

MINERÍA URBANA:

extracción de recursos de los vertederos

Por **DR. IGNASI PUIG VENTOSA**. Ingeniero industrial superior por la Universitat Politècnica de Catalunya. Master of Science in Monitoring, Modelling and Management of Environmental Change por King's College London. Doctor en Ciencias Ambientales por la Universitat Autònoma de Barcelona (especialidad Economía Ecológica y Gestión Ambiental). Coordinador de proyectos en ENT Environment and Management (www.ent.cat) y de la Fundació ENT (www.fundacioent.cat). E-mail: ipuig@ent.cat. **MARIA CALAF FORN**. Licenciada en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de Barcelona. Máster en Ingeniería y Gestión de las Energías Renovables por el Instituto Catalán de Tecnología. Máster oficial en Estudios Ambientales por la Universidad Autónoma de Barcelona (especialidad Economía Ecológica). Consultora ambiental en ENT y Fundació ENT, experta en gestión de residuos y fiscalidad ambiental y de los residuos. **MARTA JOFRA SORA**. Licenciada en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de Barcelona. Máster en Ingeniería y Gestión de las Energías Renovables por el Instituto Catalán de Tecnología. Máster en Agricultura Ecológica por la Universidad de Barcelona. Consultora ambiental en ENT y Fundació ENT, experta en gestión de residuos y fiscalidad ambiental.



El presente artículo estudia la potencialidad del *landfill mining* en los vertederos españoles, concepto que denomina el proceso de recuperación de materiales residuales depositados en vertederos para su uso posterior como materiales secundarios y, cuando no es posible, para su reaprovechamiento energético. Como conclusiones generales, el artículo sostiene que en España existe tanto potencial como tecnologías adecuadas para aplicar estos procesos de minería de vertedero, una actividad que creará puestos de trabajo, reducirá la dependencia exterior de algunas materias primas y, además, contribuiría a alcanzar los compromisos españoles de mitigación del cambio climático.



Introducción y antecedentes

Se estima que en 2001 había del orden de 8.200 vertederos en España. La entrada en vigor de normas ambientales crecientemente estrictas provocó el cierre de muchos de ellos y en 2010 solo 142 vertederos eran reconocidos como vertederos controlados en activo por el entonces Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino ^[1 y 2].

Los vertederos, aparte de instalaciones que provocan diversos impactos ambientales, son también depósitos de recursos naturales, pues contienen cantidades ingentes de materiales que en su día fueron rechazados, algunos de los cuales muy valiosos, como ciertos metales preciosos o tierras raras.

En este sentido, recientemente se ha acuñado a escala internacional el término *urban mining* para denominar los procesos de recuperación de los residuos de materiales secundarios valiosos (tales como metales férricos y no férricos) para ser usados posteriormente en la fabricación de nuevos productos. En este marco se incluye el concepto específico de *landfill mining*, que denomina la recuperación de materiales residuales depositados en vertederos para su uso posterior como materiales secundarios o para su valorización energética. En castellano se ha venido traduciendo indistintamente como «minería urbana» o «minería de vertedero».

El presente artículo se centra en el estudio de la potencialidad del *landfill mining* en los vertederos españoles y se focaliza sobre todo en los objetivos de mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y en la recuperación de recursos para ser reciclados.

En todo el mundo se han llevado a cabo hasta la fecha diversos proyectos

de extracción de recursos de vertederos, principalmente en Estados Unidos, pero también en Europa y en Asia. En España, hasta la fecha solamente se conoce la experiencia del desmantelamiento del vertedero de Berga, en 2010¹. En la mayoría de casos la iniciativa ha provenido de las Administraciones y ha tenido por objetivo principal la resolución de un problema específico de la región, como la conservación del espacio donde estaba ubicado el vertedero o la prevención de la contaminación de la tierra, el agua o el aire circundantes^[3]. No ha sido hasta más recientemente que se han desarrollado proyectos en los que el énfasis principal se ha puesto en la recuperación de los recursos contenidos en los vertederos, y de forma experimental^[3].

Esta nueva perspectiva de minería de vertedero presenta, además de un interés económico, un potencial ambiental en términos, por ejemplo, de mitigación del cambio climático y de reducción de la presión sobre los recursos naturales escasos. La materialización de este potencial, sin embargo, depende de varios factores, como la cantidad y calidad de los recursos depositados en los vertederos, la capacidad tecnológica disponible para la separación de los materiales, los costes de la tecnología de extracción y separación o el precio de ciertos recursos en el mercado, que a su vez depende de la demanda de los mismos.

Objeto y alcance

El objetivo principal del presente artículo de investigación es evaluar la viabilidad de la extracción de recursos de los vertederos españoles. Otros objetivos del artículo son los siguientes:

- Estimar la cantidad de residuos valorizables depositados en los vertederos españoles.

- Evaluar la madurez de las tecnologías existentes para la extracción de recursos de los vertederos.
- Identificar los criterios que deberían cumplir los vertederos para ser considerados susceptibles de ser sometidos a un proyecto de *landfill mining*.
- Analizar si la minería de vertedero podría contribuir a los compromisos españoles sobre mitigación del cambio climático.

Los objetivos de recuperación de los espacios, remediación, recuperación de energía y reducción de los costes de gestión de los vertederos quedan en segundo lugar.

El estudio se centra en los vertederos controlados, y no en los incontrolados, para determinar el potencial de *landfill mining*, porque existen más datos acerca de los mismos, son de dimensiones mayores y porque su configuración es más segura para efectuar extracciones de residuos.

A lo largo de todo el documento se aplica el enfoque de gestión de residuos que prevalece según la jerarquía legal de residuos a nivel europeo, y también español, que prioriza el reciclaje frente a la valorización energética y al vertido de residuos.

Metodología

A continuación se detalla la metodología seguida:

■ Estimación de los residuos valorizables presentes en los vertederos españoles

La estimación de los residuos valorizables presentes en los vertederos españoles (apartado 4) se ha estimado a partir de las cantidades históricamente vertidas y de análisis de composición.

Para la obtención de los datos históricos de vertido de residuos domésticos

se parte de información proporcionada por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), aunque para datos anteriores a 1990 se ha recurrido a estadísticas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y de Eurostat. No se han encontrado datos anteriores a 1980.

Por otro lado, la obtención de la composición de los vertederos españoles se ha estimado de acuerdo a estudios empíricos realizados en distintos vertederos a nivel mundial^[5] (Tabla 3). Aun así, cabe tener en cuenta que cada vertedero tiene su variabilidad, que habrá que analizar específicamente *in situ*.

■ Tecnología de extracción y recuperación de materiales en vertedero

En segundo lugar, la presentación de la tecnología de extracción y recuperación de materiales en vertedero (apartado 5) se ha basado en la revisión de bibliografía especializada^[6, 3 y 7]. A partir principalmente de Hogland *et al.*^[8] se presenta la descripción de las fracciones resultantes del proceso de extracción de los residuos de vertedero.

■ Estimación de los costes de la minería de vertedero

Para la elaboración de este apartado se ha realizado principalmente una revisión bibliográfica y una selección de los datos de más interés para el estudio.

Para la descripción de los costes de excavación se han seleccionado por su relevancia los estudios de Innovative Waste Consulting Services^[6], Van Passel *et al.*^[9] y Van der Zee *et al.*^[10]. Para el análisis de los puestos creados se han presentado valores en términos absolutos y por to-

(1) Según un estudio de Savage *et al.*^[4], la primera experiencia de minería de vertedero se llevó a cabo en Israel en 1953, con el fin de obtener fertilizante para los huertos.



Latinstock

Gestión de residuos domésticos mediante vertedero

Según el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente ^[14, 2] y la OCDE ^[15], el tratamiento de residuos en vertedero controlado pasó del 37 por ciento en 1980 al 60 por ciento en 1996 (Figura 1). Entre 1997 y 2004 atravesó una fase de estabilización e incluso de recesión, hasta llegar a niveles del 48 por ciento. A partir de 2004, cuando dejan de contabilizarse los residuos depositados en vertedero incontrolado³, el porcentaje de residuos gestionados en vertedero controlado ha estado aumentando hasta llegar al 70 por ciento en 2010, lejos del 49 por ciento europeo de 2008 ^[16]. En términos absolutos, ha significado un ascenso, desde 1990 a 2010, de unas 500.000 toneladas anuales promedio de residuos depositados en vertederos controlados. En conjunto, la evolución de los datos

nelada de residuo extraída y tratada, derivados del proyecto de Houthalen-Helchteren (Bélgica), extraídos del estudio de Sips y Koppers ^[11]. Para el apartado 6.3, que aborda la cuestión del valor en el mercado de los productos extraídos, se ha entrevistado a expertos en valorización de residuos y se han obtenido datos reales de venta de materiales². También se han empleado los estudios de Grantham ^[12] y Hedrick ^[13] para el análisis de los precios.

Estimación de los residuos valorizables presentes en los vertederos españoles

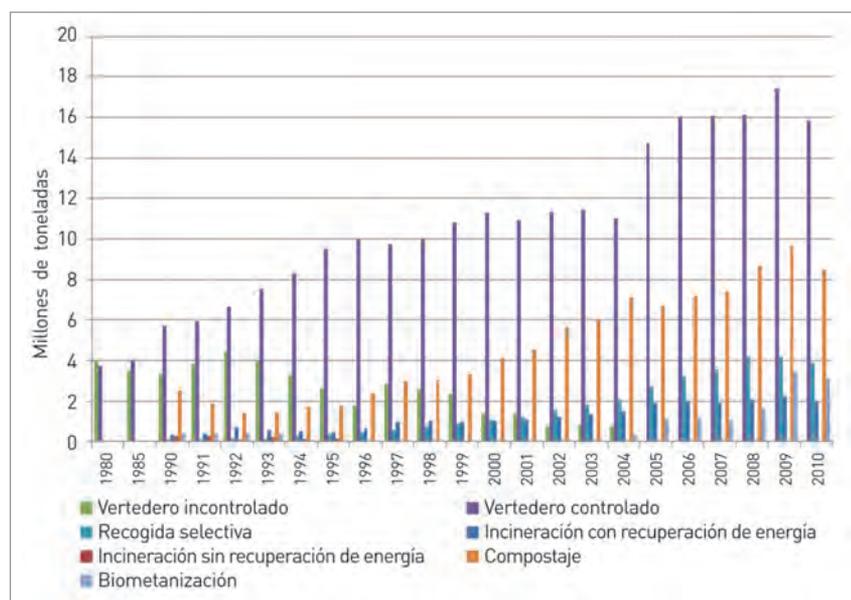
A continuación se presentan los resultados estimados de gestión mediante vertido, del parque de vertederos españoles y de la composición de los residuos vertidos (apartados 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4) y unos criterios para la selección de los vertederos donde aplicar minería urbana (apar-

tado 4.5). Finalmente, se hace una valoración cualitativa acerca de la dependencia exterior en cuanto a las importaciones españolas de materiales también presentes en vertederos (apartado 4.6).

(2) Datos facilitados por el Consorci per al Tractament de Residus Sòlids Urbans del Maresme (Barcelona).

(3) Por ser prácticamente insignificante.

Figura 1. Evolución del tratamiento de residuos domésticos en España, 1980-2010.



Fuente: OCDE ^[15] y MAGRAMA ^[14, 2].

Tabla 1. Evolución del número de vertederos controlados de residuos domésticos no peligrosos en España, 1998-2010.

Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Nº de vertederos controlados	199	195	192	191	195	187	187	188	183	162	149	147	142

Fuente: MAGRAMA ^[14, 2].

de residuos depositados en vertederos (Figura 1) muestra cómo este tratamiento ha sido el predominante en España.

De acuerdo con los datos presentados y las fuentes consultadas, actualmente hay, como mínimo, 275 millones de toneladas de residuos domésticos en los vertederos españoles controlados.

Parque de vertederos controlados presentes en el territorio español

La Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril, sobre Vertederos, transpuesta en España por el Real Decreto 1481/2001, supuso un punto y aparte en la gestión de vertederos. El citado Real Decreto establecía el año 2002 como fecha límite para la realización de un plan de acondicionamiento de los vertederos. Una

mayoría (83 por ciento en 2009) lo han realizado, aunque algunos con posterioridad a la fecha. Con anterioridad a la aprobación del Real Decreto, en España había al menos 8.200 vertederos, que presentaban una situación ambiental desconocida, y entre los vertederos «controlados» identificados (unos 315) todavía una mayoría no cumplía con los requisitos establecidos por la Directiva ^[1].

El número de vertederos controlados de residuos domésticos no peligrosos en España ha ido decreciendo desde 1998. Antes de esta fecha no se dispone de datos (Tabla 1). Según la Tabla 2, la tendencia ha sido la de clausura de los vertederos «controlados» más pequeños. Al mismo tiempo, nuevos vertederos, en general de gran capacidad, han iniciado su explotación.

En 2010 se vertieron un total de 15.833.489 toneladas de residuos domésticos en los 142 vertederos controlados. En 2010, el 49 por ciento de los vertederos disponían de captación de metano, cuando en 2007 solo eran el 14 por ciento ^[14].

Según la Tabla 2, la mayoría de los vertederos españoles (de residuos no peligrosos, peligrosos e inertes ⁴) reciben entre 10.000 y 300.000 toneladas al año. Se estima que tienen una capacidad promedio que supera los dos millones de toneladas y que actualmente se encuentran globalmente por encima de la mitad de la capacidad total de llenado. Esto podría ser indicativo de la cantidad total de residuos depositados en vertederos controlados, aunque no se diferenciaría entre residuos domésticos, inertes y peligrosos y, además, no se dispone de información acerca de los vertederos de residuos domésticos actualmente sellados. Por este motivo, se ha tomado como dato de los residuos presentes en vertedero aquél derivado de las series históricas de generación de residuos domésticos (apartado 4.1), en lugar de estimaciones a partir del parque de vertederos.

Composición de los residuos presentes en vertederos

Siguiendo la aproximación descrita en la metodología (apartado 3.1), se ha tomado como referencia la composición promedio de los residuos en los vertederos controlados obtenida de la revisión de 22 casos internacionales de minería de

Tabla 2. Evolución de algunas características de los vertederos controlados españoles, entre 2003 y 2009.

Características / Año	2003	2007	2009
Año de inicio:			
Antes de 1990 / 1995 ¹	52,96%	14%	13%
1990 – 2001 / 1995 – 2001 ¹	34,66%	62%	60%
2002 – 2005		17%	17%
Después de 2005 / 2001 ¹	12,36%	7%	10%
% de llenado de su capacidad total		57%	61%
Edad media (años)		10	11,2
Años para su sellado		7,4	
Capacidad media		2.700.000	2.300.000
Toneladas por año (promedio)		100.000	123.000
< 5.000 t/año		11%	2%
5.000 – 10.000 t/año		13%	13%
10.000 – 50.000 t/año		32%	27%
50.000 – 100.000 t/año		17%	19%
100.000 – 300.000 t/año		18%	36%
> 300.000 t/año		10%	3%

(1) Para 2003 son válidos los segundos intervalos de años indicados.

Nota: Son datos acerca de los vertederos de residuos no peligrosos, peligrosos e inertes.

Fuente: Uriarte et al. ^[1, 17] y Uriarte ^[18].

(4) No se dispone de datos desagregados para los diferentes tipos de vertederos.

Tabla 3. Composición del material presente en los vertederos, basada en 22 estudios.

Tipo de material	Promedio
Tierra	54,7%
Papel	6,8%
Plástico	8,3%
Madera	6,8%
Textiles / goma / piel	6,6%
Materiales inertes	10,6%
Residuos orgánicos	2,7%
Metales férricos	2,9%
Metales no-férricos	0,5%
Residuos peligrosos	0,1%
TOTAL	100,0%

Fuente: Svensson *et al.* ^[3].

vertedero. Típicamente, los vertederos de residuos domésticos contienen un 50-60 por ciento de un material tipo suelo o tierra (procedente del material cobertor y del residuo fuertemente degradado), un 20-30 por ciento de combustibles (p.e. plásticos, papel y madera), un 10 por ciento de materiales inorgánicos (p.e. cemento, piedras y vidrio) y un pequeño porcentaje de metales (la mayoría de ellos férricos) ^[5]. Los distintos materiales encontrados en los 22 estudios se agregaron en 10 categorías de materiales (Tabla 3) ^[3].

Estimación de los residuos valorizables en los vertederos españoles

Teniendo en cuenta la composición mostrada en la Tabla 3, se presenta a continuación la estimación de la cantidad de materiales presentes en los vertederos españoles (Tabla 4).

Entre los metales se encuentra un grupo llamado tierras raras o metales raros, un grupo de 17 elementos de la tabla periódica que se utilizan a nivel industrial para la fabricación desde automóviles, teléfonos móviles y ordenadores, hasta armas avanzadas. Estos materiales –entre los que destacan el escandio, el itrio y los lantánidos– tienen propiedades físicas y

Los vertederos de residuos domésticos contienen un 50-60% de un material tipo suelo o tierra, un 20-30% de combustibles, un 10% de materiales inorgánicos y un pequeño porcentaje de metales

Tabla 4. Estimación del material presente actualmente en los vertederos españoles, suponiendo los residuos generados desde 1980 a 2010.

Tipo de material	Cantidad (t)
Tierra	195.649.720
Papel	24.322.086
Plástico	29.687.252
Madera	24.322.086
Textiles / goma / piel	23.606.730
Materiales inertes	37.913.840
Residuos orgánicos	9.657.299
Metales férricos	10.372.654
Metales no-férricos	1.788.389
Residuos peligrosos	357.678
TOTAL	357.677.734

Nota: A los residuos vertidos de 1980 a 2010 se les ha añadido un 30 por ciento más de peso procedente del material cobertor, de acuerdo con Hogland *et al.* ^[6]. Fuente: Elaboración propia a partir de Svensson *et al.* ^[3] y MAGRAMA ^[14, 2].

químicas que mejoran las prestaciones de discos duros, convertidores catalíticos, magnetos y láseres, entre otros. En los últimos años el uso de estos materiales ha evolucionado al alza y previsiblemente esta tendencia se mantendrá debido a la creciente demanda de los países emergentes. La Comisión Europea ha llevado a cabo un estudio de su disponibilidad, que concluye que están bajo una presión creciente ^[19]. Por lo tanto, el desperdicio de dichos aparatos y equipos en vertedero significa una pérdida sustancial de estos materiales estratégicos.

Criterios de selección de vertederos donde aplicar minería urbana

Para la elección de los vertederos con potencial de aplicación de procesos de minería de vertedero se deberían priorizar los siguientes aspectos:

- Tener en cuenta no solo la recuperación de materiales, sino también la remediación de espacios degradados.
- Estabilidad de los taludes. La priorización de los vertederos estables reduce el riesgo de accidentes durante la excavación del material.
- Priorización de vertederos de cierto tamaño, para aprovechar economías de escala. Fruto de los diferentes análisis, se sugiere establecer como criterio mínimo para aplicar un proyecto de minería de vertedero disponer de una cantidad mínima de unas 300.000 toneladas.
- La edad del vertedero puede ser un aspecto determinante en la composición de los materiales encontrados: cuanto más moderno sea el vertedero, mayor proporción de plásticos y metales y menor proporción de materia orgánica contendrá; además, cuanto más antiguo, mayor grado de descomposición de los materiales habrá tenido lugar, con lo que será más difícil su recuperación.
- Que el emplazamiento del mismo esté lo suficientemente alejado de núcleos de población para no ocasionar molestias (ruido, polvo, olores, etc.).
- Que el vertedero no haya sido sellado todavía, puesto que la inversión y esfuerzo para excavar se ven reducidos en este caso.

Comparativa con las importaciones de la economía española

La cantidad de importaciones indica la dependencia exterior en cuanto a la provisión de distintos recursos. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), entre 1994 y 2010 España ha sido impor-

tador de piedras preciosas, hierro y acero, cobre, níquel, aluminio, plomo, cinc, estaño y otros metales comunes por un valor de 176.728 millones de euros. El precio comercial de algunos metales también presentes en vertedero y potencialmente recuperables es significativamente elevado. Esto, conjuntamente con los enormes reservorios existentes en los vertederos, puede ser indicativo del potencial que la minería de vertedero tendría para reducir la dependencia exterior de algunas materias primas.

Aun así, cabe tener en cuenta que el precio de los materiales recuperados en vertedero es sensiblemente inferior al de los materiales vírgenes, especialmente en el caso de los productos más sensibles a la degradación.

Estudio de las tecnologías disponibles para la extracción de recursos de los vertederos

El proceso de minería urbana consiste típicamente en tres operaciones principales: excavación del material, procesamiento del material excavado y gestión del material procesado y/o excavado. Para la excavación se utilizan equipos comúnmente empleados en minería de superficie y también en operaciones de vertedero, como las retroexcavadoras y las excavadoras hidráulicas ^[6].

El material excavado puede ser procesado aplicando una separación de residuos voluminosos y materiales peligrosos, un tamizado de la tierra y una posterior selección de materiales que permita obtener una fracción gruesa, con opciones de ser en parte reciclada, y una fracción fina, que pueda servir nuevamente como cobertor de vertederos o como material para la recuperación de espacios degradados. Para los residuos extraídos que no puedan ser aprove-

El proceso de minería urbana consta de tres operaciones principales: excavación del material, procesamiento del material excavado y gestión del material procesado y/o excavado

chados con procesos posteriores de reciclaje se puede contemplar otro tipo de tratamientos complementarios, tales como la incineración y la redeposición en vertedero (Figura 2).

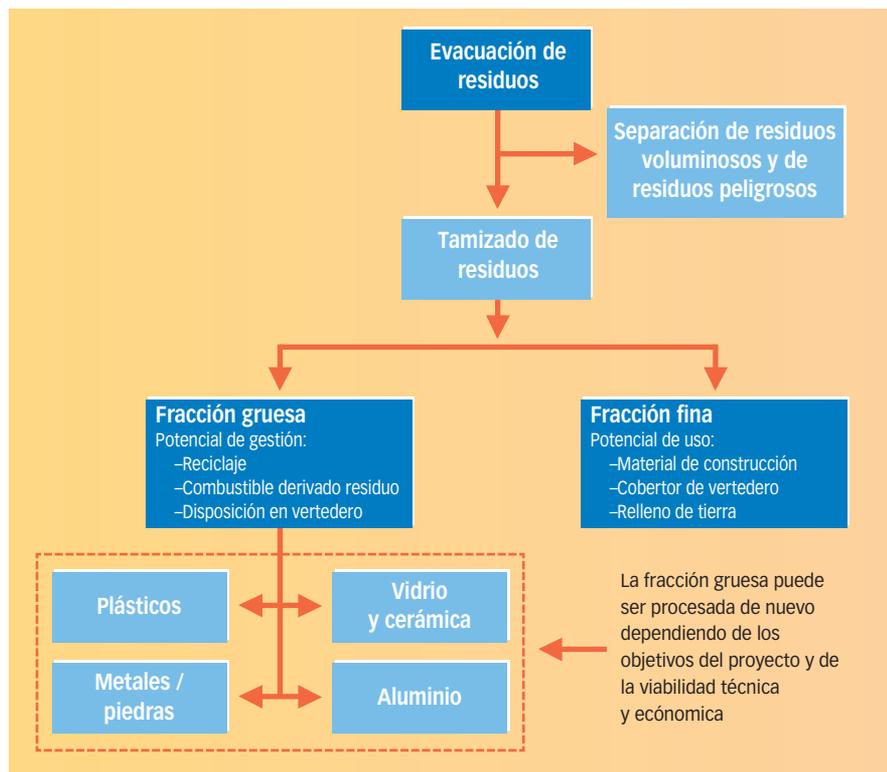
Existen dos tipos principales de tecnologías o procesos de separación dependiendo de la localización del equipo, pero el proceso de separación de los materiales es similar: las plantas estacionarias y las plantas móviles. Las primeras se diseñaron haciendo hincapié en separar la mayor cantidad posible de material para su reciclado, sobre todo en referencia a la recuperación de combustibles, plásticos para el reciclaje y metales no férricos (Figura 3). Por otro lado, las plantas móviles se concibieron

haciendo hincapié en la simplicidad, para ser transportables y manejables en el mismo vertedero, capturando *in situ* parte de los residuos ^[20, 21, 22, 23].

A partir de los procesos de tamizado descritos en ambas metodologías, pueden obtenerse diversas fracciones de grosores distintos (normalmente dos o tres): la fracción gruesa (p.e. >50 mm), la fracción fina (<18 mm o <25 mm, según tamiz) y la fracción intermedia.

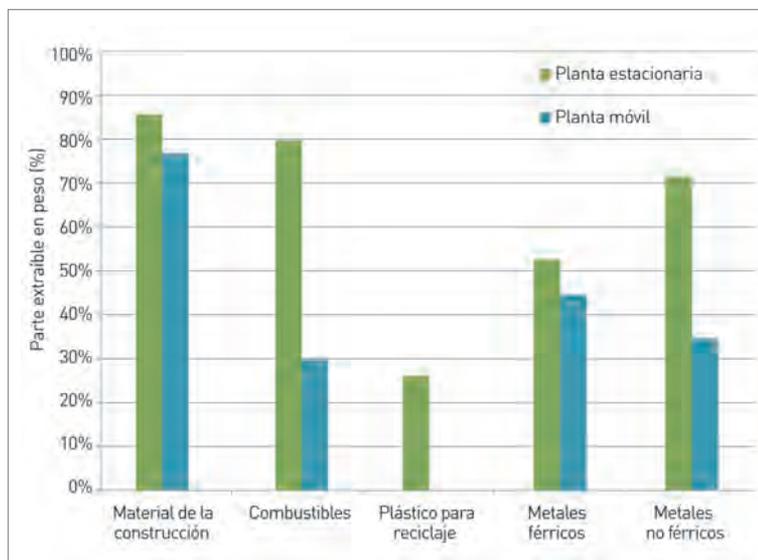
La fracción con mayor representación en peso, por encima de la mitad del total del material excavado, acostumbra a ser la gruesa, y la de menor proporción, la fina. Una parte importante de esta última proviene del material utilizado para cubrir los residuos, que representa del or-

Figura 2. Proceso de recuperación y gestión del material excavado en vertedero



Fuente: Adaptación de Innovative Waste Consulting Services ^[6].

Figura 3. Estimación de la recuperación de distintos materiales de los vertederos según el uso de tecnología estacionaria o móvil.



Fuente: Adaptación de Krook^[24].

den del 30 por ciento^[8], además del material inerte tipo tierra y del residuo orgánico fuertemente degradado existente en los residuos vertidos. El destino de dicha fracción puede ser el vertedero u otros usos, como material cobertor de vertederos, para restaurar espacios o como material de construcción^[8].

La fracción gruesa suele contener elevadas cantidades de madera y papel, que puede llegar a constituir el 50 por ciento del peso total. Es la que tiene mayor poder calorífico, aunque su valor oscila dependiendo de la fuente⁵. El contenido de metales es superior que en las otras dos fracciones (puede llegar al 5 por ciento) y la recuperación de estos es posible. También hay piedras (hasta un 10 por ciento), residuo vegetal de jardín (hasta un 6 por ciento) y residuos peligrosos (hasta un 2,5 por ciento). La producción de metano y la combustión pueden ser también con-

sideradas alternativas para la gestión de la parte no reciclable de esta fracción^[8].

La fracción intermedia contiene piedras y material de suelo indefinido. Esta fracción también tiene una proporción orgánica sustancial. Asimismo, pueden recuperarse algunos metales. Las aplicaciones para la parte no reciclable de esta fracción pueden ser la digestión o fermentación, o la combustión^[8].



(5) En Suecia se estimó entre 6,9 y 7,9 MJ/kg^[8]. Por otro lado, Obermeier y Saure^[25] lo sitúan en 11 MJ/kg, y Cossu et al.^[26], Rettenberger^[22] y Schillinger et al.^[27] encontraron valores de hasta 20 MJ/kg.

Estimación de los costes de la minería de vertedero

El coste es un factor clave para determinar la viabilidad de un proyecto de minería de vertedero. Sin embargo, también hay que tener en cuenta los costes ambientales evitados gracias a los proyectos de minería urbana. La consideración de estos costes ambientales en la toma de decisiones podría ser un elemento clave a la hora de impulsar proyectos de este tipo.

Coste de las operaciones de extracción

En la literatura existe cierto consenso en que cada proyecto de minería de vertedero tiene su conjunto único de condiciones y objetivos que directa o indirectamente influyen en su viabilidad económica^[7]. Algunos de los factores que influyen en el coste de excavación son el volumen de residuos excavados, la tecnología empleada para la excavación, la ubicación del vertedero, el volumen de residuos depositados en el mismo o el hecho de que el vertedero esté sellado o no.

En cuanto a los costes de excavación y transporte de materiales en vertedero,

tomando como referencia diversos proyectos de minería de vertedero (Berga, en Cataluña, EUA ^[6], Flandes ^[9] y Houthalten-Helchteren (Bélgica) ^[9]) se obtiene un valor promedio aproximado de 3,3 €/tonelada de material extraído.

Por otra parte, a partir de la revisión de diferentes proyectos (según Savage *et al.* ^[4] y Van Passel *et al.* ^[9]), se concluye que los costes relativos a la selección y procesado y al reciclaje de los materiales presentan un coste promedio de 32,8 €/tonelada.

Finalmente, a los costes de extracción y procesado habría que añadir el coste de investigación previo.

■ Puestos de trabajo creados

Las operaciones de minería de vertedero crean puestos de trabajo de forma directa e indirecta. Los directos son los relacionados con el diseño del proyecto, la dirección de obra, la gestión económica y administrativa, la excavación de los residuos, su procesado, el transporte de los mismos, el almacenamiento de tierra y residuos y las operaciones de valorización de los residuos extraídos. En el vertedero de Houthalten-Helchteren (Bélgica), el ratio de generación de empleo directo está entre 38 y 50 puestos de trabajo por cada millón de toneladas extraídas ^[11].

En relación a los puestos de trabajo indirectos, se incluyen los intermediarios de compra-venta de materiales recuperados, los procesadores de materiales recuperados, los fabricantes de maquinaria para la extracción de residuos, para el procesado y el reciclaje de materiales recuperados y los fabricantes de vehículos para el transporte de residuos, etc.

Uno de los sectores más beneficiados por los proyectos de minería de vertedero sería el sector del reciclaje. Según un estudio llevado a cabo por Friends of the Earth ^[28], por cada puesto de trabajo directo creado en este sector, se crean 1,2



puestos de trabajo indirectos y 1,4 puestos de trabajo inducidos. Y en cuanto al ratio de creación de empleo, se estima que se generan 59 empleos totales (directos, indirectos e inducidos) por cada 1.000 toneladas recicladas (Environmental Protection Agency ^[29]).

■ Valor en el mercado de los materiales extraídos

Según un estudio de prospección realizado en Holanda ^[10], la contribución de la venta de los materiales reciclables a los beneficios totales de la minería de vertedero se sitúa entre el 1 y el 30 por ciento.

Otros beneficios de los proyectos de minería urbana considerados en el estudio de Van der Zee *et al.* ^[10] son:

- El incremento de la capacidad de los vertederos.
- Los costes evitados o reducidos de sellado, custodia post-clausura y descontaminación de las áreas cercanas al vertedero.

- Los ingresos derivados de la venta de residuos que se emplearán como material reciclado o como combustible.
- Los ingresos derivados de la venta de la tierra recuperada para ser empleada como material de cobertura u otros usos.

Hay que tener en cuenta que los precios de venta de materiales recuperados son sensiblemente inferiores a los de los materiales recuperados mediante la recogida selectiva de residuos, puesto que su calidad es inferior. La experiencia indica que la calidad de los materiales recuperados mediante la minería urbana se podría asimilar a la de los materiales recuperados en plantas de tratamiento mecánico-biológico (TMB) de la fracción rechazo de los residuos municipales recogidos de forma mezclada (Tabla 5).

El precio de los metales es sensiblemente superior al de los otros materiales recuperados (Tabla 5). En general,



Tabla 5. Valor en el mercado de los materiales recuperados en plantas de TMB asimilables a los materiales extraídos de vertedero, 2012.

Grupo	Material	Precio (€/tonelada)
Vidrio	Vidrio	10-19
Metales	Metales férricos (genérico)	120-220
	Metales no férricos (genérico)	350-397
	Latas férricas	20-175
	Latas de aluminio	100-780
	Cobre	3.500-5.400
	Aluminio	600-950
	Inoxidable férrico	150-400
	Inoxidable no férrico	1.000-1.450
	Latón	2.000-3.150
	Bronce	3.000-4.200
	Plomo	500-1.250
Zinc	600-850	
Cable eléctrico de cobre	1.200-2.200	
Aparatos eléctricos y electrónicos	Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	45-90
Pilas	Pilas	93-505
Plásticos	PEAD (polietileno de alta densidad)	35-181
	Plástico mezclado	0-4,5
	PET (polietileno)	190-200
	Film	0
	Brick	20

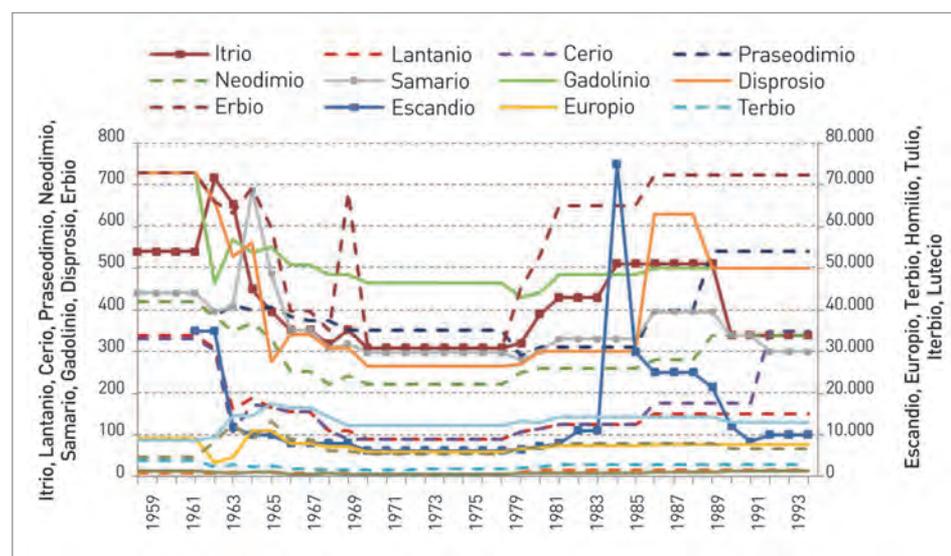
Fuente: Consorci per al Tractament de Residus Sòlids Urbans del Maresme (información facilitada directamente) y Diputació de Barcelona ^[90].

para el conjunto de materias primas empleadas para la producción de bienes, hay que destacar la tendencia al alza causada por un aumento de la demanda y una oferta cada vez más escasa. Grantham ^[12] concluye que la demanda acelerada de recursos por parte de los países en desarrollo ha causado un imprevisible cambio en la estructura de precios de los recursos. Así, resalta que después de 100 años o más de precios a la baja, los precios están ahora subiendo, y en ocho años han compensado, significativamente, los efectos de 100 años de decrecimiento. También apunta que, estadísticamente, es extremadamente improbable volver a la tendencia anterior de reducción de precios.

Mención aparte merecen los metales raros o tierras raras (apartado 4.4), cuyo precio es muy superior al de los metales comunes, en algunos casos decenas de miles de dólares por kilogramo (Figura 4).

Las operaciones de minería de vertedero son una fuente de puestos de trabajo directos e indirectos

Figura 4. Evolución del precio de los metales raros (\$/kg), 1959-1994.



Fuente: Elaboración propia a partir de Hedrick ^[13].

Al valor económico de los materiales recuperados cabe añadir el valor de mercado del terreno, en caso de que se realice una restauración total del vertedero que permita ubicar otras actividades.

Balance ambiental

Según la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) ^[31], los dos factores principales que explican el descenso de emisiones de gases de efecto invernadero de la gestión de residuos municipales en la Unión Europea son el declive de las emisiones de metano de los vertederos, derivado de la reducción de residuos tratados a través de esta vía durante el periodo 1995-2008, y el incremento de emisiones evitadas por el reciclado de residuos. El reciente informe elaborado por la Fundación Fórum Ambiental ^[32] corrobora este hecho y pone de manifiesto que la contribución de la gestión de residuos municipales en España a la mitigación de GEI podría llegar (en un escenario avanzado) a superar los 20 millones de toneladas de CO₂eq/año, derivado principalmente del incremento del reciclaje y compostaje, de la reducción del vertido de la fracción resto y del ligero incremento de la incineración de combustibles derivados de los residuos. Con esta reducción ya se llegarían a cumplir los objetivos para 2020 definidos en la Directiva 2009/29/CE en relación a las emisiones difusas totales de 2010.

En relación a los procesos de *landfill mining*, en primer lugar, cabe analizar el posible impacto ambiental asociado a la extracción de residuos de vertedero. La mayoría de estudios ^[26, 33, 34, 35] concluye que los riesgos para la salud de los tra-

bajadores son generalmente bajos. Sin embargo, en algunas ocasiones la salida de gases del vertedero puede ocasionar molestias (malos olores) a la población residente circundante. En este sentido, es necesaria la toma de medidas previas a la explotación ^[8].

Por otro lado, también se produce un impacto ambiental derivado de las emisiones de GEI y de otros contaminantes asociados a los posibles procesos de incineración, transporte de los residuos, actividades en el vertedero y a los procesos de separación del material. Según Krook ^[24], las emisiones de CO₂ equivalentes generadas durante el proceso de minería de vertedero en planta estacionaria se dividen principalmente en aquellas procedentes de la incineración de materiales (62,3 por ciento), las derivadas del transporte de residuos y materiales (33,3 por ciento), las de las actividades en el vertedero (3,5 por ciento) y las de separación de los materiales (0,5 por ciento).

Por otro lado están las emisiones evitadas. Según Krook ^[24], entre las emisiones evitadas, las que tienen mayor peso son las referentes a recuperación de energía (43,3 por ciento) y al reciclaje de los materiales recuperados –plásticos, metales férricos, metales no férricos, y residuos de la construcción– (41,9 por ciento). También hay un porcentaje de emisiones evitadas de metano (14,9 por ciento) por la reducción de residuos vertidos. No obstante, estos porcentajes acaban dependiendo de los tratamientos aplicados a los materiales recuperados.

Mediante simulaciones de Montecarlo ^[3], se obtiene el resultado del balance de emisiones neto de CO₂ equivalente derivado de la aplicación de tres



escenarios de *landfill mining*: planta estacionaria, planta móvil y remediación. Se dispone de valores totales, no de ratios, con los que no es posible hacer extrapolaciones a otros casos. Solo sirven para contar qué tecnología es mejor ambientalmente. En este sentido, en conjunto, para las plantas estacionarias, las emisiones generadas por el proceso de extracción y separación son ampliamente compensadas (con un 85 por ciento de probabilidad) por las emisiones evitadas derivadas del aprovechamiento del material y de la generación de energía. Para las plantas móviles también son compensadas, pero con menor probabilidad (60 por ciento). En el caso de la remediación no son compensadas.

Si se combinan las metodologías de cálculo de emisiones, tanto generadas como evitadas, del International Panel of Climate Change (IPCC) ^[36], del Servicio de Medio Ambiente de la Diputació

La contribución de la gestión de los residuos municipales en España a la mitigación de gases de efecto invernadero podría superar los 20 millones de toneladas de CO₂ eq/año



Latinstock

de Barcelona ⁶ y de la UNEP ^[37], en dos escenarios posibles de gestión mediante minería de vertedero de una cantidad asimilable a la vertida en España en 2010, se concluye que:

- Si los residuos se hubieran vertido en vertedero controlado sin aprovechamiento energético y la tecnología de procesado fuera mediante planta estacionaria, se podrían llegar a reducir las emisiones difusas de GEI de España de 2010 ^[32] entre el 2,4 y el 2,7 por ciento.
- Si se hubieran depositado en vertedero controlado con recuperación de energía y mediante la tecnología de planta móvil, se podrían llegar a reducir las emisiones difusas de GEI de España de 2010 entre el 1 y el 1,7 por ciento.

Por otro lado, en cuanto a las tierras raras, según Montero ^[38], tanto su extracción como procesamiento causan un elevado impacto ambiental y social. Ambos procesos (minería y procesamiento)

son devastadores para la naturaleza y perjudiciales para la salud humana, dando lugar a daños irreversibles. Esta es, precisamente, la paradoja de las tierras raras: que siendo actualmente prácticamente imprescindibles en el desarrollo de tecnologías más respetuosas con el medio ambiente, su obtención produce un gran daño medioambiental y social.

Discusión y conclusiones

El objetivo principal del artículo era evaluar la viabilidad de aplicar procesos de minería de vertedero ⁷ en España. En este sentido, aunque rebasaba el alcance del artículo ofrecer balances finales cerrados de una posible aplicación a la totalidad de vertederos españoles, sí que se han ofrecido ratios y criterios de diversas variables que tendrían que permitir evaluar caso por caso la viabilidad de proyectos concretos de este tipo en España.

Un aspecto de difícil cuantificación ha sido estimar la cantidad de residuos presentes en los vertederos españoles y, aún más, conocer la composición de los mismos y su potencial para la aplicación de procesos de minería de vertedero. Aun así, se han presentado datos globales para el conjunto del territorio español.

El impacto ambiental de las operaciones de recuperación de los materiales de un vertedero depende mucho de los procesos de extracción y de las operaciones de tratamiento aplicadas a los residuos extraídos. Según las fuentes consultadas, un proceso de extracción mediante planta estacionaria tiene un impacto ambiental global de emisiones más favorable que procesos mediante plantas móviles. Esto se explica principalmente por la recuperación de un porcentaje mayor de materiales por unidad de energía aportada en plantas estacionarias respecto de plantas móviles.

La recuperación de metales y tierras raras o metales raros es sin duda uno de los principales beneficios de la aplicación de dichas tecnologías. En el primer caso, por su relativamente fácil separación, y en ambos casos, por su contribución a reducir la dependencia exterior (sobre todo en el caso de las tierras raras), por su elevado valor económico, así como por el elevado impacto ambiental que conllevan las extracciones de las materias primas.

La recuperación de plásticos es otro aspecto de interés, con particular potencial en el caso de la tecnología de planta estacionaria. También en el caso del vidrio. Aunque la combustión de materiales es uno de los destinos finales de un porcentaje del total de residuos extraídos, no debería ser uno de los principales motivos que condujeran a realizar proyectos de este tipo, según la jerarquía legal de gestión de residuos regulada por la Directiva Marco de Residuos.

En la literatura especializada hay cierto consenso en que cada proyecto de minería de vertedero tiene su conjunto único de condiciones y objetivos que directa o indirectamente influyen en su viabilidad económica. Aun así, se ha estimado un valor medio aproximado de cerca de 3,3 €/tonelada para los costes de extracción y transporte y de unos 32,8 €/tonelada para las operaciones de separación, reciclaje y tratamiento.

No obstante, es importante mencionar los beneficios que generarían este tipo de proyectos, en particular: incremento de la capacidad de los vertederos, costes evitados o reducidos en sellado del vertedero (derivados de las emisiones evitadas) y en la custodia post-clau-

(6) Que utilizó McDougall *et al.* ^[39], Diputació de Barcelona ^[40] y Barcelona Regional ^[41].

(7) También llamada minería urbana en español; términos asociados al concepto anglosajón de *landfill mining*.

sura del mismo, disminución de costes de descontaminación de las áreas cercanas al vertedero a largo plazo, etc. También hay que tener en cuenta los ingresos derivados de la venta de materiales reciclables y de tierra recuperada para ser empleada como material de cobertura, material de construcción u otros usos. Finalmente, habría que añadir los beneficios de la venta de electricidad y/o calor derivados de la posible combustión de los materiales no reciclables y con elevado poder calorífico.

Igualmente, se ha puesto de manifiesto que las operaciones de minería de vertedero crean puestos de trabajo de forma directa, indirecta e inducida. Y se constata que el sector del reciclaje proporciona más puestos de trabajo por tonelada que el conjunto de operaciones de minería de vertedero y que los procesos de incineración, hecho que expone claramente dónde debería situarse la prioridad a efectos laborales.

Considerando los precios de venta de los materiales recuperados, es importante reforzar la inversión en la selección de los metales para aumentar la rentabilidad de los proyectos, puesto que son los que presentan precios mayores. Uno de los factores que determinará el balance económico de las iniciativas de minería de vertedero es, pues, la composición de los residuos en ellos depositados.

Por otro lado, esta recuperación es todavía más estratégica si se tiene en cuenta que los precios de los materiales vírgenes (con especial énfasis en los metales raros o tierras raras) están subiendo a un ritmo muy alto y que estadísticamente es improbable que esta tendencia se invierta.

Cabe pensar que el aumento de precio de los metales vírgenes repercutirá en un aumento del precio pagado por los materiales recuperados, y que a medida que aumente el precio de la energía crecerá la demanda de materiales recupe-



Para garantizar la viabilidad de los proyectos de *landfill mining* en España se requerirá una investigación que seleccione los vertederos que tengan un mayor potencial

rados, pues la extracción y procesado de metales requieren una gran cantidad de energía en comparación con su reciclaje. Con esto, cabe esperar que los procesos de *landfill mining* devengan con el tiempo más rentables y necesarios.

A nivel ambiental, se constata que la aplicación de minería de vertedero podría conseguir reducciones significativas de las emisiones globales difusas de GEI, y que la diferencia es significativa entre aplicar el proceso en vertederos con o sin recuperación de energía y mediante planta estacionaria o móvil.

En conjunto, se puede concluir que el desarrollo de proyectos de *landfill mining* tiene potencial en España, pero por supuesto no en todos los vertederos, ni

en todos por igual. Para garantizar la viabilidad de los proyectos hará falta la realización de investigaciones que seleccionen los vertederos con mayor potencial de acuerdo con los criterios identificados. También se ha constatado que las tecnologías disponibles se consideran lo suficientemente desarrolladas para emprender este tipo de proyectos y que significarían un impulso económico y la generación de numerosos puestos de trabajo, así como la reducción de la dependencia exterior respecto de las importaciones de ciertos productos, sobre todo metales y tierras raras. Asimismo, serían proyectos que contribuirían a los compromisos españoles en materia de mitigación del cambio climático. ♦

Referencias

- [1] Uriarte-Jaureguizar, J.; Pérez-Dueñas, L. Observatorio ATEGRUS sobre vertederos controlados de residuos no peligrosos, peligrosos e inertes en España (2005-2007). *Revista Residuos*, 2008 (102): 20-27.
- [2] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). El medio ambiente y el medio rural y marino en España 2008-2011. Gestión de residuos. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2009-2012.
- [3] Svensson, N.; Eklund, M.; Frändegard, P.; Krook, J. Introducing and approach to assess environmental pressures from integrated remediation and landfill mining. Knowledge collaboration & learning for sustainable innovation. ERSCP-EMSU conference, Delft, The Netherlands, October 2010.
- [4] Savage, G.M.; Golueke, G.; Von Stein, E.L. Landfill mining: past and present. *Biocycle*, 1993 (34) 5, 58-61.
- [5] Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M. Landfill mining: a critical review of two decades of research. *Waste Management*, 2012 (32): 513-520.
- [6] Innovative Waste Consulting Services, LLC. Landfill Reclamation Demonstration Project. Florida Department for Environmental Protection. 2009.
- [7] Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M.; Johansson, N.; Frändegard, P. Landfill mining: a review of three decades of research. Knowledge collaboration & learning for sustainable innovation, ERSCP-EMSU Conference, Delft (Holanda), 25-29 de octubre de 2010. <http://repository.tudelft.nl/view/conferen-cepapers/uuid%3A76c0d800-183f-46da-9a56-38e8f1b0bbfa> [15 de diciembre de 2012].
- [8] Hogland, W.; Maques, M.; Nimmermark, S. Landfill mining and waste characterization: a strategy for remediation of contaminated areas. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2004 (6), 119-124.
- [9] Van Passel, S., Dubois, M., Eyckmans, J., de Gheldere, S., Ang, F., Jones, P. T., Van Acker, K. The economics of enhanced landfill mining: private and societal performance drivers. *Journal of Cleaner Production*, 2012 (en proceso de publicación).
- [10] Van der Zee, D.J.; Achterkamp, M.C.; De Visser, B.J. Assessing the market opportunities of landfill mining. *Waste Management*, 2004 (24), 795-804.
- [11] Sips, K.; Koppers, P. A journey from cradle to cradle. C2C Network Initiatives Guide, Stafford Wadsworth. 2011. <http://www.c2cn.eu/content/journey-cradle-cradle-c2c-network-initiatives-guide-published-online> [15 de diciembre de 2012]
- [12] Grantham, J. Time to wake up: days of abundant resources and falling prices are over forever, The Oil Drum. 2011. <http://www.the-oildrum.com/node/7853> [15 de diciembre de 2012]
- [13] Hedrick, J. Rare-earth metal prices in the USA ca. 1960 to 1994, *Journey of Alloys and Compounds* 250, 1997, 471-481.
- [14] Ministerio de Medio Ambiente. Medio ambiente en España 1998-2007. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 1999-2008.
- [15] OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico). OECD Environmental Data. Compendium 2006-2008. 2008.
- [16] Eurostat data centre on waste: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Waste_statistics#Waste_treatment [15/12/2012]
- [17] Uriarte Jaureguizar, J.; Vecino Gutiérrez, E.; Arias García, M.; Urbarrri Bilbao, I. Observatorio Ategrus sobre vertederos controlados de residuos no peligrosos, peligrosos e inertes en España – Edición 2009. ATEGRUS – Asociación Técnica para la Gestión de Residuos y Medio Ambiente. 2010: 0-23.
- [18] Uriarte Jaureguizar, J. Situación de los vertederos en funcionamiento actualmente y actuaciones previstas a realizar en los mismos. Datos arrojados por la encuesta realizada por Ategrus. Ategrus. 2003.
- [19] European Commission - Enterprise and Industry. Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. June 2010.
- [20] Hino, J.; Miyabayashi, Y.; Nagato, T. Recovery of nonferrous metals from shredder residue by incinerating and smelting. Metallurgical Review of MMIJ (Mining and Metallurgical Institute of Japan) 1998(15), 63-74.
- [21] Obermeier, T.; Hensel, J.; Saure, T. Landfill mining: energy recovery from combustible fractions. Proceedings Sardinia '97, Sixth International Landfill Symposium, Cagliari, Italy, 1997, 569-578.
- [22] Rettenberger, G. Results from a landfill mining demonstration project. Proceedings Sardinia '95, Fifth International Landfill Symposium, Cagliari, Italy, 1995, 827-840.
- [23] Zanetti, M.; Godio, A. Recovery of foundry sands and iron fractions from an industrial waste landfill. Resources, Conservation and Recycling 2006 (48), 396-411.
- [24] Krook, J. The environmental potential of landfill mining. Reinno-va: II Congreso Internacional de Innovación en la Gestión y Tratamiento de los Residuos Municipales. Sabadell, España. 17-18 noviembre 2011.
- [25] Obermeier, T.; Saure, T. Landfill reconstruction: biological treatment of landfill waste. Proceedings, Sardinia '95, 5th International Landfill Symposium, Cagliari, 1995 (III), 819-826.
- [26] Cossu, R.; Motzo, G.M.; Laudadio, M. Preliminary study for a landfill mining project in Sardinia. Proceedings, Sardinia '95, 5th International Landfill Symposium, Cagliari, 1995 (III), 841-850.
- [27] Schillinger, F.J.; McCulloch, B.P. Summary of landfill reclamation feasibility studies. NYSERDA, 1994.
- [28] Friends of the Earth. More jobs, less waste. Potential for job creation through higher rates of recycling in the UK and EU. 2010. http://www.foeeurope.org/sites/default/files/press_releases/More_Jobs_Less_Waste_Sep_2010%5B1%5D.pdf [15 de diciembre de 2012].
- [29] Environmental Protection Agency. Municipal solid waste in the United States: 2001 facts and figures. 2003. <http://www.epa.gov/osw/non-haz/municipal/pubs/msw2001.pdf> [15 de diciembre de 2012].
- [30] Diputación de Barcelona: <http://www.diba.cat/documentos/471041/3318d11c-c9a5-4079-9bcd-3cd723a1a512> [15 de diciembre de 2012].
- [31] European Environment Agency (EEA). Waste opportunities. Past and future climate benefits from better municipal waste management in Europe. European Environment Agency. Report N° 3/2011. 2011.
- [32] Fundació Fórum Ambiental. La mejora en la prevención y la gestión de los residuos municipales en España contribuye a la lucha contra el cambio climático. 2012.
- [33] Hogland, W.; Jagodzinski, K.; Meijer, J.E. Landfill mining tests in Sweden. Proceedings Sardinia '95, Fifth International Landfill Symposium, Cagliari, Italy, 1995, 783-794.
- [34] Prechthai, T.; Padmasri, M.; Visvanathan, C. Quality assessment of mined MSW from an open dumpsite for recycling potential. Resources, Conservation and Recycling 2008 (53), 70-78.
- [35] Zhao, Y.; Song, L.; Huang, R.; Song, L.; Li, X. Recycling of aged refuse from a closed landfill. Waste Management Research 2007 (25), 130-138.
- [36] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. Revised 2001 IPCC 1996 Guidelines.
- [37] United Nations Environmental Programme (UNEP). Waste and Climate Change. Global Trends and Strategy Framework. United Nations Environmental Programme. 2010.
- [38] Montero, E. La crisis de las tierras raras. Un testimonio de la irracionalidad de nuestro modelo económico. Primera parte. Cátedra RELEC. Universidad de Cádiz. 2012.
- [39] McDougall, F.R.; White, P.; Franke, M.; Hindle, P. Integrated solid waste management. A life cycle inventory (second edition). Procter & Gamble. 1995.
- [40] Diputació de Barcelona. Anàlisi del cicle de vida aplicada a diferents models de gestió de residus urbans en diferents municipis de la província de Barcelona. Diputació de Barcelona. Servei de Medi Ambient. Noviembre de 2002.
- [41] Barcelona Regional. Pla de millora energètica de Barcelona. Barcelona Regional. Sodupe, M. (Dir.), 2002.