



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Proyecto de recuperación de recursos mediante minería de
vertederos en el vertedero de Dos Aguas.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

AUTOR/A: Rodriguez Rodriguez, Maria

Tutor/a: Bouzas Blanco, Alberto

Cotutor/a externo: BORRAS FALOMIR, LUIS

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



VNIVERSITAT
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

**Proyecto de recuperación de recursos mediante
minería de vertederos en el vertedero de Dos Aguas.**

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

Autora: Rodríguez Rodríguez, María

Tutor: Bouzas Blanco, Alberto

Cotutor externo: Borrás Falomir, Luis

Curso académico: 2022/23

RESUMEN

Los residuos sólidos representan un problema creciente debido a su producción y acumulación descontrolada. Esto conlleva emisiones de gases (metano, dióxido de carbono y olores), pérdida de recursos valiosos (plásticos, metales, energía) y generación de lixiviados. Los vertederos siguen siendo una de las principales formas de disposición de residuos representando aproximadamente el 40% de la gestión total.

En este contexto, la minería de vertederos surge como una alternativa para recuperar recursos y reducir el impacto ambiental. En este estudio se revisan los procedimientos utilizados en la minería de vertederos y se exploran oportunidades para aprovechar los residuos excavados. Se ha determinado que la vía de recuperación energética "Waste to Energy" es la más viable.

Como caso concreto, se propone un proyecto de minería de vertederos en el Vertedero de "Dos Aguas" en la Comunidad Valenciana. Se aplicarán las técnicas identificadas en el estudio bibliográfico para maximizar la recuperación de recursos y minimizar el impacto ambiental, consistentes en una primera separación mediante una pantalla trómel de dos líneas: la línea de la fracción gruesa (> 40 mm) y la línea de la fracción fina (< 40 mm). La línea gruesa se somete a una separación por densidad donde la fracción ligera constituirá la fracción combustible que se peletizará para constituir un Combustible Sólido Recuperado. La fracción fina se somete a dos separaciones con el objetivo de obtener los metales férricos y no férricos y poder venderlos para así incrementar los ingresos del proceso.

Pese a que el balance final no es económicamente viable, se propone desarrollar nuevas tecnologías para reducir los costes del proceso y se mencionan los numerables beneficios sociales y medioambientales que se deben considerar más allá del resultado económico.

Palabras clave: Minería de vertederos; residuos; recuperación energética; recuperación de residuos; reciclaje.

ABSTRACT

Solid waste represents a growing problem due to its uncontrolled production and accumulation. This leads to the emission of gases (methane, carbon dioxide, and odors), loss of valuable resources (plastics, metals, energy), and generation of leachate. Landfills continue to be one of the main waste disposal methods, along with incineration and recycling, accounting for approximately 40% of total waste management.

In this context, landfill mining emerges as an alternative to recover resources and reduce environmental impact. This study reviews the procedures used in landfill mining and explores opportunities to utilize excavated waste. It has been determined that the "Waste to Energy" recovery pathway is the most viable.

As a specific case, a landfill mining project is proposed for the "Dos Aguas" landfill in the Valencian Community. The techniques identified in the literature study will be applied to maximize resource recovery and minimize environmental impact. These techniques involve a initial separation using a two-line trommel screen: the line for the coarse fraction (> 40 mm) and the line for the fine fraction (< 40 mm). The coarse fraction is then subjected to a density-based separation in an air drum, where the light fraction will constitute the combustible fraction that will be pelletized to create a Recovered Solid Fuel. The fine fraction undergoes two separations with the aim of obtaining ferrous and non-ferrous metals, which can be sold to increase process revenue.

Despite the final balance not being economically viable, the proposal is to develop new technologies to reduce process costs, and the numerous social and environmental benefits are mentioned that should be considered beyond the economic outcome.

Key words: Landfill mining; residue; resource recovery; energetic valorization; recycle.

ÍNDICE

1.	OBJETO.....	8
2.	CONSIDERACIONES BÁSICAS	2
2.1.	Tratamiento de residuos	3
2.2.	Marco legal	5
2.3.	Minería de vertederos	7
2.3.1.	Estudios preliminares	8
2.3.2.	Excavación	8
2.3.3.	Separación por tamaño	11
2.3.4.	Caracterización de la muestra	12
2.3.5.	Separación de metales	14
2.3.6.	Separación de la fracción combustible.....	17
2.3.7.	Recuperación de Energía	18
2.3.8.	Recuperación de Materiales.....	26
3.	CASO DEL VERTEDERO DE “DOS AGUAS”	30
3.1.	Descripción del vertedero en estudio	31
3.2.	Propuesta de tratamiento de minería del vertedero.....	34
3.3.	Diagrama de bloques del proceso	39
3.4.	Balances de materia	40
3.4.1.	Consideraciones iniciales.....	40
3.4.2.	Caracterización de los residuos.....	41
3.4.3.	Separación en trómel	41
3.4.4.	Línea de finos.....	41
3.4.5.	Línea de la fracción gruesa	45
3.4.6.	Potencial total.....	47
3.5.	Balance económico.....	51
3.5.1.	Capital de inversión	52
3.5.2.	Capital de operación.....	54
3.5.3.	Estimación de ingresos	58
3.6.	Rentabilidad y conclusiones	59
4.	BIBLIOGRAFÍA	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tratamiento de residuos municipales urbanos en la Unión Europea entre 1995 y 2021 (Eurostat, 2022b).	3
Figura 2. Aumento de la cantidad de residuos recuperados en 2020 (Eurostat, 2022a). 4	
Figura 3. Tratamiento final de los residuos en España en el año 2020 (Instituto Nacional de Estadística, 2020).	5
Figura 4. Excavadora de orugas (Volvoce, 2023a).	9
Retroexcavadora (Quipp, 2023a).	9
Figura 5.	
Figura 6. Camión de volteo para el transporte del material (Quipp, 2023b).	10
Figura 7. Cinta transportadora (Conveyors & drivers, 2023).	10
Figura 8. Criba tipo trómel con dos tamaños diferentes de criba. (Apuntes de la asignatura)	11
Figura 9. Imán para encima de la cinta transportadora (Magsy, 2023a).	15
Figura 10. Imán de tambor (911Metalurgist, 2023).	16
Figura 11. Separador de metales por corrientes de Foucault (Magsy, 2023b).	16
Figura 12. Separador de tambor (biocycle.net, 2016).	17
Figura 13. Vías de valorización energética de los plásticos (Shah et al., 2023).	22
Figura 14. Esquema de un sistema de pirólisis de plásticos (Rajmohan et al., 2020).	25
Figura 15. Esquema del proceso propuesto por Jones (2013) para la recuperación de materiales.	28
Figura 16. Línea de tratamiento que siguen los residuos de Los Hornillos (UTE Los Hornillos, 2023).	31
Figura 17. Mapa donde se muestra el vertedero (marcador) y las plantas de tratamiento de donde proceden los residuos, en Manises y Quart de Poblet (círculo rojo) (Google, 2023).	32
Figura 18. Mapa del vertedero (rojo) y los núcleos poblacionales más cercanos (verde)(Google, 2023).	32
Figura 19. Vasos 1 (azul) y 2 (amarillo) del Vertedero de Dos Aguas)(Google, 2023).	33

Figura 20. Disposición de la excavación realizada por (Jain et al., 2023).....	35
Figura 21. Retroexcavadora de la marca Volvo, modelo BL70B (Volvoce, 2023b).	36
Figura 22. Excavadora de oruga de la marca Volvo (Volvoce, 2023b).	36
Figura 23. Cinta transportadora en un proyecto de Fenner Dunlop (Fenner Dunlop, 2023).	37
Figura 24. Trómel de la marca Eggersmann modelo Terra Select T70 (Eggersmann Recycling Technology, 2023).	37
Figura 25. Separador de aire Resoline Air Flow (ERGA, 2023).	37
Figura 26. Electroimán de la marca magnetix (magnetix, 2023b).	38
Figura 27. Separador de metales no férricos por corrientes de Fourier de la marca magnetix (magnetix, 2023a).	38
Figura 28. Peletizadora industrial (Peletizadoras Smart Wood, 2023).	38
Figura 29. Diagrama de bloques propuesto del proceso (Elaboración propia).	39
Figura 30. Parte del diagrama que trata la fracción fina y porcentajes finales obtenidos.	
45	
Figura 31. Parte del diagrama que trata la línea de gruesos y porcentajes obtenidos..	47
Figura 32. Diagrama de bloques con los datos calculados.	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de la mezcla de residuos extraídos de vertederos en diferentes artículos (Elaboración propia).	13
Tabla 2. Concentraciones de metales en distintos proyectos de minería de vertederos (Elaboración propia).	14
Tabla 3. Valores del poder calorífico para SRF en distintos artículos.	18
Tabla 4. Clasificación de SRF según la norma EN 15359:2012 (Ramos Casado et al., 2016).	19
Tabla 5. Rendimientos y productos de procesos de pirólisis para diferentes materias primas con plásticos (Senthil Rathi et al., 2023).	26
Tabla 6. Caracterización de los residuos recibidos por el vertedero procedentes del rechazo de las plantas de tratamiento de RSU.	34
Tabla 7. Caracterización aproximada de los residuos a partir de datos bibliográficos. .	41
Tabla 8. Concentración en porcentaje en peso de los metales no férricos más abundantes.	42
Tabla 9. Composición de las fracciones obtenidas en la línea de finos.	44
Tabla 10. Composiciones finales obtenidas en la línea de gruesos.	46
Tabla 11. Composiciones de las fracciones obtenidas.	48
Tabla 12. Factores de Lang (Peters & Timmerhaus, 2002).	52
Tabla 13. Coste de los equipos propuestos para el procedimiento descrito.	53
Tabla 14. Potencia de los equipos propuestos para el proceso.	55
Tabla 15. Consumo de combustible anual de los camiones y excavadoras empleados.	56
Tabla 16. Resumen de los costes calculados para el proyecto.	57

1. OBJETO

El presente trabajo fin de máster tiene como objetivo conocer el estado actual de la técnica de minería de vertederos y proponer un procedimiento mediante el cual se recuperen los residuos enterrados en el vaso 1 clausurado del vertedero de Dos Aguas.

Con este procedimiento propuesto, se pretende obtener un combustible derivado de los residuos excavados (Combustible Sólido Recuperado, CSR o Solid Recovered Fuel, SRF) y se extraerían los metales con el fin de incrementar el beneficio económico para buscar la rentabilidad económica de este proyecto.

Se describirán en este documento todas las etapas del proceso, partiendo de la excavación de la materia prima hasta obtener un combustible SRF, los metales férricos y no férricos separados, una fracción inerte y una fracción fina de material tipo suelo.

Para ello, se llevarán a cabo en este proyecto las siguientes tareas:

- Descripción del estado del arte de la tecnología de minería de vertederos y analizar los avances y proyectos realizados en la actualidad.
- Proponer un procedimiento con el que se pudiese llevar a cabo un proyecto de minería de vertederos en un caso real según las características del vertedero.
- Estudiar y comparar las diferentes alternativas de recuperación de residuos procedentes de vertedero.
- Estudiar la viabilidad de un proceso de minería de vertederos en el caso concreto del vertedero de Dos Aguas.

2. CONSIDERACIONES BÁSICAS

2.1. Tratamiento de residuos

Los residuos sólidos suponen un gran problema actualmente debido a la creciente producción y su consiguiente acumulación y gestión. La acumulación incontrolada de estos residuos conlleva problemas de emisiones a la atmósfera (metano, dióxido de carbono y olores), de pérdida de recursos como plásticos, metales y energía, al no ser debidamente recuperados y tratados, y la generación de lixiviados.

El depósito de los residuos en vertederos sigue siendo una de los principales destinos de estos residuos, junto con la incineración y el reciclado, como se puede observar en la Figura 1. En el año 2018, un 40% de los residuos globales fueron depositados en vertederos, un 19% tratados en plantas de reciclaje y un 11% fueron incinerados, variando estos datos según el grado de desarrollo del país en cuestión (Kaza et al., 2018).

En la Unión Europea en el año 2021, de 530 kg por cápita de residuos producidos, un 23% se depositaron en vertederos, un 27% a incineración, un 30% a reciclaje y un 19% a compostaje. (Eurostat 2022b)

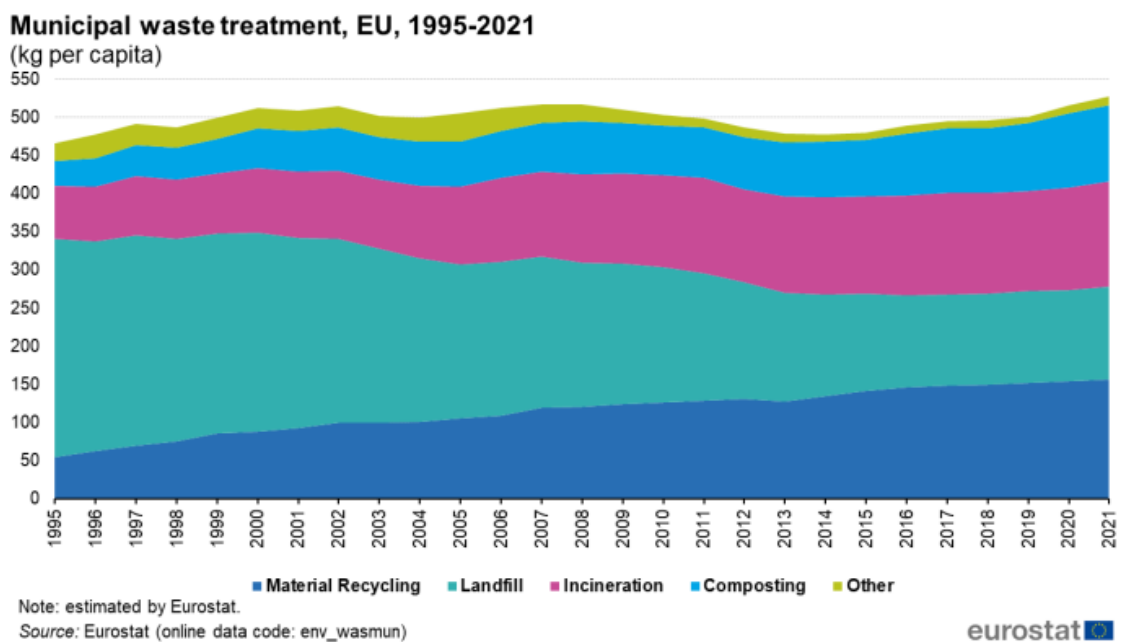
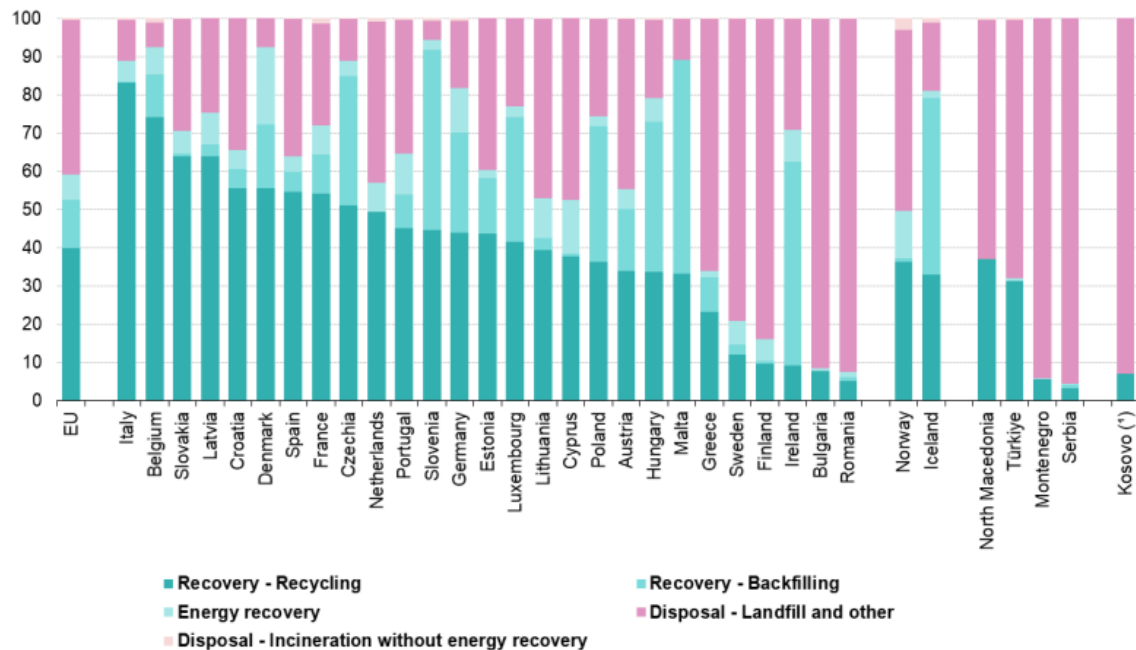


Figura 1. Tratamiento de residuos municipales urbanos en la Unión Europea entre 1995 y 2021 (Eurostat, 2022b).

En Europa en el año 2020, tal y como se muestra en la Figura 2 , más del 60% de los residuos se destinaron a actividades de recuperación, donde casi un 40% de los residuos son reciclados, un 15% para ‘backfilling’ (se utilizan los desechos para fines de recuperación en áreas excavadas o con fines de ingeniería en paisajismo) y un 6% para recuperación de energía, con un porcentaje más alto para el reciclado en España, como se muestra en el diagrama de la Figura 3. El 40% restante terminó depositado en un vertedero (31%) o en un proceso de incineración sin recuperación de energía (Eurostat, 2022a).

Waste treatment by type of recovery and disposal, 2020
(% of total treatment)



(*) This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo Declaration of Independence.
Source: Eurostat (online data code: env_wastrt)



Figura 2. Aumento de la cantidad de residuos recuperados en 2020 (Eurostat, 2022a).

Tratamiento final de residuos (porcentaje). Año 2020



Figura 3. Tratamiento final de los residuos en España en el año 2020 (Instituto Nacional de Estadística, 2020).

2.2. Marco legal

Los vertederos se definen, según el Real Decreto 646/2020, como las instalaciones para la eliminación de residuos mediante depósito en superficie o subterráneo.

Según dicho decreto se pueden clasificar los tipos de vertederos en las siguientes clases:

- Clase A: Para residuos inertes
- Clase B: Para residuos no peligrosos
- Clase C: Para residuos peligrosos

Clase DHAZ: Almacenamientos subterráneos

(España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico , 2020).

El vertedero de estudio entra en la clase B de residuos no peligrosos, ya que almacena los rechazos procedentes de las plantas de tratamiento de residuos urbanos del Área Metropolitana de Valencia situadas en Quart de Poblet y Manises.

Según el Real Decreto 646/2020 los vertederos de residuos no peligrosos pueden admitir residuos municipales no peligrosos que no sean reciclables o valorizables, residuos no peligrosos de cualquier otro origen que cumplan los requisitos fijados en el anexo II del BOE, y residuos peligrosos no reactivos estables o provenientes de un proceso de estabilización.

Dado que la minería de vertederos es un tema muy actual y del que se está empezando a investigar, no se encuentra legislación específica a nivel nacional.

A nivel europeo, el Parlamento Europeo votó en 2017 para integrar la minería de vertederos en la legislación europea. Para 2025, los Estados miembros deben de mapear los vertederos existentes en su territorio e indicar el potencial para un proyecto de minería (European Parliament, 2018).

En el segundo seminario de minería de vertederos mejorada (Enhanced Landfill Mining, ELM) en el Parlamento Europeo, se puso el foco en una gestión integral de los vertederos donde, aunque la minería de vertederos sigue siendo un concepto muy valioso, se contempla como un componente más específico dentro de esa gestión integral (Jones et al., 2018).

Respecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la minería de vertederos se relaciona con los siguientes ODS en las metas descritas a continuación:

- Con el número 12, referido a los patrones de producción y consumo sostenibles, por las metas de “Gestión sostenible y uso eficiente de recursos naturales”, y “Gestión ecológica de residuos”.
- Con el ODS 8, sobre trabajo decente y crecimiento económico, con la meta “Producción y consumo eficientes de los recursos y desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente”.
- Con el ODS 3, sobre salud y bienestar con la meta de “Reducir el número de enfermedades por productos químicos y peligrosos y contaminación”.

- Con el ODS 6, sobre desechos limpios y saneamiento, con la meta de “Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación y la emisión de productos químicos”.

(BBVA, 2021; Naciones Unidas, 2020).

2.3. Minería de vertederos

La minería de vertederos es uno de los métodos que se está desarrollando para tratar de reducir la contaminación y conseguir la recuperación de materiales y aprovechamiento de potenciales recursos.

Consiste en la extracción y procesado de los residuos de un vertedero activo o cerrado, con diferentes objetivos como la eliminación de posibles fuentes futuras de contaminación y mitigación de las actuales, reducción del coste del sistema de gestión de residuos actual, eliminación de cuestiones técnicas y administrativas relativas al posterior cuidado del vertedero, aumento de la capacidad del depósito, recuperación de la energía y materias primas, generación de nuevos terrenos para expansión urbana, etc. (Jain et al., 2013; Raga & Cossu, 2018).

Basado en la revisión bibliográfica, el proceso a seguir en la tecnología de minería de vertederos podría comenzar con un estudio preliminar de la zona y los residuos y de las condiciones ambientales del vertedero, seguida por una excavación, caracterización que determinará el posterior tratamiento del excavado, separación por fracciones y tratamiento del material excavado y, por último, una valorización, ya sea reciclaje, valorización energética o recuperación de materiales entre otros fines.

A continuación, se detallarán las etapas del proceso con las tecnologías utilizadas en cada una de ellas:

2.3.1. Estudios preliminares

Es necesario un estudio preliminar de las condiciones ambientales del vertedero para planear el excavado y evitar así dificultades técnicas debidas, por ejemplo, a altos niveles de lixiviado o emisiones indeseadas de biogás. Por ello, es conveniente realizar los siguientes estudios preliminares para detallar la información del proyecto a desarrollar:

- Características del vertedero como investigaciones geofísicas para la evaluación de la zona, del grosor y la extensión de la zona del depósito, la presencia de lixiviado en las capas del vertedero y la estabilidad cuando se vaya a realizar la excavación.
- Caracterización de los residuos, que dependerán del tipo de vertedero que es, la procedencia de los residuos depositados y de la edad y de la profundidad del vertedero, entre otras. Para ello se suelen analizar muestras en diferentes puntos del vertedero y a diferentes profundidades, y ayudará a estimar el potencial de recuperación del vertedero en cuestión.
- Evaluación de las condiciones ambientales del vertedero como la posible producción de lixiviado y su acumulación, y la producción de biogás y las emisiones actuales. De esto dependerán decisiones técnicas como el tipo de maquinaria para excavar, de medidas de prevención a tomar en cuenta para prevenir contaminación y peligrosidad y de la selección del pretratamiento adecuado (Jones et al., 2013; Raga & Cossu, 2018).

2.3.2. Excavación

La excavación y la correcta elección de la maquinaria y el procedimiento tras la evaluación de la zona es uno de los pasos que más influyen en la viabilidad de los procesos de minería de vertederos.

La maquinaria usada en la excavación será la típicamente utilizada en minería en superficie o en vertederos, como excavadoras y retroexcavadoras. Se puede emplear la tecnología de perforación (drilling) del vertedero, así como de excavación.

La perforación se suele emplear en experimentos a escala de planta piloto, ya que, aunque puede alcanzar mayores profundidades, puede reducir el tamaño de partícula y conlleva mayores costes de operación, mientras que para proyectos de mayor escala se utilizaría la maquinaria de excavación como excavadoras hidráulicas como excavadoras de orugas (Figura 4), excavadoras retroexcavadoras (Figura 5), o tractores bulldozer entre otros (Ford et al., 2013; Jain et al., 2013; Kaartinen et al., 2013).



Figura 4. Excavadora de orugas (Volvoce, 2023a). 2023a).



Figura 5. Retroexcavadora (Quipp, 2023a).

Una vez excavada la zona y extraída la muestra, se apilan y se separan los elementos voluminosos con maquinarias como palas cargadoras y tractores bulldozer.

Para transportar el material excavado se pueden emplear camiones de volteo (Figura 6) y para transportar el material, cintas transportadoras (Figura 7) (Jain et al.,



2023).

Figura 6. Camión de volteo para el transporte del material (Quipp, 2023b).



Figura 7. Cinta transportadora (Conveyors & drivers, 2023).

Hay que tener en cuenta la correcta evaluación de las condiciones ambientales del vertedero, ya que pueden ocurrir problemas técnicos como altos niveles de lixiviado o acumulación de biogás que dificulte el excavado.

2.3.3. Separación por tamaño

Una vez extraído el material, en algunos casos se puede proceder a una reducción de tamaño normalmente mediante trituradoras de baja velocidad, aunque con la propia acción de excavar se conseguirá un tamaño adecuado para seguir con el procedimiento (Ford et al., 2013; Kaartinen et al., 2013).

El siguiente paso consiste en la clasificación de los residuos excavados. Existe la posibilidad de realizar una clasificación manual en lugar de seguir con este tratamiento mecánico (Kaartinen et al., 2013), pero con el objetivo de industrializar y agilizar este procedimiento, se contemplará en este estudio únicamente el tratamiento mecánico.

Para la separación de las fracciones, se pueden emplear cribas vibratorias, cribas de discos o cribas tipo trómel. Las cribas más utilizadas son las de tipo trómel (Figura 8), que consisten en un tambor cilíndrico, que puede estar inclinado, con unas cribas en su interior perforadas con un determinado diámetro con el objetivo de separar el material en fracciones de diferentes tamaños a medida que avanza por el movimiento rotatorio del trómel.

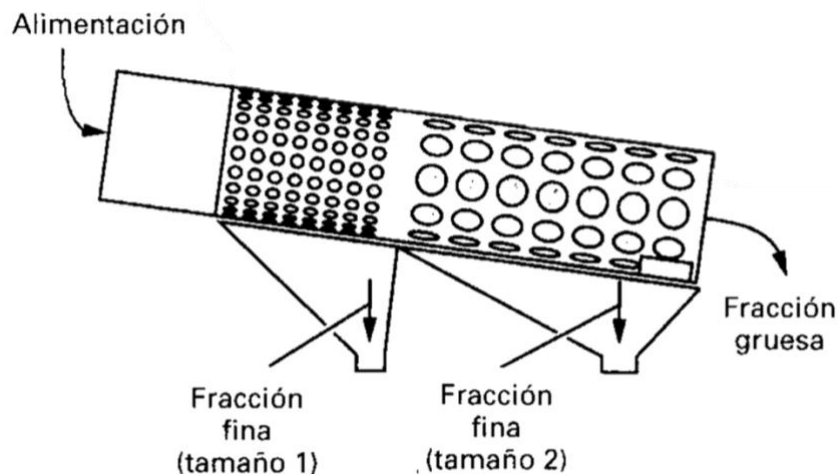


Figura 8. Criba tipo trómel con dos tamaños diferentes de criba. (Apuntes de la asignatura)

Los estudios de minería de vertederos presentan normalmente un cribado por trómel con una única criba o dos cribas.

En el primer caso, el tamaño de los orificios de la criba sería alrededor de 30-50 mm, con el objetivo de separar una fracción gruesa con mayoritariamente los combustibles e inertes, y una fracción fina con material tipo suelo y metales.

En el caso de dos cribas se obtendrían 3 fracciones. Se han encontrado proyectos en los que el tamaño mayor de criba es de 50-40 mm y el tamaño menor varía de 10 a 25 mm (Bhatnagar et al., 2017; Ford et al., 2013; Jain et al., 2023; Kaartinen et al., 2013; Prechthai et al., 2008). Así, en una separación con trómel en el que los tamaños de las cribas del trómel fueran de 50 mm la mayor y 18 la menor, se obtendrían las siguientes fracciones: una fracción mayor de 50 mm, una fracción con tamaños comprendidos entre 18 y 50 mm y una última fracción con tamaño menor de 18 mm.

2.3.4. Caracterización de la muestra

La composición de los residuos depositados difiere ampliamente según varios factores del vertedero como la zona geográfica donde esté situada, la edad, el tipo de residuos depositados (si es un vertedero de residuos sólidos urbanos, de residuos industriales, etc.) (Jain et al., 2013).

La localización puede influir en que, por ejemplo, en países más desarrollados habrá un mejor sistema de recogida y tratamiento de residuos por lo que llegará al vertedero principalmente el rechazo de esas plantas de reciclaje. La edad influye en la composición de manera que, una muestra de mayor edad tendrá una menor cantidad de materia orgánica debido a la descomposición (Prechthai et al., 2008) y también mayor cantidad de plásticos, ya que su uso ha ido aumentando en los últimos años así como su desecho (Kaartinen et al., 2013).

La fracción fina está compuesta por metales; materia orgánica degradada, dependiendo de la edad del vertedero; material tipo suelo o tierra, que puede desembocar en tierra para uso como agregado en construcción; y pequeñas fracciones de otras partículas procedentes de plástico o cristal (Ambiente Plástico, 2020). La fracción gruesa se compone principalmente por papel, cartón, plásticos, madera y

textiles, por lo que se suele denominar fracción combustible al poseer de un alto poder calorífico (Raga & Cossu, 2018).

En cuanto a las caracterizaciones encontradas en la bibliografía, no se suele especificar un porcentaje de textiles. Esto es debido a que el textil se suele clasificar dentro de la fracción de plásticos por la imposibilidad de determinar si el textil era sintético o natural (Bhatnagar et al., 2017).

Se recogen en la Tabla 1 caracterizaciones de diferentes estudios. Se presentan porcentajes para la fracción de finos, entre los que se especifican los metales; la fracción combustible, dentro de la que se encuentran los plásticos y en algunos casos solo se especifica este porcentaje; y la fracción de inertes.

Tabla 1. Caracterización de la mezcla de residuos extraídos de vertederos en diferentes artículos (Elaboración propia).

Referencia	Localización	Finos (%)	Fracción				Inertes (%)
			Metales (%)	combustible (%)	Plásticos (%)	Textiles (%)	
Pecorini & Iannelli, 2020	Italia	34 ± 19	0,8 ± 0,7		25 ± 10	8 ± 4	7 ± 4
Quaghebeur et al., 2013	Bélgica	45 ± 18	2,2 ± 2		25 ± 13	6,8	
Spooren et al., 2013	Bélgica	43	2-3		16	5	2,2
Kaartinen et al., 2013	Finlandia	46	4		24	8	
Prechthai et al., 2008	Tailandia	19-39	7,8		35-51	9,3	
Bhatnagar et al., 2017	Estonia		5,8		38		
Ortner et al., 2014	Alemania		3,75		15-50		
Krook et al., 2012	Varias	50-60	1-2	20-30			10
Raga & Cossu, 2018	Varias	40-60		20-50			10-20

En cuanto a los metales, se muestra en la Tabla 2 la concentración de metales obtenidos en mayor cantidad en distintos proyectos de vertederos de residuos municipales urbanos. Las mayores concentraciones para varios proyectos suelen ser del Calcio, el Hierro y el Magnesio, seguidos por el Zinc. En el estudio realizado por Ford (2013), solamente distingue que un 1,7% de los metales son férricos, un 0,1% es aluminio y el resto no férricos.

Tabla 2. Concentraciones de metales en distintos proyectos de minería de vertederos (Elaboración propia).

Referencia	Localización	Ca (g/kg)	Fe (g/kg)	Mg (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Si (g/kg)
Bhatnagar et al., 2017	Estonia	75	35	1500	1500	250	100	150	
Quaghebeur et al., 2013	Bélgica	28	27		667	291	496	340	240
Spooren et al., 2013	Bélgica	38	38	5000	560	660	720	350	272
Kaartinen et al., 2013	Finlandia	8,5 %(w/w)	3,7 %(w/w)	1,2 %(w/w)	0,06 %(w/w)	0,01 %(w/w)	0,01 %(w/w)	0,08 %(w/w)	20 %(w/w)
Prechthai et al., 2008	Tailandia				313	43	43	151	
Hölzle et al., 2022	India y Alemania		3,75		15-50				

Hay variaciones en cuanto a la caracterización de metales en los diferentes estudios, ya que es un parámetro muy dependiente de la región, actividades cercanas, etcétera, teniendo un valor superior en vertederos destinatarios de residuos industriales.

2.3.5. Separación de metales

Los metales presentan una concentración de un 2% aproximadamente en vertederos de residuos sólidos urbanos y se suelen encontrar en la fracción fina

obtenida del trómel. El interés de la recuperación de estos metales de los vertederos crecerá, ya que su demanda ya está subiendo. Pero la separación de metales presenta dificultades técnicas y altos costes que hace que la viabilidad de su separación sea cuestionable (Raga & Cossu, 2018; Wagner & Raymond, 2015).

Bhatnagar et al. (2017) apunta que la alternativa de recuperación de los metales irá ganando importancia debido a la creciente demanda de estos y la menor disponibilidad de los recursos naturales. En su artículo, identifica en cuatro muestras diferentes de vertederos de residuos municipales urbanos que los metales en mayor concentración son el Calcio y el Hierro con cantidades de hasta más de 50 g/kg de muestra; seguidos de Magnesio, Potasio, Sodio y Zinc, de unos 10-20 g/kg, y otros metales como Cobre, Níquel, etcétera, en proporción menor a 500 mg/kg. Señala que metales como el Cobre y el Magnesio tienen una gran importancia dada su dudosa disponibilidad en el futuro (Comisión Europea, 2010).

Para la separación de metales férricos se emplean separadores magnéticos, normalmente electroimanes de tambor o 'over-band' (Ford et al., 2013). El funcionamiento de estos separadores consiste en un campo magnético creado por imanes permanentes o bobinas electromagnéticas. El campo magnético generado atrae los materiales férricos hacia la bobina separándolos del resto de materiales. Los imanes se colocan encima de las cintas transportadoras donde irán los residuos, atrayendo los metales férricos en contra de la gravedad y separándolos del resto de metales (Figura 9).

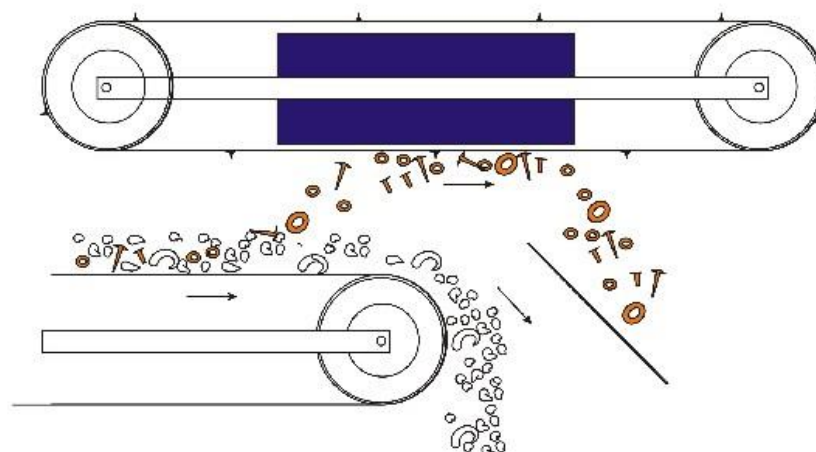


Figura 9. Imán para encima de la cinta transportadora (Magsy, 2023a).

Los imanes de tambor funcionan mejor para metales férricos pesados. En este caso, se coloca el tambor próximo a la cinta transportadora de residuos y los materiales férricos se separan del resto quedándose atraídos en el tambor (Figura 10).

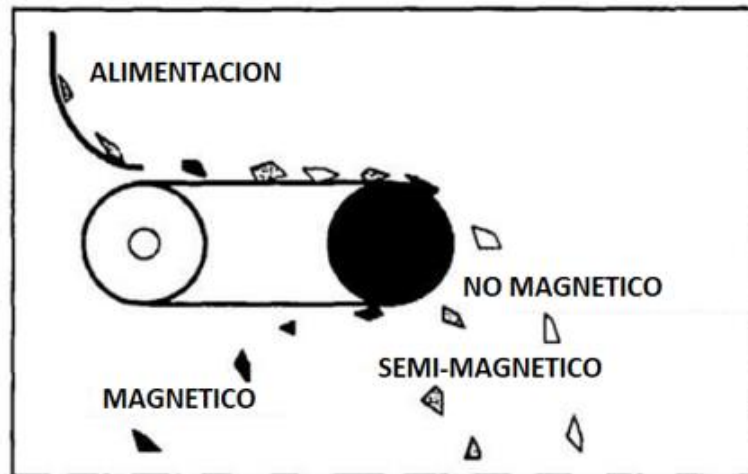


Figura 10. Imán de tambor (911Metalurgist, 2023).

Para la separación de metales no férricos se utiliza un separador de corrientes de Foucault (Figura 11) basado en un campo magnético variable. Al someter un metal no férrico en este campo, se inducirá un campo magnético opuesto en polaridad al aplicado que expulsa al metal fuera del campo magnético (Ley de Faraday).

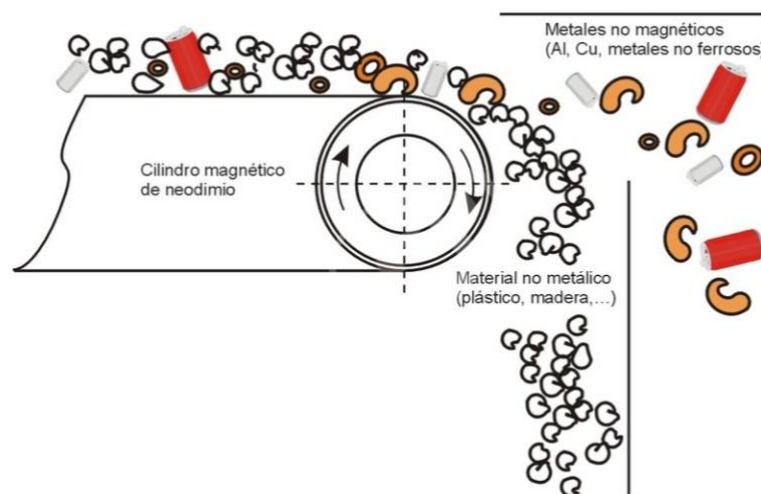


Figura 11. Separador de metales por corrientes de Foucault (Magsy, 2023b).

El presente estudio se centra en los residuos sólidos urbanos; sin embargo, en vertederos de residuos industriales se ha encontrado una cantidad de metales de hasta el 30% (Jones et al., 2013), por lo que hay que tener en cuenta que presentaría un alto potencial en cuanto a recuperación de estos metales.

2.3.6. Separación de la fracción combustible

La fracción combustible, como se ha explicado en el apartado 2.3.4 “Caracterización de los residuos”, está compuesta por papel, cartón, plásticos, madera y textiles, y se suele encontrar en la fracción gruesa obtenida en el trómel (Raga & Cossu, 2018). En algunos estudios se coloca un separador de tambor tras la criba con trómel y el imán con el objetivo de separar, dentro de la fracción gruesa, una fracción más ligera que corresponderá a esta fracción combustible, siendo la pesada compuesta por rocas, cerámica y cristales (Ford et al., 2013).

El separador de aire de tambor (Figura 12) consiste en una separación por densidad, forma y propiedades aerodinámicas. El material es alimentado por la cinta transportadora y pasa por una corriente de aire que levanta la fracción separándose y que atraviesa el tambor rotatorio por la parte superior, mientras que la fracción pesada continúa en la cinta atravesando el tambor por la parte inferior (Impact air systems, 2023).

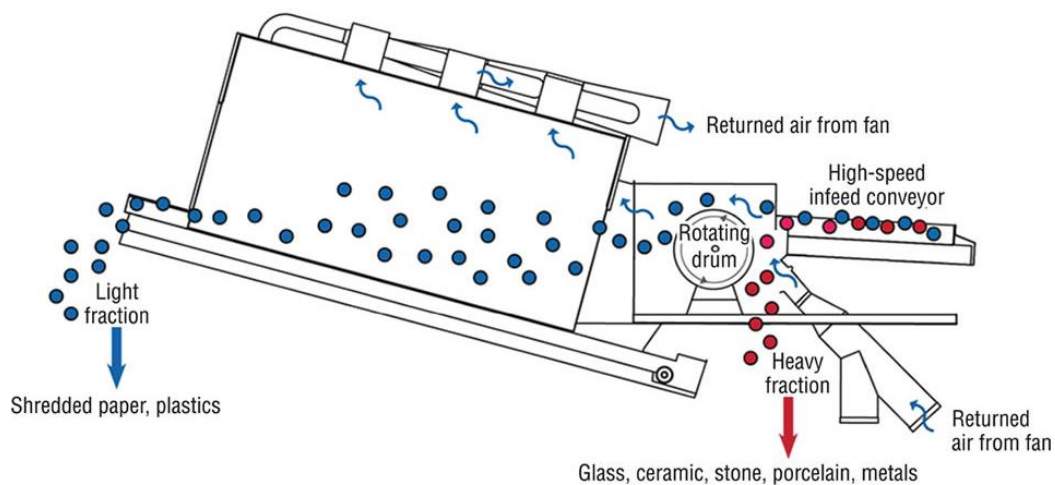


Figura 12. Separador de tambor (biocycle.net, 2016).

Una vez eliminados los metales de la fracción fina, se podría emplear este material “tipo suelo” como compost en plantaciones de cultivos. Si los metales son separados de manera adecuada, se procederá a su recuperación directamente (Jain et al., 2023).

2.3.7. Recuperación de Energía

2.3.7.1. Fracción combustible

Tras las operaciones explicadas en apartados anteriores de separación por tamaños, separaciones ópticas, mecánicas, reducción de tamaño y otras, queda una fracción con alto poder calorífico que se suele denominar con el término *Solid Recovered Fuel* (SRF), o en español como *Combustible Sólido Recuperado* (CSR). Se muestra en la Tabla 3 algunos de los valores caloríficos de fracciones de SRF obtenidos en la bibliografía:

Tabla 3. Valores del poder calorífico para SRF en distintos artículos.

Referencia	Poder calorífico (MJ/kg)
Jones et al., 2013	19-25
Raga & Cossu, 2018	20
Prechthai et al., 2008	36
Spooren et al., 2013	18
Faitli et al., 2019	22,7
Ramos Casado et al., 2016	20,3

Esta fracción combustible se rige según la norma europea EN 15359:2012, que establece, por un lado, los métodos a seguir para la determinación de diferentes parámetros que caracterizan los SRF, y por otro, los parámetros importantes para la

calidad de dichos combustibles: el poder calorífico inferior (PCI), como parámetro económico; el contenido de cloro, como parámetro técnico; y el contenido de mercurio, como parámetro medioambiental (Gallardo Izquierdo et al., 2017).

La Tabla 4 indica la clasificación según los valores de estos parámetros. Cada parámetro se divide en 5 clases con sus correspondientes valores límites, y se le asigna un valor del 1 al 5 según los valores. Por ejemplo, un combustible SRF con un PCI de 20 MJ/kg (clase 2), un contenido en cloro de 0,2 % (clase 1), y un contenido en mercurio de 0,15 mg/kg (clase 4), obtendrá el código 214.

Tabla 4. Clasificación de SRF según la norma EN 15359:2012 (Ramos Casado et al., 2016).

SRF classes					
Parameter	1	2	3	4	5
NCV, MJ/kg (a.r.), average value	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
Chlorine (Cl), % d.b., average value	≤0.2	≤0.6	≤1.0	≤1.5	≤3.0
<i>Mercury (Hg) mg/kg (a.r.)</i>					
Median	≤0.02	≤0.03	≤0.08	≤0.15	≤0.50
80th % percentile	≤0.04	≤0.06	≤0.16	≤0.30	≤1.00

Las distintas clases del SRF representan la calidad del producto, yendo de la clase 5 con la más alta calidad del SRF hasta la clase 1, con la calidad más baja. En función de la calidad, y las normativas locales, el SRF podría ser destinado a diferentes usos. Algunos de estos usos son como combustible en cementeras, en centrales térmicas convencionales, plantas industriales, incineración en hornos con recuperación de energía y otros usos como plantas de gasificación, pirólisis y plasma.

En la Lista Europea de Residuos (LER), los SRF reciben el código 191210: Residuos combustibles (combustibles derivado de residuos).

Por otra parte, existen los *Combustibles Derivados de Residuos* (CDR) o *Refuse Derived Fuels* (RDF) en inglés, que pueden ser también preparados a partir de residuos, sin embargo estos no están sometidos a la norma UNE EN 15359:2011 y solamente

cumplen con las especificaciones determinadas entre productos de combustible y usuario (Gaiker, 2021).

Algunas de las ventajas del uso de SRF frente al carbón o el coque de petróleo son la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera, preservar recursos naturales reduciendo la necesidad de explotar yacimientos de carbón y menor dependencia de los combustibles fósiles (BioHiTech Global, 2021; Hilber et al., 2007).

Una vez obtenida la fracción SRF y comprobado que cumple con los requisitos exigidos por la norma, se aglomera en pellets para densificar y tener un mejor manejo del SRF.

La cantidad de SRF producida a partir de tonelada de residuos sólidos urbanos a tratar varía entre un 23 y un 50% en peso, según el informe de Gendebien (2003) dependiendo de varios factores como la composición de los residuos, la eficiencia de los procesos utilizados en la separación, etc.

Como se ha mencionado, algunas de las posibilidades de la conversión de la fracción SRF en energía o combustibles son un proceso de conversión térmico integrado on-site, que puede incluir combustión en parrilla o lecho fluidizado, gasificación o pirólisis; una instalación remota off-site que utilice parrilla o lecho fluidizado, gasificación o pirólisis; co-combustión en calderas de carbón; co-incineración en hornos de cemento o co-gasificación con carbón o biomasa.

Lo más utilizado son las plantas de incineración; sin embargo, las plantas de gasificación y de pirólisis se presentan como alternativas más verdes y serán descritas más adelante (Gendebien et al., 2003). Los SRF producidos actualmente se están empleando mayoritariamente para hornos de cemento, ya que las características de estos combustibles permiten la valorización en estos hornos sustituyendo combustibles convencionales. En España en el año 2014, se ha incrementó el uso de combustibles alternativos en el sector cementero hasta alcanzar un 23% del consumo energético de las cementeras (Gallardo Izquierdo et al., 2017).

2.3.7.2. Valorización energética

El principal destino de esta fracción SRF producido es la valorización energética, en la que este combustible a partir de residuos se convierte en energía.

La Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados define la valorización como “cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir esa función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general “ (Ley 7/2022).

La valorización energética de SRF implica su aprovechamiento en plantas de incineración o co-incineración. Según el Real Decreto 815/2013 sobre incineración de residuos, se considera instalación de incineración la dedicada al “tratamiento térmico de residuos con o sin recuperación del calor producido por la combustión; mediante la incineración por oxidación de residuos, la pirólisis, la gasificación y proceso de plasma”, y como instalación de co-incineración “toda instalación cuya finalidad sea la generación de energía o fabricación de productos materiales y que utilice residuos como combustible habitual o complementario” (Real Decreto 815/2013).

Los plásticos suelen ser la fracción mayoritaria de las aprovechables en los vertederos. Es por ello que su potencial de recuperación es una de las tareas más importantes en un proyecto de minería de vertederos. Hay dos posibles vías en la recuperación de los plásticos: como materias primas para la producción de nuevos materiales de plástico reciclado o la obtención de combustibles mediante métodos térmicos de valorización energética dado a su alto poder calorífico (Bhatnagar et al., 2017; Prechthai et al., 2008).

Las operaciones de valorización energética tienen como objetivo transformar los residuos, que en este caso no pueden ser reciclados y tienen un alto poder calorífico, mediante la aplicación de energía calorífica (MITECO, 2023b) generando energía, ya sea en forma de electricidad, vapor o agua caliente.

La incineración es la aplicación más ampliamente desarrollada. En la incineración tiene lugar una reacción química que se basa en una oxidación térmica total en exceso de oxígeno. La temperatura de operación se encuentra entre los 900 y 1200°C, y se obtienen cenizas como residuo sólido y gases de combustión compuestos principalmente por CO₂, H₂O y O₂.

La incineración presenta desventajas como emisiones tóxicas y una gran producción de CO₂ (340 g CO_{2eq} por kWh) (Shah et al., 2023), por lo que se está empezando a contemplar el uso de gasificación o pirólisis como alternativas más verdes (Greene, 2015; MITECO, 2023b).

Se muestra a continuación (Figura 13) un esquema con las diferentes vías de valorización química de residuos, entre las que la pirólisis es ampliamente reconocida como el método más eficiente para la producción de petroquímicos y combustibles a partir de plásticos (Shah et al., 2023).

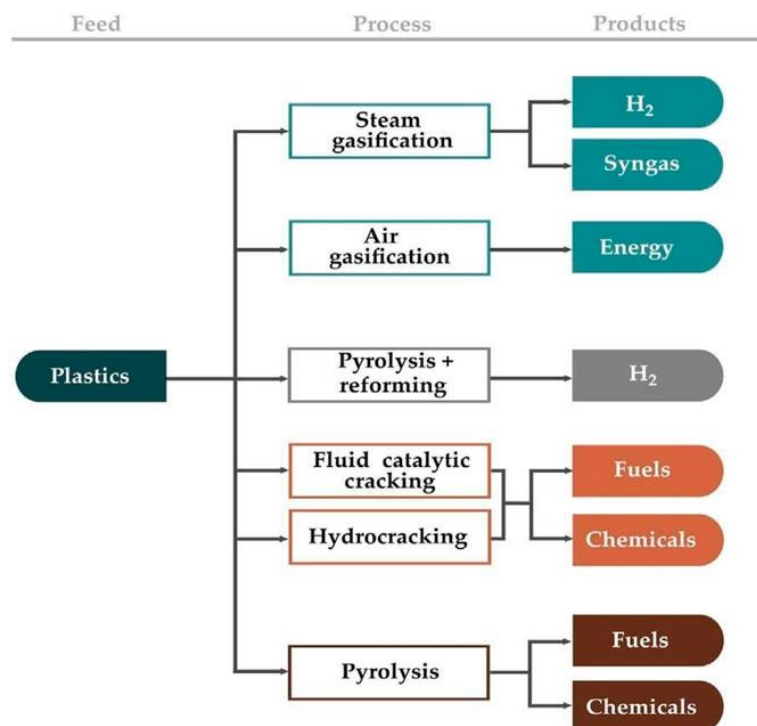


Figura 13. Vías de valorización energética de los plásticos (Shah et al., 2023).

La gasificación es la transformación del residuo mediante una acción combinada de un agente gasificante y el calor liberado por la combustión parcial del residuo. La cantidad de oxígeno empleada es menor de la estequiométrica, y la temperatura de operación suele superar los 750 °C.

Como resultado del proceso de gasificación se obtiene gas de síntesis (syngas), compuesto por monóxido de carbono e hidrógeno principalmente, con pequeñas cantidades de dióxido de carbono y metano, y un residuo sólido de carbones y cenizas denominado *char*, e hidrocarburos líquidos (aceites) (Greene, 2015; MITECO, 2023b; Rogoff & Screve, 2019).

El gas de síntesis puede ser usado como combustible para generar electricidad o vapor, y también podría ser usado en motores diésel o gasolina tras algunas modificaciones (Rogoff & Screve, 2019).

En cuanto a las emisiones procedentes de la combustión del syngas, se generan gases a concentraciones inocuas para la salud y medio ambiente. No obstante, la gasificación presenta desafíos importantes, ya que se necesita un pretratamiento para reducir la presencia de sustancias inertes, humedad y tamaño, así como tratamiento posterior para limpiar el gas de síntesis resultante (MITECO, 2023b).

La pirólisis es un proceso de combustión parcial en ausencia de oxígeno y en una atmósfera inerte proporcionada por un gas como el nitrógeno o por vacío, que genera una mezcla de gases, líquidos y residuos sólidos. La temperatura de operación es menor que la de gasificación, encontrándose entre los 300 y 800 °C.

Los productos obtenidos son: un gas cuyos componentes básicos son monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano; un residuo líquido compuesto mayoritariamente por hidrocarburos de cadenas largas; y un residuo sólido compuesto por materiales no combustibles. Los residuos líquidos y gaseosos pueden ser aprovechados para la producción de energía eléctrica mediante combustión, y el residuo

sólido para combustible en instalaciones industriales como plantas cementeras (Greene, 2015; Rajmohan et al., 2020; Rogoff & Screve, 2019).

Dependiendo de las condiciones de temperatura y tiempo de residencia en el reactor pirólítico, la pirólisis puede producir diferentes productos. Por ejemplo, a bajas temperaturas y tiempos de residencia cortos, se obtendrá principalmente aceites y alquitranes. Sin embargo, la mayoría de plantas de conversión de residuos en energía mediante pirólisis operan en condiciones altas de temperatura para evitar la formación de líquidos y alquitranes, obteniéndose solamente el gas combustible, con un poder calorífico de unos 22 MJ/kg y un residuo sólido (Radhakrishnan et al., 2023; Rogoff & Screve, 2019).

Una de las principales ventajas de la pirólisis a alta temperatura en comparación con la incineración es la reducción en la producción de compuestos orgánicos tóxicos como dioxinas y furanos.

Se muestra en la Figura 14 un ejemplo de una planta con un sistema de pirólisis de plásticos. En primer lugar, los residuos plásticos se someten a un proceso de lavado y pretratamiento para separarlos de los contaminantes y otros materiales no deseados. A continuación, el plástico pretratado se introduce en un reactor donde se lleva a cabo la pirólisis, y la corriente resultante se dirige a una unidad de cracking catalítico. En esta etapa, las cadenas largas de moléculas se rompen en cadenas más pequeñas de hidrocarburos.

El producto obtenido de la unidad de cracking se somete a un proceso de condensación, y se recolecta el líquido resultante en la parte inferior. Mientras tanto, los gases generados se envían al quemado en antorcha para su eliminación segura. El líquido combustible recolectado se purifica y se almacena para su posterior transporte (Rajmohan et al., 2020).

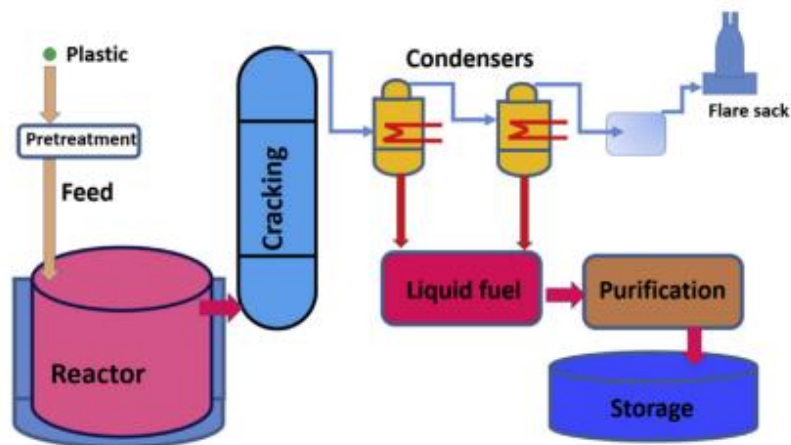


Figura 14. Esquema de un sistema de pirólisis de plásticos (Rajmohan et al., 2020).

Los mayores desafíos al utilizar la fracción combustible como carburante son el alto contenido de cenizas, el bajo poder energético y la alta concentración de metales y cloro (Jain et al., 2023). Sin embargo, Zhou (2014) sugiere que los plásticos provenientes de vertederos presentan un alto poder calorífico y concentraciones lo suficientemente bajas de cloro y azufre como para evitar la producción de gases dañinos, como el dióxido de azufre, el ácido clorhídrico o las dioxinas, durante los procesos térmicos. Esto lleva a la conclusión de que la alternativa térmica de los plásticos para la recuperación de energía tiene un gran potencial.

Senthil Rathi (2023) estudia la conversión térmica de plásticos en combustibles mediante pirólisis. Se presentan en la siguiente Tabla 5 rendimientos de productos obtenidos mediante pirólisis de plásticos mezclados obtenidos del artículo de Senthil Rathi (2023) como ejemplo:

Tabla 5. Rendimientos y productos de procesos de pirólisis para diferentes materias primas con plásticos (Senthil Rathi et al., 2023).

Materia prima	Temperatura (°C)	Productos y rendimientos
Polietileno de baja densidad (LDPE)	500	74,40 % aceite
Poliestireno (PS)	400	60% monómero estireno
Neumático de vehículo ligero	650	51% aceite
Neumático de vehículo pesado	750	63.5% aceite
HDPE, LDPE, PS, PP, PET y PVC	700	9,63% gas; 75,11% aceite; 2,87% char; 2,31% HCl

2.3.8. Recuperación de Materiales

La otra alternativa de aprovechamiento de los residuos es mediante el reciclado de los residuos excavados. Como ya se ha ido explicando en los apartados anteriores, se puede obtener papel, plásticos y metales. Tras las diferentes técnicas de separación explicadas en los apartados previos, se obtienen diversas fracciones cuyo potencial de recuperación será discutido a continuación:

Papel y cartón

El papel y cartón se encuentran dentro de la fracción combustible. El potencial de recuperación de este material por medio de reciclaje se reduce al papel seco, limpio y no degradado, por lo que, al ser esto difícil de encontrar en una fracción proveniente del vertedero, su recuperación se reducirá a ser parte de la fracción destinada a RDF.

Plásticos

Los plásticos constituyen una gran parte de la fracción combustible. Son una fracción mayoritaria en los residuos desenterrados y tienen un alto poder calorífico. Se

contempla la posibilidad de su reciclaje mediante métodos mecánicos como materia prima para la producción de nuevos plásticos reciclados, sin embargo, los tratamientos químicos y térmicos presentan mayores resultados para el aprovechamiento de la fracción de plásticos (Zhou et al., 2014).

Textiles

Respecto a los textiles, no se han encontrado muchos datos específicos de su tratamiento en la minería de vertederos. Se suele considerar dentro de la fracción de plásticos, o se encuentra en una condición de degradación que hacen imposible la consideración de otra recuperación que no sea la energética (Quaghebeur et al., 2013).

Metales

Otra fracción con alto potencial de aprovechamiento son los metales. Según Bhatnagar (2017) los metales que se encuentran en mayores proporciones en las muestra excavadas son el Hierro, Cobre, y Aluminio, con altos precios de venta, por lo que podría considerarse su recuperación y puesta en el mercado.

Fracción fina

La fracción fina inerte resultante de los residuos puede tener varios usos. Puede ser utilizada como agregados de construcción o como material de recubrimiento en vertederos (Parrodi et al., 2018). Además, las fracciones finas también se han utilizado como material de cobertura en vertederos (Bhatnagar et al., 2017; Kurian et al., 2003), o como fertilizante (Zhao et al., 2007).

Jones (2013) plantea un proyecto mediante el cual se prioriza la recuperación de materiales, del que se presenta el esquema propuesto a continuación en la Figura 15, con el que se obtendría la recuperación de las siguientes fracciones: Plásticos flexibles y papel; metales férricos; metales no férricos; plásticos rígidos o sin plastificar, madera y textiles, y lodo rico en materia orgánica.

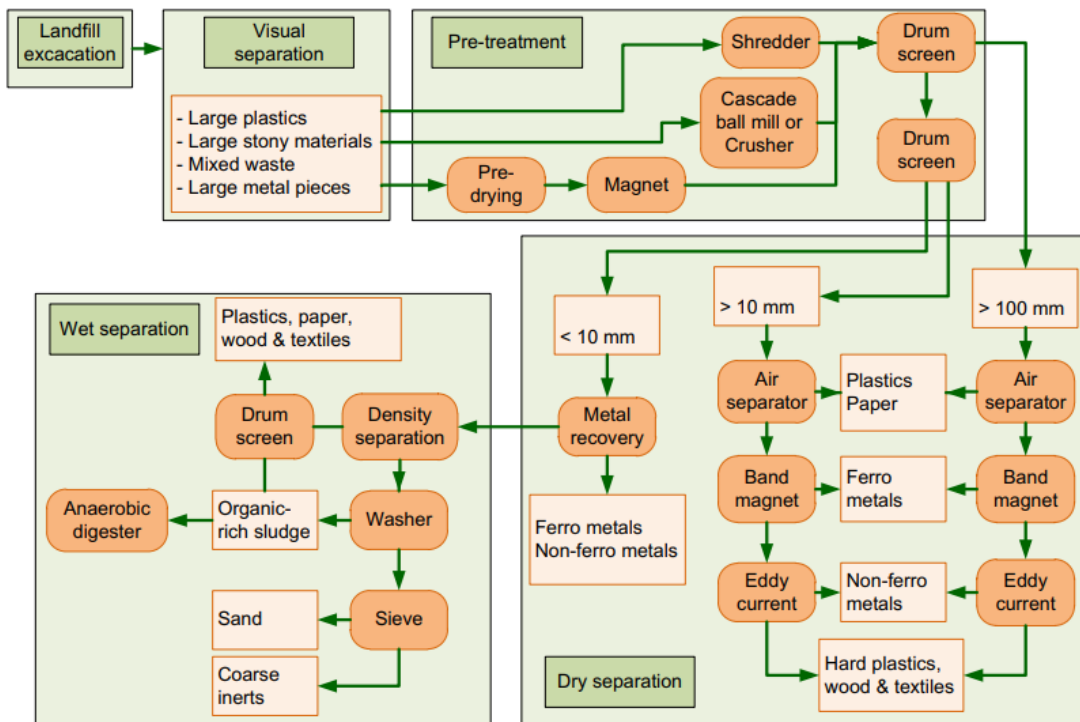


Figura 15. Esquema del proceso propuesto por Jones (2013) para la recuperación de materiales.

Sin embargo, no se han realizado muchos estudios en los cuales el objetivo de la minería de vertederos sea la recuperación de materiales y la poca investigación que se ha hecho sobre el tema no lleva a una rentabilidad clara (Marella & Raga, 2014; Quaghebeur et al., 2013; Raga & Cossu, 2018).

Se han encontrado las siguientes conclusiones sobre el tema en la bibliografía:

- Raga y Cossu (2018) comentan que hasta ahora no se han realizado proyectos en los cuales el objetivo sea la recuperación del material, y la poca investigación que se ha llevado a cabo en la materia suele concluir en resultados desfavorables.
- Bhatnagar et al. (2017) y Krook et al. (2012) concluyen que las posibilidades más viables son la producción de SRF con recuperación de metales con el objetivo de aumentar esta rentabilidad con su aprovechamiento.

- Wolfsberger (2015) indica que, de la fracción gruesa obtenida, el potencial de aprovechamiento energético de los residuos extraídos es del 40%, frente a un 7% de potencial para recuperación de material, por lo que descarta esta recuperación del material por poca rentabilidad.
- Pecorini y Iannelli (2020) ve la valorización energética como la mejor opción posible actualmente, contemplando la posibilidad de que se sigan investigando vías más eficientes para la recuperación del material.
- Hernández Parrodi (2018) contempla la posibilidad de la recuperación de los materiales extraídos como plásticos, madera, textiles, cuero y caucho, pero la dificultad para cumplir requisitos de calidad exigidos para su reutilización empeora esta posibilidad. Aun así, suponiendo que pueden reciclarse de manera adecuada, es probable que su valor en el mercado de materiales fuera muy bajo comparado con los costes que requiere su recuperación.

3. CASO DEL VERTEDERO DE “DOS AGUAS”

3.1. Descripción del vertedero en estudio

El vertedero de Dos Aguas, localizado en La Matrona (Valencia), es un vertedero de media densidad (800 kg/m^3) donde se almacenan los residuos procedentes del rechazo de las plantas de RSU (residuos sólidos urbanos) (Figura 16) del área metropolitana de Valencia, apilándose en balas de 2,5 metros de altura aproximadamente.

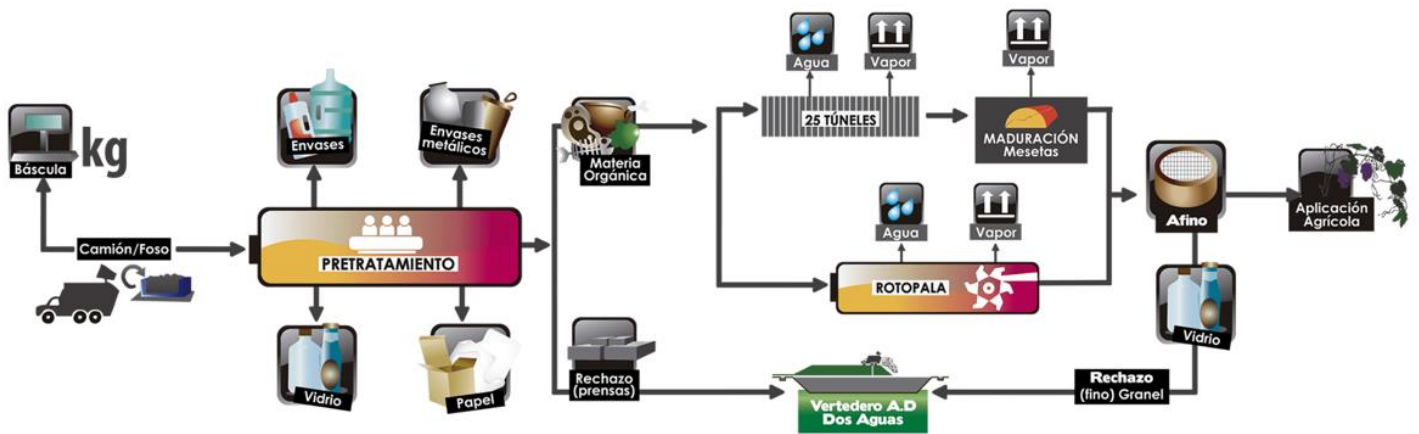


Figura 16. Línea de tratamiento que siguen los residuos de Los Hornillos (UTE Los Hornillos, 2023).

Este vertedero, el más grande de la comunidad, cuenta con dos vasos (el primero ya clausurado), y recibe los residuos de la ciudad de Valencia y toda el área metropolitana. Recibe los rechazos procedentes de la Planta de tratamiento de residuos urbanos situada en Quart de Poblet, y de la planta de Manises a unos 50 kilómetros del vertedero (Figura 17).

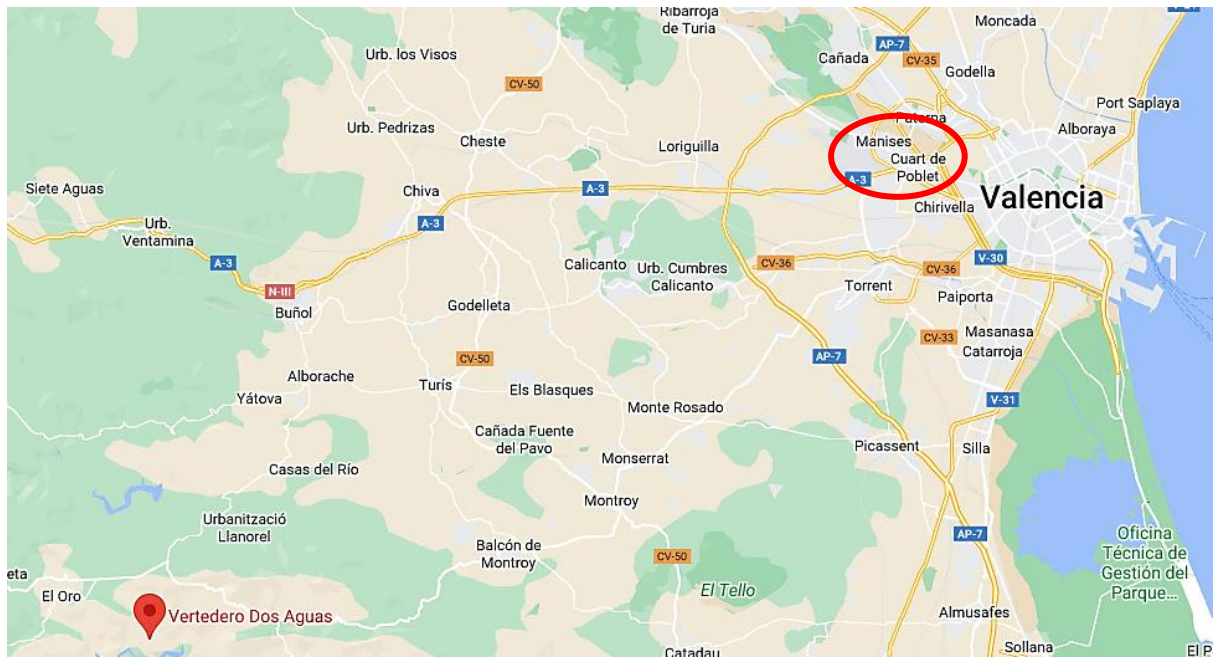


Figura 17. Mapa donde se muestra el vertedero (marcador) y las plantas de tratamiento de donde proceden los residuos, en Manises y Quart de Poblet (círculo rojo) (Google, 2023).

Las coordenadas geográficas del vertedero (círculo rojo) son latitud 39.28244, longitud - 0.87008 y los núcleos poblacionales más próximos son Dos Aguas y El Oro (cuadrados verdes), ambas a 5 kilómetros de la instalación (Figura 18).



Figura 18. Mapa del vertedero (rojo) y los núcleos poblacionales más cercanos (verde)(Google, 2023).

El vertido en el vaso 1 comenzó en septiembre de 1998, llenándose tras 12 años de actividad, en 2010. Tras un aumento de su capacidad, la capacidad del vaso alcanzó

5.080.631 m³, con unas entradas media anuales de 480.000 Tm/año. Este vaso recibía los residuos procedentes de la planta de valorización FERVASA en Quart de Poblet.

Una vez colmatado el Vaso 1 (Figura 19, azul), se comenzó la explotación en un segundo vaso, denominado “Instalación 2” (Figura 19, amarillo), con 23 años de vida útil esperada y una capacidad de vertido de 5.618.259 m³, que recibe los residuos procedentes de las plantas de Quart de Poblet y Manises (Agricultores de la Vega de Valencia, 2023; jecma, 2020; Levante-emv, 2021).



Figura 19. Vasos 1 (azul) y 2 (amarillo) del Vertedero de Dos Aguas)(Google, 2023).

Se muestra a continuación en la Tabla 6 una caracterización de los residuos recibidos por el vertedero procedentes del rechazo de las plantas de tratamiento.

Tabla 6. Caracterización de los residuos recibidos por el vertedero procedentes del rechazo de las plantas de tratamiento de RSU.

Plásticos (%)	Papel y cartón (%)	Textil (%)	Fracción orgánica (%)	Madera (%)	Vidrio (%)	Metales (%)	Otros (%)
14,09	16,46	33,95	18,00	6,68	0,93	2,64	7,26
Fracción combustible (%)							
89,36							

Esta caracterización corresponde a los residuos tal y como llegan actualmente al vertedero, previamente a ser excavados. Para el estudio de la recuperación de recursos extraídos del vertedero no se emplea esta composición ya que, tras tiempo enterrados, la composición de los residuos cambia: la fracción orgánica se degrada, así como plásticos y papel, aunque en mucha menor medida. Además, los hábitos de consumo actuales varían ligeramente de los de hace 10 años, donde la recogida separada de residuos no estaba tan implantada o el consumo de moda rápida, y por tanto su desecho, no estaba tan extendida, por ejemplo. Por ello, a la hora de realizar el cálculo de los balances de materia y estimación del potencial de recuperación se emplea una caracterización de los residuos excavados tomada del estudio bibliográfico, que puede simular con bastante acierto una situación real.

3.2. Propuesta de tratamiento de minería del vertedero

Según el estudio bibliográfico realizado en el apartado 2, se propone un procedimiento de minería de vertederos para el vertedero en estudio con las etapas necesarias para excavación y tratamiento de los residuos, con el objetivo de la obtención de un combustible (SRF) y un posible aprovechamiento de los metales contenidos en la fracción fina. Se presenta un diagrama de bloques con las etapas a seguir en el siguiente subapartado.

Tras los estudios pertinentes de la zona geográfica, estudios sobre el lixiviado y biogás, y los correspondientes análisis preliminares, se pone en marcha la primera etapa consistente en la excavación.

La excavación se realizará con retroexcavadoras y excavadoras de orugas, y se llevará a las cribas trómel mediante cintas transportadoras. Se muestra en la Figura 20 la disposición de los equipos de la excavación en un proyecto de minería de vertederos llevado a cabo por Jain (2013).



Figura 20. Disposición de la excavación realizada por (Jain et al., 2023).

Normalmente la etapa de cribado en el trómel va a ser la limitante en el proyecto, y la velocidad del trómel así como la posible sustitución en caso de rotura o saturación influirá en el tiempo empleado en esta etapa (Jain et al., 2013).

A la salida del trómel se obtendrán dos fracciones: la fracción gruesa (> 40 mm), que contendrá mayoritariamente los componentes combustibles, y la fracción fina (< 40 mm), que contendrá inertes, metales, y material tipo suelo.

La fracción gruesa pasará por un separador de tambor con aire, con el que se obtendrá la fracción combustible SRF, y las rocas y cristales por otro lado, llevados a descarte.

La fracción fina pasará primero por un electroimán, que servirá para obtener los metales férricos, y seguidamente por un separador de corrientes de Foucault, con el que se obtendrán los metales no férricos. La fracción restante será principalmente material tipo suelo que podrá servir para recubrimiento en el mismo vertedero.

Se proponen los siguientes equipos para el procedimiento descrito:

- **Retroexcavadora:**



Figura 21. Retroexcavadora de la marca Volvo, modelo BL70B (Volvoce, 2023b).

- **Excavadora de orugas:**



Figura 22. Excavadora de oruga de la marca Volvo (Volvoce, 2023b).

- **Cinta transportadora (Fenner Dunlop, 2023):**



Figura 23. Cinta transportadora en un proyecto de Fenner Dunlop (Fenner Dunlop, 2023).

- **Trómel:**



Figura 24. Trómel de la marca Eggersmann modelo Terra Select T70 (Eggersmann Recycling Technology, 2023).

- **Separador de aire:**



Figura 25. Separador de aire Resoline Air Flow (ERGA, 2023).

- **Electroimán:**



Figura 26. Electroimán de la marca magnetix (magnetix, 2023b).

- **Separador de Foucault:**



Figura 27. Separador de metales no férricos por corrientes de Fourier de la marca magnetix (magnetix, 2023a).

- **Peletizadora:**



Figura 28. Peletizadora industrial (Peletizadoras Smart Wood, 2023).

3.3. Diagrama de bloques del proceso

A continuación, se muestra en la Figura 29 el diagrama de bloques del tratamiento de minería propuesto:

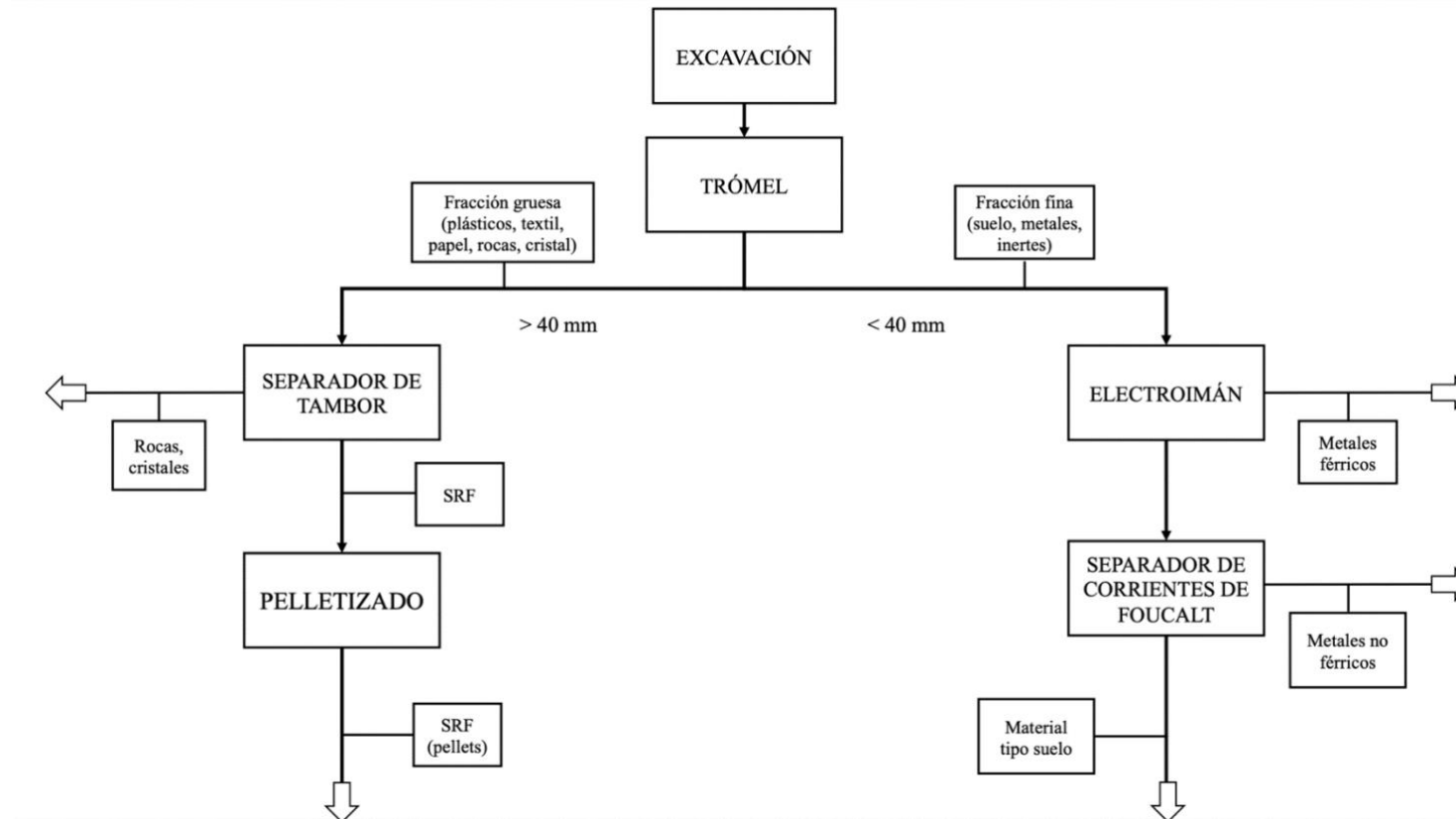


Figura 29. Diagrama de bloques propuesto del proceso (Elaboración propia).

3.4. Balances de materia

3.4.1. Consideraciones iniciales

A continuación, se procede al cálculo de los balances de materia. Para ello, se define la caracterización de los residuos en primer lugar para poder calcular el resto de las fracciones obtenidas.

Como punto de partida, se toma como referencia la capacidad de material que pueden procesar las pantallas trómel, que sería de 250 m³/h, ya que son la etapa limitante. Consistiendo en un vertedero de densidad de 800 kg/m³, el caudal másico a tratar es de 200 t/h.

$$\dot{m} = 250 \frac{m^3}{h} \cdot 800 \frac{kg}{m^3} = 200.000 \frac{kg}{h} = 200 \frac{t}{h}$$

La masa total del vertedero se calcula partiendo del volumen total del vertedero clausurado (5 080 631 m³). También hay que considerar la degradación de la materia orgánica. Según la Tabla 6, hay un 18% de materia orgánica al enterrar los residuos. Como ya han pasado más de 10 años, se puede considerar que se ha degradado el 100%, lo que corresponde a un 18% de la masa inicial. Se calcula entonces la masa total que puede ser extraída del vertedero y que será punto de partida para los cálculos de los balances de materia.

$$5.080.631 m^3 \cdot 800 \frac{kg}{m^3} - 18\% M.O. = 3.332.894 toneladas$$

Se calcula a partir del caudal másico y de las toneladas totales el tiempo que se estima que durará el proyecto para excavar y tratar todos los residuos del vaso cerrado del vertedero. Se considera que los equipos están en funcionamiento durante 8 horas diarias y 300 días al año, por lo que el proyecto tendría una duración de 8,5 años.

$$5.080.631 m^3 \cdot \frac{1 h}{250 m^3} \cdot \frac{1 día}{8 h} \cdot \frac{1 año}{300 días} \cong 8,5 años$$

3.4.2. Caracterización de los residuos

Para el procedimiento de separación, se considera la caracterización mostrada en la Tabla 7 para los residuos extraídos del vertedero. Esta caracterización se obtiene como un promedio de las caracterizaciones obtenidas de los datos bibliográficos y presentados en la Tabla 1 del apartado “2.3.4 Caracterización de la muestra”. Se utilizan datos bibliográficos debido a la falta de datos reales en la actualidad de los residuos enterrados en el vertedero. Estos datos, presentados en la Tabla 7, son los que se emplearán en el cálculo de los balances de materia que siguen a continuación.

Tabla 7. Caracterización aproximada de los residuos a partir de datos bibliográficos.

Finos (%)	Metales (%)	Fracción combustible (%)	Inertes (%)
48	2	35	15

3.4.3. Separación en trómel

En esta etapa de separación en la que el trómel cuenta con un tamaño de criba de 40 mm, se obtendrán dos fracciones: fracción gruesa (> 40 mm) y fracción fina (< 40 mm).

Teniendo en cuenta la caracterización de la Tabla 2, cada fracción contará con un 50% del total, 1.666.447 toneladas en la línea de finos y la misma cantidad en la línea de gruesos.

3.4.4. Línea de finos

La línea de finos está compuesta por los metales (un 2% del total tal y como se muestra en la Tabla 7) y los material fino (un 48%), y cuenta con un 50% del total, sumando 1.666.447 toneladas. Se calcula a continuación la cantidad de metales y finos que contiene esta línea:

- Metales totales:

$$3.332.894 \text{ t iniciales} \cdot 2\% \text{ metales} = 66.657,88 \text{ toneladas de metales}$$

- Material fino:

$$3.332.894 \text{ t iniciales} \cdot 48\% \text{ metales} \\ = 1.599.789,12 \text{ toneladas de materiales finos}$$

- Línea de finos (<40 mm):

$$3.332.894 \text{ t iniciales} \cdot 50\% \text{ metales} = 1.666.447 \text{ toneladas en la línea de finos} \\ = \text{metales} + \text{materiales finos}$$

Los metales pueden ser férricos y no férricos, y por ello se somete a dos separaciones. La primera mediante un electroimán, en el que se separarán los metales férricos, en este caso un 3,7% de ese 2% de metales que hay en la muestra, correspondiendo a un 0,074% del total inicial. Este 3,7% tomado como valor referencia para metales férricos en la muestra de residuos se obtiene del proyecto de Kaartinen (2013), indicado en la Tabla 2 del apartado “2.3.4 Caracterización de la muestra”. Según Kaartinen (2013), los siguientes metales que más concentración presentan son el calcio, magnesio, zinc, plomo, cromo, cobre y silicio. Se considerará el porcentaje total de estos metales (un 30% del 2% de los metales totales), como el porcentaje de metales no férricos separados, ya que el resto de los metales se encontrarán en concentraciones demasiado pequeñas para poder aprovecharlos. Se muestra en la siguiente tabla las concentraciones de los metales no férricos más abundantes:

Tabla 8. Concentración en porcentaje en peso de los metales no férricos más abundantes.

Metal	Ca	Mg	Zn	Pb	Cr	Cu	Si
Porcentaje (%)	8,5	1,2	0,06	0,01	0,01	0,08	20

Se estima un rendimiento del 90% en la separación que tiene lugar en el separador de corrientes de Foucault y en el separador de electroimán (Goudsmit Magnets, 2023; Steinert Global, 2023). Los metales no separados, salen con la fracción de material fino tipo suelo, sumándose al 48% que ya había inicialmente. Se presentan todos estos datos obtenidos tras la separación de metales en la Tabla 8 y se muestran los cálculos finales a continuación:

- Metales férricos:

$$2\% \text{ metales} \cdot 3,7\% \text{ metales férricos} - 10\% \text{ pérdidas} \\ \cong 0,066\% \text{ metales férricos del total}$$

$$3.332.894 \text{ t iniciales} \cdot 0,066\% \text{ metales férricos} \\ = 2.199,71 \text{ t metales férricos separados}$$

- Metales no férricos:

$$2\% \text{ metales} \cdot 30\% \text{ metales no férricos} - 10\% \text{ pérdidas} \\ \cong 0,54\% \text{ metales no férricos}$$

$$3.332.894 \text{ t iniciales} \cdot 0,54\% \text{ metales no férricos} \\ = 17.997,63 \text{ t metales no férricos separados}$$

Por tanto, la fracción de material fino queda con las siguientes cantidades:

- Material fino:

$$48\% \text{ material fino} + 2\% \text{ metales} \\ - (0,54\% \text{ no férricos} + 0,066\% \text{ férricos}) \\ = 49,39\% \text{ fracción de material fino}$$

$$3.332.894 \text{ t iniciales} \cdot 49,39\% \text{ metales férricos} \\ = 1.646.249,66 \text{ t fracción de material fino}$$

Para calcular el caudal másico de cada línea obtenida se multiplica el caudal másico inicial (200 t/h) por el porcentaje que se separa en cada rama:

- Material fino:

$$200 \frac{t}{h} \cdot 49,39\% \text{ material fino} = 98,8 \text{ t/h}$$

- Metales férricos:

$$200 \frac{t}{h} \cdot 0,066\% \text{ metales férricos} = 0,132 \text{ t/h}$$

- Metales no férricos:

$$200 \frac{t}{h} \cdot 0,54\% \text{ metales no férricos} = 1,08 \text{ t/h}$$

Se disponen los datos calculados para la línea de finos en la Tabla 9 a continuación:

Tabla 9. Composición de las fracciones obtenidas en la línea de finos.

Composición	Material fino-suelo	Metales férricos	Metales no férricos
Porcentaje del total (%)	49,4	0,066	0,54
Masa (t)	1.646.249,7	2.199,71	17.997,63
Caudal másico (t/h)	98,8	0,132	1,08

Se muestra a continuación cómo quedaría la línea del diagrama del proceso que trata la fracción fina con los porcentajes finales:

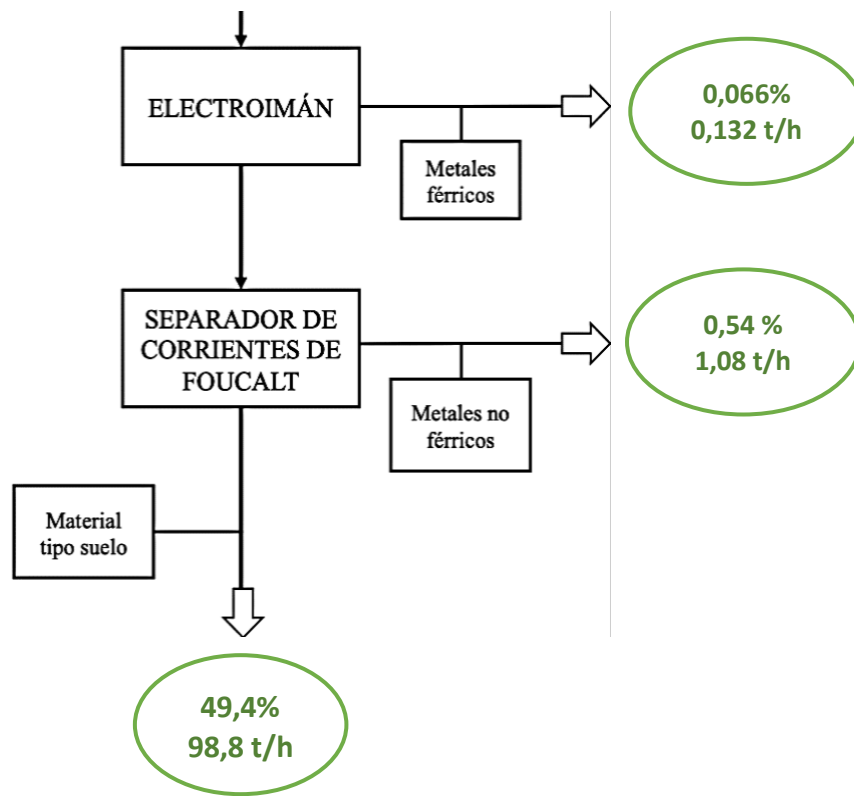


Figura 30. Parte del diagrama que trata la fracción fina y porcentajes finales obtenidos.

3.4.5. Línea de la fracción gruesa

Para tratar la línea de la fracción gruesa (>40 mm), se emplea el separador de tambor, con un rendimiento del 95% según los estudios de Tretsiaikova-McNally (2023), para retirar los cristales, cerámica y rocas (inertes) para obtener la fracción combustible con la fracción restante, que contiene plásticos, textiles, madera, papel y cartón, siendo un 35 % del total inicial.

Esta fracción combustible obtenida constituye el SRF, que se densifica seguidamente en una etapa de peletizado para formar pellets y se determina su poder calorífico, contenido en cloro y en mercurio para su clasificación según las distintas clases definidas por la normativa EN 15359:2011.

Se obtendrá un porcentaje de SRF del 33,25%, correspondiente con el porcentaje de fracción combustible, y un descarte de la fracción inerte de 15% más el rechazo del separador, haciendo un total del 16,75%. Se calcula a continuación los

porcentajes mencionados, la cantidad y el caudal másico de SRF y de inertes que se obtienen:

- Combustible SRF:

$$35\% \text{ SRF} \cdot 95\% \text{ rendimiento} = 33,25\%$$

$$3.332.894 \text{ t iniciales} \cdot 33,25\% \text{ SRF} = 1.108.187,2 \text{ toneladas de SRF}$$

$$200 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 33,25\% \text{ SRF} = 66,5 \text{ t/h}$$

- Inertes:

$$15\% \text{ fracción inerte} + (35 - 33,25)\% \text{ rechazo separador} \\ = 16,75\% \text{ inertes}$$

$$3.332.894 \text{ t iniciales} \cdot 16,75\% \text{ inertes} = 558.259,9 \text{ toneladas de inertes}$$

$$200 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 16,75\% \text{ SRF} = 33,5 \text{ t/h}$$

Tabla 10. Composiciones finales obtenidas en la línea de gruesos.

Composición	Material inerte	SRF peletizado
Porcentaje del total (%)	16,75	33,25
Masa (t)	558.259,9	1.108.187,2
Caudal másico (t/h)	33,5	66,5

Se muestra en la Figura 31 el diagrama de la línea de gruesos con las cantidades y porcentajes obtenidos.

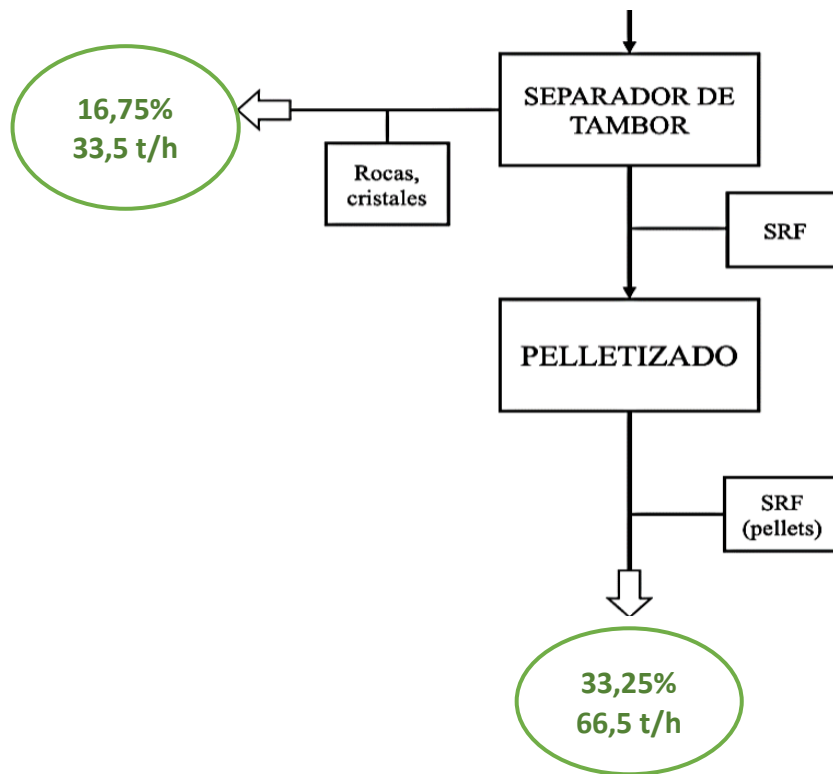


Figura 31. Parte del diagrama que trata la línea de gruesos y porcentajes obtenidos.

Se muestra en la Figura 32 el diagrama total con las cantidades inicial, y finales obtenidas.

3.4.6. Potencial total

Como se ha calculado en el apartado “3.4.1 Consideraciones iniciales”, se parten de 3.332.894 toneladas que pueden ser extraídas del vaso del vertedero clausurado y posteriormente tratadas. Como se ha calculado en los apartados previos, al final del proceso se obtienen las siguientes fracciones:

Tabla 11. Composiciones de las fracciones obtenidas.

Composición	Material fino-suelo	Metales férricos	Metales no férricos	Material inerte	SRF	Total
Porcentaje del total (%)	49,4	0,066	0,54	16,75	33,25	100
Masa (t)	1.646.249,66	2.199,71	17.997,63	558.259,75	1.108.187,26	3.332.894
Caudal másico (t/h)	98,8	0,132	1,08	33,5	66,5	200

Con los balances realizados y la masa total del vertedero considerada, quedaría el diagrama con los flujos resultantes tal y como se muestra en la Figura 32.

Teniendo en cuenta los datos de Poder Calorífico Inferior (PCI) mostrados en la Tabla 3 del apartado “2.3.7.1 Fracción combustible” en el que se muestran los valores de PCI para distintos SRF obtenidos en proyectos de la bibliografía, se estima para este caso un PCI de 20 MJ/kg.

Se calculan los MW/h para estimar el potencial energético que se podrían tener a partir de estos residuos tratados:

$$1,166 \cdot 10^9 \text{ kg SRF} * 20 \text{ MJ/kg} = 2,33 \cdot 10^{10} \text{ MJ}$$

$$2,33 \cdot 10^{10} \text{ MJ} * \frac{1 \text{ MWh}}{3600 \text{ MJ}} = 6,48 \cdot 10^6 \text{ MWh}$$

Con los datos indicados, el potencial energético obtenido a partir de los residuos extraídos del vertedero es de $6,48 \cdot 10^6$ MWh.

Para comparar la magnitud de la energía obtenida, en el año 2023 en los meses de enero, febrero y marzo el consumo de energía eléctrica en la ciudad de Valencia fue de $2,00 \cdot 10^6$; $2,10 \cdot 10^6$; $2,03 \cdot 10^6$ MWh respectivamente (Institut Valencià d’Estadística, 2023), sumando un total de $6,13 \cdot 10^6$ MWh, por lo que la energía

obtenida con el SRF podría abastecer aproximadamente a la ciudad de Valencia durante algo más de un trimestre.

Se procede a la estimación de los costes asociados a este proyecto para estudiar la viabilidad del trabajo.

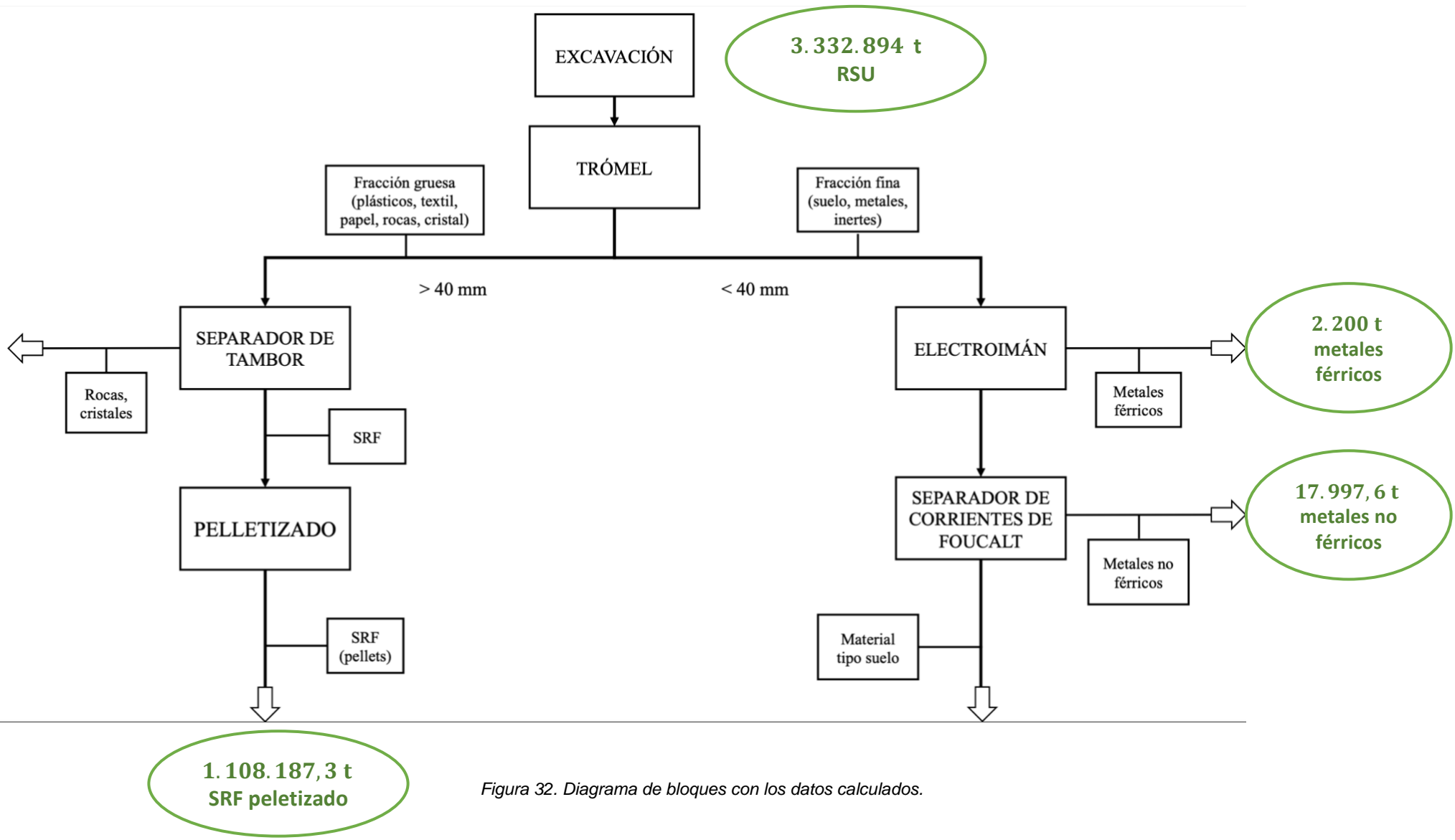


Figura 32. Diagrama de bloques con los datos calculados.

3.5. Balance económico

En este apartado se realizará una evaluación económica para estimar la viabilidad del proyecto, siguiendo el método descrito en el libro “Plant Design and Economics for Chemical Engineers” por Peters y Timmerhaus (2002).

Para el balance económico se definen el Capital de inversión o total (TCI o CapEx) y el Capital de operación (OpEx):

- **Capital de inversión:** se obtiene generalmente a partir del capital fijo (Fixed- Capital Investment o FCI) y el capital circulante (Working Capital o WC).

El capital fijo (FCI) abarca los costes necesarios para la instalación de equipos y puesta en marcha del proyecto. Dentro del capital fijo se incluyen los *costes directos*, que se refieren a estructuras, preparación del terreno, instrumentación requerida; y *costes indirectos*, que engloban el transporte de mercancías, el tratamiento de residuos, ...

El capital circulante (WC) corresponde a la inversión destinada a las materias primas necesitadas en el proceso, dinero disponible para salarios, impuestos, etc. Este capital circulante se suele estimar como un 10-20% del capital de inversión total.

- **Capital de operación:** que engloba los costes de producción (mano de obra, materias primas, costes en investigación y desarrollo, etc.), depreciación del capital fijo, impuestos, y otros gastos que puedan surgir.

3.5.1. Capital de inversión

Para el cálculo del capital fijo (FCI) dentro del capital de inversión, se emplea uno de los métodos contemplados en el libro de Peters Timmerhaus (2002), el método de los factores de Lang para la aproximación del capital de inversión. Esta técnica comprende que el coste de un proceso puede obtenerse a partir del coste de la adquisición del equipamiento, multiplicando el coste de los equipos por una serie de factores. Estos factores varían dependiendo del tipo de proceso, en este caso serán los proporcionados en el libro Peter y mostrados en la Tabla 10.

Una vez que se tienen los factores de Lang y el coste de los equipos, se calculan los costes fijos con la ecuación de Hirsch y Glazier mostrada a continuación:

$$FCI = f_I[E(1 + f_D)]$$

Tabla 12. Factores de Lang (Peters & Timmerhaus, 2002).

	Factor de Lang	
Costes directos	Instalación de equipos	0,45
	Instrumentación y control	0,18
	Sistemas eléctricos	0,10
	Edificios	0,25
	Instalaciones de servicio	0,40
	Total f_D	1,38
Costes indirectos	Ingeniería y supervisión	0,33
	Gastos de construcción	0,39
	Gastos legales	0,04
	Contratista	0,17
	Contingencias	0,35
	Total f_I	1,28

En la Tabla 13 se presentan los costes de los equipos utilizados en el proceso:

Tabla 13. Coste de los equipos propuestos para el procedimiento descrito.

Equipo	Referencia	Coste/unidad (€)	Coste (€)
Camión de volteo (x2)	Quipp.ph, (2023)	70.000	70.000
Excavadora de oruga (x3)	volvoce.com, (2023)	45.000	135.000
Retroexcavadora (x2)	volvoce.com, (2023)	40.000	80.000
Cinta transportadora (x5)	Fenner Dunlop, (2023)	20.000	100.000
Trómel	Eggersmann Recycling Technology, (2023)	200.000	200.000
Separador de aire	ERGA, (2023)	200.000	200.000
Electroimán	magnetix, (2023b)	100.000	100.000
Separador de Foucalt	magnetix, (2023a)	150.000	150.000
Peletizadora (x2)	peletizadoras.net, (2023)	125.000	250.000
Total			1.355.000

El coste total del equipamiento industrial es de 1,355 millones de euros. Teniendo en cuenta el coste del transporte, que se estima en un 10% (Peters, 2003), el precio final de los equipos y su transporte es 1,49 millones €.

$$E = 1,355 \cdot 10^6 \text{ €} + 10\% \text{ transporte} = 1,491 \cdot 10^6 \text{ € de equipos y transporte}$$

Aplicando la ecuación de los factores de Lang, el capital fijo (I_F) es 4,54 millones de €.

$$\begin{aligned} FCI &= f_I[E(1 + f_D)] = 1,28 \cdot [1,491 \cdot 10^6 (1 + 1,38)] \\ &= 4,54 \cdot 10^6 \text{ € de capital fijo} \end{aligned}$$

El capital circulante (WC) se estima como un 20% del capital fijo ya estimado, por lo que constituiría un coste de 0,91 millones de €.

$$4,54 \cdot 10^6 \text{ € capital fijo} \cdot 20\% \text{ capital circulante} \\ = 9,08 \cdot 10^5 \text{ € de capital circulante}$$

El coste del capital fijo (FCI) y circulante (WC) constituyen el **capital de inversión**, con un total de 5,45 millones de euros.

$$4,54 \cdot 10^6 \text{ € de capital fijo} + 9,08 \cdot 10^5 \text{ € de capital circulante} \\ = 5,45 \cdot 10^6 \text{ € de capital de inversión total}$$

3.5.2. Capital de operación

El capital de operación se divide en costes variables de operación, fijos y generales.

- **Costes de operación variables:**

Los costes de operación variables comprenden los gastos necesarios para poner en marcha la planta de producción o el proyecto, así como el coste de la mano de obra, servicios públicos (utilities: agua, electricidad), suministros y mantenimiento, y laboratorios para controles de calidad, entre otros.

Respecto a la **mano de obra**, para un proyecto de estas dimensiones, teniendo en cuenta los equipos con los que cuenta el proceso, se estima que serán necesarios 30 operarios según las indicaciones del manual de Peters y Timmerhaus (2002) para un proyecto de estas dimensiones. Con un salario anual de 17511,96€ para personal técnico, según (MITECO, 2023a), más un 33% del salario bruto que le cuesta a la empresa un trabajador (Seguridad Social, 2023), sumaría un total de 0,17 millones de € en mano de obra aproximadamente.

$$30 \text{ operarios} \cdot \left(17.511,96 \frac{\text{€}}{\text{operario}} + 33\% \text{ seguridad social} \right)$$

$$= 1,694 \cdot 10^5 \text{ € de mano de obra}$$

La **supervisión y administración** se estima como un 15% del coste de mano de obra, sumando 25.410 €.

$$1,694 \cdot 10^5 \text{ € de mano de obra} \cdot 15\% \text{ supervisión y administración}$$

$$= 2,54 \cdot 10^4 \text{ € supervisión y administración}$$

Para estimar el coste de **servicios**, se debe tener en cuenta la potencia de los equipos, y el coste anual de la potencia consumida, ya que es difícil estimar el . El precio de la electricidad se obtendrá del coste de la electricidad de uso industrial en España, que en el año 2021 es de 0,097 €/kWh. Se muestra en la Tabla 14 la potencia de los equipos con el coste correspondiente a este consumo en un año (MINCOTUR, 2023).

Tabla 14. Potencia de los equipos propuestos para el proceso.

Equipo	Potencia/u (kW)	Potencia (kW)
Trómel	75	75
Cinta transportadora (x5)	5	25
Separador de aire	250	250
Electroimán	20	20
Separador de Foucalt	5,5	5,5
Peletizadora	45	90
Total		465,5

Se considera que los equipos están en funcionamiento durante 8 horas diarias, por lo que el consumo anual con 300 días de trabajo de estos equipos sería de 1.117.200 kWh/año. Con el precio mencionado, el coste de la potencia total en un año de funcionamiento sería de 108.368,4 €.

Para los camiones y las excavadoras, se tendrá en cuenta el consumo de combustible gasoil. Se estima que las retroexcavadoras consumen 45 L/h de combustible, y tanto los camiones como las excavadoras de oruga, de mayor tamaño y potencia, consumen 55 L/h de combustible gasoil (Leyva-Tarafa et al., 2019). Con un funcionamiento de 8 horas diarias, 300 días de trabajo anuales y un precio medio del gasoil de 1,557 €/L (Click Gasoil, 2023), el consumo anual de gasoil en camiones y excavadoras suma un total de 601.624,8 €. Se muestra en la Tabla 15 y resumen del consumo de gasoil anual.

Tabla 15. Consumo de combustible anual de los camiones y excavadoras empleados.

Equipo	Consumo/u (L/h)	Consumo (L/año)
Retroexcavadora	45	216.000
Camión de volteo	55	264.000
Excavadora de oruga	55	396.000
Total		876.000

$$876.000 \frac{L}{año} \text{ de consumo de combustible} \cdot 1,557 \frac{€}{L}$$

$$= 1.363.932 \frac{€}{año} \text{ en combustible}$$

Sumando el gasto por la potencia consumida y por el combustible, se tiene un total de 709.993,2 € de electricidad y combustible (*utilities*):

$$1.363.932 \frac{€}{año} \text{ combustible} + 108.368,4 \frac{€}{año} \text{ de electricidad}$$

$$= 1.472.300,4 \text{ €/año}$$

El gasto destinado a mantenimiento y reparaciones se estima como un 7% del capital de inversión, haciendo un total de 381.400 €. Se considera también un 15% del total de mano de obra destinado a laboratorios en el caso de que hubiera que hacer análisis de calidad, por ejemplo, con un total de 25.410 €.

- **Costes de operación fijos:**

Los costes de operación fijos incluyen gastos por depreciación, intereses, impuestos locales y seguros, y se calculan como un 25% del capital de inversión fijo, con un total de 1,362 millones de euros.

- **Costes de operación generales:**

Los costes generales contemplan costes destinados a administración, distribución e investigación que pueda tener lugar en el proyecto, y se suelen calcular como un 20% de la mano de obra, sumando 25.410 euros.

Se resumen en la siguiente Tabla 16 los costes que conlleva un año de trabajo en el proyecto:

Tabla 16. Resumen de los costes calculados para el proyecto.

		Coste (millones de €)
Capital de inversión	Equipos y transporte	1,49
	Capital fijo	4,54
	Capital circulante	0,91
	Total	5,45
Capital de operación	Mano de obra	0,17
	Supervisión y administración	0,025
	Servicios	1,47
	Mantenimiento y reparaciones	0,38
	Laboratorios	0,025
	Fijos	1,36
	Generales	0,034
	Total	3,47
TOTAL COSTES (1er año)		8,92

Con el equipo propuesto, la capacidad de extracción y tratamiento de los residuos será el limitado por el trómel, en este caso de $250 \text{ m}^3/\text{h}$. Con una velocidad de trabajo de 8 h al día, durante 300 días en un año, se estima que se extraerá y tratará la totalidad de los residuos del vertedero en unos 8 años y medio.

El capital de inversión se considera un único gasto en el primer año, mientras que el capital de operación habrá que multiplicar el total calculado por los 8,5 años que dura el proyecto.

$$5,45 \cdot 10^6 \text{ € de capital de inversión} + 3,47 \cdot 10^6 \text{ € de capital de operación} \\ \cdot 8,5 \text{ años} = 34,94 \text{ millones de € de costes}$$

Por ello, el total de costes será de 34,94 millones de euros.

3.5.3. Estimación de ingresos

Para la estimación de los ingresos se parte del volumen total del vertedero, que es de 5 080 631 m³. El vertedero es un vertedero de densidad de 800 kg/m^3 , y como se ha calculado, se tendrá en total unas 3.332.894 toneladas a excavar y tratar.

De esa masa, se ha calculado que se obtendrá un 33,25% de SRF, un total de $1,108 \cdot 10^9 \text{ kg}$. Según Bhatnagar (2017), el precio de SRF puede alcanzar unos 10 € por tonelada producida, que haría un total de 8,865 millones de €.

$$1.108.187 \text{ toneladas de SRF} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{t}} = 11,08 \text{ millones de € de SRF}$$

En cuanto a los metales, se obtendrían unas 2.199,7 toneladas de metales férricos y 17.997,6 toneladas de metales no férricos. Van Passel (2013) propone un precio de 230€ la tonelada de metales férricos y 1000 € la tonelada de no férricos,

constituyendo un total de ingresos proveniente de los metales de 1,45 millones de euros.

$$2.199,7 \text{ toneladas metales férricos} \cdot 230 \frac{\text{€}}{\text{t}}$$
$$= 0,506 \text{ millones de € de metales férricos}$$

$$17.997,6 \text{ toneladas metales no férricos} \cdot 1000 \frac{\text{€}}{\text{t}}$$
$$= 18 \text{ millones de € de metales no férricos}$$

$$18 \text{ millones de € de metales no férricos}$$
$$+ 0,506 \text{ millones de € de metales férricos}$$
$$= 18,506 \text{ millones de € de metales}$$

Sumando ingresos por la producción de SRF y por la venta de chatarra de metales, el total de los ingresos ascendería hasta 11,7 millones de euros.

$$18,506 \text{ millones de € de metales} + 11,08 \text{ millones de € de SRF} =$$
$$29,59 \text{ millones de € de ingresos totales}$$

3.6. Rentabilidad y conclusiones

El balance entre ingresos y costes da un valor de -5,36 millones de euros, donde las pérdidas son muy significativas, en consonancia con lo encontrado en los diferentes artículos de la bibliografía.

$$29,59 \text{ millones de € de ingresos} - 34,94 \text{ millones de € de costes}$$
$$= -5,36 \text{ millones de € de pérdidas}$$

Para que el proyecto de minería de vertederos salga rentable de manera económica será necesario desarrollar técnicas nuevas que abaraten los costes de tratamiento. También se puede contemplar la posibilidad de alquilar el equipo utilizado y disminuir así los costes asociados al capital de inversión.

Sin embargo, no se pueden dejar de lado beneficios a nivel social o medioambiental que conlleva esta técnica alternativa de recuperación de residuos. La minería de vertederos puede tener varios objetivos, como reciclaje de los residuos enterrados, trabajos por preocupación ambiental, recuperación de volumen de vertedero, reciclaje del terreno o recuperación de tierras.

También contribuye en la reducción de gases de efecto invernadero. Dado que en Europa hay entre 150.000 y 500.000 vertederos, la implementación de esta tecnología de minería de vertederos resultaría en una disminución de entre 15 a 75 millones de toneladas métricas de CO_{2eq} al año durante 20-30 años. Esta reducción se produciría al introducir el combustible SRF como una alternativa a los métodos de producción de energía tradicionales. (Jones et al., 2013).

La mayor parte de los gases emitidos por el vertedero se producen 20 años después de haber sido clausurado; sin embargo, se seguirán produciendo dichos gases (metano y dióxido de carbono mayoritariamente) hasta más de 100 años después. Aunque las emisiones una vez se clausure el vertedero estén canalizadas, pueden seguir teniendo lugar emisiones fugitivas. Es por ello que, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero también tiene relación con la disminución de esas emisiones fugitivas que se dan lugar en los vertederos clausurados (Sánchez et al., 2016).

También se plantea a la hora de hacer un análisis económico de los proyectos de minería de vertederos la incorporación de los impactos sociales y medioambientales dentro del análisis costo-beneficio, asignando un valor económico a beneficios sociales que no suelen estar reflejados en balances económicos como la reducción de la huella ambiental (contaminación del aire, suelo, aguas superficiales y subterráneas), una menor dependencia de importaciones de energía y materiales, la restauración de la naturaleza y la creación de áreas recreativas, los beneficios para los ciudadanos derivados del desarrollo urbano en el área recuperada, el ruido, los olores, el polvo y el aumento del tráfico durante la excavación (Raga & Cossu, 2018).

Para concluir, se deben buscar alternativas para alcanzar una rentabilidad económica de la tecnología de vertederos con los vertederos clausurados; sin embargo, no se deben dejar de lado los beneficios sociales y ambientales que hacen atractiva esta vía de tratamiento de los residuos de los vertederos.

También se debe poner el foco en los residuos susceptibles de terminar en un vertedero. Se espera que con la tendencia actual a la recogida separada de residuos se disminuya el porcentaje de la fracción resto que no es tratada por las plantas de tratamiento y la cantidad de residuos destinados a vertedero disminuya cada vez más, aunque también deberían contemplarse otras alternativas antes de que el destino de dichos residuos sean los vertederos, como la producción de Combustibles Sólidos Recuperados, y la instauración de una concepción de los vertederos como almacenaje temporal en todo caso de los residuos y no fin último.

Cabe mencionar que la aplicabilidad de esta minería se reduce a vertederos de décadas anteriores en los que se incluían residuos que no han sido tratados en un proceso de valorización previa y de los que se podría extraer una fracción combustible alta. Los vertederos actuales, como sería el caso del vaso 2 del vertedero estudiado en este proyecto, receptores de rechazos de dichas plantas de valorización en los que se incluirán mayoritariamente residuos inertes debido al avance de los hábitos de desecho y legislaciones, quizá no sean susceptibles de la minería de vertederos y habría que enfocar el estudio de estas técnicas únicamente en vertederos antiguos.

4. BIBLIOGRAFÍA

- 911Metalurgist. (2023). Separador de rodillo magnético. [consultado el 02/04/2023] <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/separadores-magneticos-permanentes/>
- Agricultores de la Vega de Valencia. (2023). Tratamiento y Eliminación de Residuos. SAV.es. [consultado el 11/05/2023] <https://www.sav.es/areas-de-negocio/tratamiento-y-eliminacion-de-residuos/>
- Ambiente Plástico. (2020, junio 20). Cómo aprovechar la Minería de vertederos como fuente de recursos. [consultado el 21/04/2023] <https://www.ambienteplastico.com/como-aprovechar-la-mineria-de-vertederos-como-fuente-de-recursos/>
- BBVA. (2021, mayo 10). Minería urbana: las posibilidades de un vertedero más allá de los residuos. [consultado el 10/03/2023] <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/mineria-urbana-las-posibilidades-de-un-vertedero-mas-alla-de-los-residuos/>
- Bhatnagar, Kaczala, Burlakovs, Kriipsalu, Hogland, & Hogland. (2017). Hunting for valuables from landfills and assessing their market opportunities A case study with Kudjape landfill in Estonia. *Waste Management and Research*, 35(6), 627-635. <https://doi.org/10.1177/0734242X17697816>
- Biocycle. (2016). Separador de tambor. [consultado el 22/04/2023] <https://www.biocycle.net/separation-code-switch-contaminant-removal/>
- BioHiTech Global. (2021). Solid Recovered Fuel (SRF). [consultado el 13/04/2023] <https://renovareenv.com/education/what-is-solid-recovered-fuel/#:~:text=Using%20solid%20recovered%20fuel%20as,of%20their%20fossil%2Dbased%20fuels>
- Click Gasoil. (2023). Precio Gasóleo A. [consultado el 11/07/2023] <https://www.clickgasoil.com/c/precio-gasoleo-a>
- Comisión Europea. (2010, junio 17). Presentación de una lista de 14 materias primas minerales fundamentales. [consultado el 14/06/2023] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/MEMO_10_263
- Conveyors & drivers, I. (2023, abril). Conveyor belt. [consultado el 04/05/2023] <https://www.condrives.com/product/cd-slider-bed-belt-conveyor/>
- Eggersmann Recycling Technology. (2023). Trómel móvil TERRA SELECT T 70. [consultado el 02/04/2023] <https://www.eggersmann-recyclingtechnology.com/es/maquinas-de-reciclaje/maquinas-de-cribado-terra-select/productos/terra-select-t-70/>
- ERGA. (2023). Separador de aire Resoline Air Flow. [consultado el 03/05/2023] <https://ergaglobal.com/es/catalog/separadores-de-gravedad/separador-por-aire-resoline-air-flow/>
- Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero., Pub. L. No. 187, Boletín Oficial del Estado (BOE) 48659 (2020). <https://www.boe.es>
- European Parliament. (2018, junio 29). Parliamentary question | Support for enhanced landfill mining . Parliamentary question - E - 003579/2018. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-8-2018-003579_EN.html?redirect

- Eurostat. (2022a). Amount of waste recovered increases in 2020. [consultado el 15/05/2023] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220913-1>
- Eurostat. (2022b). Municipal waste treatment, EU, 1995-2021. Eurostat. [consultado el 02/03/2023] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Municipal_waste_treatment,_EU,_1995-2021_\(kg_per_capita\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Municipal_waste_treatment,_EU,_1995-2021_(kg_per_capita).png)
- Faitli, Nagy, Romenda, Gombkötő, Bokányi, & Barna. (2019). Assessment of a residual municipal solid waste landfill for prospective 'landfill mining'. *Waste Management & Research*, 37(12), 1229-1239. <https://doi.org/10.1177/0734242X19881197>
- Fenner Dunlop. (2023). Engineered Conveyor Solutions. [consultado el 22/06/2023] <https://fennerdunlopeurope.com/>
- Ford, Warren, Lorton, Smithers, Read, & Hudgins. (2013). Feasibility and Viability of Landfill Mining and Reclamation in Scotland. www.zerowastescotland.org.uk
- Gaiker. (2021). Desarrollo de combustibles sólidos recuperados (CSR) y combustibles derivados de residuos (CDR). Validación de las especificaciones técnicas. [consultado el 08/05/2023] http://www.gaiker.es/cas/pdf/desarrollo_de_combustibles_solidos_recuperados.pdf
- Gallardo Izquierdo, A., Edo-Alcón, N., & Albarrán Vargas Zúñiga, F. (2017). El combustible sólido recuperado: Producción y marco regulador. RETEMA.
- Gendebien, Leavens, & Godley. (2003). «Refuse derived fuel, current practice and perspectives». European Commission – Directorate General Environment Final Report B4-3040/2000/306517/MAR/E3. [consultado el 02/05/2023] <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/rdf.pdf>
- Google. (2023). Vertedero de Dos Aguas - Google Maps. [consultado el 07/06/2023] <https://www.google.es/maps/place/Vertedero+Dos+Aguas/@39.2822755,-0.9112151,13z/data=!4m6!3m5!1s0xd611f5210c6170f:0x7188447455b8d789!8m2!3d39.2822714!4d-0.8700164!16s%2Fg%2F11jzgy5cny?entry=ttu>
- Goudsmit Magnets. (2023). Electroimanes Overband. <https://www.goudsmitmagnets.com/es/solutions/magnetic-recycling-sorting/overband-magnetic-separators/electro>
- Greene. (2015, marzo). Incineración y gasificación, diferencias y similitudes. [consultado el 19/05/2023] <https://greene.es/incineracion-y-gasificacion-diferencias-y-similitudes/>
- Hernández Parrodi, Höllen, & Pomberger. (2018). POTENTIAL AND MAIN TECHNOLOGICAL CHALLENGES FOR MATERIAL AND ENERGY RECOVERY FROM FINE FRACTIONS OF LANDFILL MINING: A CRITICAL REVIEW. *Detritus*, In Press(1), 1. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13689>
- Hilber, Maier, Scheffknecht, Agraniotis, Grammelis, Kakaras, Glorius, Becker, Derichs, Schiffer, Jong, & Torri. (2007). Advantages and Possibilities of Solid Recovered Fuel Cocombustion in the European Energy Sector. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57(10), 1178-1189. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.10.1178>

- Hölzle, Somani, Ramana, & Datta. (2022). Heavy metals in soil-like material from landfills – Resource or contaminants? *Journal of Cleaner Production*, 369, 133136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133136>
- Impact air systems. (2023). Air Drum Separator (ADS). [consultado el 02/04/2023] <https://impactairsystems.com/solutions/air-drum-separator/>
- Institut Valencià d'Estadística. (2023). Estimación del consumo de energía eléctrica. [consultado el 27/05/2023] <https://pegv.gva.es/es/temas/industriaenergiamineriaayconstruccion/energia/estimaciondelconsumodeenergiaelectrica>
- Instituto Nacional de Estadística, I. (2020). Cuentas medioambientales: Cuenta de los residuos.
- Jain, Kumar, & Kumar. (2023). Landfill mining: A review on material recovery and its utilization challenges. *Process Safety and Environmental Protection*, 169, 948-958. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2022.11.049>
- Jain, Townsend, & Johnson. (2013). Case study of landfill reclamation at a Florida landfill site. *Waste Management*, 33(1), 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.011>
- jecma. (2020). Informe de control de emisiones difusas en el vertedro de RNP's integrado dentro del proyecto de gestión de la «Instalación 2» del área de gestión V2 del plan zonal 2, ubicado en partida La Matrona S/N, en el término municipal de Dos Aguas (Valencia), titularidad de la Entidad Metropolitana para el Tratamiento de Residuos (EMTRE).
- Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular., Pub. L. No. 85, BOE (2022). <https://www.boe.es/buscar/pdf/2022/BOE-A-2022-5809-consolidado.pdf>
- Jones, Geysen, Tielemans, Van Passel, Pontikes, Blanpain, Quaghebeur, & Hoekstra. (2013). Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 55, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.021>
- Jones, Wille, & Krook. (2018). 2 nd EFLM Seminar in the European Parliament: 5 Lessons Learned. En Policy Brief. NEW-MINE. [consultado el 07/05/2023] https://www.nweurope.eu/media/5206/new-mine_policybrief_december_2018.pdf
- Kaartinen, Sormunen, & Rintala. (2013). Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 55, 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.036>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Krook, Svensson, & Eklund. (2012). Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management*, 32(3), 513-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.015>
- Kurian, Kandasamy, & Ammaiyappan. (2003). STUDIES ON LANDFILL MINING AT SOLID WASTE DUMPSITES IN INDIA.
- Levante-emv. (2021, febrero 24). El macrovertedero de Dos Aguas alargará su vida útil hasta 2025. [consultado el 28/04/2023] <https://www.levante->

- emv.com/comunitat-valenciana/2021/02/24/macrovertedero-aguas-alargara-vida-util-35397333.html
- Leyva-Tarafa, Cuesta-Recio, Belete-Fuentes, & Alayo-Lloren. (2019). Análisis del consumo de combustible y del índice de desgaste de los neumáticos de los equipos mineros. *Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas*, 3(1), 25-36.
- magnetix. (2023a). Non-ferrous metal separator Type SWP (Eddy Current). [consultado el 02/04/2023] <https://metal-separators.com/files/files/Katalog%202020EN/eddy%20current%20separator.pdf>
- magnetix. (2023b). Over-Belt Separator Type STM. [consultado el 12/06/2023] <https://metal-separators.com/files/files/Katalog%202020EN/magnetic%20belt%20separator.pdf>
- Magsy. (2023a). Imán para encima de la banda transportadora. [consultado el 01/06/2023] https://www.magsy.es/25096-iman-para-encima-de-la-cinta-transportadora?utm_referer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F
- Magsy. (2023b). Separadores magnéticos de los metales no magnéticos (Eddy current separator). [consultado el 23/04/2023] <https://www.magsy.es/25100-separadores-magneticos-de-los-metales-no-magneticos>
- Marella, & Raga. (2014). Use of the Contingent Valuation Method in the assessment of a landfill mining project. *Waste Management*, 34(7), 1199-1205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.03.018>
- MINCOTUR. (2023). Precio neto de la electricidad para uso doméstico y uso industrial.
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación., Pub. L. No. 251 (2013).
- MITECO. (2023a). Resolución de 16 de enero de 2023, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el Acuerdo sobre revisión de las tablas salariales correspondientes al año 2022 del Convenio colectivo del personal laboral del Consejo de Administración del Patrimonio Nacional.
- MITECO. (2023b). Valorización energética/Tratamientos térmicos. [consultado el 02/05/2023] <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/VALORIZACION-ENERGETICA-TRATAMIENTOS-TERMICOS-Introduccion.aspx>
- Naciones Unidas. (2020, diciembre 10). Objetivos de Desarrollo Sostenible. [consultado el 23/06/2023] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Ortner, Knapp, & Bockreis. (2014). Landfill mining: Objectives and assessment challenges. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*, 167(2), 51-61. <https://doi.org/10.1680/warm.13.00012>
- Parrodi, Höllen, & Pomberger. (2018). CHARACTERIZATION OF FINE FRACTIONS FROM LANDFILL MINING: A REVIEW OF PREVIOUS INVESTIGATIONS. *Detritus*, 2(1), 46. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13663>

- Pecorini, & Iannelli. (2020). Characterization of excavated waste of different ages in view of multiple resource recovery in landfill mining. *Sustainability (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/su12051780>
- peletizadoras.net. (2023). Equipos individuales de peletizado. [consultado el 22/05/2023] https://peletizadoras.net/wp-content/uploads/2018/05/CATÁLOGO-ECOFRICALIA-2021-PLT800_PLT1000.pdf
- Peters, & Timmerhaus. (2002). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (4th ed.). McGraw-Hill Professional.
- Prechthai, T., Padmasri, M., & Visvanathan, C. (2008). Quality assessment of mined MSW from an open dumpsite for recycling potential. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.002>
- Quaghebeur, Laenen, Geysen, Nielsen, Pontikes, Van Gerven, & Spooren. (2013). Characterization of landfilled materials: Screening of the enhanced landfill mining potential. *Journal of Cleaner Production*, 55, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.06.012>
- Quipp. (2023a). Backhoe Loader. [consultado el 02/04/2023] https://quipp.ph/products/2dx-backhoe-loader-4wd?_pos=2&_sid=5ca95e9c9&_ss=r
- Quipp. (2023b, abril). Dump truck. [consultado el 02/04/2023] <https://quipp.ph/collections/dump-truck/products/dc330g350-6x4-dump-truck-euro-4>
- Radhakrishnan, Senthil Kumar, Rangasamy, Praveen Perumal, Sanaulla, Nilavendhan, Manivasagan, & Saranya. (2023). A critical review on pyrolysis method as sustainable conversion of waste plastics into fuels. *Fuel*, 337, 126890. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126890>
- Raga, & Cossu. (2018). Landfill Mining. En *Solid Waste Landfilling* (pp. 1061-1073). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-407721-8.00051-6>
- Rajmohan, Yadav, Vaishnavi, Gopinath, & Varjani. (2020). Perspectives on bio-oil recovery from plastic waste. En *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 459-480). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64321-6.00023-9>
- Ramos Casado, Arenales Rivera, Borjabad García, Escalada Cuadrado, Fernández Llorente, Bados Sevillano, & Pascual Delgado. (2016). Classification and characterisation of SRF produced from different flows of processed MSW in the Navarra region and its co-combustion performance with olive tree pruning residues. *Waste Management*, 47, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.018>
- Rogoff, & Screve. (2019). Energy From Waste Technology. En *Waste-To-energy* (pp. 29-56). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816079-4.00003-7>
- Sánchez, Narros, del Peso, de la Fuente, & Rodríguez. (2016, November). Emisiones superficiales de metano en vertederos. ¿Por qué y cómo cuantificarlas? CONAMA. [consultado el 26/07/2023] <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998971814.pdf>

- Seguridad Social. (2023). Bases y tipos de cotización 2023. [consultado el 23/07/2023] <https://www.seg-social.es/wps/portal/wss/internet/Trabajadores/CotizacionRecaudacionTrabajadores/36537>
- Senthil Rathi, Senthil Kumar, & Rangasamy. (2023). A sustainable approach on thermal and catalytic conversion of waste plastics into fuels. *Fuel*, 339, 126977. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126977>
- Shah, Amin, Iqbal, Nadeem, & Kalin. (2023). A review on gasification and pyrolysis of waste plastics. *Frontiers in Chemistry*, 10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.960894>
- Spooren, Nielsen, Quaghebeur, & Tielemans. (2013). Characterisation study of landfilled materials with a particular focus on the fines and their potential in enhanced landfill mining.
- Steinert Global. (2023). Separador magnético de matriz STEINERT HGF: separar partículas férricas ultrafinas de emulsiones. [consultado el 02/05/2023] <https://steinertglobal.com/es/separadores-iman-sensores/separacion-magnetica/separadores-magneticos-en-via-humeda/steinert-hgf/>
- Tretsiakova-McNally, S., Lubarsky, H., Vennard, A., Cairns, P., Farrell, C., Joseph, P., Arun, M., Harvey, I., Harrison, J., & Nadjai, A. (2023). Separation and Characterization of Plastic Waste Packaging Contaminated with Food Residues. *Polymers*, 15(13), 2943. <https://doi.org/10.3390/polym15132943>
- UTE Los Hornillos. (2023). Los Hornillos; tratamiento y valorización de residuos. [consultado el 10/06/2023] <https://www.uteloshornillos.es/instalacion-1/>
- Van Passel, Dubois, Eyckmans, de Gheldere, Ang, Tom Jones, & Van Acker. (2013). The economics of enhanced landfill mining: private and societal performance drivers. *Journal of Cleaner Production*, 55, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.024>
- Volvo. (2023a). Excavadoras | Excavadoras compactas | Excavadoras de ruedas | Excavadoras de orugas. [consultado el 04/06/2023] <https://www.volvoce.com/latin-america/es-mx/products/excavators/#/all>
- Volvo. (2023b). Volvo Backhoe Loaders BL60B, BL70B. [consultado el 04/06/2023] https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/global-site/product-archive/documents/04-backhoe-excavator-loaders/04-volvo/all-common/brochure_bl60b_bl70b_t4i_en_22_20036855_c.pdf?v=1x4-Pw
- Wagner, & Raymond. (2015). Landfill mining: Case study of a successful metals recovery project. *Waste Management*, 45, 448-457. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.034>
- Wolfsberger, Aldrian, Sarc, Hermann, Höllen, Budischowsky, Zöschner, Ragoßnig, & Pomberger. (2015). Landfill mining: Resource potential of Austrian landfills – Evaluation and quality assessment of recovered municipal solid waste by chemical analyses. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 33(11), 962-974. <https://doi.org/10.1177/0734242X15600051>
- Zhao, Song, Huang, Song, & Li. (2007). Recycling of aged refuse from a closed landfill. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable*

Circular Economy, 25(2), 130-138.

<https://doi.org/10.1177/0734242X07074053>

Zhou, Fang, Xu, Cao, & Wang. (2014). Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 80, 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.083>