenciados con respecto al resto.

La presencia de elevadas concentraciones de sulfatos en los RCD es la principal causa de que este tipo de residuos no sean calificados como *inertes*, y sean considerados por el contrario como *no peligrosos*. Existen además estudios que demuestran qué ante la presencia de materia orgánica, elevadas concentraciones de sulfatos pueden desencadenar la formación de sulfuro de hidrógeno H_2S (Eun *et al.*, 2005), gas que se añadiría a las otras emisiones típicas existentes en vertederos de RCD (López y Lobo, 2014).

Las concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) se han obtenido mediante *Determinación Gravimétrica por secado a 180 °C*. Las altas concentraciones de sulfatos justifican que los valores de sólidos totales disueltos (STD) se encuentren, en los lixiviados de muchas de las muestras de la Comunidad Autónoma de Madrid, por encima del valor límite (4000 mg/kg) establecido por la normativa para residuos de carácter inerte.

1.3.1.3. Índice fenol y carbono orgánico disuelto (COD)

El índice fenol y el carbono orgánico disuelto (COD) se han determinado por *Espectrofotometría de Absorción UV-Vis con un Autoanalizador de flujo continuo*. Tanto los fenoles como el COD se encuentran en los lixiviados de todas las muestras por debajo del valor límite para residuos inertes, salvo la muestra nº 25 obtenida en la Comunidad Valenciana que presenta un valor de COD excepcionalmente elevado para este parámetro que lo califica como un *residuo peligroso* (**Tabla 6**). Se trata de un valor atípico para este tipo de RCD que podría deberse a una contaminación fortuita; la muestra fue obtenida del rechazo del precibado de finos mixto-cerámicos de una planta móvil, localizada en una instalación en la que se reciclaban diversos tipos de residuos (plásticos, RCD, etc.) con un continuo tránsito de maquinaria.

1.3.2. Parámetros orgánicos de las muestras de RCD

La presencia de compuestos orgánicos sólo fue analizada en un total de 10 muestras de RCD, obtenidas todas ellas en plantas de gestores autorizados de la Comunidad Autónoma de Madrid. En las **Figuras 5** y **6** se puede observar la recogida de algunas de las muestras para el análisis de parámetros orgánicos. El carbono orgánico total (COT) se determinó mediante el ensayo UNE-EN 13137 en los Laboratorios del IGME. Mientras que los ensayos para la determinación de los contenidos totales de hidrocarburos fueron realizados por LABA-QUA Madrid, aplicando los siguientes métodos acreditados: MAD-C-PE-0235 (hidrocarburos/cromatografía de gases/espectrometría de masas o HC/CG/MS) para BTEX; MAD-C-P-0098 (cromatografía líquida de alta eficacia/ultravioleta/fluorescencia o HPLC/UV/F) para HPA; MAD-C-PE-064 (cromatografía de gases con detector de captura de electrones o GC/ECD) y MAD-C-PE-0180 (cromatografía de gases/ionización de llama o CG/FID) para aceite mineral (C10-C40). Los resultados obtenidos quedan recogidos en la **Tabla 7**.





Figura 5. Toma de muestras de material de rechazo (precibado) mixto-cerámico para determinación de contenidos totales de parámetros orgánicos (BTEX, PCB, aceites minerales y HPA)



Figura 6. Toma de muestras de material de rechazo (precibado) de hormigón y mezcla hormigón-cerámicos para determinación de parámetros orgánicos (BTEX, PCB, aceites minerales y HPA)

Orden AAA/661/2013	MATERIAL DE PRECIBADO (RECHAZO)										MEZCLA HORMI- GÓN/ CERÁMICOS (mg/kg)	
	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	HORMIGÓN (mg/kg)					MIXTO-CERÁMICOS (mg/kg)					
		Muestra 3	Muestra 6	Muestra 31	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 7	Muestra 10		Muestra 8
COT ¹	30.000	6.300	6.900	***	5.100	3.700	17.200	10.100	8.145	7.272	5.676	
BTEX ²	6	< 0,05**	< 0,05**	< 0,05**	< 0,05**	< 0,05**	< 0,05**	< 0,05**	< 0,05**	< 0,05**	< 0,05**	
PCB ³	1	< 0,025*	< 0,025*	< 0,025*	< 0,025*	< 0,025*	< 0,025*	< 0,025*	< 0,025*	< 0,025*	< 0,025*	
Aceite mineral ⁴	500	93	99,9	648,3	<40	<40	<40	41,7	145,4	64,8	243,2	
HPA ⁵	55	0,279	0,381	17,4	1,320	0,233	0,380	0,259	<0,08	<0,08	<0,08	

¹COT (Carbono orgánico total); ²BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos); ³PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres); ⁴Aceite mineral (C10 a C40).

⁵HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno.)

*Valor por debajo del nivel de detección de la técnica **Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.

*** No se recogió muestra para COT

Tabla 7. Contenido total de parámetros orgánicos en muestras de precibado (rechazo) obtenidas de gestores de RCD de la Comunidad Autónoma de Madrid



Prácticamente todas las muestras analizadas presentaban contenidos totales de COT (Cárbono Orgánico Total), BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos), PCB (Policlorobifenilo, 10 congéneres), HPA (Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos, 16 congéneres) y aceite mineral (C10 a C40) por debajo de los valores límite establecidos por la Orden AAA/661/2013. A excepción de una única muestra que ha registrado contenidos en aceite mineral por encima del umbral asignado a este parámetro orgánico, aunque dentro de un mismo orden de magnitud (648,3 frente a los 500 mg/kg establecido por la norma).

1.4. Caracterización geotécnica de los RCD de precibado

1.4.1. Caracterización de los RCD como relleno (PG-3)

Para la caracterización de los RCD como material de relleno se han utilizado los criterios establecidos por el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)* en terraplenes (Orden FOM/1382/2002). Esta caracterización está orientada a rellenos para la construcción de carreteras y obras de ingeniería civil tipo terraplén y, por lo tanto, se debe considerar que tiene un carácter meramente orientativo respecto al uso de estos materiales en el relleno de huecos mineros.

En líneas generales, y de acuerdo con el PG-3, todas las muestras analizadas obtenidas de los rechazos pétreos del precibado de finos de RCD son equiparables desde el punto de vista granulométrico al tipo de suelo que puede utilizarse en terraplenes (**Figura 7**). Todas ellas presentan un cernido o material que pasa por el tamiz 20 UNE mayor del 70% en peso, según UNE 103101 (**Tabla 8**). Asimismo, el tamaño máximo de material no supera en ningún caso los 100 mm, presentando dichos rechazos un tamaño zahorra de 0 a 20 mm, o bien, de 0 a 40 mm.

SUELO MARGINAL	SUELO TOLERABLE	SUELO ADECUADO	SUELO SECCIONADO		
Todos los suelos para Terraplén deben cumplir #20>70% ó #0,08≥35%				#n =% en peso que pase por el tamiz "n" UNE	G R A N U L O M E T R I A
-	-	#máx ≤ 100 mm	#máx ≤100 mm	Tamaño máximo (#máx)	
-	-	#2<80%	#0,4<15% ó (1) (1)#0,40<75% (1)#2<80%	Otras condiciones	
-	-	#0,080<35%	(1)#0,080<25%	Finos (#0,080)	
LL<90	LL<65 sí LL>40(3)	LL<40 sí LL>30 (2)	(1)LL<30	Límite Líquido (LL)	
IP>0,73-(LL-20)	(3)IP>0,73-(LL-20)	(2)IP>4	(1)IP<10	Índice de Plasticidad (IP)	
MO<5%	MO<2%	MO<1%	MO<0,2%	Materia Orgánica (MO)	
-	YESO<5% OTRAS SS<1%	SS<0,2%	SS<0,2%	Sales Solubles (SS)	
-	AC<1%	-	-	Asiento de Colapso (AC)	
HL<5%	HL<3%	-	-	Hinchamiento Libre (HL)	

Figura 7. Criterios para la clasificación de suelos para rellenos tipo terraplén según criterios del PG-3

En dicho pliego de prescripciones se clasifican los materiales para terraplenes, de mejor a peor aptitud, en suelos: seleccionados, adecuados, tolerables, marginales e inadecuados en función de sus características intrínsecas. Dichas características son definidas según diversos criterios como: el contenido de materia orgánica, sales solubles y yesos; granulometría; plasticidad del material; colapsabilidad o expansividad del suelo, entre otros, tal y como se recoge en el artículo 330.3 del PG-3 (**Tabla 8**). De acuerdo con dichos criterios, las muestras de RCD analizadas pueden clasificarse como suelos tolerables (63%) o marginales (30%), según los casos, debido fundamentalmente al contenido de sales solubles (incluidos yesos) cuyo porcentaje en peso supera el límite que se exige en un suelo seleccionado o adecuado (<0,2%); y sólo dos muestras pueden calificarse como suelos adecuados (7%). Esta clasificación queda reflejada en la **Tabla 8**, y en las correspondientes fichas descriptivas de las características geoquímicas y geotécnicas de cada una de las treinta muestras recogidas (**Anexo 2**).

Muestra	GRANULOMETRÍA (mm) UNE 103101				PLASTICIDAD		CONTENIDO (% en peso)				Suelo Colapsable ⁶	Suelo Expansivo ⁷	Clasificación del suelo
	CERNIDO (% en peso)				LL ¹	IP ¹	Materia orgánica ²	Sales solubles ³	Otras sales solubles ⁴	Yesos ⁵	Índice colapso (%)	Hinchamiento libre (%)	
	#20	#2	#0,4	#0,08									
Muestra 1	>70	55	36	16	No plástico	0,88	2,12	0,61	1,51	0,2	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 2	>91	69	42	28	No plástico	0,56	2,48	0,61	1,87	0,2	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 3	>86	51	31	22	No plástico	1,12	1,47	0,59	0,88	0,1	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 4	>94	75	42	25	No plástico	0,97	1,08	0,47	0,61	0,2	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 5	>92	70	38	21	No plástico	0,85	1,31	0,56	0,75	0	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 6	>88	61	30	15	No plástico	0,60	0,13	0,10	0,03	0,1	No hincha	ADECUADO	
Muestra 7	>87	66	42	22	No plástico	1,57	0,30	0,18	0,12	0,3	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 8	>72	47	27	15	No plástico	1,03	1,79	0,42	1,37	0,1	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 9	>78	59	32	18	No plástico	0,78	2,12	0,74	1,38	0,2	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 10	>71	42	22	12	No plástico	0,73	0,55	0,27	0,28	0,5	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 11	100	82	61	22	No plástico	0,56	1,27	1,27	0,00	0,1	No hincha	MARGINAL	
Muestra 12	100	63	37	17	No plástico	0,20	1,29	1,25	0,04	0,2	No hincha	MARGINAL	
Muestra 13	100	61	36	20	No plástico	0,72	0,28	0,28	0,00	0,1	No hincha	TOLERABLE	
Muestra 14	100	64	33	19	No plástico	0,39	0,15	0,14	0,01	0,2	No hincha	ADECUADO	
Muestra 15	100	60	32	18	No plástico	1,13	0,22	0,22	0,00	0,2	No hincha	TOLERABLE	



Muestra	GRANULOMETRÍA (mm) UNE 103101				PLASTICIDAD		CONTENIDO (% en peso)				Suelo Colapsable ⁶	Suelo Expansivo ⁷	Clasificación del suelo
	CERNIDO (% en peso)				LL ¹	IP ¹	Materia orgánica ²	Sales solubles ³	Otras sales solubles ⁴	Yesos ⁵	Índice colapso (%)	Hincha- miento libre (%)	
	#20	#2	#0,4	#0,08									
Muestra 16	100	68	50	36	No plástico		1,40	0,34	0,22	0,12	0,4	No hincha	TOLERABLE
Muestra 17	100	67	43	23	No plástico		1,31	0,42	0,40	0,02	0,4	No hincha	TOLERABLE
Muestra 18	100	78	61	40	No plástico		1,28	0,16	0,15	0,01	0,3	No hincha	TOLERABLE
Muestra 19	100	57	39	30	No plástico		0,81	0,40	0,16	0,24	0,2	No hincha	TOLERABLE
Muestra 20	100	92	61	34	No plástico		1,98	2,50	2,47	0,03	0,2	No hincha	MARGINAL
Muestra 21	100	71	61	53	No plástico		0,97	1,73	1,58	0,15	0,4	No hincha	MARGINAL
Muestra 22	100	76	51	29	No plástico		0,91	2,40	2,19	0,21	0,2	No hincha	MARGINAL
Muestra 23	100	75	52	29	No plástico		0,44	0,55	0,51	0,04	0,2	No hincha	TOLERABLE
Muestra 24	100	66	45	32	27,8	12,7	0,28	0,60	0,56	0,04	0,2	No hincha	TOLERABLE
Muestra 25	100	72	56	47	No plástico		0,72	2,42	2,24	0,18	0,1	No hincha	MARGINAL
Muestra 26	100	74	40	13	No plástico		0,85	0,26	0,09	0,17	0,2	No hincha	TOLERABLE
Muestra 27	100	78	49	30	No plástico		0,91	1,20	1,10	0,10	0,3	No hincha	MARGINAL
Muestra 28	100	42	19	14	No plástico		0,50	0,84	0,78	0,06	0,2	No hincha	TOLERABLE
Muestra 29	100	59	25	12	No plástico		0,77	1,11	1,04	0,07	0,2	No hincha	MARGINAL
Muestra 30	100	68	41	24	No plástico		0,90	2,18	2,03	0,15	0,2	No hincha	MARGINAL

¹LL: Límite Líquido (UNE 103103); IP: Índice de Plasticidad (UNE 103104)

²UNE 103204

³NLT 114/99

⁴Sales solubles diferentes al yeso (% Sales solubles % Yesos)

⁵UNE 103201 Y UNE 103201 ERRATUM equivalente a NLT 120/72. Yeso soluble determinado a partir del contenido total de sulfatos solubles. Puede ocurrir que solo una parte del sulfato esté formando yeso

⁶Suelo colapsable: aquél en que una muestra remoldeada del mismo, compactada con la densidad y humedad óptima del ensayo Proctor normal, sufre un asiento superior al 1% de la altura inicial de la muestra, con una presión de ensayo de 0,2 MPa. UNE 103406

⁷Suelo expansivo: aquél en que una muestra remoldeada del mismo, compactada con la densidad y humedad óptima del ensayo Proctor normal, experimenta un hinchamiento libre de más de un 3%. UNE 103601

Tabla 8. Clasificación de las muestras de RCD para rellenos tipo terraplén según criterios del PG-3

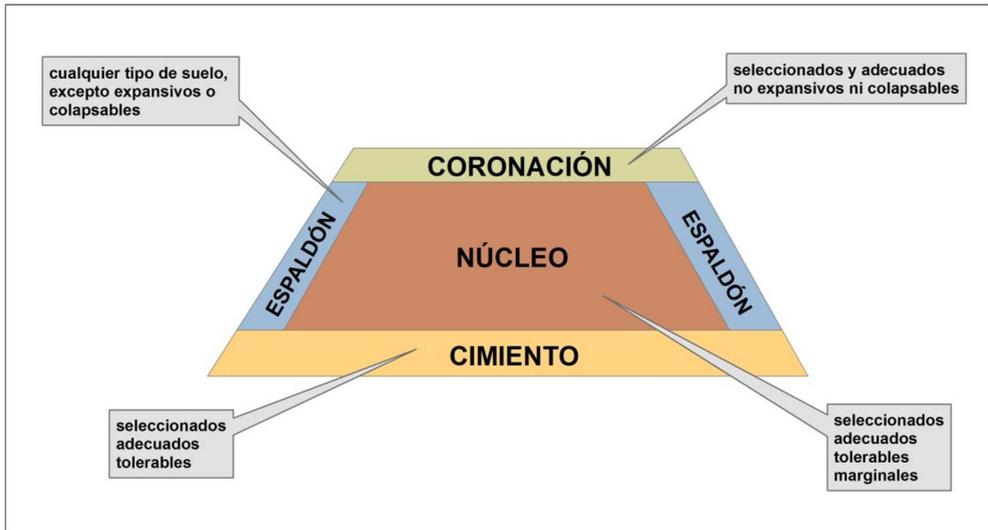


Figura 8. Empleo de tipos de suelos según las distintas zonas de un relleno tipo terraplén (PG-3)

En los rellenos tipo terraplén, el PG-3 distingue diversas zonas (**Figura 8**) y en función de éstas condiciona el empleo de uno u otro tipo de suelo, estableciendo además determinadas condiciones respecto a: la capacidad portante del material de relleno, expresada a través del índice CBR (California Bearing Ratio); el porcentaje de sales solubles o yesos presentes en el mismo o el contenido en materia orgánica, entre otros. Estos condicionantes son mucho más restrictivos en la coronación del relleno dónde sólo se admiten suelos adecuados y seleccionados, con un índice CBR correspondiente a las condiciones de compactación de puesta en obra ≥ 5 y un contenido en materia orgánica inferior al 1%; y en el cimiento en el que se permiten todos los tipos de suelos salvo los marginales y un índice CBR ≥ 3 . En ambas zonas, el contenido en sales solubles no debe superar el 0,2%. Aunque en el núcleo del relleno se aconseja el uso de suelos y un índice CBR similares a los propuestos en el cimiento. Sin embargo, es posible el empleo en el mismo de: suelos marginales o con contenidos en sales solubles o materia orgánica por encima de lo recomendado en las anteriores zonas; o bien, suelos con un índice CBR inferior a tres siempre y cuando se justifique mediante un estudio especial y sea aprobado por el Director de Obras, conforme al apartado 330.4.4 del PG-3. En aquellos casos en que los materiales del núcleo presenten contenidos en sulfatos solubles superiores al 2%, se deberá evitar la infiltración de agua desde la coronación o los espaldones utilizando el propio material o aplicando medidas complementarias. Por último, los suelos colapsables y expansivos no podrán ser utilizados en ningún caso en coronación y espaldones, y su uso en otras zonas deberá ser justificado y acorde con lo dispuesto en los apartados 330.4.4.1 y 330.4.4.2 del PG-3.

Aunque no se ha determinado la capacidad portante de las muestras evaluadas mediante la realización de los correspondientes ensayos CBR. No obstante, se ha podido inferir dicho índice a partir de algunas propiedades del suelo como la granulometría y la plasticidad aplicando una fórmula empírica propuesta por la AASHTO (American Association of State



Highway and Transportation Officials), para materiales no plásticos (índice de plasticidad igual a 0) (NCHRP, 2001):

$$\text{CBR} = 28,09 \cdot (D_{60})^{0,358}$$

Donde,

D_{60} = Diámetro o tamaño de grano (mm) que se corresponde con el cernido del 60%

Excepciones: si D_{60} es menor de 0,01 mm, CBR = 5; y si D_{60} es > 30 mm, CBR = 95

El rango de valores CBR calculados han sido de 19 a 54 para las muestras de RCD mixto-cerámicos, y de 35 a 43 para las de hormigón (**Figura 9**), siendo el valor medio de 32 y 38 respectivamente. Los valores obtenidos se aproximan a los resultados de algunos ensayos CBR sobre áridos reciclados mixto-cerámicos (Etxeberria *et al.*, 2016). Sin embargo, son muchos otros los estudios en los que estos ensayos han asignado valores mucho más elevados para este tipo de áridos (IHOBE-CEDEX, 2011; Universidad de Córdoba, 2015; etc.). En cualquier caso, estos materiales parecen presentar una capacidad portante aceptable para su uso en rellenos de huecos mineros, y más que suficiente para su empleo en terraplenes (≥ 5 en la coronación, y ≥ 3 para núcleo y cimientto).

Hay que destacar que los ensayos de colapso en suelo (UNE 103406) y del hinchamiento libre de un suelo en edómetro (UNE 103601) ponen de relieve que todas las muestras analizadas son materiales equiparables a suelos no colapsables, ni expansivos (**Tabla 8**). Ambas características geomecánicas contribuyen a una mayor estabilidad geotécnica de los rellenos que pudieran realizarse con dicho material, tanto mineros como de tipo terraplén.

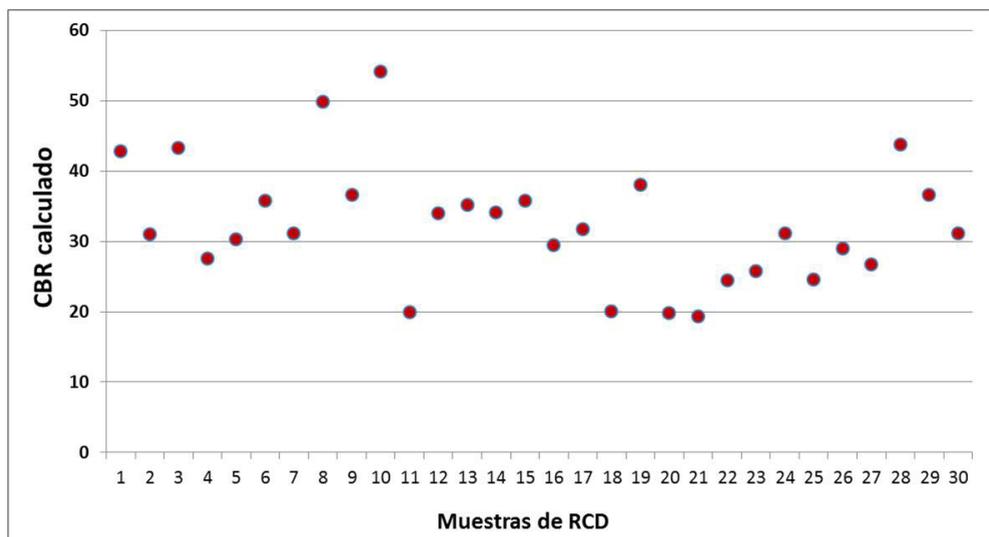


Figura 9. Valor de los índices CBR calculados (AASHTO) para todas las muestras de RCD

Las sales solubles presentes en los RCD, además de disminuir la calidad del material, condicionan su empleo en la rehabilitación de huecos excavados o la construcción de terraplenes. A excepción de tres muestras: 6, 14 y 18, el resto de las muestras presentaban un contenido de sales solubles superior al 0,2% en peso (**Tabla 8**). Por ello, estos suelos tolerables y/o marginales sólo podrían ser utilizados en los núcleos de los rellenos tipo terraplén. Por otra parte, ninguna muestra ha presentado un porcentaje de sulfatos (UNE 103201) y yesos (valor calculado según NLT 120/72) solubles superior al 5% por lo que el contenido en yesos en sí no ha supuesto un factor condicionante.

El contenido en materia orgánica (MO) es muy bajo en estos RCD, inferior al 1% en la mayoría de las muestras. Y algo más de la cuarta parte del total de muestras de RCD de precibado tienen un porcentaje de entre < 2% y 1% de MO.

1.4.2. Ensayo de compactación Proctor normal

La bibliografía científico-técnica aconseja que el relleno de los huecos de excavación con RCD debe realizarse por tongadas, depositadas de abajo a arriba (IHOBE, 2005; Departamento de Desarrollo rural, Medio Ambiente y Administración Local, 2014; ANEFA, 2007 y 2008a; Arranz *et al.*, 2009, etc.). Este método permite una mejor compactación y, por lo tanto, una mayor estabilidad geotécnica del relleno ya que cuánto más compacto y denso sea un suelo, mayor será su resistencia al corte y su capacidad portante (Sanz Llano, 1975).

El ensayo Proctor permite determinar la humedad óptima para que un suelo alcance su máxima compacidad para una energía dada de compactación (0,583 J/cm³ en el ensayo Proctor normal).

Los resultados del ensayo Proctor normal realizado sobre las muestras de RCD según la norma UNE 103500, ponen de relieve que: se pueden alcanzar por compactación densidades

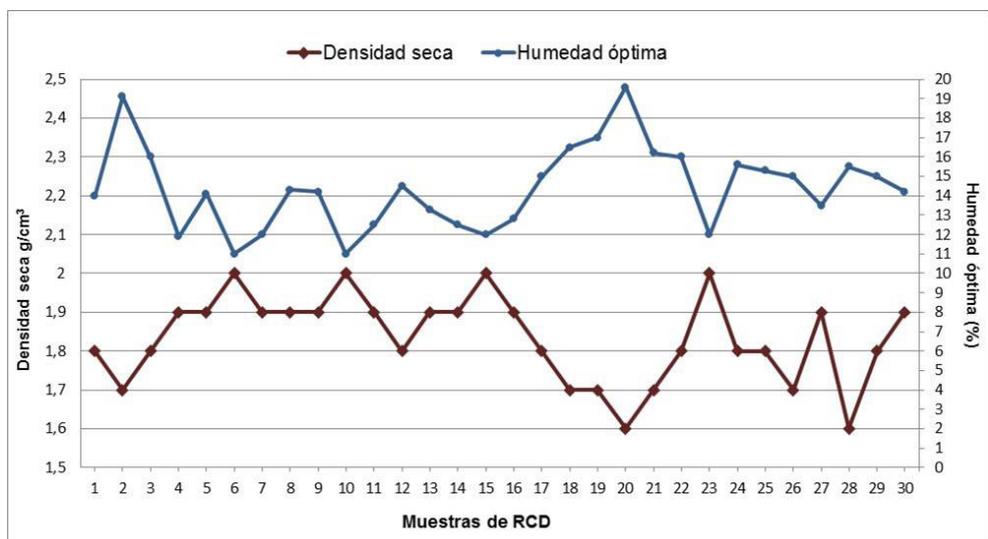


Figura 10. Resultados del ensayo de compactación Proctor normal en muestras de RCD



secas entre 1,6 y 2 g/cm³ en dicho material, con humedades óptimas que pueden oscilar entre 11 y 19,6% (**Figura 10** y **Anexo 2**). A modo de referencia, hay que señalar que la densidad real, esto es, de la fase sólida de los RCD analizados, está en torno a un promedio de 2,65 g/cm³. Otro aspecto destacable es que la humedad total de las muestras analizadas varía entre el 1,5% y el 11,3%, por lo que será necesario en la mayoría de los casos incrementar la humedad de estos materiales de relleno para poder alcanzar dichas densidades de compactación, tal y como puede observarse en la **Figura 11**.

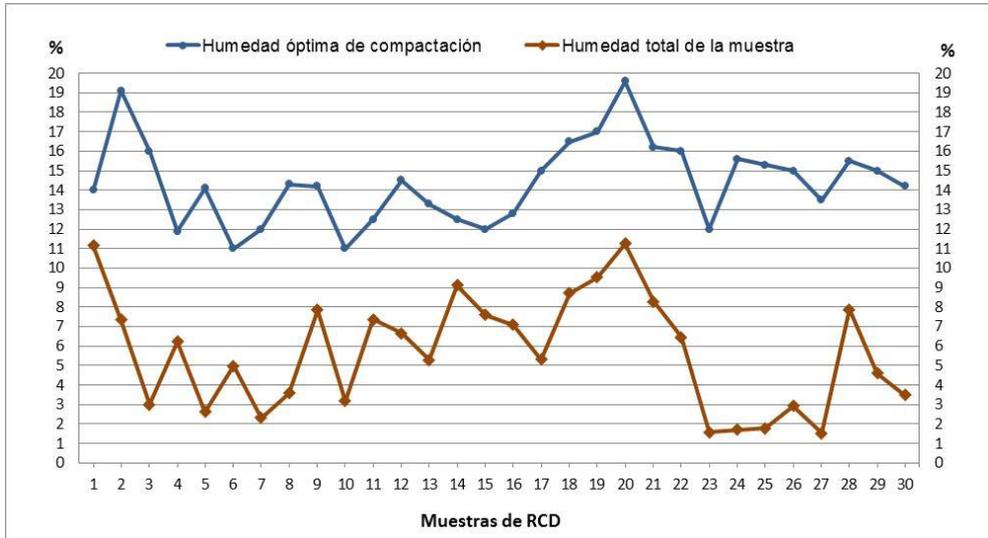


Figura 11. Análisis comparativo de la humedad de las muestras de RCD y la humedad óptima de compactación que se debe alcanzar según el ensayo Proctor normal.

1.4.3. Composición mineralógica (DRX)

Se han determinado además las fases minerales cristalinas presentes en las muestras de RCD por Difracción de Rayos X (DRX), mediante una estimación semicuantitativa por el método de los poderes reflectantes. Aunque, en algunos casos, sólo ha sido posible un análisis cualitativo.

Los RCD mixto cerámicos de precibado (incluyendo mezclas de cerámicos y hormigón) suelen presentar la siguiente composición mineralógica: feldespato potásico (microclina), cuarzo, plagioclasa (albita), filosilicatos (moscovita, y en algunas ocasiones clorita) y en menor medida yesos, presentando dolomita algunas de las muestras (**Figura 12**). Algunos de estos componentes han sido también identificados por otros autores en RCD y en áridos reciclados mixto-cerámicos (García González, 2016; Mejía *et al.*, 2015; Medina *et al.*, 2015; Asensio *et al.*, 2013; Calvo Pérez *et al.*, 2002; IHOBE-CEDEX, 2011; etc.). Por otra parte, hay estudios que relacionan el fuerte peso de los feldespatos con el contenido cerámico, ya que en este tipo de materiales se utilizan frecuentemente las fases de aluminosilicatos (Limbachiya *et al.*, 2007; García González, 2016). La presencia de yesos está asociada fundamen-

almente al enlucido de las paredes de mampostería cerámica (ladrillos) con dicho material, práctica común en las edificaciones. Las elevadas concentraciones de sulfatos asociados a los yesos en estos RCD, imposibilita que estos materiales puedan ser calificados como inertes en muchos casos; o que el porcentaje de sales solubles condicione el uso de los mismos en rellenos tipo terraplén según el PG-3.

Las muestras de RCD de hormigón presentan los mismos componentes, aunque con un peso mayor de cuarzo y calcita (**Figura 12**). Esta composición es similar a la de los áridos reciclados de RCD de hormigón o con un alto contenido de mortero adherido (García González, 2016; Vegas *et al.*, 2011; etc.). Asimismo, la alta proporción de calcita puede estar relacionada con el uso de áridos naturales calizos en la elaboración del hormigón, tal y como señalan algunos autores. Limbachiya *et al.* 2007, consideran además que el proceso de carbonatación que puede experimentar el hormigón primario durante su periodo de vida útil puede contribuir también a incrementar su presencia.

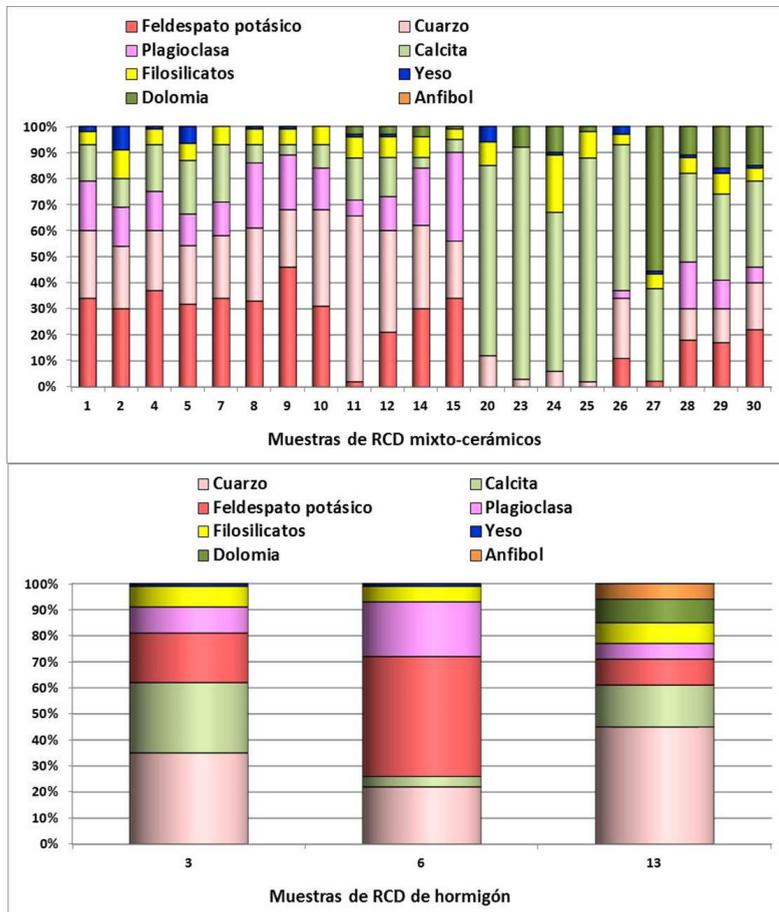


Figura 12. Composición mineralógica del precibado de residuos de RCD mixto-cerámicos y de hormigón determinada por Difracción de Rayos X (análisis semicuantitativo)

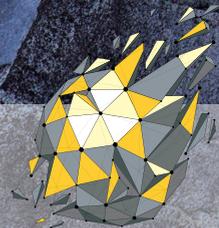
2. BIBLIOGRAFÍA

- ANEFA. 2007. *Manual de Restauración de Minas a Cielo Abierto*. Gobierno de la Rioja. Consejería de Turismo, Medio Ambiente y Política Territorial. Dirección General de Política Territorial. 167 p.
- ANEFA. 2008a. *Manual de Restauración de Explotaciones Mineras a Cielo Abierto de Aragón*. ANEFA y Gobierno de Aragón. 135 p.
- Arranz González, J.C., Alberruche del Campo, E. Martínez Plédel, B. 2009. Documento nº 4. Definición de Modelos y Fórmulas de Restauración Ambiental y de Criterios para el Establecimiento de Usos Agrarios sobre Zonas Explotadas. Proyecto *Ordenación Mine-ro-Ambiental del Sector de los Áridos en la Zona Occidental de la Ribera del Ebro (Navarra)*. Acuerdo Especifico de Colaboración entre la Administración de la Comunidad Foral de Navarra y el IGME para el Desarrollo de Actuaciones Vinculadas con el Plan Director de Actividades Mineras en la Comunidad Foral de Navarra Año 2008. Centro Documentación del IGME. 62 p.
- Asensio, E., Sánchez, M.I., Frías, M., Medina, C. 2013. Diseño de nuevas matrices cementantes basadas en residuos de construcción y demolición. *Actas del Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-eficientes*. Sevilla. 66-73.
- Calvo Pérez, B., Parra y Alfaro, J.L., Astudillo Matilla, B., Sanabria Zapata, C.M. Carre-tón Moreno, R. 2002. Áridos reciclados para hormigones y morteros. *Caracterización mineralógica y química*. 10 p.
- De Brito, J., Pereira, A.S., Correia, J.R. 2005. Mechanical behaviour of non-estructural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concret Composites*, 27(4): 429-433.
- Departamento de Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Administración Local. 2014. *Guía Metodológica para la Tramitación Ambiental de las Actividades Extractivas en la Comuni-dad Foral de Navarra y Guía de Buenas Prácticas*. Gobierno de Navarra. Departamento de Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Administración Local. Servicio de Calidad Ambiental. Sección de Evaluación Ambiental. Abril 2014. 38 p.
- Etxeberría, M., González-Corominas, A., Galindo, A. 2016. Estudio de la aplicación del árido reciclado mixto en hormigón poroso y como relleno de zanjas en la ciudad de Bar-celona. *Informes de la Construcción*. Vol. 68. Nº 542. IETCC-CSIC.
- Eun, S., Reinhart., D.R., Cooper, D., Townsend, T., Faour, A. 2007. Hydrogen sulfide flux measurements from construction and demolition debris (C&D) landfills. *Waste Mana-gement*, 27 (2007): 220-227.
- García González, J. 2016. *Hormigón elaborado con residuos de construcción y demolición mixtos cerámicos: optimización de sus propiedades físicas, mecánicas y durables mediante pre-satu-ración de los áridos, uso de superplastificantes y precipitación microbiológica de carbonato cálcico*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la Universidad de León. Y Magnel Laboratory for Concrete Research. Departamento de Ingeniería Es-tructural. Universidad de Gante. 438 p.



- GERD. 2012. *Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD*. Fueyo Editores. 292 p.
- IHOBE. 2005. *Guía Técnica para el Relleno de Canteras con Materiales Naturales de Excavación*. (Ley 1/2005 para prevención y corrección de la contaminación). Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 324 p.
- IHOBE-CEDEX, 2011. *Uso de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición. Investigación prenortativa*. IHOBE-CEDEX. 76 p.
- Limbachiya, M.C., Marrocchino, E., Koulouris, A. 2007. Chemical-mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management*, 27(2): 201-208.
- López, A., Lobo, A. 2014. Emissions of C&D refuse in landfills: A European case. *Waste Management*, 34 (2014): 1446-1454.
- Medina, D., Zhu, W., Howind, T., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I. 2015. Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes. *Construction and Building Materials*. 79, 22-33.
- Mejía, E., Osorno, L., Osorio, N.W. 2015. Residuos de construcción: una opción para la recuperación de suelos. *Revista EIA*. Año XII. Vol. 12. Edición especial nº 2. Junio 2015. pp E55-E60.
- NCHRP. 2001. *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final Document. Appendix CC-1: Correlation of CBR values with soil index properties*. 204 p.
- Sanz Llano, J.J. 1975. *Mecánica de suelos*. Reunión de Ingenieros. Editores Técnicos Asociados, SA. Barcelona. 414 p.
- Universidad de Córdoba. 2015. *Guía de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) de Andalucía Central*. Consejería de Obras Públicas y Vivienda de la Junta de Andalucía, Universidad de Córdoba, Unión Europea, CEMOSA, AGRECA. 198 p.
- Vegas, R., Banda, E. 1982. Tectonic framework and Alpine evolution of the Iberian Peninsula. *Earth Evolution Sciences*, 4: 320-343.

ANEXO 2



INVENTARIO DE MUESTRAS DE RCD



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA
Y COMPETITIVIDAD



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA Y PESCA,
ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

Nº DE MUESTRA

1

Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

COMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

181



Muestra para análisis de la lixiviabilidad



Muestra para parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,035	COT ¹	30.000	5.100
Ba	20	0,504	BTEX ²	6	< 0,05**
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	< 0,025*
Cr Total	0,5	0,244	Aceite mineral ⁴	500	<40
Cu	2	0,146	HPA ⁵	55	1,320
Hg	0,01	<0,05***	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,0695	<i>** Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.</i>		
Ni	0,4	0,234	<i>*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución</i>		
Pb	0,5	<0,02*	LABORATORIO DEL IGME		
Sb	0,06	0,0632	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Se	0,1	<0,05*	LABORATORIO LABAQUA		
Zn	4	0,249	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Cloruro	800	90	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Fluoruro	10	<0,5*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Sulfato	1.000	15.100	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafeno, Acenafileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Índice Fenol	1	0,06			
COD	500	121			
STD	4.000	21.238			

COMENTARIOS



Nº DE MUESTRA

1



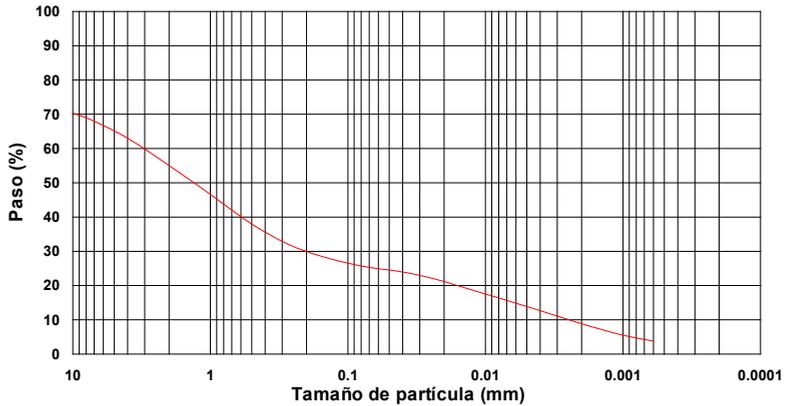
DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>70	70	55	36	16

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,88		
SALES SOLUBLES (%)	2,12	YESOS (%)	1,51

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA

1

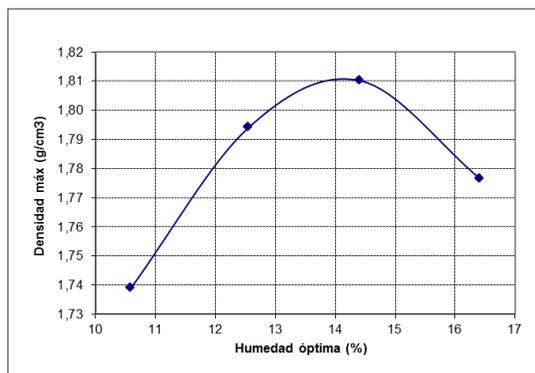
Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,63	HUMEDAD TOTAL (%)	11,15
------------------------------------	------	-------------------	-------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,8
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	14



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

FELDESPATO K (34%)
 CUARZO (24%)
 CALCITA (22%)
 PLAGIOCLASA (13%)
 FILOSILICATOS (7%)



Nº DE MUESTRA 2



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

COMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad



Muestra para parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,091	COT ¹	30.000	3.700
Ba	20	0,403	BTEX ²	6	< 0,05**
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	< 0,025*
Cr Total	0,5	0,043	Aceite mineral ⁴	500	<40
Cu	2	0,039	HPA ⁵	55	0,233
Hg	0,01	<0,05***	* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica		
Mo	0,5	0,112	** Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.		
Ni	0,4	<0,05*	*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución		
Pb	0,5	<0,02*	LABORATORIO DEL IGME		
Sb	0,06	0,029	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Se	0,1	<0,05*	LABORATORIO LABAQUA		
Zn	4	0,425	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Cloruro	800	140	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Fluoruro	10	<0,5*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Sulfato	1.000	18.700	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Índice Fenol	1	0,07			
COD	500	82			
STD	4.000	24.798			

COMENTARIOS

--

Nº DE MUESTRA 2

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

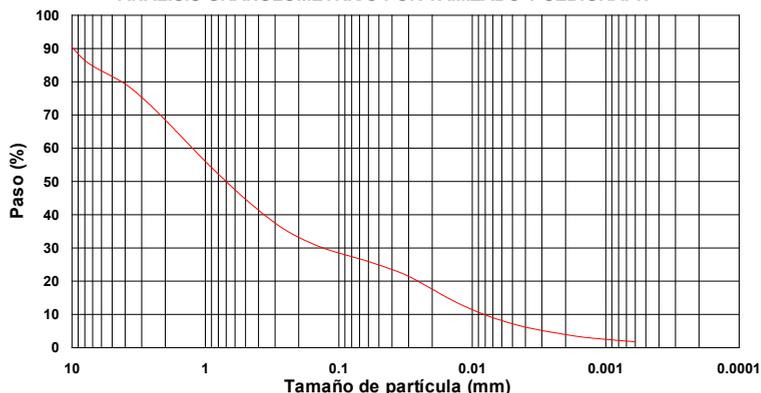
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

185

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



TAMIZ (mm)

	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>91	91	69	42	28

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,56		
SALES SOLUBLES (%)	2,48	YESOS (%)	1,87

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

**Nº DE MUESTRA****2**Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

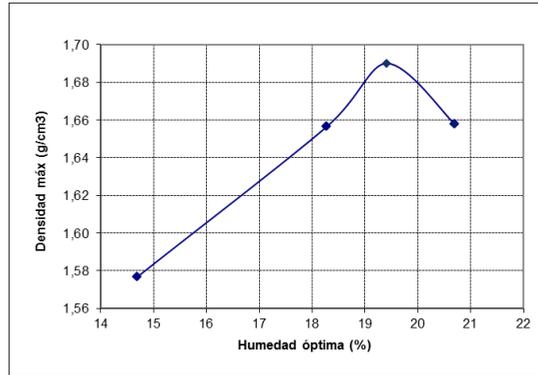
186

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,60	HUMEDAD TOTAL (%)	7,34
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	1,7
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	19,1

**INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)****COMPOSICIÓN MINERALÓGICA****ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

FELDESPATO POTÁSICO (30%),
CUARZO (24%)
PLAGIOCLASA (15%)
CALCITA (11%)
FILOSILICATOS (11%)
YESO (9%)

Nº DE MUESTRA 3

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
TIPOLOGÍA DE RCD: HORMIGÓN

187



Muestra para análisis de la lixiviabilidad



Muestra para parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,028	COT ¹	30.000	6.300
Ba	20	0,725	BTEX ²	6	< 0,05**
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	< 0,025*
Cr Total	0,5	0,067	Aceite mineral ⁴	500	93
Cu	2	0,12	HPA ⁵	55	0,279
Hg	0,01	<0,05*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,043	<i>** Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.</i>		
Ni	0,4	0,058	<i>*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución</i>		
Pb	0,5	<0,02*	LABORATORIO DEL IGME		
Sb	0,06	0,023	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Se	0,1	<0,05*	LABORATORIO LABAQUA		
Zn	4	0,14	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Cloruro	800	50	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Fluoruro	10	<0,5*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Sulfato	1.000	8.840	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Índice Fenol	1	0,07			
COD	500	165			
STD	4.000	14.656			

COMENTARIOS



Nº DE MUESTRA 3



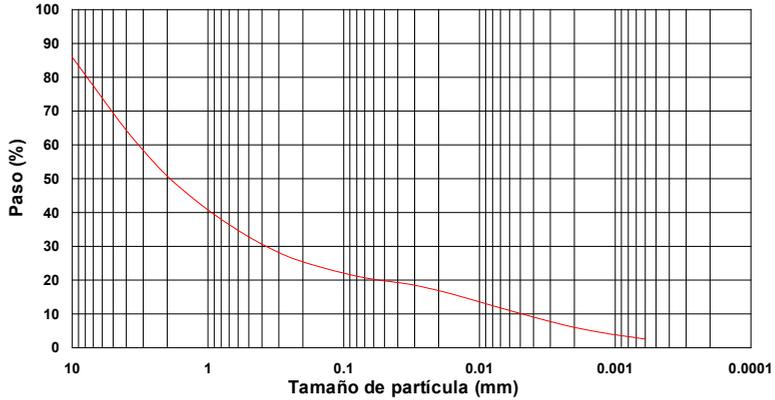
DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>86	>86	51	31	22

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,1	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,1
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	1,12		
SALES SOLUBLES (%)	1,44	YESOS (%)	0,88

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA 3
 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

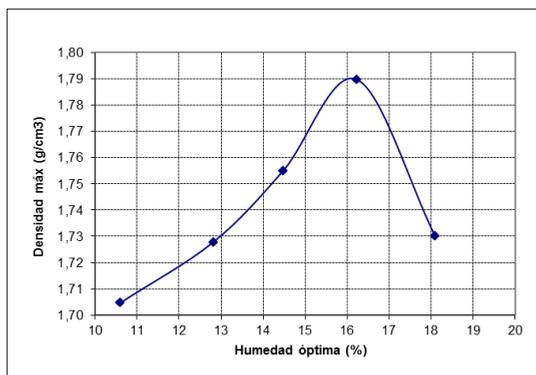
DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,63	HUMEDAD TOTAL (%)	3
---	------	--------------------------	---

189

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	1,8
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	16


INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

CUARZO (35%)
 CALCITA (27%)
 FELDESPATO POTÁSICO (19%)
 PLAGIOCLASA (10%)
 FILOSILICATOS (8%)
 YESO (1%)



Nº DE MUESTRA

4

Instituto Geológico
y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

190

COMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixivabilidad



Muestra para parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,0793	COT ¹	30.000	17.200
Ba	20	0,449	BTEX ²	6	< 0,05**
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	< 0,025*
Cr Total	0,5	0,0393	Aceite mineral ⁴	500	<40
Cu	2	0,0447	HPA ⁵	55	0,380
Hg	0,01	<0,05***	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,0265	<i>** Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.</i>		
Ni	0,4	<0,05*	<i>*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución</i>		
Pb	0,5	<0,02*	LABORATORIO DEL IGME		
Sb	0,06	0,0176	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Se	0,1	<0,05*	LABORATORIO LABAQUA		
Zn	4	0,712	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Cloruro	800	10	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Fluoruro	10	<0,5*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Sulfato	1.000	6.079	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Índice Fenol	1	0,10			
COD	500	54			
STD	4.000	10.780			

COMENTARIOS

Nº DE MUESTRA

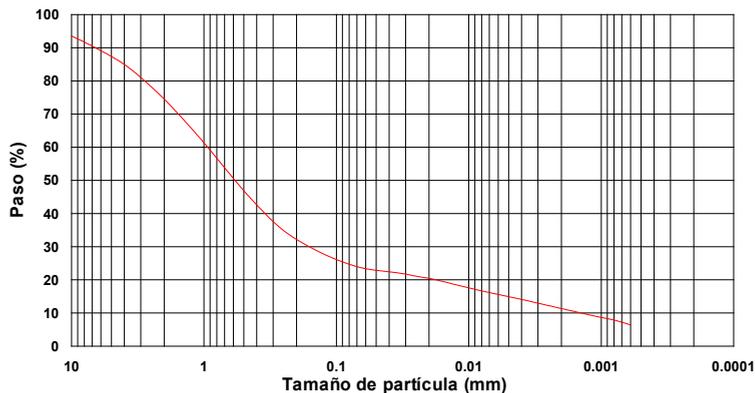
4


 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

191

GRANULOMETRÍA
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH

TAMIZ (mm)

	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>94	94	75	42	25

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,97		
SALES SOLUBLES (%)	1,08	YESOS (%)	0,61

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable



Nº DE MUESTRA

4

**Instituto Geológico
y Minero de España**

**DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL**

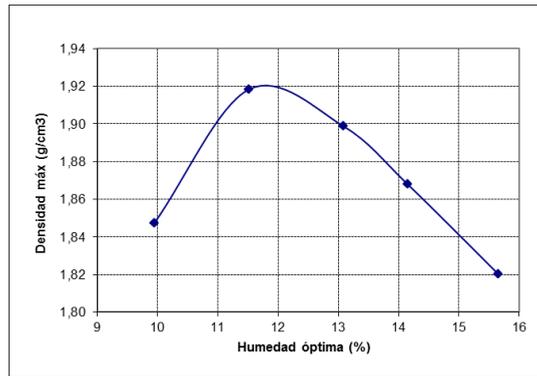
192

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,61	HUMEDAD TOTAL (%)	6,23
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	1,9
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	11,9



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- FELDESPATO K (37%)
- CUARZO (23%)
- CALCITA (18%)
- PLAGIOCLASA (15%)
- FILOSILICATOS (6%)
- YESO (1%)

Nº DE MUESTRA 5

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

193



Muestra para análisis de la lixiviabilidad



Muestra para parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,1	COT ¹	30.000	10.100
Ba	20	0,442	BTEX ²	6	< 0,05**
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	< 0,025*
Cr Total	0,5	0,064	Aceite mineral ⁴	500	41,7
Cu	2	0,19	HPA ⁵	55	0,259
Hg	0,01	<0,05***	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,022	<i>** Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.</i>		
Ni	0,4	<0,05*	<i>*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución</i>		
Pb	0,5	<0,02*	LABORATORIO DEL IGME		
Sb	0,06	0,019	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Se	0,1	<0,05*	LABORATORIO LABAQUA		
Zn	4	0,269	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Cloruro	800	310	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Fluoruro	10	<0,5*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Sulfato	1.000	7.520	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Índice Fenol	1	0,14			
COD	500	112			
STD	4.000	13.078			

COMENTARIOS



Nº DE MUESTRA 5



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

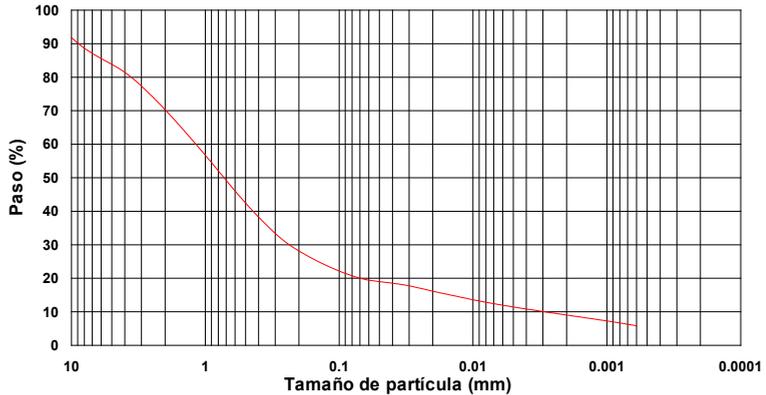
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

194

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>92	92	70	38	21

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,0	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,0
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,85		
SALES SOLUBLES (%)	1,31	YESOS (%)	0,75

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA

5

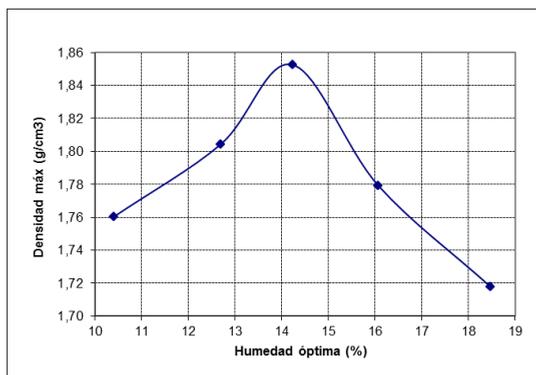
Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,60	HUMEDAD TOTAL (%)	2,61
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,9
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	14,1



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

FELDESPATO K (34%)

CUARZO (24%)

CALCITA (22%)

PLAGIOCLASA (13%)

FILOSILICATOS (7%)



Nº DE MUESTRA 6



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

COMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
TIPOLOGÍA DE RCD: HORMIGÓN



Muestra para análisis de la lixiviabilidad



Muestra para parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,063	COT ¹	30.000	6.900
Ba	20	0,0429	BTEX ²	6	< 0,05**
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	< 0,025*
Cr Total	0,5	0,0571	Aceite mineral ⁴	500	99,9
Cu	2	0,0517	HPA ⁵	55	0,381
Hg	0,01	<0,05***	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,0334	<i>** Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.</i>		
Ni	0,4	<0,05*	<i>*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución</i>		
Pb	0,5	<0,02*	LABORATORIO DEL IGME		
Sb	0,06	0,0125	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Se	0,1	<0,05*	LABORATORIO LABAQUA		
Zn	4	0,182	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Cloruro	800	10	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Fluoruro	10	<0,5*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Sulfato	1.000	280	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Índice Fenol	1	0,08			
COD	500	64			
STD	4.000	1.310			

COMENTARIOS

--

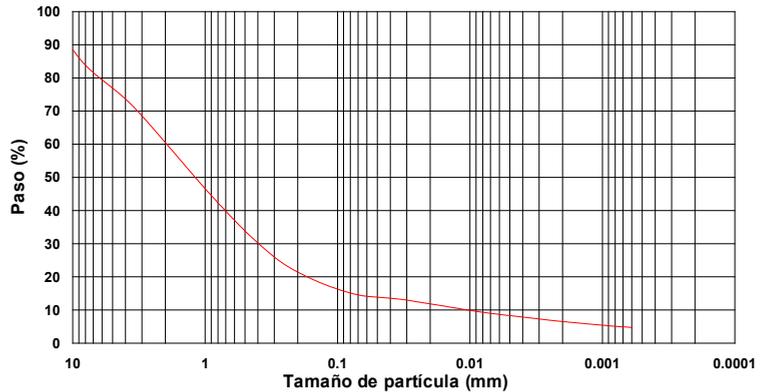
Nº DE MUESTRA 6


 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

197

GRANULOMETRÍA
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH


	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>88	88	61	30	15

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,1	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,1
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,60		
SALES SOLUBLES (%)	0,13	YESOS (%)	0,03

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo adecuado



Nº DE MUESTRA

6

Instituto Geológico
y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

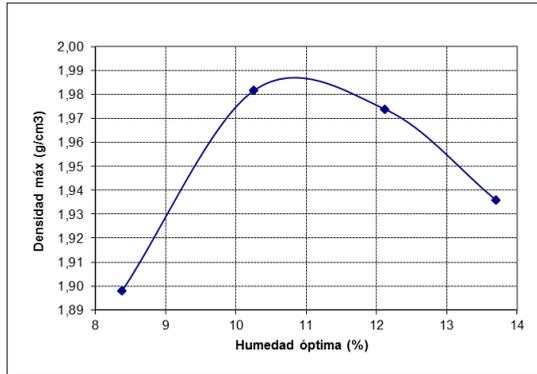
198

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,64	HUMEDAD TOTAL (%)	4,97
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	2
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	11



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- FELDESPATO K (46%)
- CUARZO (22%)
- PLAGIOCLASA (21%)
- FILOSILICATOS (6%)
- CALCITA (4%)
- YESO (1%)

Nº DE MUESTRA

7


 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

 COMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
 TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

199



Muestra para análisis de la lixiviabilidad



Muestra para parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,183	COT ¹	30.000	8.145
Ba	20	0,198	BTEX ²	6	< 0,05**
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	< 0,025*
Cr Total	0,5	0,0417	Aceite mineral ⁴	500	145,4
Cu	2	0,873	HPA ⁵	55	<0,08
Hg	0,01	<0,05***	* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica		
Mo	0,5	0,0241	** Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.		
Ni	0,4	0,063	*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución		
Pb	0,5	<0,02*	LABORATORIO DEL IGME		
Sb	0,06	0,0167	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Se	0,1	<0,05*	LABORATORIO LABAQUA		
Zn	4	0,644	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Cloruro	800	10	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Fluoruro	10	<0,5*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Sulfato	1.000	1.169	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Índice Fenol	1	0,10			
COD	500	78			
STD	4.000	3.040			

COMENTARIOS



Nº DE MUESTRA

7



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

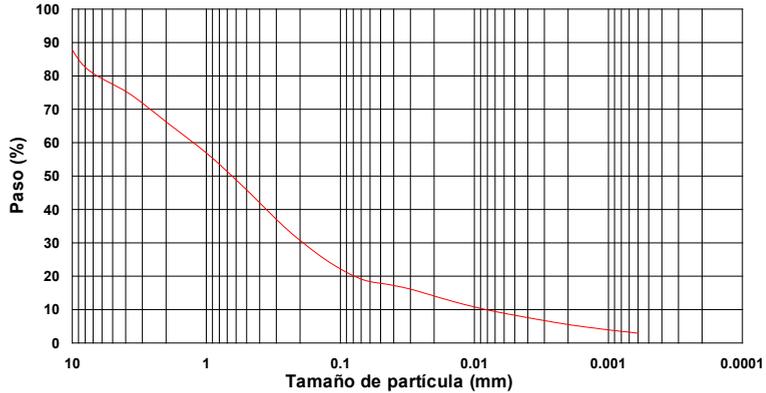
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

200

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



TAMIZ (mm)

	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>87	87	66	42	22

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,3	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,3
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	1,57		
SALES SOLUBLES (%)	0,30	YESOS (%)	0,12

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA

7

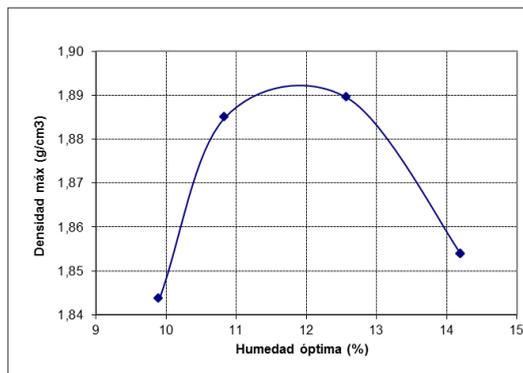
Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,65	HUMEDAD TOTAL (%)	2,31
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,9
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	12



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

FELDESPATO POTÁSICO (34%),
 CUARZO (24%)
 CALCITA (22%)
 PLAGIOCLASA (13%)
 FILOSILICATOS (7%)



Nº DE MUESTRA 8



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

COMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
TIPOLOGÍA DE RCD: MEZCLA HORMIGÓN/MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad



Muestra para parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,197	COT ¹	30.000	5.676
Ba	20	0,402	BTEX ²	6	< 0,05**
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	< 0,025*
Cr Total	0,5	0,0848	Aceite mineral ⁴	500	243,2
Cu	2	0,0575	HPA ⁵	55	<0,08
Hg	0,01	<0,05***	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,0255	<i>** Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.</i>		
Ni	0,4	0,119	<i>*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución</i>		
Pb	0,5	<0,02*	LABORATORIO DEL IGME		
Sb	0,06	0,0311	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Se	0,1	0,0547	LABORATORIO LABAQUA		
Zn	4	0,263	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Cloruro	800	20	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Fluoruro	10	<0,5*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Sulfato	1.000	13.696	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Índice Fenol	1	0,11			
COD	500	71			
STD	4.000	17.928			

COMENTARIOS

--

Nº DE MUESTRA 8

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

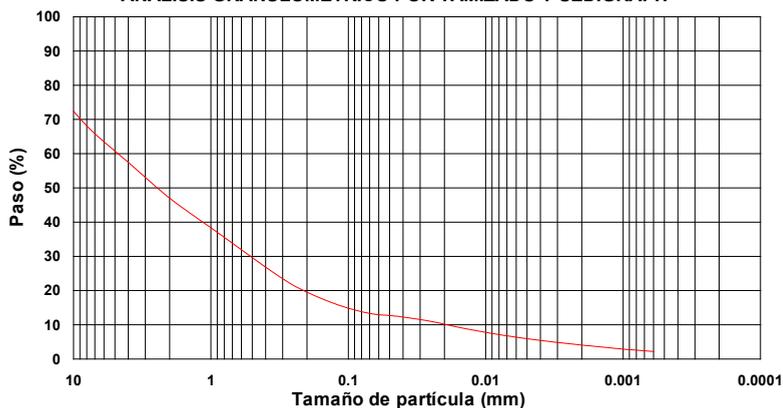
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

203

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>72	72	47	27	15

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,1	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,1
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	1,03		
SALES SOLUBLES (%)	1,79	YESOS (%)	1,37

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

**Nº DE MUESTRA****8**Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

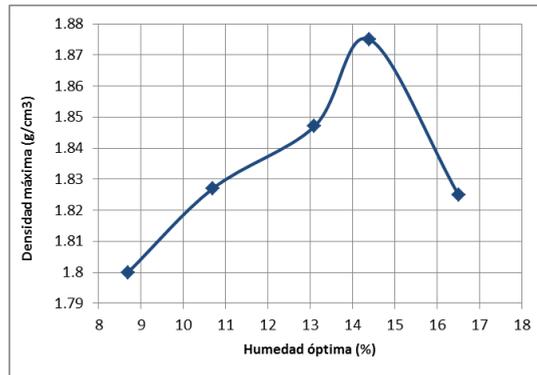
204

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,64	HUMEDAD TOTAL (%)	4,97
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	2
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	11

**INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)****COMPOSICIÓN MINERALÓGICA****ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

FELDESPATO POTÁSICO (33%)
CUARZO (28%)
PLAGIOCLASA (25%)
CALCITA (7%)
FILOSILICATOS (6%)
YESO (1%)

Nº DE MUESTRA 9

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

205



Muestra para análisis de la lixiviabilidad y parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,042	COT ¹	30.000	4.879
Ba	20	0,45	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,04	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,05	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,05***	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,039	<i>** Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.</i>		
Ni	0,4	0,176	<i>*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución</i>		
Pb	0,5	<0,02*			
Sb	0,06	0,015			
Se	0,1	<0,05*	LABORATORIO DEL IGME		
Zn	4	0,721	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Cloruro	800	40	LABORATORIO LABAQUA		
Fluoruro	10	<0,5*	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Sulfato	1.000	13.793	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Índice Fenol	1	0,09	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
COD	500	66	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
STD	4.000	21.166			

COMENTARIOS

No se recogió muestra para análisis de parámetros orgánicos



Nº DE MUESTRA 9



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

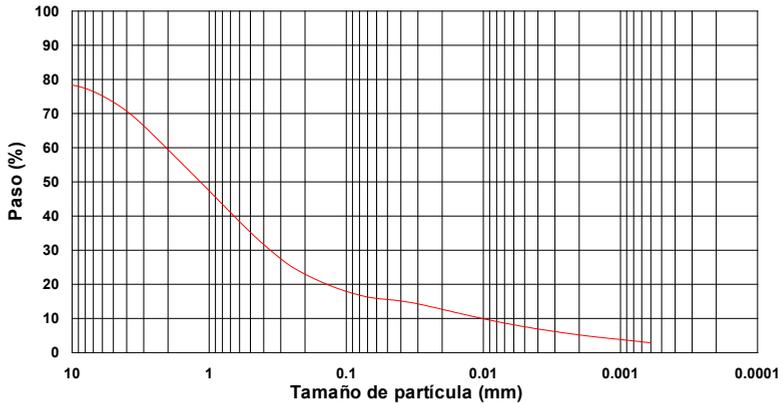
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

206

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>78	78	59	32	18

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,78		
SALES SOLUBLES (%)	2,12	YESOS (%)	1,38

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA 9

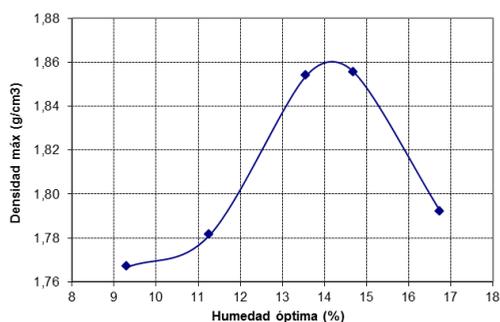

 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,63	HUMEDAD TOTAL (%)	7,84
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,9
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	14,2


INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

FELDESPATO POTÁSICO (46%)

CUARZO (22%)

PLAGIOCLASA (21%)

FILOSILICATOS (6%)

CALCITA (4%)

YESO (1%)



Nº DE MUESTRA 10



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

COMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad



Muestra para parámetros orgánicos

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,103	COT ¹	30.000	7.272
Ba	20	0,112	BTEX ²	6	< 0,05**
Cd	0,04	<0,02	PCB ³	1	< 0,025*
Cr Total	0,5	0,054	Aceite mineral ⁴	500	64,8
Cu	2	0,05	HPA ⁵	55	<0,08
Hg	0,01	<0,05***	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,023	<i>**Todos los hidrocarburos BTEX se encuentra por debajo del nivel de detección de la técnica < 0,01 para Benceno, Etilbenceno y Tolueno, y < 0,02 para Xilenos (sumatorio). El valor < 0,05 se corresponde con la suma total de todos estos límites de detección.</i>		
Ni	0,4	0,072	<i>*** Valor límite por encima del nivel de detección de la técnica debido a haber necesitado una mayor dilución</i>		
Pb	0,5	<0,02*	LABORATORIO DEL IGME		
Sb	0,06	0,008	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Se	0,1	<0,05*	LABORATORIO LABAQUA		
Zn	4	0,264	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Cloruro	800	10	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Fluoruro	10	<0,5*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Sulfato	1.000	2.796	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Índice Fenol	1	0,07			
COD	500	84			
STD	4.000	5.478			

COMENTARIOS

--

Nº DE MUESTRA 10

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

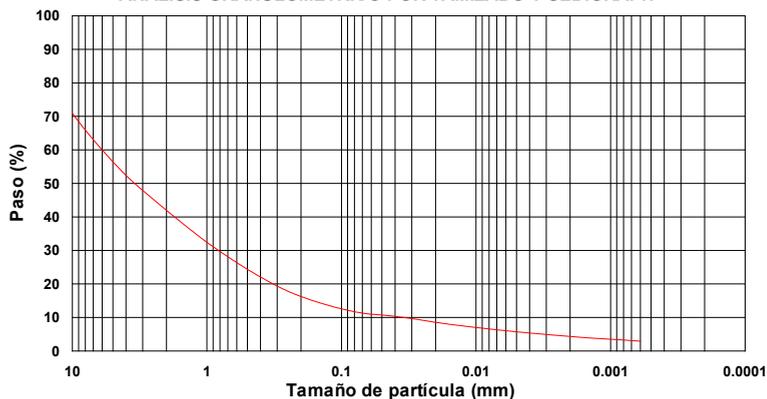
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

209

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	>71	71	42	22	12

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,5	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,5
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,73		
SALES SOLUBLES (%)	0,55	YESOS (%)	0,28

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable



Nº DE MUESTRA 10



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

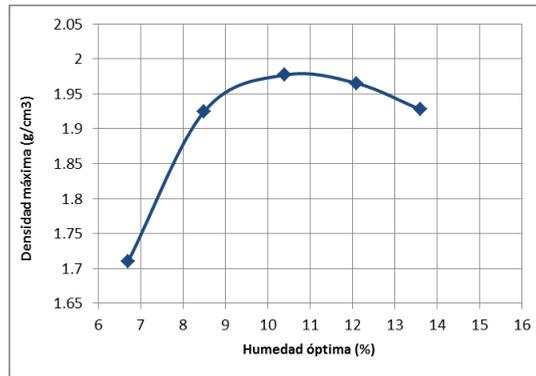
210

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,61	HUMEDAD TOTAL (%)	3,18
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	2
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	11



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

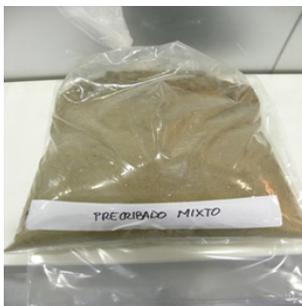
ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- CUARZO (37%)
- FELDESPATO POTÁSICO (31%)
- PLAGIOCLASA (16%)
- CALCITA (9%)
- FILOSILICATOS (7%)

Nº DE MUESTRA 11

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: ANDALUCÍA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

211



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,048	COT ¹	30.000	18.000
Ba	20	0,381	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,004*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,009	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,065	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,001*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,226			
Ni	0,4	0,01			
Pb	0,5	0,011			
Sb	0,06	0,026			
Se	0,1	<0,001*			
Zn	4	0,186			
Cloruro	800	5			
Fluoruro	10	<0,5*			
Sulfato	1.000	812			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	23			
STD	4.000	1.266			

COMENTARIOS

No se recogió muestra para análisis de parámetros orgánicos



Nº DE MUESTRA 11



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

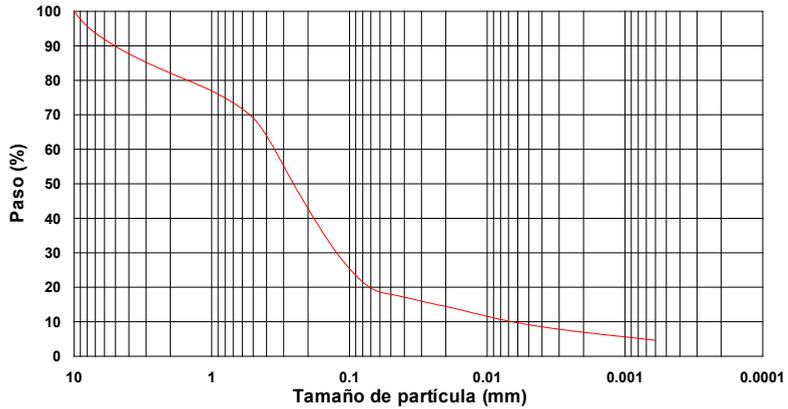
212

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



TAMIZ (mm)					
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	82	61	22

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,1	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,1
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,56		
SALES SOLUBLES (%)	1,27	YESOS (%)	0,00

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo marginal

Nº DE MUESTRA 11

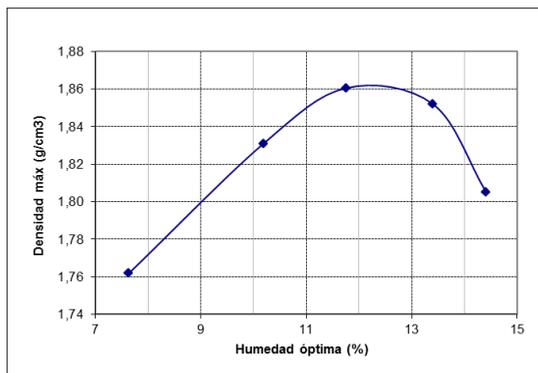
DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,67	HUMEDAD TOTAL (%)	7,38
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,9
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	12,5



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

CUARZO (63%)
 CALCITA (16%)
 FILOSILICATOS (8%)
 PLAGIOCLASA (6%)
 DOLOMITA (3%)
 FELDESPATO K (2%)
 YESO (2%)



Nº DE MUESTRA 12



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

214

COMUNIDAD AUTÓNOMA: EXTREMADURA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,043	COT ¹	30.000	10.000
Ba	20	0,464	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,004*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,212	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,023	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,001*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,068			
Ni	0,4	0,012			
Pb	0,5	0,008			
Sb	0,06	0,021			
Se	0,1	0,011			
Zn	4	0,178			
Cloruro	800	23			
Fluoruro	10	<0,5*			
Sulfato	1.000	800			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	17			
STD	4.000	1.285			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos

Nº DE MUESTRA 12

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

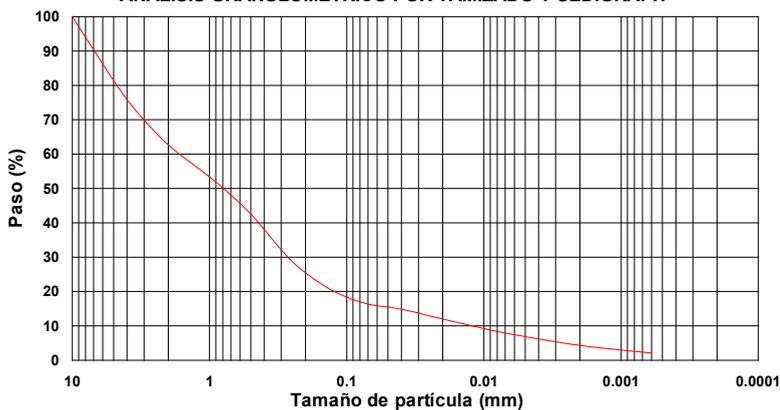
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

215

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	63	37	17

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,20		
SALES SOLUBLES (%)	1,29	YESOS (%)	0,04

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo marginal

**Nº DE MUESTRA 12**Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

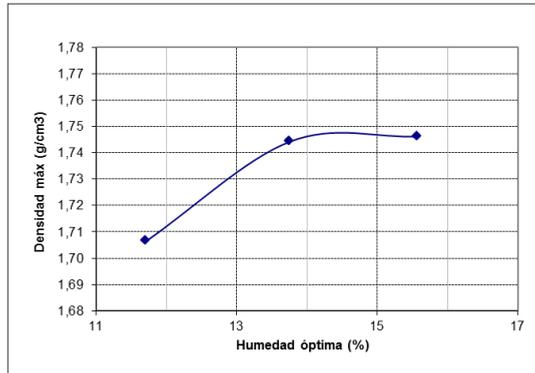
216

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,65	HUMEDAD TOTAL (%)	6,66
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,8
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	14,5

**INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)****COMPOSICIÓN MINERALÓGICA****ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

CUARZO (39%)
FELDESPATO K (21%)
CALCITA (15%)
PLAGIOCLASA (13%)
FILOSILICATOS (8%)
DOLOMITA (3%)
YESO (1%)

Nº DE MUESTRA 13

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: EXTREMADURA
TIPOLOGÍA DE RCD: HORMIGÓN

217



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,042	COT ¹	30.000	6.000
Ba	20	0,235	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,089	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,043	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,005*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteño, Acenafileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,043			
Ni	0,4	0,005			
Pb	0,5	0,004			
Sb	0,06	0,025			
Se	0,1	<0,005*			
Zn	4	0,006			
Cloruro	800	7			
Fluoruro	10	<0,5*			
Sulfato	1.000	129			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	17			
STD	4.000	283			

COMENTARIOS

No se recogió muestra para análisis de parámetros orgánicos



Nº DE MUESTRA 13



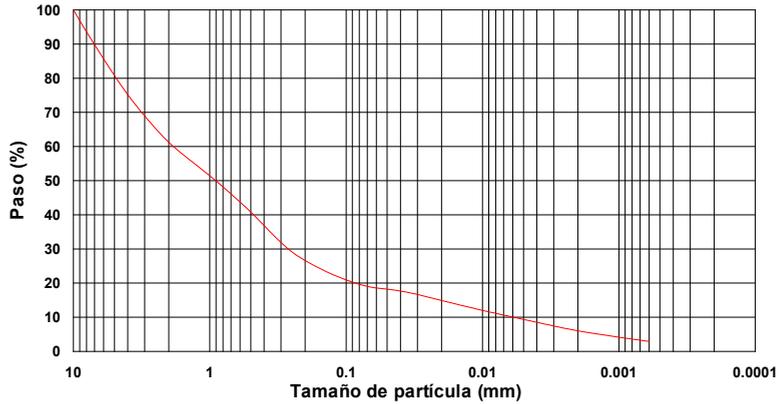
DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	61	36	20

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,1	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,1
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,72		
SALES SOLUBLES (%)	0,28	YESOS (%)	0,00

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA 13

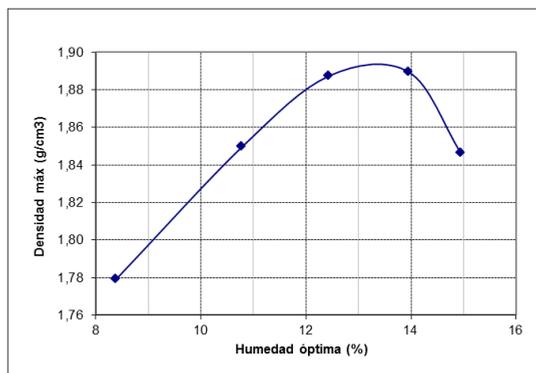

 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,65	HUMEDAD TOTAL (%)	5,28
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,9
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	13,3


INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

CUARZO (45%)
 CALCITA (16%)
 FELDESPATO K (10%)
 DOLOMITA (9%)
 FILOSILICATOS (8%)
 PLAGIOCLASA (6%)
 ANFIBOL (6%)



Nº DE MUESTRA 14

Instituto Geológico y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

220

COMUNIDAD AUTÓNOMA: EXTREMADURA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,041	COT ¹	30.000	6.000
Ba	20	0,089	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,06	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,032	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,005*	* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,02			
Ni	0,4	0,007			
Pb	0,5	0,002			
Sb	0,06	0,031			
Se	0,1	<0,005*			
Zn	4	0,043			
Cloruro	800	5			
Fluoruro	10	<0,5*			
Sulfato	1.000	69			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	10			
STD	4.000	151			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos

Nº DE MUESTRA 14

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

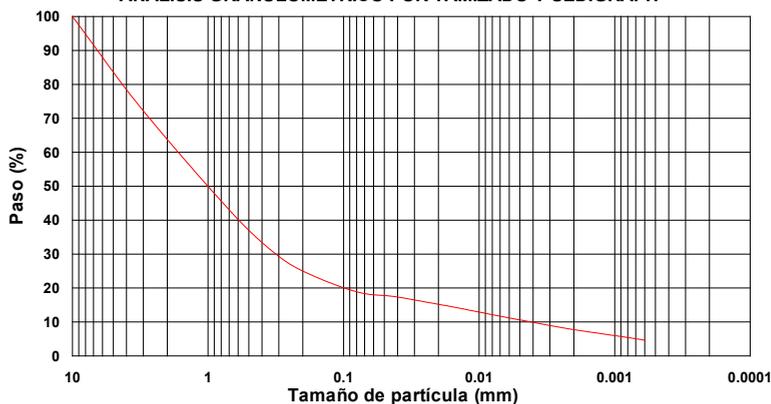
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

221

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	64	33	19

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,39		
SALES SOLUBLES (%)	0,15	YESOS (%)	0,01

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo adecuado



Nº DE MUESTRA 14



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

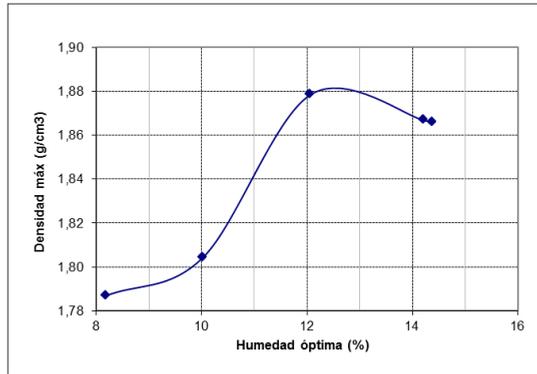
222

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,68	HUMEDAD TOTAL (%)	9,12
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	1,9
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	12,5



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- CUARZO (32%)
- FELDESPATO K (30%)
- PLAGIOCLASA (22%)
- FILOSILICATOS (8%)
- CALCITA (4%)
- DOLOMITA (4%)

Nº DE MUESTRA 15

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: EXTREMADURA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

223



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,023	COT ¹	30.000	16.900
Ba	20	0,038	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,015	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,034	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,005*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,045			
Ni	0,4	<0,005*			
Pb	0,5	<0,002*			
Sb	0,06	0,046			
Se	0,1	<0,005*			
Zn	4	0,020			
Cloruro	800	5			
Fluoruro	10	<0,5			
Sulfato	1.000	55			
Índice Fenol	1	<0,005			
COD	500	17			
STD	4.000	220			

COMENTARIOS

Se trata de una Planta de Transferencia. No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos



Nº DE MUESTRA 15



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

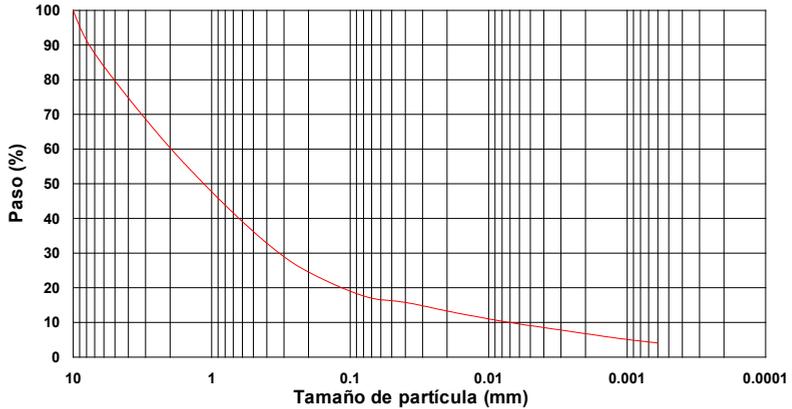
224

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	60	32	18

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	1,13		
SALES SOLUBLES (%)	0,22	YESOS (%)	0,00

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA 15

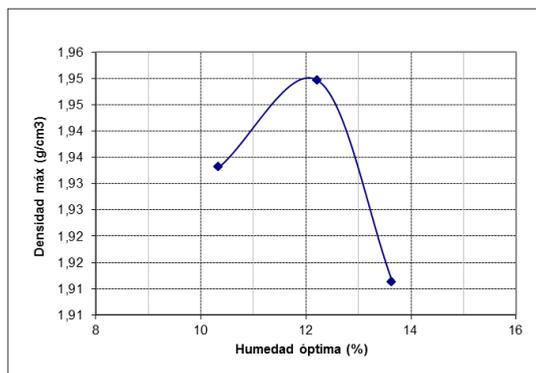

 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,64	HUMEDAD TOTAL (%)	7,61
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	2
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	12


INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

PLAGIOCLASA (34%)
 FELDESPATO K (34%)
 CUARZO (22%)
 CALCITA (5%)
 FILOSILICATOS (4%)
 DOLOMITA (1%)



Nº DE MUESTRA 16



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

226

COMUNIDAD AUTÓNOMA: CANTABRIA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,007	COT ¹	30.000	23.100
Ba	20	0,342	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,041	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,069	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	< 0,005*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,065	LABORATORIO DEL IGME		
Ni	0,4	0,006	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Pb	0,5	< 0,002*	LABORATORIO LABAQUA		
Sb	0,06	0,147	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Se	0,1	0,009	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Zn	4	<0,01*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Cloruro	800	<1*	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Nafaleno y Pireno)		
Fluoruro	10	0,64			
Sulfato	1.000	205			
Índice Fenol	1	0,005			
COD	500	40			
STD	4.000	340			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos.

Nº DE MUESTRA 16

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

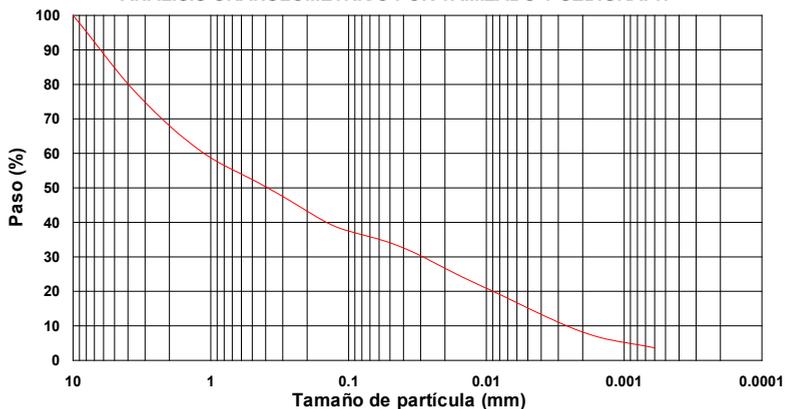
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

227

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



TAMIZ (mm)

	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	68	50	36

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,4	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,3
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

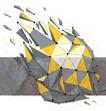
HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	1,40		
SALES SOLUBLES (%)	0,34	YESOS (%)	0,12

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable



Nº DE MUESTRA 16



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

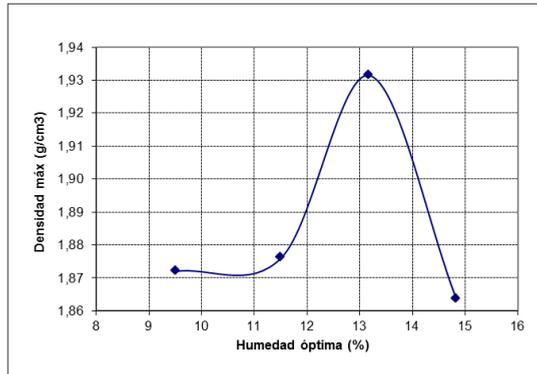
228

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,68	HUMEDAD TOTAL (%)	7,08
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	1,9
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	12,8



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- CUARZO
- CALCITA
- FELDESPATOS
- FILOSILICATO
- DOLOMITA/ANKERITA (I)
- YESO (I)
- (I) Indicios.

La composición mineral de la muestra no permite su estimación semicuantitativa, por lo que solo se presentan los resultados del análisis cualitativo.

Nº DE MUESTRA 17

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: CANTABRIA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

229



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,007	COT ¹	30.000	37.100
Ba	20	0,650	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,05	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,134	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,005*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,168			
Ni	0,4	0,022			
Pb	0,5	0,003			
Sb	0,06	0,046			
Se	0,1	0,016			
Zn	4	0,012			
Cloruro	800	9			
Fluoruro	10	0,66			
Sulfato	1.000	104			
Índice Fenol	1	0,006			
COD	500	68			
STD	4.000	423			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos.



Nº DE MUESTRA 17



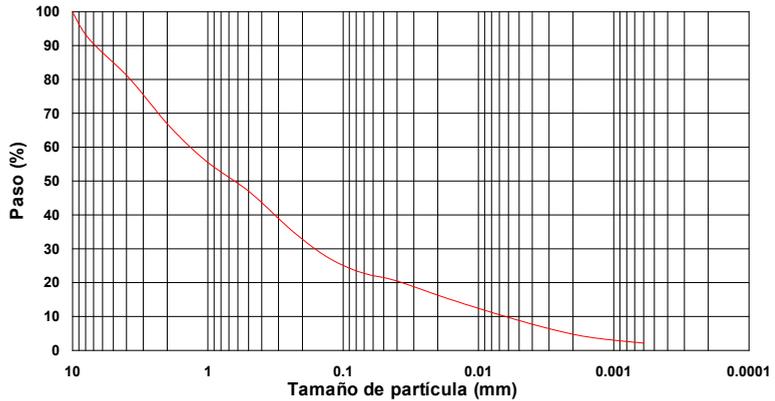
DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	67	43	23

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,4	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,4
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	1,31		
SALES SOLUBLES (%)	0,42	YESOS (%)	0,02

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA 17

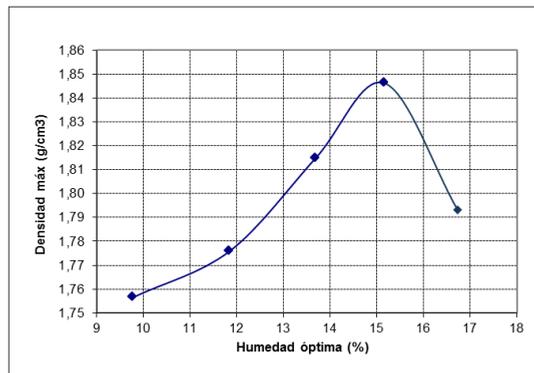

 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,66	HUMEDAD TOTAL (%)	5,32
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,8
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	15


INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

CALCITA
 CUARZO
 FEDESPATOS (I)
 HALITA (I)
 (I) Indicios.

La composición mineral de la muestra no permite su estimación semicuantitativa, por lo que solo se presentan los resultados del análisis cualitativo.



Nº DE MUESTRA 18



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

COMUNIDAD AUTÓNOMA: CANTABRIA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,013	COT ¹	30.000	8.400
Ba	20	0,501	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,098	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,099	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	< 0,01*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,059			
Ni	0,4	0,014			
Pb	0,5	< 0,004*			
Sb	0,06	0,074			
Se	0,1	<0,01*			
Zn	4	<0,02*			
Cloruro	800	<1			
Fluoruro	10	0,66			
Sulfato	1.000	1.170			
Índice Fenol	1	0,005			
COD	500	43			
STD	4.000	425			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos

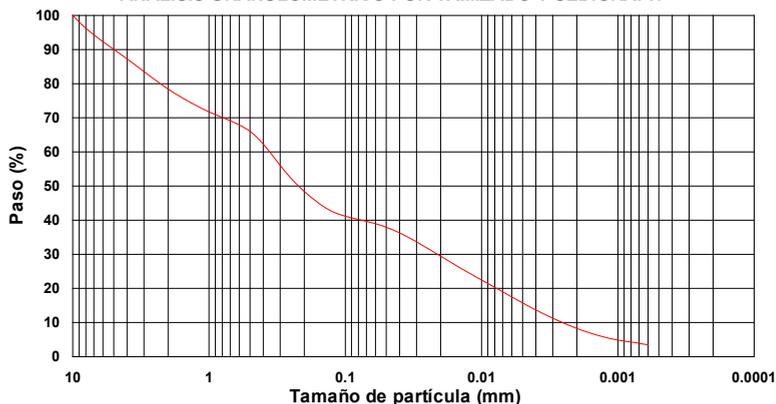
Nº DE MUESTRA 18


 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

233

GRANULOMETRÍA
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH

TAMIZ (mm)

	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	78	61	40

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,3	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,3
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	1,28		
SALES SOLUBLES (%)	0,16	YESOS (%)	0,01

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable



Nº DE MUESTRA 18



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

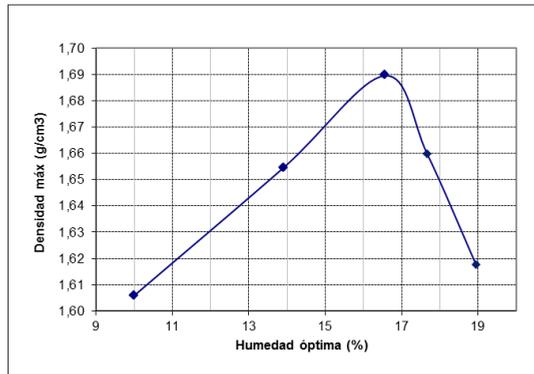
234

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,64	HUMEDAD TOTAL (%)	8,72
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,7
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	16,5



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- CUARZO
- CALCITA
- YESO
- FELDESPATOS
- FILOSILICATOS
- DOLOMITA/ANKERITA (I)
- (I) Indicios.

La composición mineral de la muestra no permite su estimación semicuantitativa, por lo que solo se presentan los resultados del análisis cualitativo.

Nº DE MUESTRA 19

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: PAÍS VASCO
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

235



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,019	COT ¹	30.000	16.000
Ba	20	0,374	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,039	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,013	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,005*	* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,037			
Ni	0,4	<0,005*			
Pb	0,5	<0,002*			
Sb	0,06	0,070			
Se	0,1	0,008			
Zn	4	<0,01			
Cloruro	800	<1*			
Fluoruro	10	0,64			
Sulfato	1.000	268			
Índice Fenol	1	<0,005			
COD	500	19			
STD	4.000	402			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos. La muestra se recogió en un acopio de áridos reciclados tamaño zahorra 0-40 mm de material mixto-cerámico. En la actualidad este acopio lleva unos 2 años sin salida comercial por la caída de la demanda debido a la crisis del sector de la construcción.



Nº DE MUESTRA 19



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

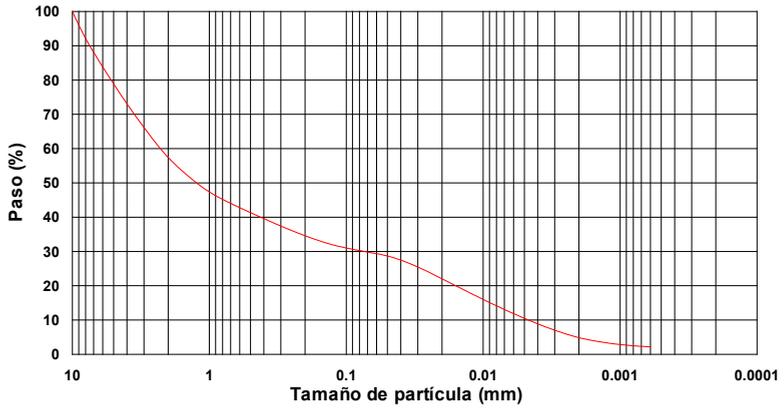
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

236

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	57	39	30

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,81		
SALES SOLUBLES (%)	0,40	YESOS (%)	0,24

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA 19

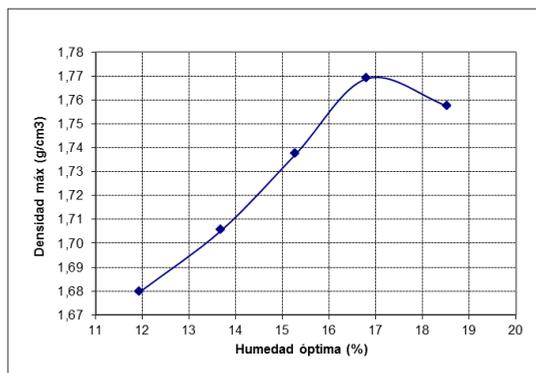
DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,68	HUMEDAD TOTAL (%)	9,54
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,7
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	17



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

CALCITA

CUARZO

FELDESPATOS

FILOSILICATOS

DOLOMITA/ANKERITA (I)

(I) Indicios.

La composición mineral de la muestra no permite su estimación semicuantitativa, por lo que solo se presentan los resultados del análisis cualitativo.



Nº DE MUESTRA 20

Instituto Geológico y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

238

COMUNIDAD AUTÓNOMA: PAÍS VASCO
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,035	COT ¹	30.000	12.900
Ba	20	0,860	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,088	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,170	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	< 0,01*	<p>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</p> <p>LABORATORIO DEL IGME</p> <p>¹COT (Carbono orgánico total).</p> <p>LABORATORIO LABAQUA</p> <p>²BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)</p> <p>³PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)</p> <p>⁴Aceite mineral (C10 a C40)</p> <p>⁵HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)</p>		
Mo	0,5	0,113			
Ni	0,4	0,044			
Pb	0,5	0,005			
Sb	0,06	0,097			
Se	0,1	0,024			
Zn	4	0,153			
Cloruro	800	18			
Fluoruro	10	0,96			
Sulfato	1.000	2.440			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	13			
STD	4.000	2.501			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos. Los RCD mixto-cerámicos son mezclados con finos de hormigón para poder comercializarlos, aunque con poco éxito.

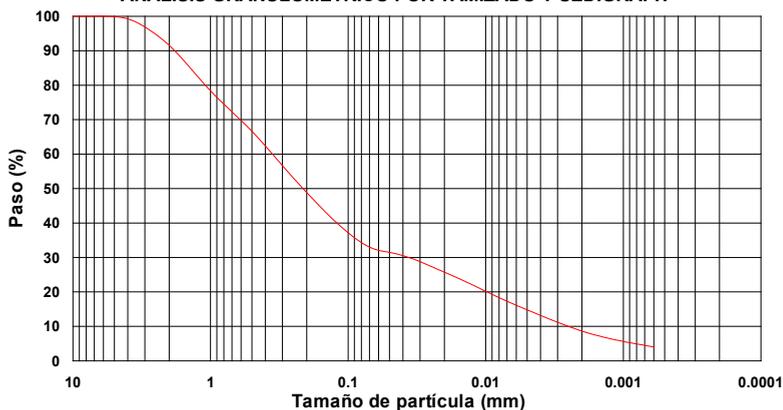
Nº DE MUESTRA 20


 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

239

GRANULOMETRÍA
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH


	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	92	61	34

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	1,98		
SALES SOLUBLES (%)	2,50	YESOS (%)	0,03

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo marginal

**Nº DE MUESTRA** 20Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

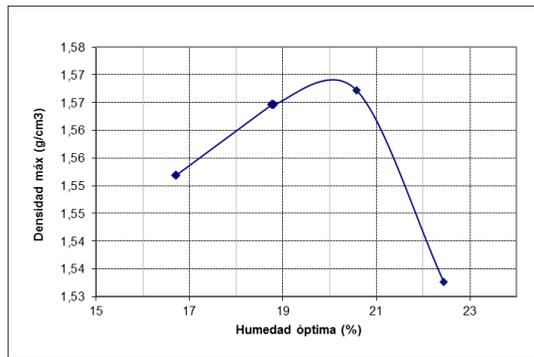
240

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,62	HUMEDAD TOTAL (%)	11,26
------------------------------------	------	-------------------	-------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,6
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	19,67

**INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)****COMPOSICIÓN MINERALÓGICA****ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

CALCITA (73%)
CUARZO (12%)
FILOSILICATOS (9%)
YESO (6%)

Nº DE MUESTRA 21

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: CASTILLA Y LEÓN
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

241



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,013	COT ¹	30.000	6.200
Ba	20	0,752	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,004*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,176	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,061	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,01*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,068	LABORATORIO DEL IGME		
Ni	0,4	0,018	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Pb	0,5	<0,004*	LABORATORIO LABAQUA		
Sb	0,06	0,007	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Se	0,1	<0,01*	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Zn	4	<0,02*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Cloruro	800	8	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Sulfato	1.000	1.500			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	66			
STD	4.000	1.734			

COMENTARIOS

No se recogió muestra para análisis de parámetros orgánicos



Nº DE MUESTRA 21



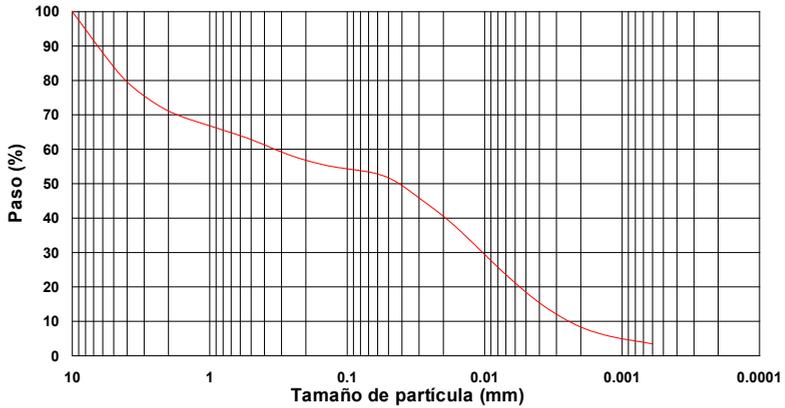
DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	71	61	53

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,4	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,4
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,97		
SALES SOLUBLES (%)	1,73	YESOS (%)	0,15

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo marginal

Nº DE MUESTRA 21


 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

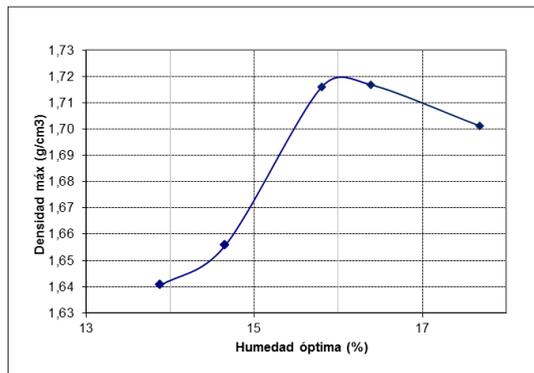
DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,59	HUMEDAD TOTAL (%)	8,29
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,7
---	-----

HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	16,2
------------------------------------	------


INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

CUARZO
 CALCITA
 YESO
 FELDESPATOS
 FILOSILICATOS
 DOLOMITA/ANKERITA (I)
 (I) Indicios.

La composición mineral de la muestra no permite su estimación semicuantitativa, por lo que solo se presentan los resultados del análisis cualitativo.



Nº DE MUESTRA 22



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

244

COMUNIDAD AUTÓNOMA: CASTILLA Y LEÓN
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,041	COT ¹	30.000	8.300
Ba	20	0,876	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,004*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,009	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,051	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,01*	* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,050			
Ni	0,4	<0,01			
Pb	0,5	<0,004*			
Sb	0,06	0,038			
Se	0,1	<0,01*			
Zn	4	0,366			
Cloruro	800	<1*			
Fluoruro	10	<0,5*			
Sulfato	1.000	2130			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	37			
STD	4.000	2.103			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos

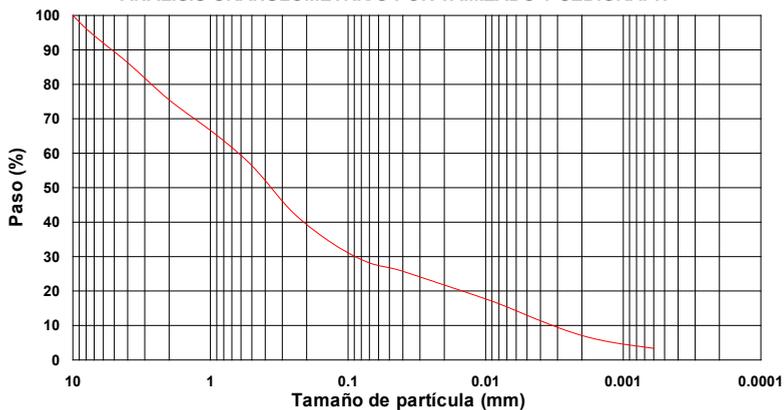
Nº DE MUESTRA 22


 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

245

GRANULOMETRÍA
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH


	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	76	51	29

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,91		
SALES SOLUBLES (%)	2,40	YESOS (%)	0,21

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo marginal



Nº DE MUESTRA 22



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

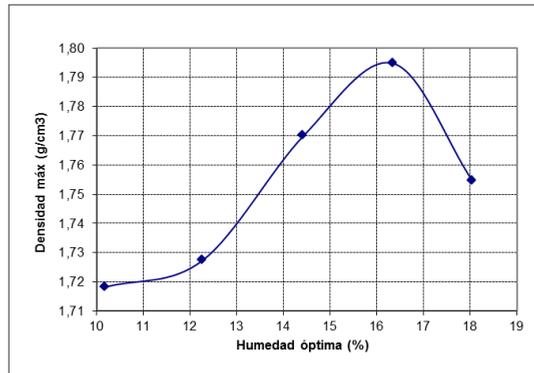
246

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,63	HUMEDAD TOTAL (%)	6,45
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	1,8
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	16



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- CUARZO
- CALCITA
- YESO
- FELDESPATOS
- FILOSILICATOS
- DOLOMITA/ANKERITA (I)

(I) Indicios.

La composición mineral de la muestra no permite su estimación semicuantitativa, por lo que solo se presentan los resultados del análisis cualitativo.

Nº DE MUESTRA 23

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD VALENCIANA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

247



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,012	COT ¹	30.000	33.500
Ba	20	0,445	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,106	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,074	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,005	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,274	LABORATORIO DEL IGME		
Ni	0,4	<0,005	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Pb	0,5	<0,002*	LABORATORIO LABAQUA		
Sb	0,06	0,177	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Se	0,1	0,007	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Zn	4	<0,01*	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Cloruro	800	3	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Sulfato	1.000	362			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	46			
STD	4.000	545			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos. Este material es utilizado en el relleno de canalizaciones, etc.



Nº DE MUESTRA 23



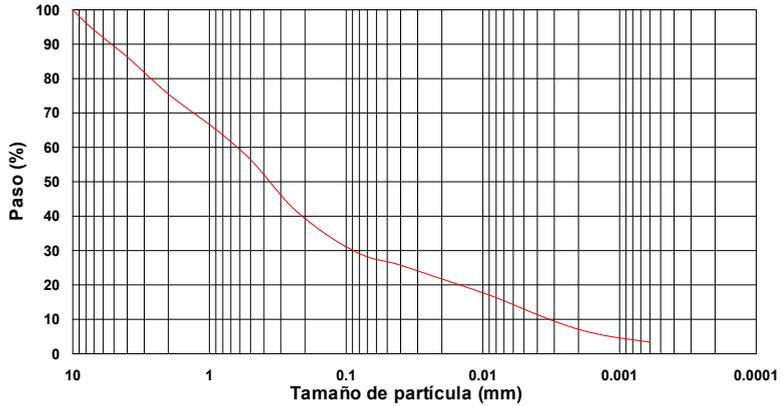
DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	75	52	29

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,44		
SALES SOLUBLES (%)	0,55	YESOS (%)	0,04

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

Nº DE MUESTRA 23

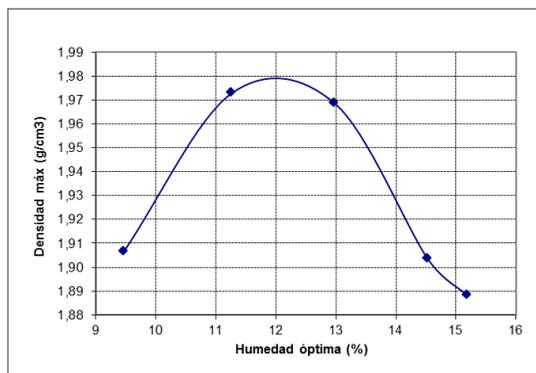
DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,69	HUMEDAD TOTAL (%)	1,59
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	2,0
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	12



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

CALCITA (89%)

DOLOMITA/ANKERITA (8%)

CUARZO (3%)



Nº DE MUESTRA 24



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

250

COMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD VALENCIANA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,011	COT ¹	30.000	21.400
Ba	20	0,860	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,010	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,020	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,005*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,083			
Ni	0,4	<0,005*			
Pb	0,5	0,003			
Sb	0,06	0,022			
Se	0,1	0,004			
Zn	4	0,065			
Cloruro	800	41			
Fluoruro	10	1,66			
Sulfato	1.000	362			
Índice Fenol	1	<0,005			
COD	500	20			
STD	4.000	595			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos

Nº DE MUESTRA 24

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

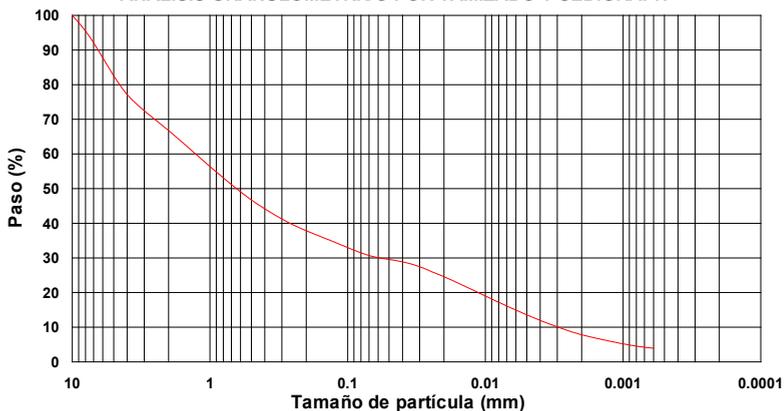
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

251

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	66	45	32

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	27,8	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	15,1	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	12,7
---------------------	------	----------------------	------	-------------------------	------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,28		
SALES SOLUBLES (%)	0,60	YESOS (%)	0,04

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable



Nº DE MUESTRA 24



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

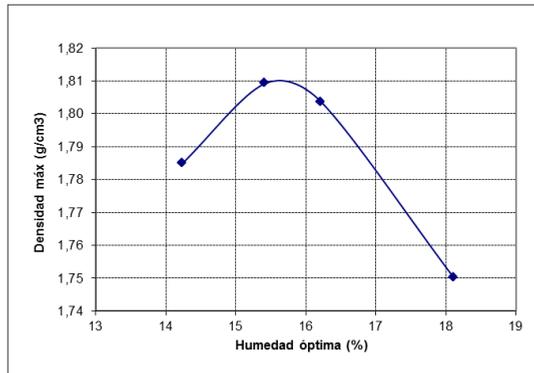
252

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,66	HUMEDAD TOTAL (%)	1,71
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	1,8
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	15,6



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- CALCITA (61%)
- FILOSILICATOS (22%)
- DOLOMITA/ANKERITA (10%)
- CUARZO (6%)
- YESO (1%)

Nº DE MUESTRA 25

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD VALENCIANA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

253



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,012	COT ¹	30.000	25.400
Ba	20	1,128	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,004*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,226	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,107	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,01*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,220	LABORATORIO DEL IGME		
Ni	0,4	0,010	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Pb	0,5	0,004	LABORATORIO LABAQUA		
Sb	0,06	0,049	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Se	0,1	0,014	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Zn	4	0,086	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Cloruro	800	40	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Nafaleno y Pireno)		
Fluoruro	10	0,55			
Sulfato	1.000	1.780			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	1.416			
STD	4.000	2.421			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos. Es una planta móvil de RCD junto a una planta de reciclaje de plásticos, con tránsito de maquinaria, etc.; posible contaminación fortuita de los RCD que explicaría valores COD elevados.



Nº DE MUESTRA 25



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

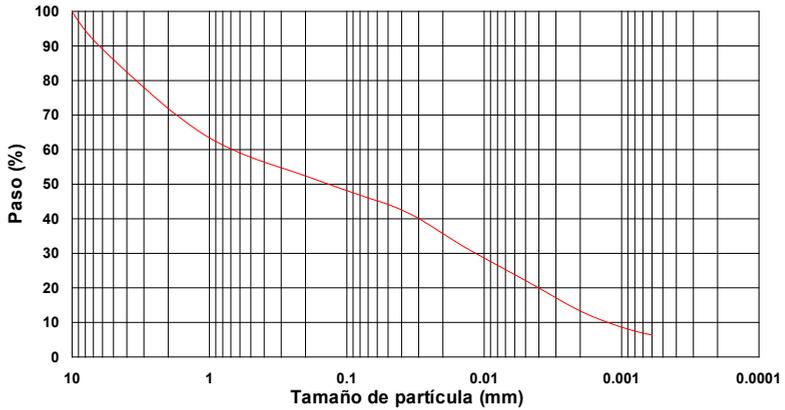
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

254

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	72	56	47

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,1	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,1
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,72		
SALES SOLUBLES (%)	2,42	YESOS (%)	0,18

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo marginal

Nº DE MUESTRA 25


 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

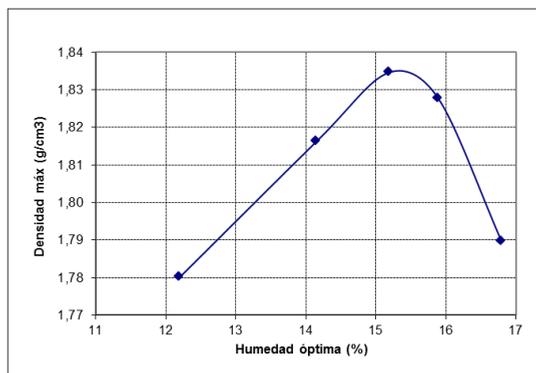
DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,67	HUMEDAD TOTAL (%)	1,79
------------------------------------	------	-------------------	------

255

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,8
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	15,3


INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

CALCITA (85%)
 FILOSILICATOS (10%)
 DOLOMITA/ANKERITA (2%)
 CUARZO (2%)
 YESO (1%)



Nº DE MUESTRA 26

Instituto Geológico y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

256

COMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ARAGÓN
 TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,013	COT ¹	30.000	6.400
Ba	20	1,020	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,004*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,423	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,204	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,01*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Nafaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,067			
Ni	0,4	0,018			
Pb	0,5	0,006			
Sb	0,06	0,003			
Se	0,1	0,018			
Zn	4	<0,02*			
Cloruro	800	19			
Fluoruro	10	<0,5			
Sulfato	1.000	1.690			
Índice Fenol	1	0,090			
COD	500	210			
STD	4.000	2.581			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos. El material de rechazo de precribado de 0-25 mm es mezclado con el de 0-80 mm para su uso como capa de sellado de un vertedero de residuos sólidos urbanos.

Nº DE MUESTRA 26

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

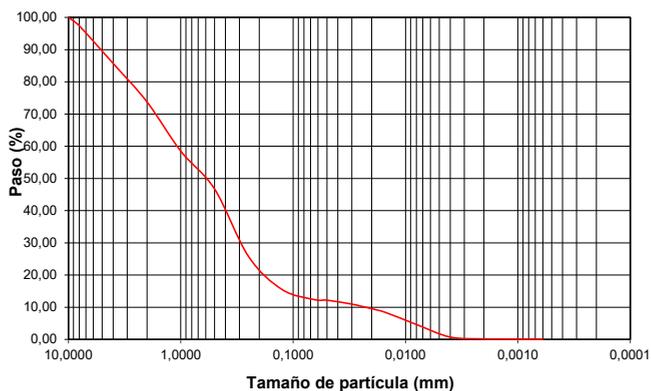
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

257

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	74	40	13

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,85		
SALES SOLUBLES (%)	0,26	YESOS (%)	0,17

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable



Nº DE MUESTRA 26



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

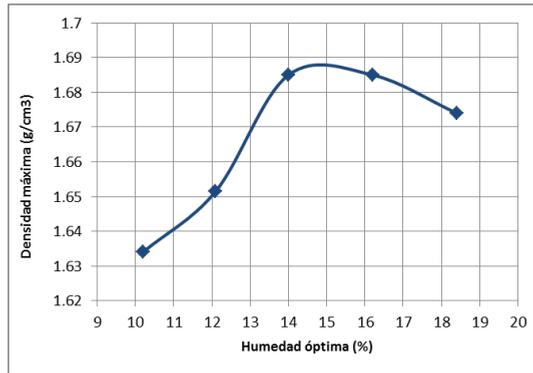
258

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,63	HUMEDAD TOTAL (%)	2,92
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,7
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	15



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- CALCITA (56%)
- CUARZO (23%)
- FELDESPATO K (11%)
- FILOSILICATOS (4%)
- YESO (3%)
- PLAGIOCLASA (3%)

Nº DE MUESTRA 27

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: COMUNIDAD AUTÓNOMA DE LA REGIÓN DE MURCIA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

259



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,050	COT ¹	30.000	13.900
Ba	20	1,428	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,037	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,032	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,005*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i>		
Mo	0,5	0,106	LABORATORIO DEL IGME		
Ni	0,4	0,008	¹ COT (Carbono orgánico total).		
Pb	0,5	0,005	LABORATORIO LABAQUA		
Sb	0,06	0,047	² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos)		
Se	0,1	0,005	³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres)		
Zn	4	0,242	⁴ Aceite mineral (C10 a C40)		
Cloruro	800	26	⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Fluoruro	10	<0,5*			
Sulfato	1.000	988			
Índice Fenol	1	<0,005*			
COD	500	324			
STD	4.000	1.195			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos

Nº DE MUESTRA 27

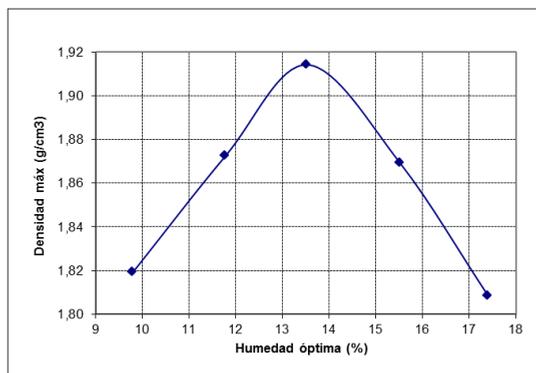
DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,71	HUMEDAD TOTAL (%)	1,54
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,9
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	13,5



INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

DOLOMITA/ANKERITA (50%)

CALCITA (32%)

CUARZO (10%)

FILOSILICATOS (5%)

FELDESPATO (2%)

YESO (1%)



Nº DE MUESTRA 28



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

262

COMUNIDAD AUTÓNOMA: CATALUÑA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,010	COT ¹	30.000	7.000
Ba	20	0,971	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,414	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,026	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	< 0,005*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,101			
Ni	0,4	< 0,005*			
Pb	0,5	< 0,002*			
Sb	0,06	0,017			
Se	0,1	0,009			
Zn	4	< 0,01*			
Cloruro	800	26			
Fluoruro	10	< 0,5			
Sulfato	1.000	552			
Índice Fenol	1	< 0,005			
COD	500	47			
STD	4.000	837			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos

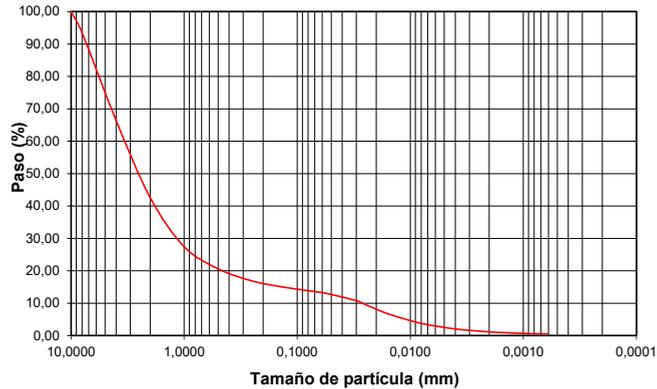
Nº DE MUESTRA 28


 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

263

GRANULOMETRÍA
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH


	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	42	19	14

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

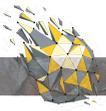
HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,50		
SALES SOLUBLES (%)	0,84	YESOS (%)	0,06

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo tolerable

**Nº DE MUESTRA** 28Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

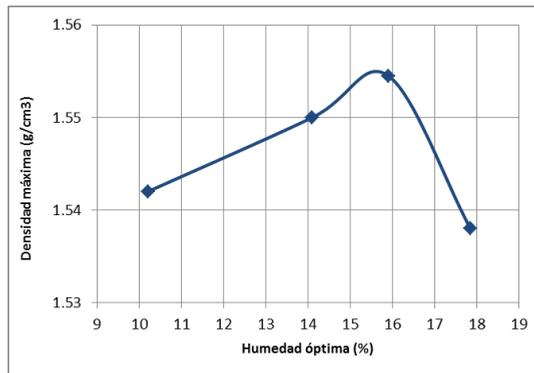
264

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm³)	2,63	HUMEDAD TOTAL (%)	7,89
---	------	--------------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm³)	1,6
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	15,5

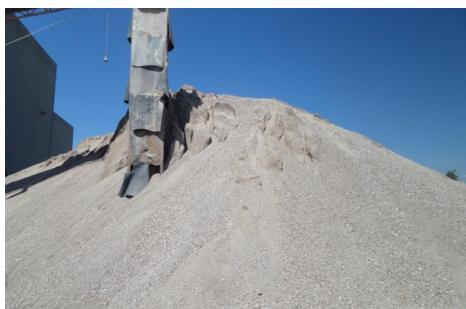
**INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)****COMPOSICIÓN MINERALÓGICA****ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

CALCITA (34%)
FELDESPATO K (18%)
PLAGIOCLASA (18%)
CUARZO (12%)
DOLOMITA (11%)
FILOSILICATOS (6%)
YESO (1%)

Nº DE MUESTRA 29

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURALCOMUNIDAD AUTÓNOMA: CATALUÑA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO

265



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,012	COT ¹	30.000	6.300
Ba	20	1,140	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,002*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,201	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,081	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,005*	<i>* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica</i> LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Nafaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,094			
Ni	0,4	0,013			
Pb	0,5	<0,002*			
Sb	0,06	0,022			
Se	0,1	0,009			
Zn	4	<0,01*			
Cloruro	800	30			
Fluoruro	10	< 0,5			
Sulfato	1.000	730			
Índice Fenol	1	< 0,005			
COD	500	48			
STD	4.000	1115			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos. Comercializan todo salvo un rechazo de material de precribado de 0-20 mm.



Nº DE MUESTRA 29



DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

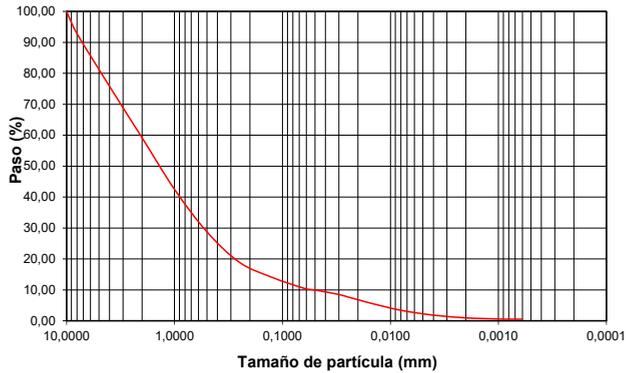
266

CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	59	25	12

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,77		
SALES SOLUBLES (%)	1,11	YESOS (%)	0,07

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo marginal

Nº DE MUESTRA 29

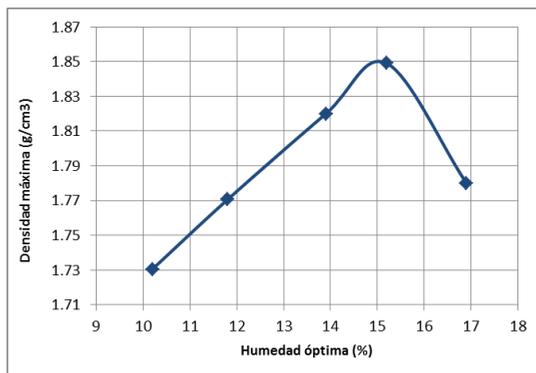

 DIRECCIÓN GENERAL
 DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
 Y MEDIO NATURAL

DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,65	HUMEDAD TOTAL (%)	4,60
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,8
HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	15


INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA
ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

CALCITA (33%)
 FELDESPATO K (17%)
 DOLOMITA (16%)
 CUARZO (13%)
 PLAGIOCLASA (11%),
 FILOSILICATOS (8%)
 YESO (2%)



Nº DE MUESTRA 30



DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL

268

COMUNIDAD AUTÓNOMA: CATALUÑA
TIPOLOGÍA DE RCD: MIXTO-CERÁMICO



Muestra para análisis de la lixiviabilidad

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LA MUESTRA DE RCD (Orden AAA/661/2013)

LIXIVIABILIDAD (UNE-EN 12457-4)			PARÁMETROS ORGÁNICOS		
PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca	PARÁMETROS	VALOR LÍMITE mg/kg de materia seca	VALOR MUESTRA mg/kg de materia seca
As	0,5	0,028	COT ¹	30.000	6.800
Ba	20	0,551	BTEX ²	6	
Cd	0,04	<0,004*	PCB ³	1	
Cr Total	0,5	0,155	Aceite mineral ⁴	500	
Cu	2	0,165	HPA ⁵	55	
Hg	0,01	<0,01*	* Valor por debajo del nivel de detección de la técnica LABORATORIO DEL IGME ¹ COT (Carbono orgánico total). LABORATORIO LABAQUA ² BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) ³ PCB (Policlorobifenilo, suma de 10 congéneres) ⁴ Aceite mineral (C10 a C40) ⁵ HPA (Hidrocarburos policíclicos aromáticos, Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno)		
Mo	0,5	0,161			
Ni	0,4	0,018			
Pb	0,5	<0,004*			
Sb	0,06	0,222			
Se	0,1	0,019			
Zn	4	0,032			
Cloruro	800	27			
Fluoruro	10	< 0,5			
Sulfato	1.000	1.520			
Índice Fenol	1	< 0,005			
COD	500	61			
STD	4.000	2.176			

COMENTARIOS

No se ha recogido muestra para análisis de parámetros orgánicos

Nº DE MUESTRA 30

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

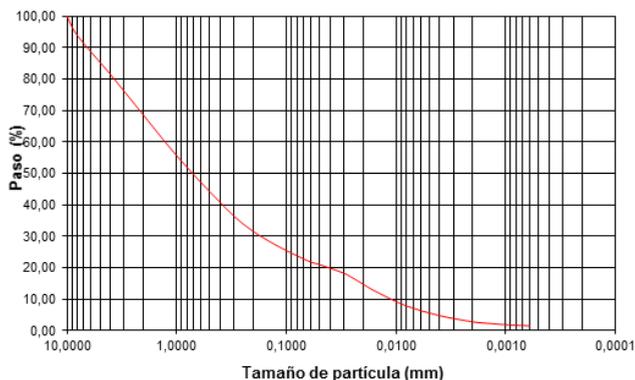
CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE RCD PARA RELLENOS

PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)

269

GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIGRAPH



	TAMIZ (mm)				
	20	10	2	0,40	0,08
CERNIDO (%)	100	100	68	41	24

PLASTICIDAD: LÍMITES DE ATTERBERG (UNE 103103)

LÍMITE LÍQUIDO (LL)	--	LÍMITE PLÁSTICO (Ip)	--	ÍNDICE PLASTICIDAD (IP)	No Plástico
---------------------	----	----------------------	----	-------------------------	-------------

ASIENTO EN ENSAYO DE COLAPSO (UNE 103406)

ÍNDICE DE COLAPSO (I_c) en %	0,2	POTENCIAL PORCENTUAL DE COLAPSO (I_{pc}) en %	0,2
SUELO COLAPSABLE (> 1%)	NO		

ENSAYO DEL HINCHAMIENTO LIBRE EN EDÓMETRO (UNE 103601)

HINCHAMIENTO LIBRE (%)	No hincha		
SUELO EXPANSIVO (HINCHAMIENTO LIBRE > 3%)	NO		

CONTENIDO EN:

MATERIA ORGÁNICA (%) (UNE 103204)	0,90		
SALES SOLUBLES (%)	2,18	YESOS (%)	0,15

CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN POSIBILIDADES DE USO PARA RELLENO

Suelo marginal

**Nº DE MUESTRA 30**Instituto Geológico
y Minero de EspañaDIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

270

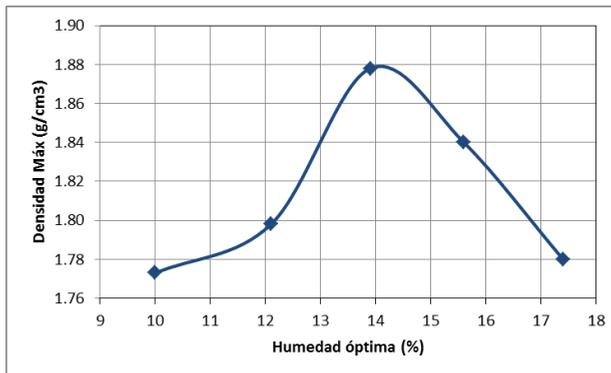
DENSIDAD REAL (picnómetro de helio. PTE-MI-004 Ed 0) Y HUMEDAD TOTAL (PTE-MI-007 Ed 0)

DENSIDAD REAL (g/cm ³)	2,67	HUMEDAD TOTAL (%)	3,48
------------------------------------	------	-------------------	------

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR NORMAL (UNE 103500)

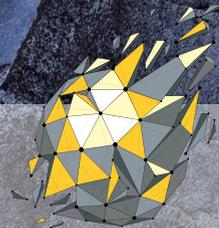
DENSIDAD SECA MÁXIMA (g/cm ³)	1,9
---	-----

HUMEDAD ÓPTIMA DE COMPACTACIÓN (%)	14,2
------------------------------------	------

**INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA (no requerida)****COMPOSICIÓN MINERALÓGICA****ESTIMACIÓN SEMICUANTITATIVA DE FASES CRISTALINAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

CALCITA (33%)
FELDESPATO K (22%)
CUARZO (18%)
DOLOMITA (15%)
PLAGIOCLASA (6%)
FILOSILICATOS (5%)
YESO (1%)

ANEXO 3



EVALUACIÓN DE LA
IDONEIDAD DE LOS
HUECOS DE
EXPLOTACIÓN DE
ARCILLA DE LA
COMARCA DE LA SAGRA
(TOLEDO) PARA SU
REHABILITACIÓN
CON RCD

	Pág.
1. ANÁLISIS DE LOS FACTORES CONDICIONANTES PARA LA REHABILITACIÓN DE HUECOS MINEROS CON RCD EN EXPLOTACIONES PILOTO	279
1.1. Selección de explotaciones piloto	279
1.2. Factores condicionantes en las explotaciones de arcilla de la Comarca de la Sagra (Toledo)	279
1.2.1. Marco geológico y litoestratigrafía	279
1.2.2. Hidrogeología e hidrología	287
1.2.3. Estado erosivo de los taludes del hueco y/o presencia de inestabilidades	296
1.2.4. Caracterización geotécnica de los huecos para el relleno con RCD	299
1.2.5. Viabilidad de la rehabilitación de los huecos seleccionados en función del coste del transporte y suministro de RCD	303
1.2.6. Calidad ambiental y del paisaje y accesibilidad visual de los huecos mineros	304
1.2.7. Valoración de la idoneidad de los huecos seleccionados para su rehabilitación con RCD	306
2. BIBLIOGRAFÍA	309

	Pág.
Figura 1. Huecos de las explotaciones de arcilla: Valanzana (izquierda) y La Paloma II (derecha)	280
Figura 2. Proximidad de la comarca de La Sagra (Toledo) a la capital madrileña	280
Figura 3. Mapa de unidades litoestratigráficas (Fuente: Cartografía Geológica Digital continua a escala 1:50000. GEODE. IGME)	283
Figura 4. Detalle de uno de los cortes de la cantera Valanzana en la que se aprecian las unidades diferenciadas U1, U2, U3 y U4	284
Figura 5. Columna estratigráfica sintética de la cantera Valanzana	284
Figura 6. Alternancia de niveles métricos de arenas masivas y de niveles de limos y arcillas de colores anaranjados y verdosos (la escala mide 2 m) correspondientes a las unidades U1, U2 y U3	285
Figura 7. Aspecto de los niveles superiores de la serie, en donde se observa la estructura prismática del paleosuelo en el tramo oscuro lutítico y los nódulos carbonatados en el tramo arenoso infrayacente (U4). El nivel superior corresponde a un nivel arcósico antropizado	285
Figura 8. Columna estratigráfica sintética de la cantera La Paloma II y aspecto de los niveles lutíticos aflorantes (la escala mide 2m)	286
Figura 9. Unidad hidrogeológica y masa de agua subterránea de la demarcación hidrográfica del Tajo donde se localizan los huecos de explotación seleccionados	288
Figura 10. Modelización del flujo de las aguas subterráneas (mapa de isopiezas) en torno a los huecos mineros seleccionados, a partir de niveles piezométricos en sondeos y calicatas (AITEMIN, 2003)	290
Figura 11. Captaciones de agua (pozos) en el entorno de los huecos mineros seleccionados según la Encuesta de Infraestructura y Equipamientos Locales de los municipios de Toledo (EIEL, 2016)	291
Figura 12. Profundidades del nivel freático en sondeos y calicatas (AITEMIN, 2005a,b,c,d,e,f)	292
Figura 13. Caracterización hidroquímica de las aguas extraídas de dos pozos situados en el Coto Minero de La Sagra (Diagramas de Piper). Período 1997-2002	293
Figura 14. Ensayos para la determinación de la conductividad hidráulica in situ en el fondo de los huecos de las canteras Valanzana y La Paloma II por el método de Hatt & Le Coustumer (2008)	294
Figura 15. Izquierda: hueco inundado y parcialmente relleno con tierras de excavación de la cantera Valanzana. Derecha: Hueco inundado de la cantera La Paloma II	294
Figura 16. Izquierda: vegetación freatófita en el frente sur del hueco de explotación en la Paloma II. Derecha: vegetación freatófita al pie de las bermas de dicho frente	295



Figura 17.	Localización de los cursos fluviales más próximos a los huecos mineros seleccionados	296
Figura 18.	Estado erosivo e inestabilidades de los taludes del hueco de explotación de la cantera Valanzana	297
Figura 19.	Erosión de los frentes de avance de la explotación de arcilla en la cantera La Paloma II	298
Figura 20.	Estado erosivo e inestabilidades de los taludes del hueco de explotación de la cantera La Paloma II	298
Figura 21.	Localización de los puntos donde se han realizado los ensayos geotécnicos in situ en las canteras Valanzana (arriba) y La Paloma II (abajo)	299
Figura 22.	Ensayos de resistencia a la compresión simple con penetrómetro de bolsillo de hasta 5 dNa/cm ² (izquierda) y de resistencia al corte con vane test (derecha) en condiciones no drenadas	300
Figura 23.	Municipios de la Comunidad de Madrid y Toledo localizados en un radio de 30 km en torno a los huecos de las canteras Valanzana y La Paloma II clasificados según de tamaño de población	303
Figura 24.	Localización de las canteras Valanzana y La Paloma II respecto a las principales vías de comunicación por carretera	304
Figura 25.	Análisis de visibilidad de los huecos mineros de las canteras Valanzana (Izquierda) y La Paloma II (Derecha)	305

	Pág.
Tabla 1. Valores medios de resistencia a la compresión simple no drenada (q_u) en Kg/ cm ²	300
Tabla 2. Valores medios de resistencia al esfuerzo cortante no drenado (S_u) en kg/cm ²	301
Tabla 3. Valores de cohesión C_u calculados por el método de Bucchi (1972) y el valor de resistencia al esfuerzo cortante (S_u) obtenido del ensayo vane test	302
Tabla 4. Valoración del índice de idoneidad del hueco de Valanzana para su rehabilitación con RCD	306
Tabla 5. Valoración del índice de idoneidad del hueco de La Paloma II para su rehabilitación con RCD	307

1. ANÁLISIS DE LOS FACTORES CONDICIONANTES PARA LA REHABILITACIÓN DE HUECOS MINEROS CON RCD EN EXPLOTACIONES PILOTO

1.1. Selección de explotaciones piloto

Una vez establecidos los criterios para una evaluación preliminar de la idoneidad de un hueco minero para su rehabilitación con RCD, y con el objeto de poder llevar a cabo una valoración de la metodología así como un análisis más detallado de los principales factores que condicionan el uso de estos residuos como material de relleno en la restauración minera, se han seleccionado de entre todas las tipologías varios huecos mineros de explotaciones de arcilla, considerados *a priori* los más idóneos para este fin, localizados ambos en la comarca de La Sagra (Toledo).

1.2. Factores condicionantes en las explotaciones de arcilla de la comarca de la Sagra (Toledo)

La comarca de La Sagra (Toledo) es uno de los principales centros de producción de arcilla para la fabricación de ladrillo, tejas y bovedillas a nivel autonómico y nacional, con una fuerte concentración de explotaciones. Asimismo, la importancia histórica de este sector en la región queda patente en la existencia de numerosos huecos de canteras antiguas abandonadas sin ningún tipo de restauración. Por otra parte, la comarca se encuentra a menos de 50 km de la capital madrileña y su área metropolitana generadores de una producción muy elevada de RCD (**Figura 2**), por lo que la viabilidad económica debido a los costes de transporte y la disponibilidad de material para las labores de restauración están garantizadas. Todas estas razones, han sido determinantes para la selección de los huecos de explotación de las canteras Valanzana y La Paloma II como ejemplos ilustrativos (**Figura 1**), localizándose ambas en el Coto Minero de La Sagra (Resolución de 2 de marzo de 2004 de la Consejería Industria y Trabajo de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha), en los municipios de Illescas y Pantoja respectivamente.

La cantera Valanzana presenta tres huecos diferenciados, estimándose una capacidad máxima conjunta de 397.148 m³. Actualmente la empresa propietaria dispone de autorización como gestor de residuos para la recuperación ambiental de un espacio degradado con tierras y piedras limpias (código LER 170504) y minerales como arenas y piedras (código LER 191209). Con dichos materiales se ha rellenado parcialmente parte de uno de los huecos (**Figura 1**). La cantera La Paloma II se encuentra en estos momentos inactiva; por lo tanto presenta diversos frentes todavía sin explotar, y un hueco residual cubierto por una lámina de agua en la zona más profundamente excavada (**Figura 1**). A continuación se describen los principales condicionantes geológicos, litológicos, hidrogeológicos, hidrológicos, geotécnicos, además de otros factores de viabilidad económica o de prioridad por razones ambientales que deben considerarse, en cada una de ellas, para el uso de los RCD de precibado en el relleno de los huecos residuales.

1.2.1. Marco geológico y litoestratigrafía

Las canteras de Valanzana y La Paloma II se ubican en los materiales terciarios de la zona suroccidental de la Cuenca de Madrid, en la Cuenca del Tajo. La Cuenca de Madrid es una

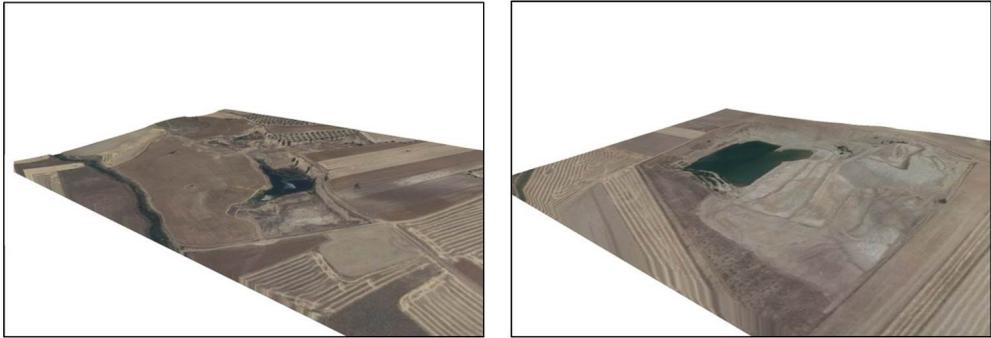


Figura 1. Huecos de las explotaciones de arcilla de Valanzana (izquierda) y La Paloma II (derecha)

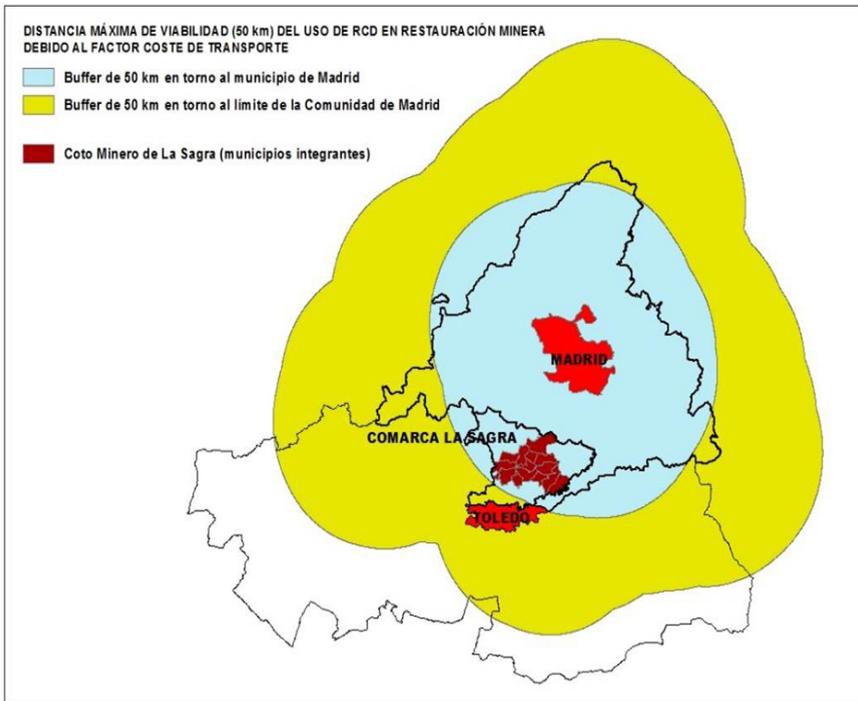


Figura 2. Proximidad de la Comarca de La Sagra (Toledo) a la capital madrileña

depresión intraplaca formada durante la orogenia alpina (Vegas y Banda, 1982), y está rellena de materiales sedimentarios terciarios de origen continental. La Cuenca de Madrid está limitada al noroeste por el Sistema Central, al sur por los Montes de Toledo y al este por la Sierra de Altomira, que la separa de la Cuenca de Loranca o Depresión Intermedia.

La tectónica alpina hace que durante el Terciario, la Cuenca de Madrid funcione de forma diferente en cada uno de sus bordes. En el límite oriental, la Sierra de Altomira se emplaza

definitivamente durante el Oligoceno superior-Mioceno inferior, formando una franja de materiales mesozoicos y paleógenos plegados y cabalgantes hacia el oeste. El límite meridional de los Montes de Toledo muestra una mayor actividad tectónica durante el Mioceno inferior, se estructura mediante fallas inversas y presenta un depósito discontinuo de materiales eocenos y oligocenos (Rodas *et al.*, 1991). En el Sistema Central existen muestras de intensa actividad tectónica a lo largo de casi todo el Mioceno, y principalmente durante el Aragoniense medio-superior (Calvo *et al.*, 1991). Durante la mayor parte del Mioceno la cuenca estuvo ocupada por orlas de abanicos aluviales coalescentes que alimentaban los sistemas lacustres del centro de la cuenca y que la fueron rellenando con una potente sucesión de sedimentos.

Los sondeos profundos realizados en la Cuenca del Tajo para la exploración de hidrocarburos, han puesto de manifiesto la existencia de materiales mesozoicos sobre el basamento paleozoico en el sector oriental de la cuenca. También se ha observado en los mismos la existencia de una marcada asimetría en el relleno sedimentario en sentido NO-SE, de tal forma que en las proximidades del Sistema Central los materiales terciarios alcanzan espesores cercanos a los 4000 m y disminuyen hasta menos de 1000 m en el borde meridional de la cuenca (Megías *et al.*, 1983; Racero, 1988). El relleno continental terciario tiene buena continuidad estratigráfica, comenzando con depósitos paleógenos que aparecen orlando la cuenca de forma discontinua; sobre estos yace discordante y subhorizontal la serie neógena que constituye la mayoría de los afloramientos. Los materiales del Neógeno aflorantes corresponden a los depósitos de relleno de una cuenca endorreica. Abarcan desde las facies detríticas groseras, de borde de cuenca, a las facies centrales, con precipitación de materiales evaporíticos, y las facies de transición o intermedias entre las de borde y las centrales, constituidas por sedimentos detríticos finos y de precipitación química. Sobre ellos, localmente, hay recubrimientos del Cuaternario constituidos por los depósitos aluviales y las terrazas asociadas a los ríos y arroyos, especialmente en las proximidades del arroyo Guatén y el río Tajo.

En la zona afloran fundamentalmente materiales del Mioceno. El relleno mioceno de la Cuenca de Madrid ha sido dividido en tres unidades tectosedimentarias mayores: Unidad Inferior, Unidad Intermedia y Unidad Superior (Junco y Calvo, 1983; Alonso-Zarza *et al.*, 2004). Los materiales correspondientes a las Unidades Inferior e Intermedia se distribuyen según el esquema sedimentario clásico de una cuenca continental endorreica, mientras que la Unidad Superior indica la existencia de una red fluvial y, por tanto, el cambio a condiciones exorreicas en la cuenca. La Unidad Inferior (de edad Ramblense-Aragoniense medio) tiene un espesor máximo de 800 m y está formada por depósitos detríticos en los bordes de la cuenca que hacia el centro de la misma van disminuyendo su granulometría hasta evolucionar a sedimentos evaporíticos en los sectores centrales. La Unidad Intermedia (de edad Aragoniense medio-Vallesiense) presenta un predominio de sedimentos carbonatados en los sectores centrales de la cuenca y de los sedimentos detríticos en el borde noroccidental; se subdivide en dos ciclos separados con una discontinuidad estratigráfica consistente en un marcado incremento en la granulometría (Alonso Zarza *et al.*, 1986 y 1990). El ciclo inferior presenta un predominio de las facies carbonatadas frente a las detríticas, mientras que en el ciclo superior predominan las facies detríticas arcósicas con cambios laterales de facies



a granulometrías más finas hacia el sureste. La Unidad Superior miocena (de edad Vallesien-se-Turolense) presenta espesores inferiores a los 60 m; su base está constituida por depósitos detríticos de origen fluvial (conocidos como “red fluvial intramiocena”) sobre los que se disponen un conjunto calcáreo denominado tradicionalmente “Calizas del Páramo” o Calizas Pontien-ses. Durante el Plioceno se establece un complejo sedimentario fluvial que culmina con la formación de una unidad de paleosuelos carbonáticos (Sanz-Montero, 1996).

A continuación, se describen las principales características litoestratigráficas de los materia-les presentes en cada una de las explotaciones mineras seleccionadas:

a) Litoestratigrafía de la cantera Valanzana

La explotación Valanzana se ubica en los depósitos detríticos del ciclo superior de la Unidad Intermedia miocena (Aragoniense superior), concretamente en una unidad de arcosas con intercalaciones de lutitas (unidad 6) (Díaz de Neira y López Olmedo, 1999), tal y como puede observarse en la **Figura 3**, que puede llegar a tener un espesor máximo de 70 m en otras zonas. En general, esta unidad presenta niveles arenosos de potencia métrica (1-5 m), generalmente masivos, con intercalaciones lutíticas de espesores métricos (1-2 m) con tonalidades más oscuras, normalmente rojizas, y con abundantes rasgos edáficos. Los niveles arenosos se organizan en secuencias granodecrecientes con base erosiva y presentan estratifi-cación cruzada a mediana y gran escala.

Se ha elaborado una columna estratigráfica sintética a partir de levantamientos parciales en varios puntos de la cantera debido a la inexistencia de un afloramiento completo de la serie. Además, existen variaciones laterales en la granulometría y la potencia de los sedimentos que, si bien no son importantes, hacen que la potencia y la granulometría representadas sean orientativas. Se han diferenciado 4 unidades estratigráficas individualizadas por existir un marcado cambio en la granulometría o discordancias erosivas (**Figura 4**).

De muro a techo la serie comienza por una unidad fundamentalmente limosa, U1 (**Figura 5**), de más de 3 m de potencia, de colores ocres y rojizos, con algunos niveles finamente lami-nados; se observan rasgos edáficos en algunos niveles más arcillosos; hacia techo aparecen niveles de lutitas gris-verdosas y limos arenosos ocre finamente laminados (**Figura 6**). Por encima se distingue una unidad U2, de unos 2 m de potencia, formada por dos secuencias granodecrecientes que comienzan con un nivel de arenas de grano muy grueso a fino, ma-sivas, de color beige claro, que pasan a techo a niveles de limos y lutitas pardos, verdosos y grises; el nivel limo-arcilloso situado a techo presenta desarrollo de calcretas. El paso a la unidad U3 (**Figura 5**) está marcado por un aumento en la granulometría, comenzando con un nivel de arenas de 1,5 m de potencia que hacia techo pasa a arenas finas y limos con nódulos de carbonato, con laminación cruzada planar a gran escala; esta unidad aumenta considerablemente de potencia hacia el oeste debido a la existencia de una discordancia erosiva que elimina los niveles superiores de la serie hacia el este, llegando casi a desaparecer. La unidad superior U4 (**Figura 7**) presenta una potencia variable, se trata de una secuencia granodecreciente de arenas de grano grueso, medio y fino, fundamentalmente masivas, aun-que en algunos puntos se observa laminación paralela y cruzada planar, que pasan a techo a limos y lutitas pardo negruzcas con rasgos edáficos.

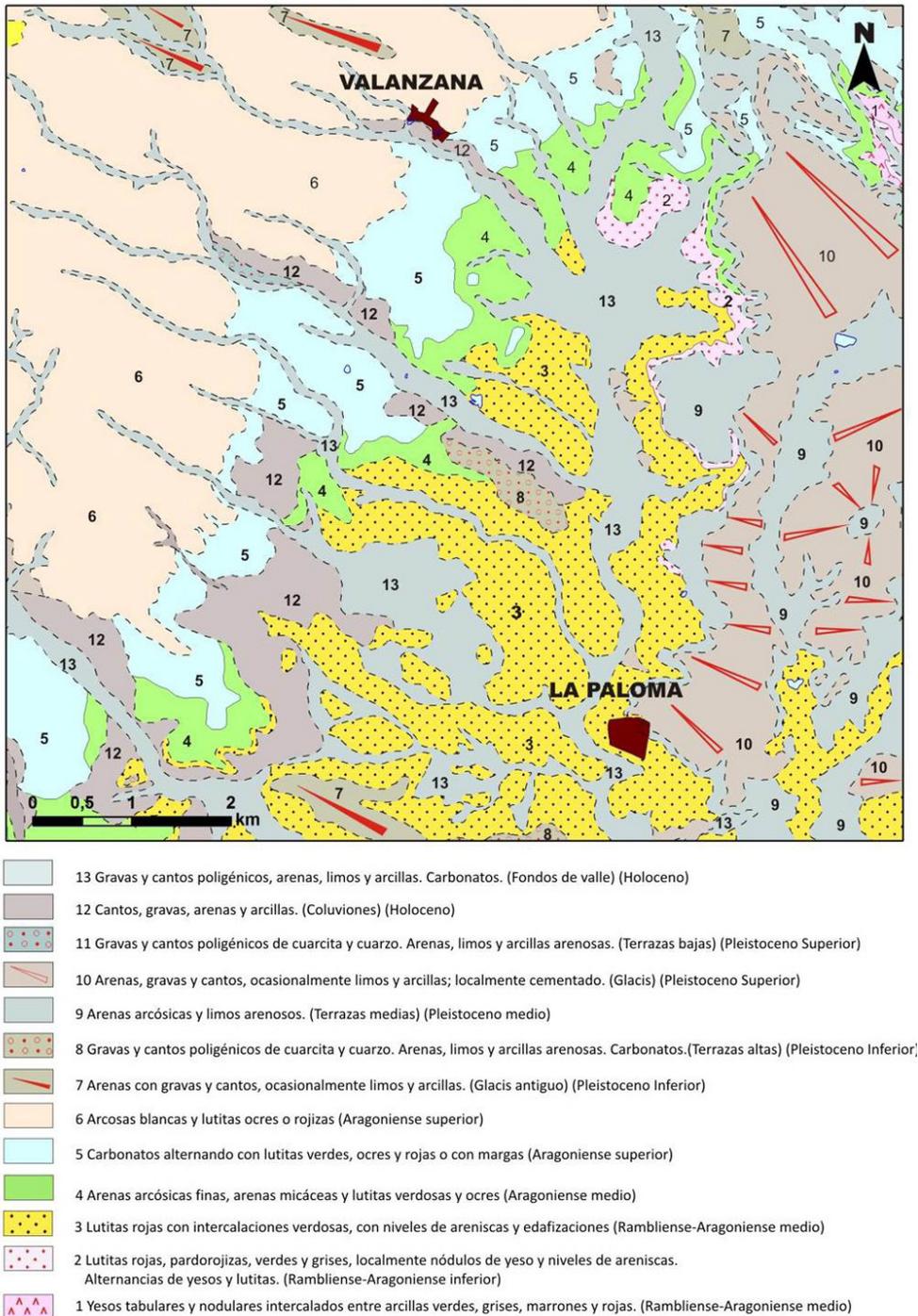


Figura 3. Mapa de unidades litoestratigráficas (Fuente: Cartografía Geológica Digital continua a escala 1:50000. GEODE. IGME)

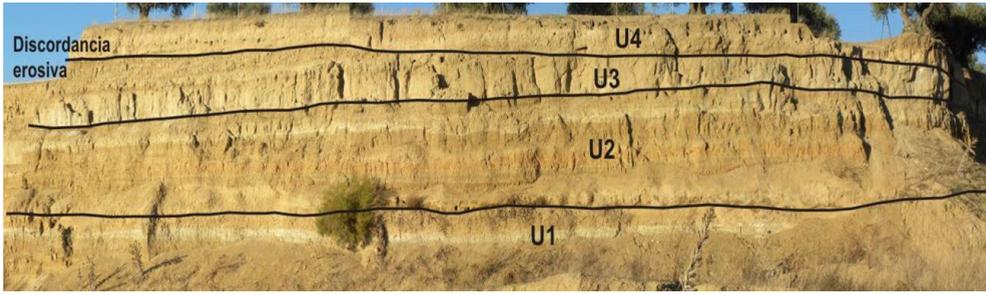


Figura 4. Detalle de uno de los cortes de la cantera Valanzana en la que se aprecian las unidades diferenciadas U1, U2, U3 y U4

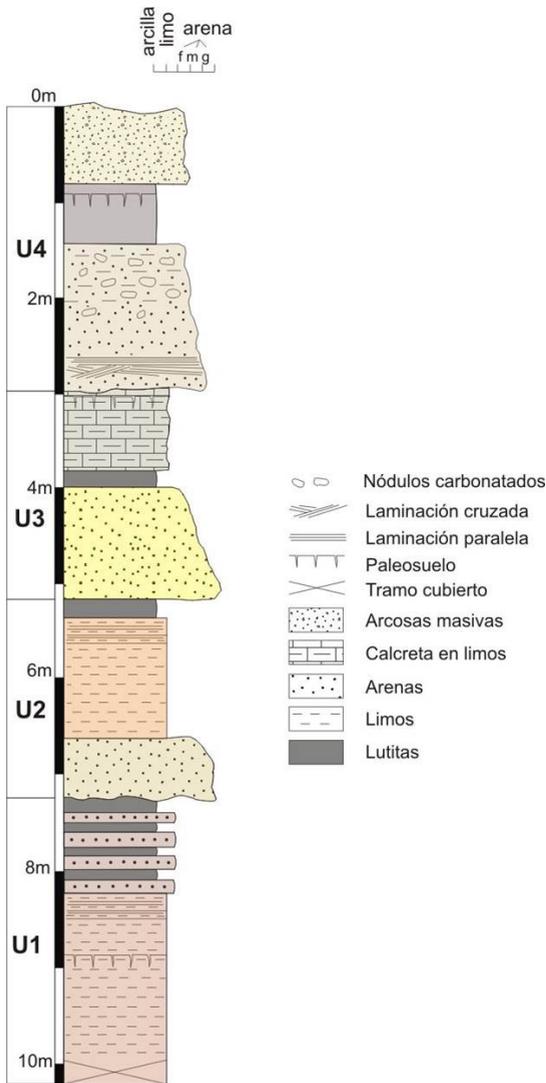


Figura 5. Columna estratigráfica sintética de la cantera Valanzana

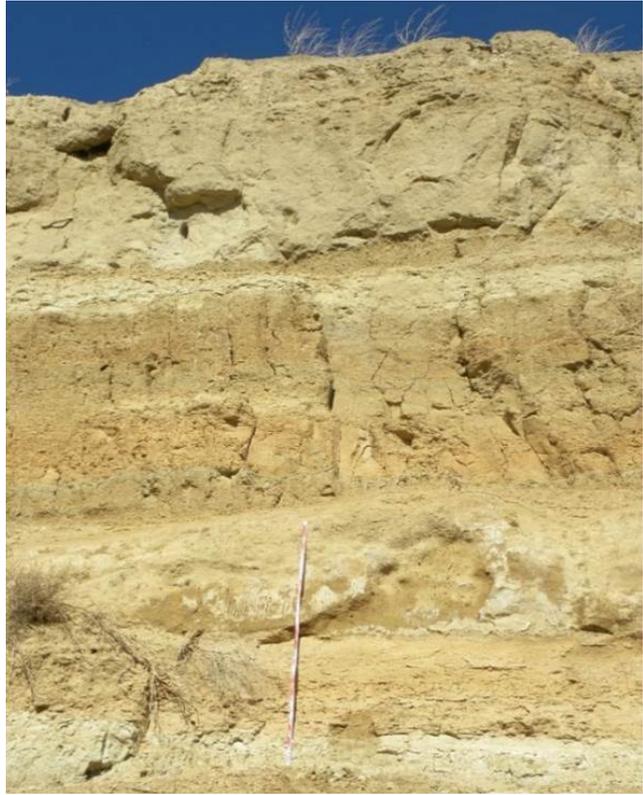


Figura 6. Alternancia de niveles métricos de arenas masivas y de niveles de limos y arcillas de colores anaranjados y verdosos (la escala mide 2 m) correspondientes a las unidades U1, U2 y U3



Figura 7. Aspecto de los niveles superiores de la serie, en donde se observa la estructura prismática del paleosuelo en el tramo oscuro lutítico y los nódulos carbonatados en el tramo arenoso infrayacente (U4). El nivel superior corresponde a un nivel arcósico antropizado

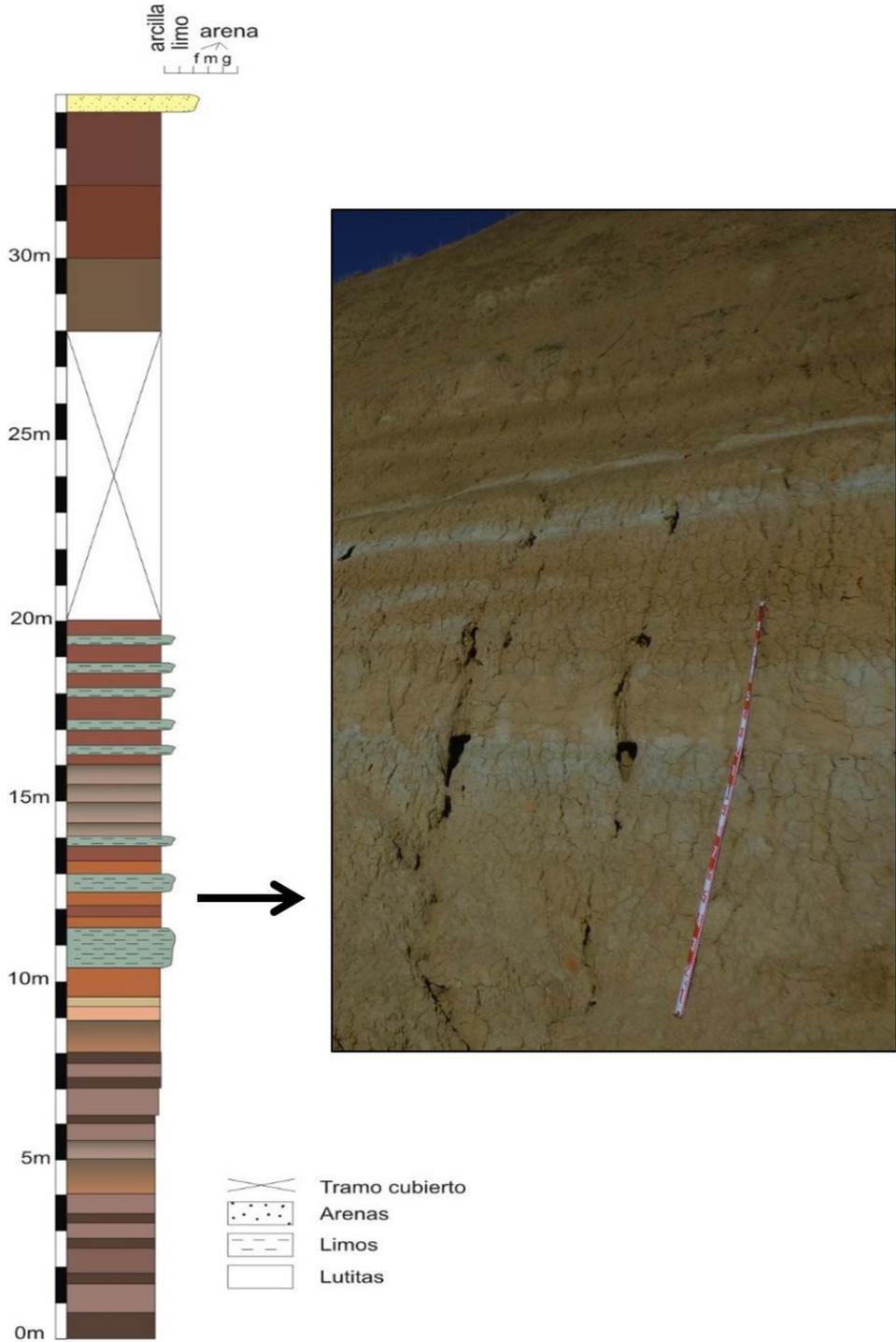


Figura 8. Columna estratigráfica sintética de la cantera La Paloma II y aspecto de los niveles lutíticos aflorantes (la escala mide 2 m)

b) Litoestratigrafía de la cantera La Paloma II

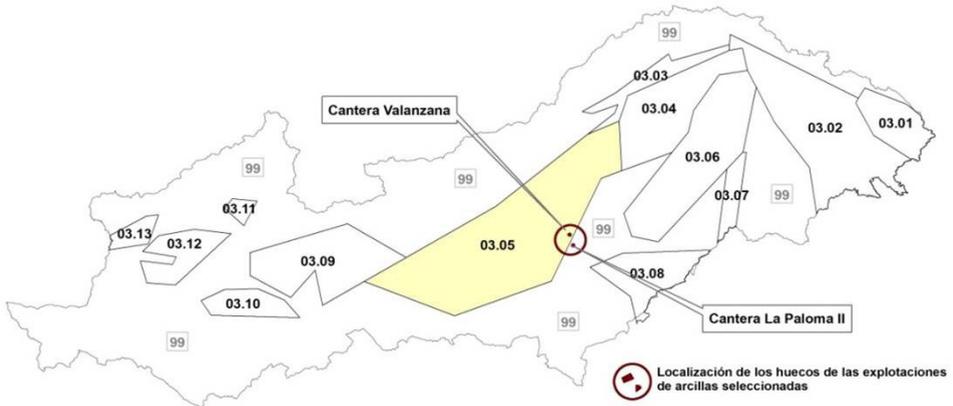
La cantera de La Paloma II está excavada en una unidad de lutitas rojas con intercalaciones verdosas perteneciente a la Unidad Inferior miocena (Ramblense-Aragoniense medio) (unidad 3) (Mediavilla y Rubio, 2010), tal y como puede observarse en la **Figura 3**. Estos materiales pertenecen a la Formación Arcillas Rojas de La Sagra, que constituye la base de la industria cerámica de la región. Se trata de sucesiones con carácter marcadamente arcilloso, homogéneas, con abundante bioturbación y tonalidades pardo-rojizas principalmente, correspondientes a un medio de deposición de tipo llanura fangosa lacustre. En ella aparecen ocasionalmente intercalaciones de arenas micáceas finas. La Formación Arcillas de La Sagra presenta tránsitos laterales hacia el Sur a depósitos procedentes de la erosión de los Montes de Toledo (Formación “Arenas Gruesas Rojas”), hacia el Oeste a sedimentos de orla distal de abanicos aluviales procedentes de la erosión del sector más occidental del Sistema Central (Formación “Arenas Finas con Sepiolita, Sílex y Carbonatos”)(García Romero *et al.*, 1990), y hacia el este a las evaporitas del centro de la cuenca.

En la cantera se observa una potente serie de más de 35 m de potencia (**Figura 8**), subhorizontal, con bastante continuidad lateral, muy monótona, en la que alternan niveles de limos verdosos y ocre-rojizos, de 50 cm a 1 m de potencia, con niveles lutíticos pardo-verdosos, rojizos y pardo-rojizos decimétricos a métricos. Los niveles más bajos que se pueden observar en la cantera corresponden a niveles de lutitas pardo-negruczas, bien estratificadas, en bancos de 50 a 70 cm de espesor, con una textura granulosa y en bloques.

1.2.2. Hidrogeología e hidrología.

Los huecos de explotación de las canteras Valanzana y La Paloma II se localizan en el límite de la unidad hidrogeológica 03.05 “Madrid-Talavera”, y en la unidad 99 que engloba acuíferos dispersos de interés local o de baja transmisividad y almacenamiento, respectivamente (**Figura 9**). Dichas unidades hidrogeológicas quedaron definidas en el primer Plan Hidrológico de cuenca del Tajo (Orden de 13 de agosto de 1999). Asimismo, y de acuerdo con la Directiva Marco del Agua, ambos huecos se ubican en la masa de agua subterránea 030.015 “Talavera” (**Figura 9**).

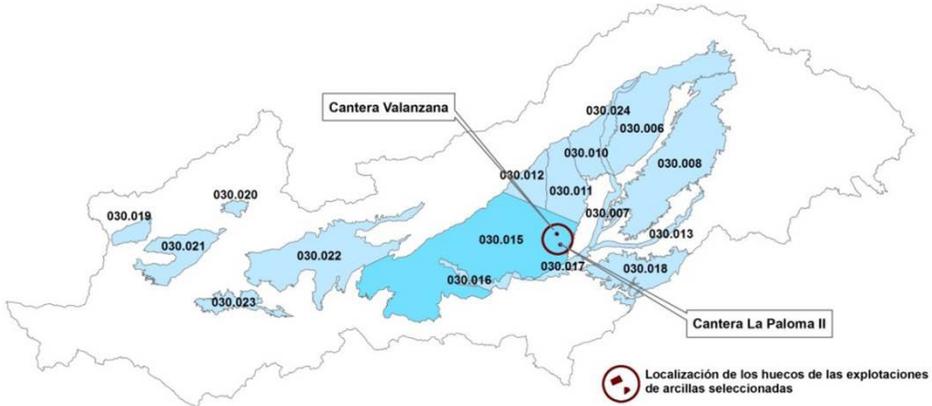
La unidad hidrogeológica 03.05 Madrid-Talavera y la masa de agua subterránea “Talavera” están integradas en la subunidad Madrid-Toledo del Sistema Acuífero nº 14 “Terciario Detrítico Madrid-Toledo-Cáceres”, definida por López Vilchez y Ruiz Celáa (1983). Esta subunidad está constituida por materiales terciarios, de carácter detrítico, que rellenan la fosa tectónica del Tajo. Se encuentra limitada: al norte y al sur por las formaciones paleozoicas impermeables del Sistema Central y las estribaciones de los Montes de Toledo; al este por las facies centrales miocenas químico-evaporíticas de la cuenca; y al oeste por la Subunidad Tiétar, perteneciente al mismo sistema acuífero (Porrás *et al.*, 1985). Estos materiales detríticos terciarios constituyen, a nivel regional, un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo formado por un conjunto de lentejones de gravas y arenas arcillosas que dan lugar a acuíferos multicapa distribuidos aleatoriamente, en una matriz de arcillas arenosas de muy baja permeabilidad (Porrás *et al.*, 1985; Navarro *et al.*, 1993; Yélamos y Villarroya, 2007). La recarga del mismo se realiza por infiltración de la lluvia, preferentemente en las zonas de divisoria



UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

- | | |
|---|---------------------------|
| 03.01 Albarracín-Cella-Molina de Aragón | 03.08 Ocaña |
| 03.02 Tajuña-Montes Universales | 03.09 Tiétar |
| 03.03 Torrelaguna-Jadraque | 03.10 Talaván |
| 03.04 Guadalajara | 03.11 Zarza de Granadilla |
| 03.05 Madrid-Talavera | 03.12 Galisteo |
| 03.06 La Alcarria | 03.13 Moraleja |

99 Acuíferos de interés local o de baja transmisividad y almacenamiento, dispersos por la cuenca



MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEAS

- | | |
|--|--|
| 030.006 GUADALAJARA | 030.016 ALUVIAL DEL TAJO: TOLEDO-MONTEARAGÓN |
| 030.007 ALUVIALES JARAMA-TAJUÑA | 030.018 OCAÑA |
| 030.008 LA ALCARRIA | 030.019 MORALEJA |
| 030.010 MADRID: MANZANARES-JARAMA | 030.020 ZARZA DE GRANADILLA |
| 030.011 MADRID: GUADARRAMA-MANZANARES | 030.021 GALISTEO |
| 030.012 MADRID: ALDEA DEL FRESNO-GUADARRAMA | 030.022 TIÉTAR |
| 030.013 ALUVIAL DEL TAJO: ZORITA DE LOS CANES-ARANJUEZ | 030.023 TALAVÁN |
| 030.015 TALAVERA | 030.024 ALUVIAL DEL JARAMA: GUADALAJARA-MADRID |
| 030.017 ALUVIAL DEL TAJO: ARANJUEZ-TOLEDO | |

Figura 9. Unidad hidrogeológica y masa de agua subterránea de la demarcación hidrográfica del Tajo donde se localizan los huecos de explotación seleccionados

de cuencas hidrográficas o interfluvios; a partir de estas áreas, se establece un flujo hacia los fondos de valle de los principales ríos que discurren por la zona. La descarga suele tener lugar, a través de los aluviales cuaternarios que actúan como simple by-pass (Porrás *et al.*, 1985;

Coleto, I., 1994; Yélamos y Villarroya, 2007). Hay que destacar en este modelo de flujo, la posibilidad de existencia de “zonas de estancamiento” a diferentes profundidades, donde la velocidad del agua es prácticamente nula y el tiempo de residencia podría ser muy elevado (Porrás *et al.*, 1985). Asimismo, la profundidad del nivel freático es muy variable debido a la heterogeneidad de los materiales que lo conforman, el número y distribución de niveles arenosos en el conjunto del sistema acuífero o su localización en una zona de recarga o descarga, etc. Aunque por lo general suele ser poco profundo, debido en gran medida al suave modelado de la topografía de la cuenca, y muy especialmente en las proximidades de los cursos fluviales en que el nivel freático es por lo general inferior a 10 m (Porrás *et al.*, 1985; Navarro *et al.*, 1993). No obstante, en zonas de fuerte concentración de pozos y sondeos pueden registrarse profundidades mayores, incluso de más de 60 m.

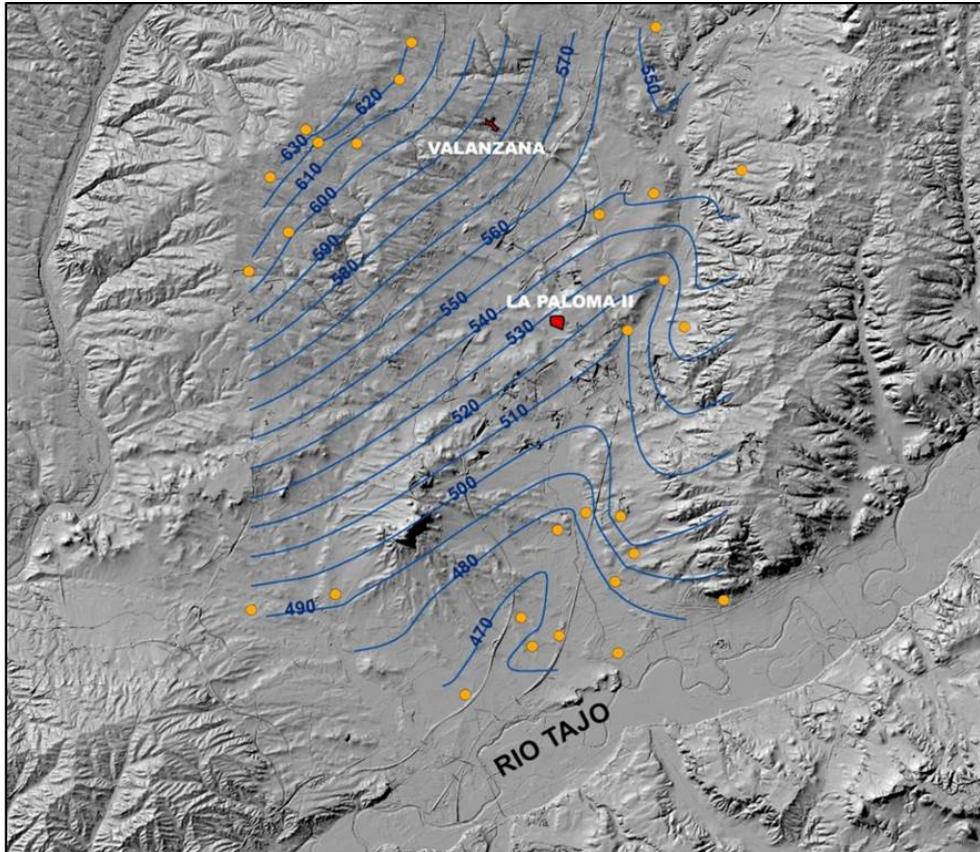
Las características hidroquímicas de las aguas de la subunidad Madrid-Toledo del sistema acuífero nº 14 son también muy variables. Debido a la baja permeabilidad y transmisividad de este sistema (Yélamos y Villarroya, 2007), el flujo del agua subterránea suele ser lento y el tiempo de permanencia en el acuífero es elevado, por lo que el factor litológico va a tener una gran influencia en el grado de mineralización y características geoquímicas del agua (Fernández Uría, 1984). Coleto (1994) encuentra diferencias significativas en las aguas subterráneas de dicho sistema acuífero según discurren por las distintas facies de relleno de la cuenca del Tajo; de tal forma que: en materiales detríticos terciarios de borde de cuenca dominan las aguas bicarbonatadas cálcicas; en las facies de transición, las aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas; y en las facies distales evaporíticas situadas en el centro de la cuenca, las aguas sulfatadas cálcicas y magnésicas con elevada proporción de cloruros. No obstante, la heterogeneidad y anisotropía espacial de los materiales pueden introducir distorsiones y excepciones al modelo hidroquímico descrito (Rubio, 1984; Fernández Uría, 1984).

Los materiales detríticos cuaternarios de origen fluvial presentes en dicha subunidad Madrid-Toledo pueden constituir también acuíferos en aluviales y terrazas, aunque de poca entidad debido al escaso espesor de estas formaciones (inferior a 10 m) (Navarro *et al.*, 1993). Estos acuíferos presentan una transmisividad elevada por lo que son especialmente vulnerables a la contaminación (Porrás *et al.*, 1985).

El estudio hidrogeológico de la comarca de La Sagra (Toledo) realizado por AITEMIN (2003), para complementar el estudio de impacto ambiental del “Plan Técnico de las Explotaciones de Arcilla” que sirvió de base para la aprobación del Coto Minero de La Sagra, donde se ubican ambos huecos mineros, califica la zona como de escaso interés hidrogeológico. Según dicho trabajo de investigación, la localización de este en los límites de la unidad hidrogeológica 03.05 “Madrid-Talavera” propicia que, en el mismo, se den unas condiciones hidrogeológicas más parecidas a las de la unidad 99. No hay que olvidar que estas unidades hidrogeológicas representaban unidades básicas de gestión de las aguas subterráneas, por lo que sus límites no se definieron en base a criterios estrictamente hidrogeológicos. La zona, por lo tanto, se caracterizaría por la existencia de pequeños acuíferos colgados dispersos entre sí, de interés local y baja transmisividad, asociados a: lentejones arenosos aislados en las Arcillas de La Sagra consideradas muy impermeables y que son objeto de explotación minera; y a materiales detríticos de recubrimiento de las mismas, más groseros y de escasa potencia.



El estudio hace referencia también a la presencia de acuíferos locales en algunos aluviales y terrazas cuaternarias con suficiente espesor. Por último, el escaso número de pozos y sondeos para la captación de agua en la zona confirmaría, según los autores de dicho estudio, la escasez de agua subterránea y/o la poca entidad e importancia de estos acuíferos de ámbito local.



- Sondeos y calicatas
- Isopieza

Figura 10. Modelización del flujo de las aguas subterráneas (mapa de isopiezas) en torno a los huecos mineros seleccionados, a partir de niveles piezométricos en sondeos y calicatas (AITEMIN, 2005a, b, c, d, e, f)

Desde un punto de vista puramente teórico, se ha llevado a cabo una modelización del flujo de agua subterránea mediante la elaboración de un mapa de isopiezas (**Figura 10**), a partir de la posición del nivel freático en un conjunto de sondeos y calicatas realizados en varios permisos de investigación mineros (AITEMIN, 2005a, b, c, d, e, f) aplicando el método de interpolación “natural neighbor” con el SIG ArcGis 10.3. De acuerdo con dicho modelo, el agua tiende a fluir desde los interfluvios y zonas más elevadas hacia los principales cursos fluviales, ríos Guatén y Tajo fundamentalmente. Sin embargo, es evi-

dente que la baja permeabilidad de la “Formación Arcillas de la Sagra” distorsiona el mismo. Según el estudio hidrogeológico de la comarca de La Sagra (AITEMIN, 2003), el flujo de agua subterránea es divergente desde el Alto de Illescas, si bien el efecto “barrera” de dichas arcillas favorece que este se oriente finalmente hacia el oeste y suroeste, en dirección al río Guadarrama. La Encuesta de Infraestructura y Equipamientos Locales (EIEL), año 2016, muestra cómo en esa zona se concentra la mayor parte de las captaciones o pozos existentes en la comarca; todos estos pozos explotan el sistema acuífero nº 14 (**Figura 11**). Por el contrario, en el entorno de los huecos de explotación seleccionados y donde afloran las Arcillas de La Sagra no aparece registrada ninguna captación de agua. Por lo tanto, el modelo hidrogeológico en esta área parece responder al propuesto por AITEMIN (2003) y que ha sido descrito anteriormente.

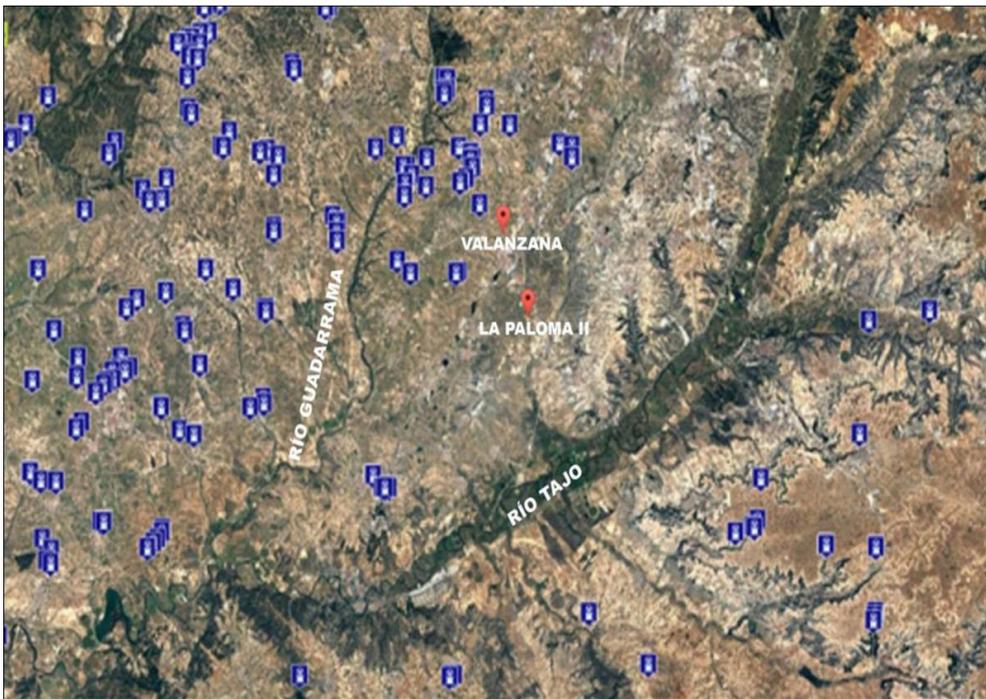


Figura 11. Captaciones de agua (pozos) en el entorno de los huecos mineros seleccionados según la Encuesta de Infraestructura y Equipamientos Locales de los municipios de Toledo (EIEL, 2016). <http://eiel.diputoledo.es/>

La profundidad del nivel freático de los sondeos y calicatas considerados para la elaboración del anterior modelo de flujo ha sido muy variable, tal y como se puede observar en la **Figura 12**. Aunque en general, este se encuentra en casi todos los casos por encima de los 3 m, salvo excepciones (recubrimientos detríticos de poco espesor y próximos a cauces, fundamentalmente). Las formaciones litológicas en las que se ha localizado dicho nivel freático han sido: arenas de grano grueso a fino, sueltas o en una matriz limosa; y arcillas (arenosas, limosas, yesíferas, etc.). En este último caso, la profundidad del nivel freático ha sido por lo general



superior a 10 m, y en algunos casos por encima de 20 m (profundidad máxima de penetración de dichos sondeos). No hay que olvidar que las arcillas, a pesar de su baja permeabilidad, pueden llegar a almacenar agua hasta alcanzar incluso la saturación; sin embargo, no permiten la transmisión de la misma (acuicludo) o bien la transmiten muy lentamente (acuitardo), por lo que en caso de una posible afección al nivel freático es probable que el agua fluya a un ritmo extraordinariamente lento. Respecto a la posición de la superficie freática en los huecos de explotación seleccionados, al no disponer de datos piezométricos en los mismos, se han tomado como referencia los resultados obtenidos en los anteriores sondeos (AITEMIN, 2005a, b, c, d, e, f).

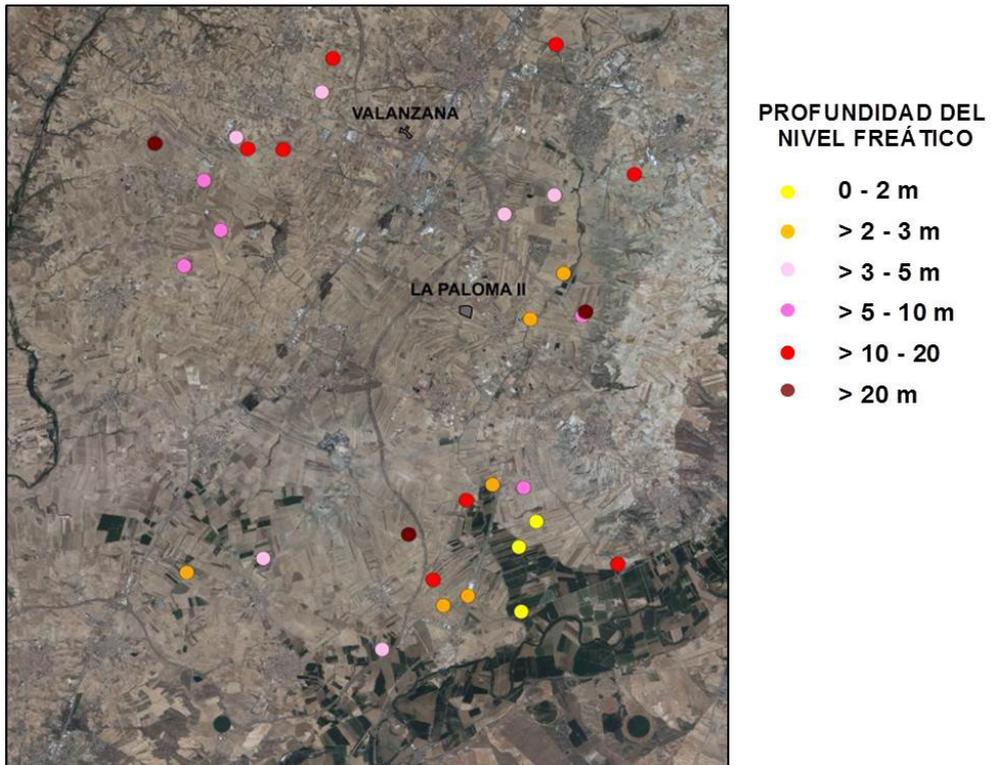


Figura 12. Profundidades del nivel freático en sondeos y calicatas (AITEMIN, 2005a, b, c, d, e, f)

La caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas que pudieran verse afectadas presenta cierto grado de incertidumbre, debido a que solo existen en la zona dos pozos con datos hidroquímicos: códigos de identificación 1824-8-0002 y 1924-1-0004 de la Base de Datos de Puntos de Agua del IGME, situados a varios kilómetros de distancia de las explotaciones seleccionadas, en los núcleos urbanos de Villaluenga de la Sagra e Illescas. Las muestras de agua analizadas en ambos pozos, a lo largo de una serie temporal de varios años (1997-2002), son de los tipos bicarbonatado magnésico y bicarbonatado cálcico-magnésico respectivamente (**Figura 13**), característicos de aguas que fluyen en las facies de transición de los materiales de relleno de la cuenca del Tajo (Coletto, 1994).

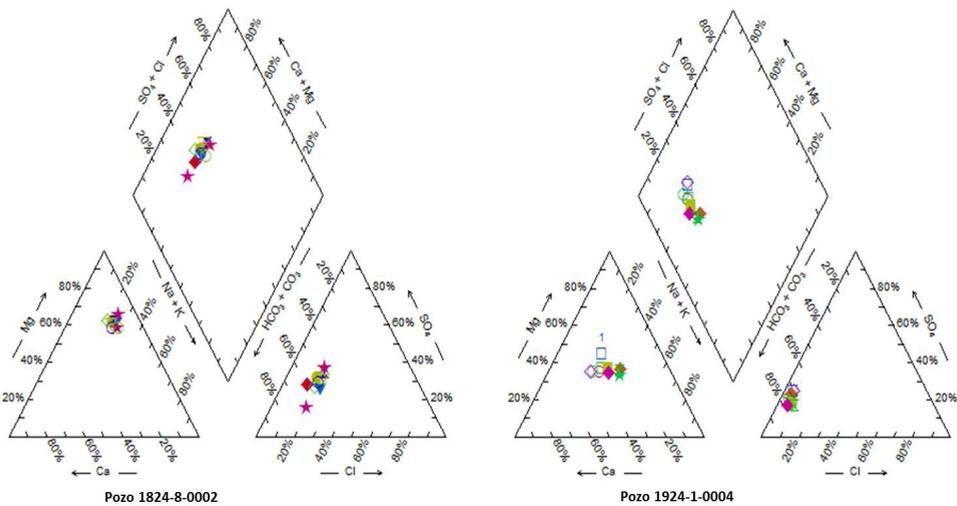


Figura 13. Caracterización hidroquímica de las aguas extraídas de dos pozos situados en el Coto Minero de La Sagra (Diagramas de Piper). Período 1997-2002. <http://info.igme.es/BDAguas/>

Para garantizar la protección de las aguas subterráneas, de acuerdo con el Real Decreto 1481/2001 por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertederos, y el Desarrollo Técnico de los Anexos I y III del mismo (Subdirección General de Calidad Ambiental, 2003), se exige que en el emplazamiento de los huecos mineros exista una barrera geológica natural que tenga unas condiciones de permeabilidad y espesor cuyo efecto combinado, sea equivalente a un valor de permeabilidad (k) que, como mínimo, sea igual a 1×10^{-7} m/s en un espesor de 1 m, si los RCD para el relleno de los mismos son de carácter inerte, tal y como se ha señalado en anteriores ocasiones. Con objeto de parametrizar la permeabilidad del sustrato y valorar el grado de adecuación a la normativa, se han llevado a cabo varios ensayos para la determinación de la conductividad hidráulica *in situ* de los materiales aflorantes en el fondo de los huecos de las canteras seleccionadas (**Figura 14**), aplicando el método de Hatt & Le Coustumer (2008) que utiliza un único cilindro bajo carga de agua constante. El resultado obtenido es una conductividad hidráulica saturada en campo de $4,5 \times 10^{-8}$ y $2,1 \times 10^{-8}$ m/s para las explotaciones Valanzana y La Paloma II, respectivamente. Estos valores de permeabilidad cumplen con lo establecido por la normativa respecto a los vertederos de residuos inertes. Sin embargo, tal y como se ha señalado en apartados anteriores, los materiales de rechazo o precribado de RCD mixtos o cerámicos deberían ser calificados en muchos casos como *residuos no peligrosos* de acuerdo con la Orden AAA/661/2013, por presentar concentraciones de sulfatos por encima de los límites establecidos para residuos inertes.

Para los vertederos de residuos no peligrosos, la norma exige una barrera geológica natural con una permeabilidad como mínimo de 1×10^{-9} m/s en un metro de espesor. Por lo tanto, en ambos huecos de explotación sería necesaria la instalación de una barrera geológica artificial (capa mineral de un espesor no inferior a 0,5 m) y un revestimiento geosintético de impermeabilización, a pesar de la baja permeabilidad del sustrato. Todo ello, incremen-



Figura 14. Ensayos para la determinación de la conductividad hidráulica *in situ* en el fondo de los huecos de las canteras Valanzana y La Paloma II por el método de Hatt & Le Coustumer (2008)

taría notablemente el coste económico de los trabajos de acondicionamiento de los huecos excavados para su relleno con RCD no peligrosos. No obstante, la normativa contempla la posibilidad de reducir o modificar dichos requisitos, así como la exigencia de recogida de lixiviados, por parte del órgano competente en medio ambiente de la Comunidad Autónoma si el nivel de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, superficiales y el suelo es considerado aceptable (Anexo I del R. D. 1481/2001). En los casos concretos de las explotaciones Valanzana y La Paloma II, debido a la ausencia de sondeos o pozos que nos permita conocer la litología existente bajo la lámina de agua y/o la posición real del nivel freático, se ha considerado de *modo hipotético*, que la litología del sustrato son arcillas y que constituye una barrera geológica natural con un nivel de impermeabilidad suficiente para garantizar la protección de las aguas subterráneas. Esta elevada incertidumbre exigiría un estudio de las condiciones hidrogeológicas más detallado.

El carácter impermeable de estos materiales propicia que los huecos de las explotaciones de arcilla abandonados en la Comarca de La Sagra aparezcan por lo general inundados con



Figura 15. Izquierda: hueco inundado y parcialmente relleno con tierras de excavación de la cantera Valanzana. Derecha: Hueco inundado de la cantera La Paloma II



Figura 16. Izquierda: vegetación freatófita en el frente sur del hueco de explotación en la Paloma II. Derecha: vegetación freatófita al pie de las bermas de dicho frente

aguas pluviales, y en algunos casos con aguas freáticas, al igual que los huecos seleccionados (**Figura 15**). Es por ello que será necesario el desagüe de los mismos, como trabajo de acondicionamiento previo para el relleno con RCD. Además, en el caso de La Paloma II, es posible que la vegetación freatófita existente en el frente sur del hueco se deba a la presencia de un nivel freático colgado en materiales de recubrimiento (**Figura 16**), cuyas aguas deberán ser reconducidas o drenadas hacia el exterior del hueco o aplicar otras medidas de impermeabilización.

En cuanto a las aguas superficiales, ambas explotaciones se encuentran localizadas en la cuenca del arroyo de Gansarinos, tributario del río Guatén; este último es afluente del río Tajo. El hueco actual de la explotación Valanzana se encuentra situado a una distancia de entre 100 y 200 m del arroyo de Dos Villas; curso fluvial de cabecera de carácter intermitente y fuertemente estacional (**Figura 17**), cuyas aguas fluyen hacia el arroyo Gansarinos. El hueco de explotación de La Paloma II se encuentra a unos 150-300 m de este último arroyo (**Figura 17**), incluido en la masa de agua superficial denominada Arroyo de Guatén y Arroyo de Gansarinos (ES030MSPF0628021) según el Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo (R.D. 1/2016). De acuerdo con dicho plan, se adscribe a la tipología de ríos manchegos, cuya naturaleza es calificada de muy modificada por la acción antrópica. El estado ecológico de esta masa de agua, evaluado en dicho instrumento de planificación a partir de diversos indicadores biológicos (macroinvertebrados, diatomeas y macrófitos), físico-químicos e hidromorfológicos (forma del cauce y estructura de la vegetación de ribera), es calificado como deficiente. El estado químico de la misma no alcanza el buen estado, por lo que la valoración del estado final de dicha masa de agua es considerada como “peor que bueno” (CHT, 2015).

Hay que señalar, además, que no existen captaciones de agua subterránea para abastecimiento en el entorno de los huecos de explotación seleccionados; ni captaciones en masas de agua superficial destinadas a dicho uso aguas abajo de los mismos, en los arroyos de Dos Villas, Gansarinos, y Guatén que estén incluidas en el Registro de Zonas Protegidas de acuerdo con la Directiva Marco del Agua (DMA) y el Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA); así



Figura 17. Localización de los cursos fluviales más próximos a los huecos mineros seleccionados

como ninguna otra tipología de zona protegida: especies acuáticas de interés económico, masas de agua de uso recreativo incluidas zonas de baño, zonas húmedas, reservas fluviales, espacios protegidos y Red Natura 2000 asociados al medio acuático, perímetros de protección de aguas minerales y termales, etc.

1.2.3. Estado erosivo de los taludes del hueco y/o presencia de inestabilidades

Ya se ha señalado en este manual cómo el grado de erosión de los taludes del hueco y/o la presencia de inestabilidades pueden incrementar significativamente los costes económicos del acondicionamiento y saneado del mismo, para poder llevar a cabo el relleno con RCD en condiciones de seguridad y garantizar la estabilidad geotécnica tras la restauración. De acuerdo con la clasificación de estados erosivos de los taludes de depósitos de residuos mineros abandonados (Alberruche *et al.*, 2014), la explotación Valanzana presenta por lo general frentes o taludes verticales o subverticales, afectados por una erosión hídrica de tipo laminar y en regueros fundamentalmente, con algunas cárcavas pequeñas (de 30 cm a 1 m de profundidad) asociadas muchas de ellas a fenómenos de tubificación (**Figura 18**). Los frentes de mayor altura, con materiales más compactos, presentan algunas grietas verticales que pueden dar lugar a vuelcos de poca entidad. Al pie de estos frentes, se acumulan derrubios de material (**Figura 18**). Respecto a la cantera La Paloma II, actualmente inactiva, hay que distinguir: por un lado, los taludes de los frentes de avance de la explotación de arcilla que muestran una fuerte erosión hídrica con numerosos regueros y cárcavas, y erosión por suflución (piping); así como el desprendimiento de pequeños bolos de arcilla erráticos que quedan depositados al pie de los mismos (**Figura 19**). Y, por otro lado, los taludes del hueco de la cantera subverticales que presentan una erosión laminar y en regueros con algunas cárcavas poco profundas, así como algunos fenómenos de tubificación (**Figura 20**). De forma muy puntual, se observa en cabecera algún pequeño deslizamiento muy superficial y de escasa significación. El frente sur muestra un perfil escalonado con rezume de agua en los taludes de las bermas en el momento de la visita de campo, posiblemente asociado a un nivel freático colgado en materiales de recubrimiento. El agua es recogida en canales para evacuación de la escorrentía excavados al pie de los mismos, sobre bermas con una cubierta vegetal freatófita

(juncos, *Tamarix*, etc.); y es drenada hacia el hueco de la explotación que está cubierto por una lámina de agua (**Figuras 19 y 20**).



Figura 18. Estado erosivo e inestabilidades de los taludes del hueco de explotación de la cantera Valanzana



Figura 19. Erosión de los frentes de avance de la explotación de arcilla en la cantera La Paloma II

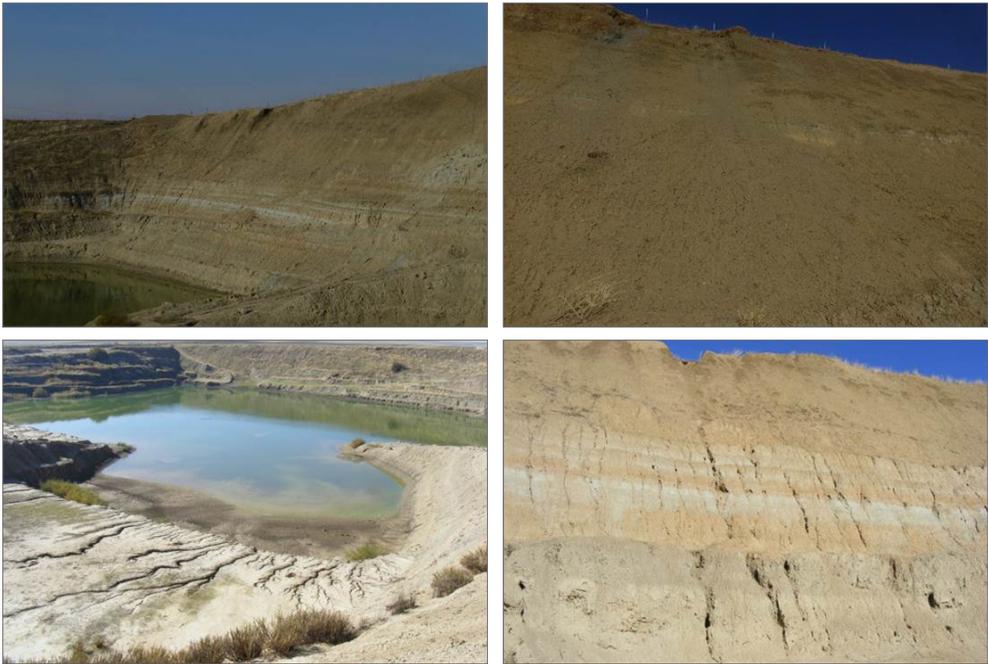


Figura 20. Estado erosivo e inestabilidades de los taludes del hueco de explotación de la cantera La Paloma II

1.2.4. Caracterización geotécnica de los huecos para el relleno con RCD

La caracterización geotécnica de los huecos de explotación, en una evaluación de carácter preliminar, ha tenido como objetivo realizar una estimación rápida de la capacidad portante del terreno y problemas de estabilidad asociados al relleno de los mismos con RCD. **Para ello, se han realizado ensayos *in situ*** de resistencia a la compresión simple y resistencia al esfuerzo cortante en condiciones no drenadas en taludes y en la base de cada uno de los huecos de las explotaciones Valanzana y La Paloma II (**Figura 21**).



Figura 21. Localización de los puntos donde se han realizado los ensayos geotécnicos *in situ* en las canteras Valanzana (arriba) y La Paloma II (abajo)



El ensayo de resistencia a la compresión simple no drenada (q_u) se ha realizado con un penetrómetro de bolsillo, marca Geotester, de hasta $5,5 \text{ daN/cm}^2$ de doble escala, obteniéndose directamente el valor q_u en kilogramos fuerza por cm^2 (**Figura 22**). La determinación de la resistencia al corte sin drenaje (S_u) se ha obtenido mediante un ensayo Vane Test, equipo Torvane, de $1,1 \text{ kg/cm}^2$ por revolución (**Figura 22**).



Figura 22. Ensayos de resistencia a la compresión simple con penetrómetro de bolsillo de hasta 5 daN/cm^2 (izquierda) y de resistencia al corte con vane test (derecha) en condiciones no drenadas

En cada ensayo se han realizado sistemáticamente varias medidas, tanto de resistencia a la compresión simple como de resistencia al esfuerzo cortante. Mientras que en las **Tablas 1 y 2** se muestran los valores medios de q_u y S_u de los ensayos realizados en cada punto o emplazamiento seleccionado para el análisis geotécnico de las explotaciones estudiadas.

RESULTADOS ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (q_u) NO DRENADA DE CAMPO CON PENETRÓMETRO (kg/cm^2)								
CANTERA VALANZANA								
P1 Base	P1 Talud	P2 Base	P2 Talud	P3 Base	P4 Base	P5 Base	P6 Talud Limos	P6 Talud Arenas
2,11	3,91	5,35	5,07	1,43	4,76	2,28	5,45	4,88

CANTERA LA PALOMA II				
P1	P2	P3	P4 (Talud)	P5
5,24	1,66	3,75	5,45	4,05

Tabla 1. Valores medios de resistencia a la compresión simple no drenada (q_u) en kg/cm²

RESULTADOS ENSAYO DE RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA (S_u) EN CAMPO CON VANE TEST (kg/cm ²)								
CANTERA VALANZANA								
P1 Base	P1 Talud	P2 Base	P2 Talud	P3 Base	P4 Base	P5 Base	P6 Talud Limos	P6 Talud Arenas
0,36	0,18	0,28	0,16	0,52	0,27	0,21	0,34	0,20
CANTERA LA PALOMA II								
P1	P2	P3	P4 (Talud)	P5				
0,55	0,45	0,74	0,96	0,51				

Tabla 2. Valores medios de resistencia al esfuerzo cortante no drenado (S_u) en kg/cm²

De acuerdo con la clasificación de Hunt (1984) (citado en IGME, 1987), los valores obtenidos de resistencia a la compresión simple sin drenaje, permite clasificar el material del sustrato entre las dos categorías de consistencia más elevadas, esto es, “muy rígida” y “dura”, aunque es mucho más representativa esta última categoría. Por lo tanto, la capacidad portante del terreno parece ser suficiente para acoger la sobrecarga que representa el relleno con RCD.

Aunque el análisis de la resistencia al esfuerzo cortante no permite su interpretación directa en un valor de consistencia del sustrato, como el caso anterior, su obtención permite la determinación del valor de la cohesión no drenada (C_u), parámetro clave en lo que al comportamiento geotécnico de las arcillas se refiere, dado que para este tipo de materiales y en condiciones no drenadas comúnmente se asume la equivalencia $S_u = C_u$. Alternativamente se ha aplicado también una metodología específica para la obtención de la cohesión en arcillas saturadas a partir del valor de q_u del penetrómetro, aplicando la metodología de Bucchi (Bucchi, 1972). Los resultados de la aplicación de ambas metodologías se resumen en la **Tabla 3**. En el caso de la cantera Valanzana, los resultados obtenidos aplicando uno u otro método han sido similares. Mientras que en La Paloma II, las diferencias han sido mayores. En cualquier caso, los valores de cohesión resultantes en ambos métodos son de un mismo orden de magnitud, quedando la mayoría de ellos comprendidos entre los 30 y los 70 kPa.



Así mismo, los valores de C_u obtenidos se han contrastado con la clasificación de Karol en la que se clasifican los tipos de suelo en base a su valor de cohesión, previa conversión de las unidades de kPa a libras por pie cuadrado (Karol, 1960). De acuerdo con la misma, los materiales sobre los que se han realizado los ensayos geotécnicos, en ambas explotaciones mineras, se incluyen en el rango de “firme” (*firm*) y “rígido” (*stiff*) de dicha clasificación.

	Resistencia a la compresión simple q_u (kPa) Penetrómetro	Resistencia al esfuerzo cortante S_u (kPa) ó Cohesión C_u (kPa) Vane-test	Cohesión C_u (kPa) Bucchi (1972)
VALANZANA			
Base P1	513.69	53.53	69.32
Base P2	163.20	44.60	22.02
Base P3	367.88	72.30	49.65
Talud P4	535.09	94.24	72.21
Base P5	397.31	47.12	53.62
LA PALOMA II			
P1 Base	206.90	35.75	27.92
P1 Talud	383.93	17.99	51.81
P2 Base	524.39	26.98	70.77
P2 Talud	497.19	15.65	67.10
P3 Base	140.46	50.90	18.96
P4 Base	466.87	26.62	63.00
P5 Base	223.40	20.91	30.15
P6 Talud Limos	535.09	33.32	72.21
P6 Talud Arenas	478.91	19.42	64.63

Tabla 3. Valores de cohesión C_u calculados por el método de Bucchi (1972) y el valor de resistencia al esfuerzo cortante (S_u) obtenido del ensayo vane test

Como conclusión, de todo lo expuesto, no parece que puedan producirse problemas geotécnicos significativos con respecto al relleno de los huecos con RCD, en ambas explotaciones mineras estudiadas.

1.2.5. Viabilidad de la rehabilitación de los huecos seleccionados en función del coste del transporte y suministro de RCD

Entre los factores más importantes que pueden condicionar la viabilidad del uso de los RCD en la restauración minera, hay que destacar: por un lado, el coste del transporte; y por otro, la disponibilidad de un volumen de residuos suficiente para garantizar la restitución topográfica. El coste del transporte va a depender de la distancia a la que se encuentren las instalaciones de gestión o de transferencia de RCD, o bien los centros de producción, considerándose los 30 km como una distancia crítica tal y como se ha señalado en esta Guía. Es evidente que las condiciones de accesibilidad y calidad de las vías de comunicación pueden influir sobre dicho coste. Asimismo, la producción de RCD está estrechamente ligada al crecimiento urbano y tamaño de población. Teniendo en consideración todos estos aspectos, se han identificado y clasificado los municipios localizados en un radio de 30 km en torno a los huecos de las canteras Valanzana y La Paloma II, en función de la población de derecho registrada en cada uno de ellos de acuerdo con la revisión de los padrones municipales a 1 de enero de 2016 (INE) (**Figura 23**). Hay que señalar que dentro de esta distancia se localizan algunos de los municipios del área metropolitana de Madrid más populosos: Getafe (176.659 hab.), Leganés (187.173 hab.), Alcorcón (167.354 hab.), Móstoles (205.614 hab.), Fuenlabrada (194.171 hab.) y Parla

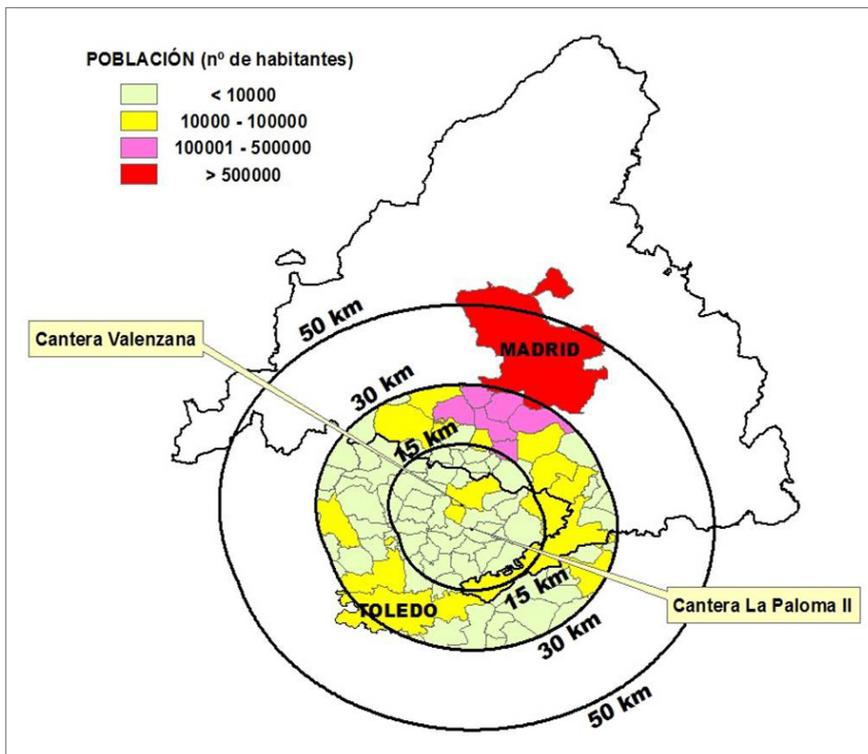


Figura 23. Municipios de la Comunidad de Madrid y Toledo localizados en un radio de 30 km en torno a los huecos de las canteras Valanzana y La Paloma II clasificados según de tamaño de población



(124.661 hab.); conjuntamente estos municipios metropolitanos superan el millón de habitantes. En este radio de influencia se localizan también Toledo (83.459 hab.) y algunos de los municipios más poblados de la provincia como Illescas (26.672 hab.) y Seseña (22.027 hab.). En el Plan de Gestión Integrada de los Residuos de Construcción y Demolición de la Comunidad de Madrid (2002-2011), se afirmaba que la mayor parte de la producción de RCD de la región se generaba en Madrid capital (3.165.541 hab.) y en la zona sur metropolitana donde se ubican la mayoría de los municipios enunciados.

Respecto al principal productor de RCD de la Comunidad de Madrid, las canteras Valanzana y La Paloma II se encuentran a una distancia por carretera de 39 y 48 km respectivamente de la capital madrileña. Ambas distancias se consideran desde el punto de vista del coste del transporte viables (menos de 50 km), máxime si se tiene en cuenta que la casi totalidad del trayecto se recorre a través de una vía rápida como es la A-42 o Autovía de Toledo. La proximidad de ambas explotaciones a la red pública de carreteras y a vías de comunicación como: la A-42, la autopista de peaje AP-41 (Madrid-Toledo) y la autovía de La Sagra (CM-41 y CM-43) tal y como puede observarse en la **Figura 24**, propicia además unas condiciones de accesibilidad muy favorables.

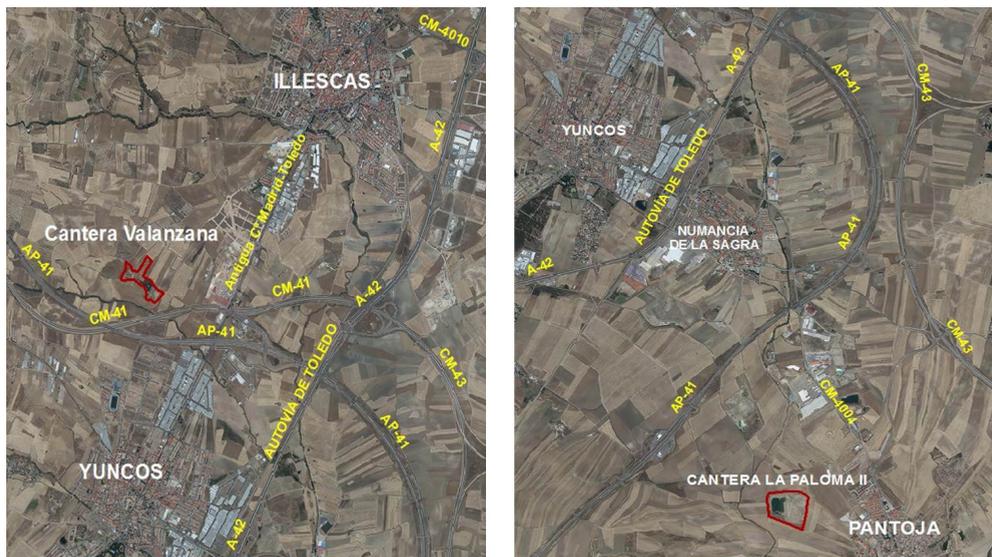


Figura 24. Localización de las canteras Valanzana y La Paloma II respecto a las principales vías de comunicación por carretera

1.2.6. Calidad ambiental y del paisaje y accesibilidad visual de los huecos mineros

En cuanto a la calidad ambiental del entorno donde se ubican las explotaciones de arcilla seleccionadas, hay que destacar que no existen elementos naturales o zonas sensibles o vulnerables afectadas por la degradación ambiental asociada a las mismas, tales como: espacios naturales protegidos (ENP) o pertenecientes a la Red Natura 2000, u otras figuras de protección internacionales; hábitats de interés comunitario prioritarios y no prioritarios (Directiva

Hábitats), formaciones de vegetación bien conservadas, etc. Asimismo, la calidad paisajística podría calificarse de media, propia de un espacio agrario dominado por los cultivos de cereal y la presencia de algunos olivares.

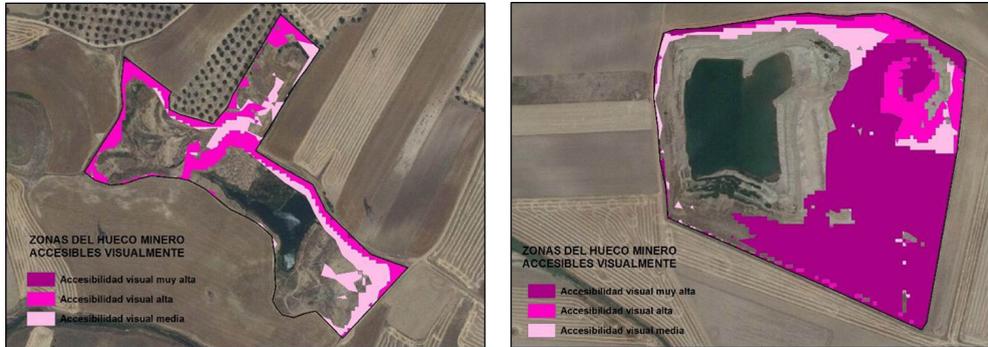


Figura 25. Análisis de visibilidad de los huecos mineros de las canteras Valanzana (Izquierda) y La Paloma II (Derecha)

Para la evaluación de la incidencia visual de estos espacios degradados, se ha determinado la visibilidad de los mismos desde las principales vías de comunicación existentes en la zona (**Figura 25**) y los núcleos de población más próximos (Illescas, Yuncos, Numancia de la Sagra, Pantoja, Cobeja, Yuncler y Villaluenga de la Sagra). El modelo de visibilidad se ha elaborado con ArcGis 10.3, de acuerdo con el método descrito en Alberruche *et al.*, (2015); si bien, en este caso, para definir los distintos niveles de accesibilidad visual se han considerado las intensidades medias diarias (IMD) de vehículos que circulan por dichas vías, según los mapas de tráfico del año 2015 elaborados por la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha y el Ministerio de Fomento, y el tamaño de población de los núcleos urbanos como factores de ponderación aplicando los criterios propuestos en esta Guía.

En ambos casos, los huecos de explotación no son accesibles visualmente desde carreteras y zonas habitadas salvo las zonas más elevadas de los frentes que delimitan la zona excavada. La cantera de la Paloma II presenta además una amplia zona, todavía pendiente de explotación, con una accesibilidad visual muy elevada.

Las áreas de las canteras con mayor incidencia visual serán aquellas que son visibles desde las vías más transitadas como la A42 (Autovía de Toledo), que registra una intensidad media diaria (IMD) de más de 45.000 vehículos diarios en tramos próximos a las mismas, o desde los núcleos de población de más de 10.000 habitantes (Illescas y Yuncos). En este último caso, se ha aplicado un criterio más conservador que la propia metodología propuesta. Las zonas de la explotación con una accesibilidad visual alta son aquellas que son visibles desde la CM-41 (Autovía de la Sagra) en aquellos tramos que presenta IMD superiores a 5.000 vehículos de tránsito; mientras que las áreas de incidencia visual media son aquellas visibles desde el resto de las vías consideradas, por presentar todas ellas IMD por debajo del umbral anteriormente señalado o desde el resto de los núcleos de población seleccionados, todos ellos, con tamaños de población inferior a 5.000 habitantes.



1.2.7. Valoración de la idoneidad de los huecos seleccionados para su rehabilitación con RCD

Finalmente, se ha determinado la idoneidad de cada uno de los huecos seleccionados para su rehabilitación con RCD, aplicando los criterios de la metodología de evaluación preliminar de la misma propuesta en esta Guía. El resultado final de la valoración del índice de idoneidad (ID) de las canteras Valanzana y La Paloma II ha sido “Muy Alto” y “Alto”, respectivamente. En las Tablas 4 y 5 se muestran las valoraciones de los parámetros y del correspondiente ID. Los condicionantes técnico-económicos, de protección ambiental y la proximidad a los centros de producción de RCD son los principales factores que definen una aptitud tan elevada para el uso de estos RCD en los huecos de explotación de arcilla seleccionados.

CANTERA VALANZANA	
CONDICIONANTES TÉCNICO-MINEROS (C_{MIN})	
FACTOR HIDROGEOLÓGICO (AG_{SUB})	
<i>Características hidrogeológicas del hueco de explotación</i>	H_{SUB}
Permeabilidad muy baja: arcillas. Conductividad hidráulica saturada en campo de $4,5 \times 10^{-8}$ determinada <i>in situ</i> . Se asume hipotéticamente dicha conductividad para el hueco cubierto por la lámina de agua. Si un estudio hidrogeológico confirmara el origen freático de la misma, el valor se reduciría drásticamente	4
<i>Vulnerabilidad de las masas de agua subterránea</i>	V_{SUB}
Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación Baja	3
<i>Profundidad del nivel freático</i>	P_{NF}
> 3 m en litologías impermeables. .	4
<i>Distancia a captaciones de agua para abastecimiento urbano</i>	M_{SUB}
No existen captaciones de agua para abastecimiento en un radio de 1 km	4
$AG_{SUB} = 0,3 * H_{SUB} + 0,3 * V_{SUB} + 0,3 * P_{NF} + 0,1 * M_{SUB}$	3,7
FACTOR DE PROXIMIDAD A MASAS DE AGUAS SUPERFICIALES (PA_{SUP})	
<i>Distancia del hueco a una masa de agua superficial</i>	PA_{SUP}
Distancia al arroyo de Dos Villas entre 100 y 200 m	2
GRADO DE EROSIÓN DE LOS TALUDES DEL HUECO Y/O PRESENCIA DE INESTABILIDADES (ER_{EST})	
<i>Huecos excavados en suelos y rocas blandas</i>	ER_{EST}
Taludes con erosión con regueros frecuentes o abundantes con pocas cárcavas pequeñas (de 30 cm a 1 m de profundidad) asociadas algunas a fenómenos de tubificación. Presencia de grietas de tracción verticales pero con riesgo de vuelcos poco significativos	3
$C_{MIN} = 0,7 * AG_{SUB} + 0,2 * PA_{SUP} + 0,1 * ER_{EST}$	3,29

FACTOR COSTE DE TRANSPORTE Y SUMINISTRO DE RCD (CT_{SUM})	
<i>Distancia a centros de producción de RCD</i>	D_{NUC}
Los municipios del área metropolitana se localizan en la franja entre 15-30 km	3
<i>Tamaño de población de los núcleos urbanos</i>	P_{NUC}
Los municipios del área metropolitana situados a la distancia anterior suman un contingente de población de más de 1.000.000 de habitantes	4
$CT_{SUM} = 0,7 * D_{NUC} + 0,3 * P_{NUC}$	3,3

FACTOR PRIORIDAD DE RESTAURACIÓN DE ESPACIOS DEGRADADOS POR MINERÍA (PR_{REST})	
<i>Calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje</i>	C_{AMB}
Espacio agrario con una calidad visual del paisaje media	2
<i>Accesibilidad visual</i>	A_{VIS}
Baja. El hueco no es visible, y solo es accesible visualmente las zonas más elevadas de los frentes	1
$PR_{REST} = 0,6 * C_{AMB} + 0,4 * A_{VIS}$	1,6

ÍNDICE DE IDONEIDAD DEL HUECO PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD (ID)	
$ID = 0,6 * C_{MIN} + 0,3 * CT_{SUM} + 0,1 * PR_{REST}$	3,12

Tabla 4. Valoración del índice de idoneidad del hueco de Valanzana para su rehabilitación con RCD

CANTERA LA PALOMA II	
CONDICIONANTES TÉCNICO-MINEROS (C_{MIN})	
FACTOR HIDROGEOLÓGICO (AG_{SUB})	
<i>Características hidrogeológicas del hueco de explotación</i>	H_{SUB}
Permeabilidad muy baja: arcillas. Conductividad hidráulica saturada en campo de $4,5 \times 10^{-8}$ determinada <i>in situ</i> . Se asume hipotéticamente dicha conductividad para el hueco cubierto por la lámina de agua. Si un estudio hidrogeológico confirmara el origen freático de la misma, el valor se reduciría drásticamente.	4
<i>Vulnerabilidad de las masas de agua subterránea</i>	V_{SUB}
Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación Baja	2
<i>Profundidad del nivel freático</i>	P_{NF}
> 3 m en litologías impermeables. .	4
<i>Distancia a captaciones de agua para abastecimiento urbano</i>	M_{SUB}
No existen captaciones de agua para abastecimiento en un radio de 1 km	4
$AG_{SUB} = 0,3 * H_{SUB} + 0,3 * V_{SUB} + 0,3 * P_{NF} + 0,1 * M_{SUB}$	3,4



FACTOR DE PROXIMIDAD A MASAS DE AGUAS SUPERFICIALES (PA_{SUP})	
<i>Distancia del hueco a una masa de agua superficial</i>	PA_{SUP}
Distancia al arroyo de Dos Villas entre 100 y 200 m	2
GRADO DE EROSIÓN DE LOS TALUDES DEL HUECO Y/O PRESENCIA DE INESTABILIDADES (ER_{EST})	
<i>Huecos excavados en suelos y rocas blandas</i>	ER_{EST}
Taludes con erosión con regueros frecuentes o abundantes con pocas cárcavas pequeñas (de 30 cm a 1 m de profundidad) asociadas algunas a fenómenos de tubificación. Presencia de grietas de tracción verticales pero con riesgo de vuelcos poco significativos.	2
C_{MIN} = 0,7*AG_{SUB} + 0,2*PA_{SUP} + 0,1*ER_{EST}	2,98

FACTOR COSTE DE TRANSPORTE Y SUMINISTRO DE RCD (CT_{SUM})	
<i>Distancia a centros de producción de RCD</i>	D_{NUC}
Los municipios del área metropolitana se localizan en la franja entre 15-30 km	3
<i>Tamaño de población de los núcleos urbanos</i>	P_{NUC}
Los municipios del área metropolitana situados a la distancia anterior suman un contingente de población de más de 1.000.000 de habitantes	4
CT_{SUM} = 0,7*D_{NUC} + 0,3*P_{NUC}	3,3

FACTOR PRIORIDAD DE RESTAURACIÓN DE ESPACIOS DEGRADADOS POR MINERÍA (PR_{REST})	
<i>Calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje</i>	C_{AMB}
Espacio agrario con una calidad visual del paisaje media	2
<i>Accesibilidad visual</i>	A_{VIS}
Baja. El hueco no es visible, y solo es accesible visualmente las zonas más elevadas de los frentes	1
PR_{REST} = 0,6*C_{AMB} + 0,4*A_{VIS}	1,6

ÍNDICE DE IDONEIDAD DEL HUECO PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD (ID)	
ID = 0,6*C_{MIN} + 0,3*CT_{SUM} + 0,1*PR_{REST}	2,94

Tabla 5. Valoración del índice de idoneidad del hueco de La Paloma II para su rehabilitación con RCD

2. BIBLIOGRAFÍA

- AITEMIN. 2003. Estudio hidrogeológico de la Comarca de La Sagra (Toledo). AITEMIN-Consorcio Minero de La Sagra, S.L. Inedito. 29 p.
- AITEMIN. 2005a. Investigación de Arcillas en La Sagra (Toledo). Permiso “Barriales” (nº 3.913). AITEMIN-Consorcio Minero de La Sagra, S.L. Memoria y Anejos. Inedito. 44 p.
- AITEMIN. 2005b. Investigación de Arcillas en La Sagra (Toledo). Permiso “Botanera” (nº 3.821, 1-1-0). AITEMIN-Consorcio Minero de La Sagra, S.L. Memoria y Anejos. Inedito. 102 p.
- AITEMIN. 2005c. Investigación de Arcillas en La Sagra (Toledo). Permiso “Cerro Partido” (nº 3.821). AITEMIN-Consorcio Minero de La Sagra, S.L. Memoria y Anejos. Inedito. 99 p.
- AITEMIN. 2005d. Investigación de Arcillas en La Sagra (Toledo). Permiso “El León” (nº 3.914). AITEMIN-Consorcio Minero de La Sagra, S.L. Memoria y Anejos. Inedito. 31 p.
- AITEMIN. 2005e. Investigación de Arcillas en La Sagra (Toledo). Permiso “Orejuela” (nº 3.915). AITEMIN-Consorcio Minero de La Sagra, S.L. Memoria y Anejos. Inedito. 51 p.
- AITEMIN. 2005f. Investigación de Arcillas en La Sagra (Toledo). Permiso “Zarzalejo” (nº 3.916). AITEMIN-Consorcio Minero de La Sagra, S.L. Memoria y Anejos. Inedito. 49 p.
- Alberruche, E., Arranz, J.C. Rodríguez, R., Vadillo, L., Rodríguez, V., Fernández, F.J. 2014. Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural e IGME. 318 p.
- Alberruche, M.E., Arranz, J.C., Rodríguez, V., Fernández, F.J., Rodríguez, R., Vadillo, L. 2015. Metodología para la evaluación del impacto paisajístico residual de una mina de carbón a cielo abierto en el Valle de Laciana (España). DYNA 82 (190), 60-69.
- Alonso Zarza, A. M., Calvo, J.P., García del Cura, M.A. (1986). Sedimentología y petrología de los abanicos aluviales y facies adyacentes en el Neógeno de Paracuellos del Jarama (madrid). *Estudios Geológicos*, 42, 79-101.
- Alonso Zarza, A.M., Calvo, J.P., García del Cura, M.A. (1990). Litoestratigrafía y evolución paleogeográfica del Mioceno del borde NE de la Cuenca de Madrid (prov. Guadalajara). *Estudios Geológicos*, 46, 415-432.
- Alonso-Zarza, A.M., Calvo, J.P., Silva, P., Torres, T. (2004). Cuenca del Tajo. En: *Geología de España (Ed. Vera, J.A.)*. SGE-IGME, 556-561.



- Bucchi, A. 1972. Una determinazione rápida delle componenti “ ” e “C” della resistenza al taglio delle terre. *Inarcos*. Nº 318. Associazione de Ingegneri e Architetti della Provincia de Bologna.
- Calvo, J.P., De Vicente, G., Alonso, A.M. (1991). Correlación entre las deformaciones alpinas y la evolución del relleno sedimentario de la Cuenca de Madrid durante el Mioceno. I Congreso del Grupo Español del Terciario, Actas, 55-58.
- CHT. 2015. Inventario de presiones y evaluación del estado de las masas de agua. Anejo 7 de la Memoria del Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del tajo (2015-2021). 127 p.
- Coletto, I. 1994. Modelización de la evolución química de las aguas subterráneas en las facies de transición de la Cuenca de Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Geológicas. Departamento de Geodinámica. 334 p.
- Díaz de Neira, J.A., López Olmedo, F. (1999). Mapa geológico de España a escala 1:50.000, 2ª serie, Villaluenga de la Sagra (604). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Fernández Uría, A. 1984. Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en el sector oriental de la Cuenca de Madrid. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.
- García Romero, E., Brell, J.M., Doval, M., Navarro, J.V. 1990. Caracterización mineralógica y estratigráfica de las formaciones neógenas del borde sur de la cuenca del Tajo (Comarca de la Sagra). *Boletín Geológico y Minero*, 101(6), 945-956.
- Hatt & Le Coustumer. 2008. Practice Note 1. *In situ* measurement of hydraulic conductivity. FAWB's Guidelines for Soil Filter Media in Bioretention Systems. Version 2.1. <http://www.monash.edu.au/fawb/publications/index.html>.
- IGME, 1987. Manual de Taludes. Serie Geotecnia. IGME. 455 p.
- Junco, F., Calvo, J.P. (1983). Cuenca de Madrid. En: Libro homenaje a J.M. Ríos, 2, 534-542.
- Karol, R. H., 1960. *Soils and Soil Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 194 p.
- López Vílchez, L., Ruiz Celáa, C. 1983. Síntesis hidrogeológica de la Cuenca del Tajo. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, VII, 637-648.
- Mediavilla, R.M., Rubio, F.J. 2010. Mapa geológico de España a escala 1:50.000, 2ª serie, Aranjuez (605). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Megías, A.G., Ordóñez, S., Calvo, J.P. 1983. Nuevas aportaciones al conocimiento geológico de la cuenca de Madrid. *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*, 1, 163-191.
- Navarro Alvargonzález, A., Fernández Uría, A., Dobles Domínguez, J.G. 1993. Cuenca del Tajo. En: IGME (Ed). Las aguas subterráneas en España. Capítulo IX. IGME. Madrid, 217-230.

- Porras, J., Nieto, P., Álvarez-Fernández, C., Fernández Uría, A., Gimeno, M.V. 1985. *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Informe de Síntesis*. Tomo II. Anejos I. Sistemas acuíferos de la Cuenca del Tajo. IGME. 53-80.
- Racero, A. 1988. Consideraciones acerca de la evolución geológica del margen SW de la Cuenca del Tajo durante el Terciario a partir de los datos del subsuelo. *II Congreso Geológico de España, Simp.*, 213-222.
- Rodas, M., Garzón, M.G., Luque, F.J. y Mas, R. 1991. Correlation between the Paleogene detritic facies in the margins of Tajo and Duero basins (central Spain): mineralogical, sedimentological and geomorphical characteristics. *Sci. Geol. Mem*, 88, 43-52.
- Rubio, P.L. 1984. Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en el sector occidental de la Cuenca de Madrid. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.
- Sanz Montero, M.E. 1996. Sedimentología de las formaciones neógenas del sur de la Cuenca de Madrid. CEDEX. Monografías, 52.
- Subdirección General de Calidad Ambiental. 2003. Desarrollo técnico del R.D. 1481/2001 relativo a las instalaciones de vertido de residuos. 86 p.
- Vegas, R., Banda, E. 1982. Tectonic framework and Alpine evolution of the Iberian Peninsula. *Earth Evolution Sciences*, no. 4, 320-343.
- Yélamos, J.G., Villarroya Gil, F. 2007. El acuífero terciario detrítico de Madrid: pasado, posibilidades actuales y retos pendientes. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2007. (15.3): 317-324.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico
y Minero de España



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

CENTRO DE PUBLICACIONES
Paseo de la Infanta Isabel, 1 - 28014 Madrid