



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

**VALORACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE
ESCOMBRERAS COMO FUENTE DE NUEVOS
RECURSOS**

Autor: Juan Manuel Martínez Álvarez

Tutor: Francisco Ortega Fernández

Oviedo, Junio de 2017

AGRADECIMIENTOS

Después de un intenso periodo de análisis de datos, investigación y redacción, hoy ha llegado el día en el que doy por finalizado mi trabajo fin de máster. Ha sido una experiencia muy bonita el poder desarrollarlo en una empresa líder mundial en su sector, enriquecedora tanto en el campo técnico-científico como en el personal. Y es todo un orgullo para mí agradecerse a todas esas personas que me han ayudado y apoyado durante este proyecto.

En primer lugar, me gustaría agradecerse a mi tutor, Francisco Ortega Fernández, por haber depositado su confianza en mí desde hace ya un buen tiempo y brindarme esta oportunidad y por darme un buen ejemplo a seguir en el mundo profesional.

Por otra parte, me gustaría agradecerse a mi tutora de mi estancia en la empresa ArcelorMittal Asturias, Victoria Masaguer Torres, por haberme ayudado, comprendido y haberme hecho sentir parte del equipo de trabajo como uno más. Además, quiero darle las gracias a Noelia Vega Aguirre por su apoyo y ayuda durante toda mi estancia.

Y por último y no menos importante a mis padres, que me han brindado todo su apoyo y consejo durante toda mi vida y nunca me han negado ningún tipo de oportunidad.

Juan Manuel Martínez Álvarez

Oviedo, 30 de junio de 2017.

INDICE

1	ANTECEDENTES	1
2	OBJETO	5
3	LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA	6
3.1	HISTORIA.....	7
3.2	INSTALACIONES	7
3.3	PRODUCCIÓN	9
4	RESIDUOS SIDERÚRGICOS	12
4.1	ESCORIA DE HORNO ALTO	12
4.2	ESCORIA DE ACERÍA	13
4.3	LODOS DE ACERIA	14
5	REAPROVECHAMIENTO EN EL USO DE RESIDUOS	16
6	CASO DE USO: VERTEDERO SIDERÚRGICO	18
6.1	HIDROLOGÍA	19
6.2	GEOLOGÍA.....	21
6.3	HIDROGEOLOGÍA	23
6.4	CARACTERISTICAS GEOTECNICAS	24
7	CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES	26
7.1	TÉCNICAS DE PERFORACION	27
7.1.1	SONDEOS DE ROTACIÓN.....	28

7.1.2	SONDEOS A CIRCULACIÓN INVERSA	29
7.2	DATOS DEL CONTENIDO EN HIERRO DE LOS SONDEOS	31
	CONTENIDO EN HIERRO EN PARTES POR MILLÓN (PPM)	31
7.3	MODELIZACIÓN DEL CONTENIDO EN HIERRO	37
7.3.1	INTRODUCCIÓN DEL MODELO TOPOGRÁFICO	37
7.3.2	INTRODUCCIÓN DE SONDEOS	39
7.3.3	INTRODUCCIÓN DEL MODELO LITOLÓGICO	41
7.3.4	INTRODUCCIÓN DE LAS MUESTRAS	42
7.3.5	CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS DE BLOQUES	43
7.3.6	ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS DE HIERRO	45
8	PROPUESTA DE ACTUACIÓN	47
8.1	CASO DE EXPLOTACIÓN 1	47
8.1.1	DATOS DE LA CORTA 1	48
8.1.2	DISEÑO POST-EXPLOTACIÓN	49
8.2	CASO DE EXPLOTACIÓN 2	49
8.2.1	DATOS DE LA CORTA 2	50
8.2.2	DISEÑO POST-EXPLOTACIÓN	51
8.3	CASO DE EXPLOTACIÓN 3	51
8.3.1	DATOS DE LA CORTA 3	52
8.3.2	DISEÑO POST-EXPLOTACIÓN	52
9	VALORACIÓN DE LA VIABILIDAD	54
9.1	Viabilidad Técnica: TECNOLOGIA DE RECUPERACION DEL HIERRO	54

9.2	VIABILIDAD ECONÓMICA.....	57
9.3	VIABILIDAD ESTRATÉGICA.....	59
10	CONCLUSIONES.....	61
11	REFERENCIAS	63

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Instalaciones principales de ArcelorMittal Asturias.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 2 Capacidades productivas de todas las instalaciones de ArcelorMittal Asturias.</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 3 Producción de residuos sólidos no peligrosos en los hornos altos de Gijón.</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 4 Producción de residuos sólidos no peligrosos por parte de la Acería LD de Avilés.</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 5 Producción de residuos sólidos no peligrosos por parte de la acería de Gijón.</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 6 Tipos de residuos generados en una siderurgia integral para la producción del acero.</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 7 Comparación en las composiciones entre la escoria de horno alto, el cemento y el Clinker.</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 8 Composición química de dos muestras de escoria de acería.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 9 Análisis químicos de un lodo de acería.</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 10 Estimación de los residuos depositados en la escombrera</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 11 Coordenadas de las cabezas de los sondeos.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 12 Puntos de muestreos y número de muestras a tomar en cada punto.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 13 Tabla de posiciones de los sondeos en la base de datos usada por el RecMIN.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 14 Fragmento de la tabla de desviaciones extraída de la base de datos usada por el RecMIN.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 15 Tabla de identificación de la litología dentro de la base de datos usada por el RecMIN.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 16 Extracto de la base de datos de la litología para usar en el RecMIN.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 17 Extracto de la base de datos de la escombrera en la que se detalla el contenido en hierro.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 18 Resultados de recuperación del Hierro con los dos esquemas de separación propuestos.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 19 Datos de los bloques correspondientes a la Corta 1.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 20 Datos de los bloques correspondientes a la Corta 2.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 21 Datos de los bloques correspondientes a la Corta 3.</i>	<i>62</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Diferentes vías de cerrar el ciclo de un proyecto de minería de vertederos de acuerdo a la economía circular.....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 2 Gráfico de la producción histórica del acero en el mundo.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3 Escoria de acería.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4 Foto de un talud triásico de la zona durante obras en el 2006.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5 Elementos que se pueden verse afectados por deslizamientos del vertedero..</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6 Red de muestreo de sondeos llevada a cabo en el vertedero.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 7 Testigos extraídos de un sondeo a rotación directa.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8 Esquema de un sondeo a circulación inversa.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9 Curvas de nivel referenciadas sobre puntos de levantamiento topográfico en Autocad, formato DWG.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 10 Convirtiendo archivo .DXF a *.su mediante el RecMIN para operar en el módulo gráfico.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 11 Modelo 3D de las curvas de nivel del vertedero en RecMIN.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 12 Modelo triangulado en 3D de la escombrera en RecMIN.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 13 Vista de los sondeos sobre la topografía de la escombrera en RecMIN. Plano XY.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 14 Creación de una base de datos de bloques en RecMIN.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 15 Creación de una tabla de bloques de tamaño 5x5x5 en el modelo</i>	<i>44</i>
<i>Figura 16 Base de bloques sobre la que trabajar.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 17 Modelo de bloques filtrado que representa el volumen real aproximado de la escombrera.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 18 Distribución del contenido en hierro en g/t en el vertedero.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 19: Diseño de la Corta 1 con sus bloques explotables elaborada en RecMIN.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 20 Diseño final de la Corta 1.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21 Diseño de la Corta 2 con sus bloques explotables elaborada en RecMIN.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 22 Diseño final de la Corta 2.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 23 Diseño de la Corta 3 con sus bloques explotables elaborada en RecMIN.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 24 Diseño final de la Corta 3.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 25 Esquema de separación de Hierro-Escoria por fuerzas magnéticas.....</i>	<i>55</i>

<i>Figura 26 Análisis granulométrico del Sondeo 1, situado al sur de la escombrera.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 27 Proceso de separación de hierro de la escoria original y mejorado.).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 28 Gráfico que muestra la variación de los beneficios considerando la variación del coste total</i>	<i>59</i>
<i>Figura 29 Variación del precio del mineral de hierro en las dos últimas décadas.....</i>	<i>62</i>

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1 Situación de las dos factorías siderúrgicas asturianas

Mapa 2 Cuencas hidrográficas de Asturias

Mapa 3 Mapa de precipitaciones anuales medias en el Principado de Asturias



1 ANTECEDENTES

El mundo está comenzando a enfrentarse a un reto sin precedentes, combatir el cambio climático (Rockström et al., 2009) y la escasez de recursos (Comisión Europea, 2010). La respuesta que se está dando desde la Unión Europea para hacer frente a estas dos grandes adversidades va encaminada hacia la eficiencia energética y la economía circular con bajas emisiones de carbono. En su *Roadmap to a Resource Efficient Europe* la Comisión Europea (2011) determinó que para 2020 los residuos tanto industriales como urbanos sean tratados como recursos; desde ese momento reciclarlos y re-utilizarlos se ha convertido en la máxima prioridad para cumplir con esta meta. Como ha sido descrito por Jones et al. (2011), en una economía circular el ciclo de vida del material ha de ser cerrado, ya sea mediante el reciclado, el consumo directo de los desechos para fabricación (escorias de acería en el cemento) o la recuperación de fuentes de minerales valiosas (El hierro de las escorias de acería). En cualquier caso, no se ha desperdiciar la ocasión de recuperar la mayor cantidad de material posible. Dadas todas estas necesidades y vías de investigación ha aparecido un nuevo concepto que pretende cubrir todas estas expectativas denominada **Minería de Vertederos**.

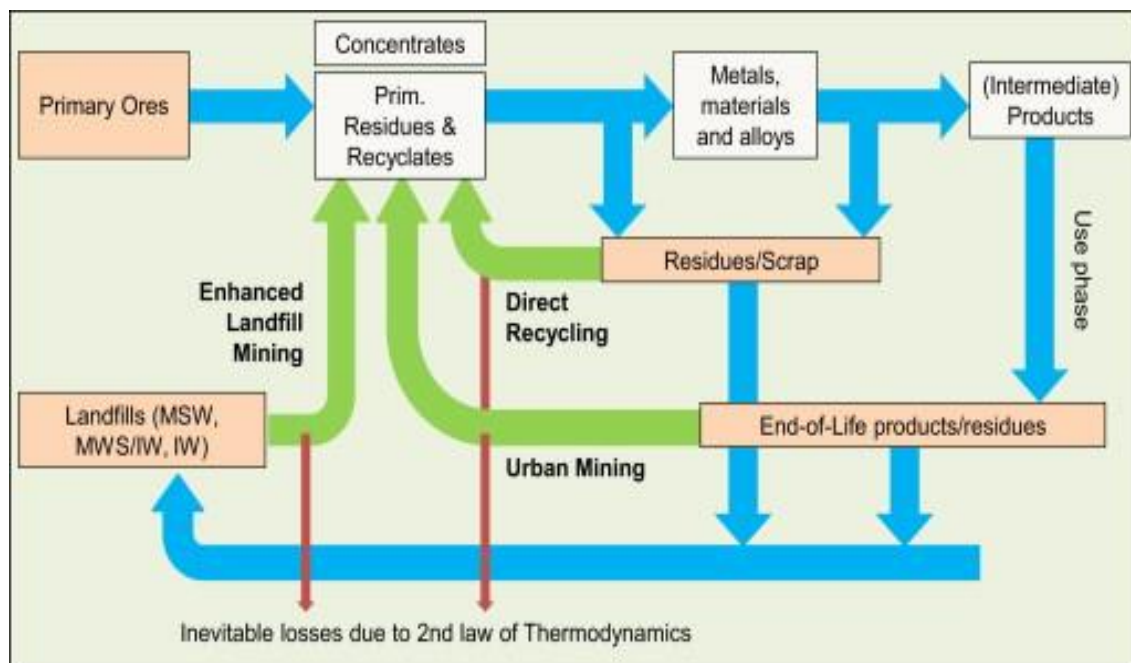


Figura 1 Diferentes vías de cerrar el ciclo de un proyecto de minería de vertederos de acuerdo a la economía circular. Fuente: Jones et al. (2011).

La minería de vertederos no es un concepto nuevo, pero su práctica y éxito sí empieza a ser algo novedoso ya que en el pasado no ha sido demasiado utilizado. La definición



actual que mejor define este concepto procede de (Krook et al., 2012): “*Un proceso para la extracción de materiales u otros recursos naturales de residuos que han sido previamente depositados o enterrados*”. Wolfsberger et al. 2014 expone en su estudio que la minería de vertederos se centra en minar los depósitos que han sido creados de manera antropogénica los cuales pueden ser considerados como “Minas de materiales secundarios” debido a su alta concentración de materiales reciclables y reutilizables.

Uno de los aspectos más interesantes de la minería de vertederos es su origen que se fija en Israel en 1953. Dado que Israel es un país con poca extensión, surgió la necesidad de ampliar la capacidad de sus vertederos y su solución fue recuperar capacidad usando aquellas partes reutilizables y reciclables. (Savage et al., 1993).

Históricamente la tendencia de los vertederos ha sido extender su vida útil haciéndolos mayores y más seguros, dadas las dificultades para la apertura de nuevas zonas de vertido, lo cual también ha propiciado que su potencial para ser explotables aumente. Uno de los ejemplos más comunes es la explotación de metano en vertederos con alta tasa de descomposición orgánica procedente de materiales tipo sólidos urbanos. Toda esta situación fue propiciada por la implantación de legislaciones más restrictivas como la aplicada por la EPA en USA, que fue el primer organismo en establecer un criterio mínimo por el cual todos los nuevos vertederos deberían de tener valla perimetral, monitorización de aguas subterráneas, geotextiles y geomembranas para prevenir cualquier fuga o rotura. (Krook et al., 2012).

La regulación medioambiental, directa o indirectamente ha sido uno de los principales motores para la minería de vertederos como ha constatado en su estudio (Van Passel et al., 2012). Es curioso que uno de los principales objetivos nunca haya sido recuperar los materiales en sí mismos, sino la creación de más capacidad de almacenaje, la remediación de problemas o la recolocación de materiales de características similares. De esta manera lo constató el Departamento de protección medioambiental de Florida en su estudio (FDEP, 2009), en el cuál expone que en 2009 había 32 proyectos relacionados con la minería de vertederos que tenían por objetivo, alargar la vida de los mismos, reducir el coste de su clausura o la recuperación de energía mediante incineración de materiales combustibles.



A comienzos del 2000, surgió el concepto de **minería de vertederos mejorada** (ELFM) que abarca tanto la reutilización de los productos tras su vida útil como la recuperación y reciclado de los materiales necesarios para su creación, creando depósitos temporales que los mantengan hasta poder darles un uso posterior.

A partir de este punto, aunque la prevención de la contaminación sea un pilar clave en el diseño y operación de vertedero, ya no es el único elemento a considerar puesto que se añade el interés en el acondicionamiento, excavación y posterior valoración de futuros materiales o formas de energía para derivados industriales o urbanos, convirtiéndolo en un pilar clave para la evolución social y ecológica de la sociedad (Jones et al., 2013).

Actualmente, dado el nivel inicial de desarrollo en que se encuentra, el principal interés en la minería de vertederos es determinar con fiabilidad como es de viable su aprovechamiento, en función del tipo de vertedero y de los tipos de residuos. Para ello se está financiando diversas plantas pilotos cuyo principal objetivo es determinar los costes de la explotación y tratamiento a la vez que se intenta conseguir la máxima tasa de recuperación de los materiales puesto que hasta ahora, muchos de estos proyectos serían inviables sin el apoyo de los gobiernos como expone (Winterstetter et al., 2014).

Las dificultades técnicas son el principal escollo que se ha de solucionar para que los proyectos de minería de vertederos sean totalmente viables. Los pasos fundamentales son los mismos que en cualquier proyecto minero tradicional: exploración, caracterización de materiales, excavación, procesamiento, transporte y restauración. La viabilidad está condicionada también por la ubicación, la economía local, condiciones macroeconómicas (mercado de minerales), legislación, tipo de materiales,... Otro problema importante es la aparición de materiales compuestos inexistentes en la naturaleza, lo cual exige separaciones únicas y, en muchos casos un estudio de investigación específico para su beneficio dado que hasta el momento era inexistente. En la minería de vertederos se dan unas características específicas que distan de las de la minería tradicional, por ejemplo, la gran heterogeneidad de los materiales o incluso su geometría: dado que es algo absolutamente antropogénico cada uno puede ser totalmente distinto al anterior.

El aprovechamiento de los vertederos no sólo supone la eliminación de una fuente de preocupación ambiental, paisajística y social, sino que también evita la necesidad de extracción de nuevos materiales, con la consiguiente alteración del medio en estas nuevas



zonas. Al ser materiales posiblemente no existentes en la zona de depósito se produce además una contaminación derivada del transporte que no es marginal sino que llega a suponer más del 20% de la alteración al medio, aspecto que nuevamente se elimina gracias a la extracción local, generalmente vinculada a la propia industria que produce los residuos.

A los problemas técnicos citados se une la premisa de que todo proyecto de minería ha de cumplir es que los ingresos han de ser suficientemente mayores que los gastos para justificar económicamente la ejecución del proyecto.



2 OBJETO

El presente proyecto tiene por finalidad el estudio de la viabilidad de la valorización de recursos en escombreras siderúrgicas, haciendo éstas una nueva fuente potencial de cara al futuro. Basándose en la idea comentada anteriormente acerca de la minería de vertederos y la economía circular, se pretende valorar sobre un caso tipo si una antigua escombrera clausurada podría suponer una gran fuente de recursos para la industria siderúrgica en lugar de un gasto de mantenimiento.

Este objetivo principal se consigue mediante la realización de una serie de objetivos específicos intermedios entre los que cabe citar:

- Identificación de un vertedero siderúrgico tipo.
- Caracterización de los elementos de infraestructura, topográficos y geométricos.
- Identificación de los aspectos ambientales incluyendo geología, hidrogeología, vegetación, etc.
- Caracterización interna y externa de los depósitos.
- Determinación de la viabilidad del aprovechamiento.

Este proyecto ha sido elaborado como trabajo fin de master (TFM) a petición de la empresa ArcelorMittal mediante una estancia en su Centro Global de I+D+i.



3 LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA

La industria siderúrgica, como elemento primario productor del material más utilizado en todos los sectores industriales, es una de las grandes consumidoras de materias primas y productoras de residuos.

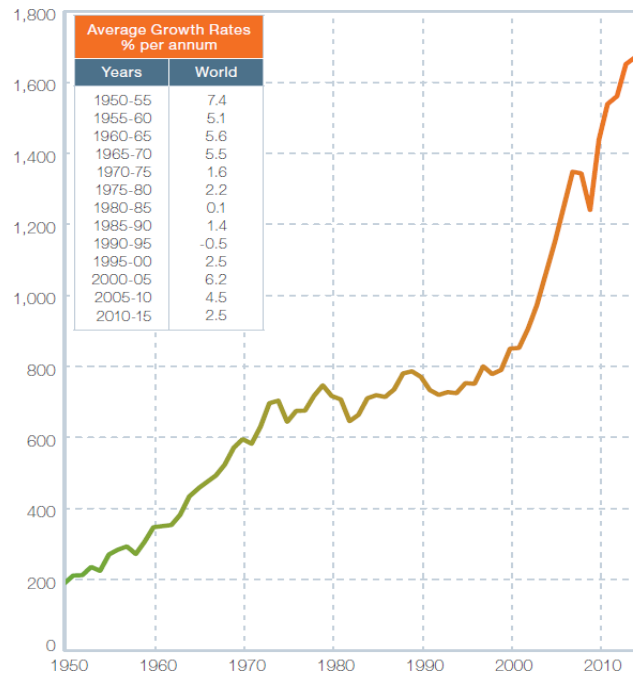


Figura 2 Gráfico de la producción histórica del acero en el mundo. Fuente: EUROFER, 2016.

Como vemos en la Figura 2 la producción anual de acero no deja de crecer con el paso del tiempo, es cierto que existen periodos de estancamiento o de pequeña recesión en la producción, pero la tendencia general es a seguir subiendo. Esto hace que sea más necesario que nunca determinar la mayor cantidad de materias primas existentes y al mismo tiempo surge la necesidad de tratar o gestionar los residuos derivados de ese proceso.

De acuerdo a B. Das et al. 2007 se generan entre 2 a 4 kilogramos de residuos por tonelada de acero producido, teniendo en cuenta que en 2016 de acuerdo a EUROFER 2016 se han producido 1,650 millones de toneladas de acero. Haciendo un cálculo sencillo se obtiene la cantidad de residuos que esto ha implicado.

$$\text{Residuos Siderurgicos en 2016} = 1,650 \text{ Mt} * (2,000 - 4,000) \text{ t/Mt} = 6,600,000 - 3,300,000 \text{ t}$$



Como se puede observar actualmente los residuos anuales derivados de la producción de acero se cuantifican en millones de toneladas.

Con el fin de poder valorar la cantidad y variedad de residuos generados se incluyen algunos datos de la industria siderúrgica de la región.

3.1 HISTORIA

Asturias ha sido una región industrial desde los inicios de la revolución industrial, dada la presencia del carbón y la cercanía del mineral de hierro. Tras la existencia de diversas empresas siderúrgicas en las zonas mineras, la verdadera expansión se produce en 1950 con la creación de ENSIDESA, proyecto estratégico para cubrir la necesidad de una fuente primaria de fabricación de acero de alta calidad. Se ubicó en Avilés con lo que supuso el desarrollo de la región hasta lo que es hoy día. En el área de Veriña (Gijón) se creó UNINSA la cual fue absorbida por la primera, al igual que las pequeñas industrias siderúrgicas del interior (Mieres y La Felguera) para convertirse en el CSI o Corporación Siderúrgica Integral en 1994.

Posteriormente pasó a ser ACERALIA en 1997. Y tras la fusión en 2001 de esta con el grupo ARBED (Luxemburgo) y USINOR (Francia) nace un gran grupo siderúrgico llamado ARCELOR.

Y finalmente en 2006 el grupo indio MITTAL Steel lanza una OPA y se hace con el grupo ARCELOR naciendo la empresa ARCELOR MITTAL.

3.2 INSTALACIONES

En la actualidad las instalaciones siderúrgicas de proceso integral existentes en Asturias se sitúan en dos ubicaciones: los parques de minerales y carbones, Sinter, Hornos Altos, acería LD y laminación de largos en Gijón y Baterías de Cok, Acería LD y el Tren de Bandas en Caliente, laminados de planos y recubiertos en Avilés.



Mapa 2 Situación de las dos factorías siderúrgicas asturianas. Fuente: Google Earth, 2017.



3.3 PRODUCCIÓN

Los hornos altos situados en la factoría de Veriña (Gijón) generan el arrabio que es llevado a las respectivas acerías de ambas fábricas. En la acería de Avilés se produce acero para alimentar los trenes de chapa gruesa y de bandas en caliente a,mbos situados también en Avilés del tren de bandas en caliente salen las bobinas laminadas en caliente que serán el producto de partida para las líneas de galvanizado hojalata y prepintado. Por otra parte, la acería de Gijón está especializada en productos largos, suministrando acero a los trenes de carril y alambrón que también se encuentra en la fábrica de Veriña.

La disposición de las mayores instalaciones viene recogida en la siguiente tabla.

Nombre		Factoría	Producto principal	Destino
Parque de carbones de Aboño		Gijón	Pasta de carbón	Baterías de coque
			Carbón pulverizado P.C.I.	Hornos Altos
Baterías de coque		Avilés	Coque	Hornos altos
		Gijón		Ventas
Parque de minerales y sinter		Gijón	Sínter	Hornos Altos
Hornos Altos		Gijón	Arrabio	Acerías
Acerías		Avilés	Acero sólido	Laminación
		Gijón		
Laminación	Tren de chapa gruesa	Gijón	Chapa gruesa	Ventas
	Tren de perfil-carril	Gijón	Carril	Ventas
	Tren de alambrón	Gijón	Alambrón	Ventas
	Tren de bandas en caliente	Avilés	Bobina caliente	Ventas
				Decapado
	Decapado	Avilés	Bobina decapada	Galvanizado
				Laminación en frío
	Laminación en frío	Avilés	Bobina fría	Ventas
				Hojalata
	Galvanizado	Avilés	Bobina galvanizada	Ventas
Prepintado				

Tabla 1 Instalaciones principales de ArcelorMittal Asturias. Fuente: BOPA, 2016.

Las capacidades productivas son muy elevadas, siendo recogidas estas en la autorización ambiental integrada (Tabla 2).



Factoría de Avilés	Capacidad productiva
Baterías de coque	1.435.000 t/año
Acería LD III con colada continua de slabs	4.200.000 t/año
Tren de bandas en caliente y línea de Saneo	3.600.000 t/año
Línea de decapado	2.050.000 t/año
Trenes Tándem	1.900.000 t/año
Línea de limpieza electrolítica	150.000 t/año
Hornos de recocido en campana	864.000 t/año
Línea de recocido continuo	300.000 t/año
Tren Temper para frío	650.000 t/año
Línea de corte de fleje	107.000 t/año
Línea de inspección de chapa	350.000 t/año
Trenes Temper para hojalata	400.000 t/año
Líneas de preparación	400.000 t/año
Líneas de hojalata	300.000 t/año
Línea de Galvanizado 1	250.000 t/año
Línea de Galvanizado 2	550.000 t/año
Factoría de Gijón	
Hornos de coque	1.050.000 t/año
Sinter A	2.850.000 t/año
Sinter B	3.200.000 t/año
Hornos Altos	4.700.000 t/año
Acería LD	1.100.000 t/año
Coladas continuas	1.000.000 t/año
T. carril	300.000 t/año
T. chapa	620.000 t/año
T. alambrón	679.000 t/año

Tabla 2 Capacidades productivas de todas las instalaciones de ArcelorMittal Asturias. Fuente: BOPA, 2016.

Actualmente todos los residuos sólidos derivados de la producción se acumulan en la escombrera del Estrellín en las cantidades anuales presentadas en las siguientes tablas.



Hornos altos (Gijón)

Residuos no peligrosos	Cód. LER	t/año
Polvos de captación de la nave de colada	100208	22.000
Lodos de Horno Alto	100214	13.004

Tabla 3 Producción de residuos sólidos no peligrosos en los hornos altos de Gijón.

Fuente: BOPA, 2016

Acería LDA (Avilés)

Residuos no peligrosos	Cód. LER	t/año
Lodos gruesos del proceso de lavado del gas de acería LD	100214	15.035
Lodos finos del proceso de lavado del gas de acería LD	100214	60.000
Polvo de captación secundaria n.º 1 y n.º 3 (Convertidores)	100208	4.465
Restos de refractario	161102/4	11.413
Polvos de captación del molino de chatarra en LDII	100208	597
Lodos húmedos de captación del molino de chatarra en LDII	100214	50
Captación en oxicorte de chatarra en LDII	100208	68
Escorias/escombros de acería LD	100201	360.000

Tabla 4 Producción de residuos sólidos no peligrosos por parte de la Acería LD de Avilés.

Fuente: BOPA, 2016.

Acería LDG (Gijón)

Residuos no peligrosos	Cód. LER	t/año
Lodos gruesos del proceso de lavado del gas de acería LD	100214	7.366,7
Lodos finos del proceso de lavado del gas de acería LD	100214	23.810,8
Polvo de captación secundaria en LDG	100208	3.694,5
Restos de refractario	161102/4	4.839,9
Captación de oxicorte de chatarra LDG	100208	12,1
Captación de polvo en planta de tratamiento de escorias	100201	3,89
Escoria/escombro LD	100201	80.000

Tabla 5 Producción de residuos sólidos no peligrosos por parte de la acería de Gijón.



4 RESIDUOS SIDERÚRGICOS

Las acerías integrales utilizan cuatro elementos para la producción de acero, estos son: materias primas, aire, agua y combustible. Durante la producción del acero se generan de 2 a 4 toneladas de residuos por tonelada de acero producido. Los residuos sólidos son la escoria de horno alto, lodos y polvo de horno alto, escoria de acería y lodos de acería, refractarios y por último residuos provenientes de los trenes de laminación en forma de cascarillas o aceites.

A continuación, se verán más en detalle los residuos de la table anterior, se describirá su composición como sus posibilidades de reciclado o re-uso y sus posibilidades de recuperación de materiales valiosos.

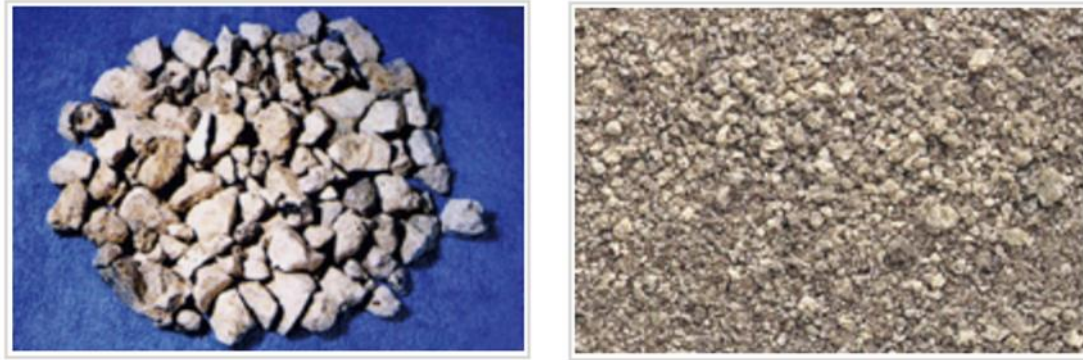
4.1 ESCORIA DE HORNO ALTO

La escoria de horno alto es básicamente inorgánica por naturaleza. Contiene mayoritariamente constituyentes inorgánicos como la sílice (30 – 35) %, óxido de calcio (28-35) %, y óxido de magnesio (1 – 6) %. Debido al bajo contenido en hierro un uso seguro es su adición a cementos para usos especiales, por ejemplo al cemento Portland para su uso en la cementación de pozos petrolíferos (R. Sánchez et al. 2011). La composición química de la escoria de horno alto en comparación al Clinker y al cemento Portland se muestra a continuación (Tabla 6).

Composition (%)	Portland cement	Clinker	Blast furnace slag
Loss on ignition	1.38	1.5	2.25
Insoluble residue	1.18	0.5	–
SiO ₂	20.91	21.5	37.14
CaO	62.18	66.6	37.40
Al ₂ O ₃	5.82	5.2	9.15
Fe ₂ O ₃	3.40	2.8	1.05
MgO	2.36	1.0	11.70
SO ₃	2.78	1.0	0.37
Mineralogical composition (%)	C ₃ S-42-46, C ₂ S-25-27, C ₃ A-6-10, C ₄ AF-5-101	C ₃ S-54-62, C ₃ A-5-10, C ₂ S-20-22, C ₄ AF-10-13	–

Tabla 6 Comparación en las composiciones entre la escoria de horno alto, el cemento Portland y el Clinker. Fuente: B. Das et al 2007.

La escoria de horno alto se presenta en dos estados, escoria de enfriamiento al aire y granulada, la granulada es la que se usa como aditivo del cemento mientras que la otra se usa en pavimentos, carreteras o relleno de paisajes.



(a)

(b)

Figura 3: *Escorias de horno alto*: (a) Escoria de enfriamiento al aire. (b) Fuente: Escoria granulada. <http://www.slg.jp/e/slag/kind.html>

4.2 ESCORIA DE ACERÍA

El arrabio que sale de los hornos altos no se convierte en acero hasta llegar a la acería, en la que se introduce en un convertidor y la lanza de oxígeno provoca una reacción que tiene por consecuencia el empobrecimiento en carbono hasta bajar del 2.11%. Este empobrecimiento trae como consecuencia la generación de residuos denominados escorias de acería. La producción actual de escoria de acería está sobre 150 – 200 kg / ton de acero (*B. Das et al 2007*).

La típica composición de la escoria de acería viene reflejada en la siguiente tabla Tabla 7. Como se puede apreciar los componentes principales son el Fe, CaO y SiO₂. El alto contenido en CaO hace que, en muchas plantas siderúrgicas, la escoria de acería sustituya a la caliza y dolomía como fundentes o se mezclen para introducirlas al horno alto.

Constituents	Percent	
	Sample 1	Sample 2
SiO ₂	12.16	12.0
Al ₂ O ₃	1.22	1.58
FeO	26.30	27.89
CaO	47.88	50.0
MnO	0.28	–
MgO	0.82	1.50
P ₂ O ₅	3.33	3.35
S	0.28	0.30
LOI	7.54	–
Na ₂ O	0.036	–
K ₂ O	0.071	–

Tabla 7 Composición química de dos muestras de escoria de acería. Fuente: B. Das et al 2007



Figura 3 Escoria de acería. Fuente: Google, 2017.

La escoria de acería puede tener múltiples aplicaciones como el uso en fertilizantes, como fuente de recuperación de materiales valiosos, etc. De hecho, la recuperación de metales valiosos a partir de escoria de acería está desarrollando nuevas técnicas de recuperación de estos materiales por ejemplo, la adicción de pequeñas cantidades de mineral que hacen solidificar antes los silicatos para poder recuperar metales fundidos como pueden ser el vanadio o el cromo.

4.3 LODOS DE ACERIA

Las finas partículas recuperadas después del lavado de los gases de escape del convertidor van conformando un lodo conocido como lodo de acería. Este subproducto puede contener altos niveles de CaO, Zn, Pb, etc., dependiendo en gran medida del tipo de caliza o dolomía que se esté usando como fundente en el horno alto y de la composición química de la chatarra que se añade al convertidor. Para las acerías, el mayor obstáculo en el reciclado de sus lodos es su alta humedad, situada entre un 35 -40 %, que hace imposible su reutilización en la planta de sinterizado. Con las nuevas políticas de *zero-waste* y de reutilización industrial ha sido necesario diseñar nuevas rutas de reciclado para este material. Es un lodo rico en hierro y cal por lo que es interesante su reciclado.

El análisis químico de un lodo generado en la acería viene descrita en la Tabla 8.



Constituents	Percent	
	Sample 1	Sample 2
Fe (total)	64.12	61.0
FeO	79.58	76.93
Fe ₂ O ₃	2.79	1.43
CaO	8.9	10.59
MgO	0.38	0.38
SiO ₂	0.71	1.97
Al ₂ O ₃	0.32	0.95
P	0.101	0.126
MnO	0.10	0.24

Tabla 8 Análisis químicos de un lodo de acería. Fuente: *B. Das et al 2007*.

El hierro presente en el lodo se suele encontrar en su estado bivalente de reducción. Curiosamente se observa que el contenido en alúmina Al_2O_3 es bastante menor que el presente en la mena de hierro por lo que presenta ventajas para su adición directa al convertidor.

Para maximizar el uso de este lodo en la planta de sinterizado se hace necesaria la prepeletización. Ensayos en plantas piloto han demostrado la viabilidad técnica de reciclar millones de toneladas de lodos y escorias que están depositados en vertederos para convertirlos en productos utilizables y con valor añadido, ya sea para el mismo caso que fueron creados es decir el crear acero, o simplemente como fuente de recuperación e metales secundarios, por ejemplo el cinc el vanadio o el plomo.



5 REAPROVECHAMIENTO EN EL USO DE RESIDUOS

Las políticas sobre tratamiento de residuos en Europa tienen por cometido la reducción tanto del impacto medioambiental como sobre la seguridad pública y, por otra parte la mejora de la eficiencia en el uso de recursos. Para cumplir con este cometido se requiere unos niveles de reciclado mucho más altos, así como una minimización de la extracción de los recursos naturales si se quiere gozar de una sostenibilidad en el futuro. Gran parte de los esfuerzos que se llevan a cabo hacia este objetivo pasan por hacer una adecuada gestión de los residuos, ya sean urbanos o industriales.

Dentro del programa **Horizonte 2020** se está llevando a cabo una serie de propuestas medioambientales tal como la *7th Environment Action Program*, en la cual se han propuesto ciertos puntos a cumplir por las economías europeas.

- Reducción del volumen de residuos.
- Maximización del reciclado y el re-uso.
- Limitación de la incineración para la recuperación de energía.
- Limitación en la creación de vertederos para materiales no reciclables o recuperables.
- Implementación y estandarización para los estados miembros de un plan por objetivos.

De acuerdo con la Directiva Europea, en el marco de residuos (2008/98/EC) se ha introducido un nuevo concepto denominado las **5R** hacia la sostenibilidad.



Figura 5 Política de acción de las 5R. Fuente: www.wtert.eu/default.asp?Menue=14&ShowDok=25



Si se quiere cumplir con esta política se han de encontrar nuevos mercados para poder llevar el proceso productivo a lo que se conoce como **zero-waste** o no residuos. Esta necesidad ha calado hondo en las empresas, las cuales han redefinido su idea de negocio llevando la tradicional economía de empresa basada en una cadena lineal de procesos productivos hacia lo que se conoce como **economía circular**, en la que los derivados de los procesos productivos son tratados como subproductos.

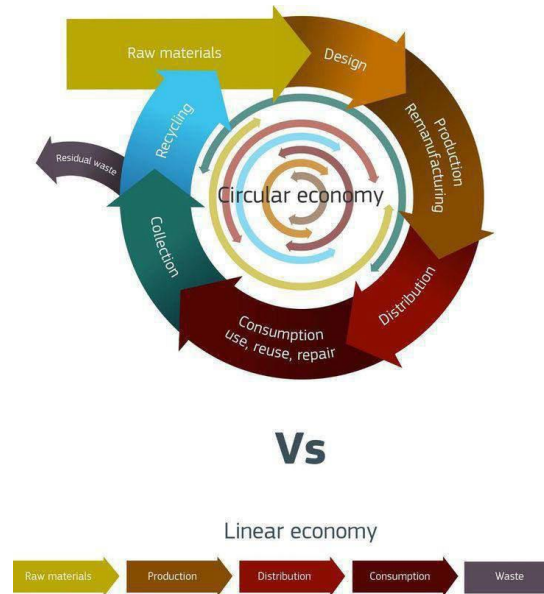


Figura 6 Economía circular vs economía tradicional. Fuente: www.pinterest.com



6 CASO DE USO: VERTEDERO SIDERÚRGICO

Con el fin de valorar la viabilidad del aprovechamiento de residuos siderúrgicos se establece un vertedero genérico que represente la mayor parte de los vertederos generados a lo largo de más de 50 años de producción de acero con los métodos actuales.

Para la configuración de este vertedero se han adoptado características de diversas escombreras, considerando los siguientes criterios:

- Se tratarán vertederos históricos que tengan un mínimo de 20 años de antigüedad, con el fin de que se hayan producido ya efectos de compactación, filtrado y meteorización que habrán modificado las características iniciales de vertido.
- Se buscan vertederos que mayoritariamente contengan escorias de acería. Dado el mayor uso que tradicionalmente han tenido las escorias de horno alto en el sector de la obra civil y construcción, es más habitual encontrar vertederos inalterados de escorias de acería en todo el mundo.
- A pesar de ser básicamente de acería, los vertederos contienen en general otros materiales que, aunque pueden estar presentes en cantidades poco importantes, pueden condicionar su explotación, como lodos de acería o de laminación.
- El vertedero representa sólo aquellos lugares de residuos inertes, nunca peligrosos que deben ser tratados de acuerdo a la legislación y no son objeto de recuperación,
- El criterio básico de explotación será, además de los aspectos económicos y técnicos, la evitación de la generación de impacto ambiental en el entorno.
- Con el fin de evaluar los aspectos climatológicos, el vertedero se sitúa en Asturias.

Es decir, se pretende diseñar un proceso que pueda ser aplicado a cualquier vertedero siderúrgico de estas características mediante su aplicación a este caso genérico.

La estimación de residuos del vertedero modelo es la siguiente:

MATERIALES	CANTIDADES
Escorias de Horno Alto	3 Mt
Escorias de acería	7 Mt



Lodos de Horno Alto	1.4 Mt
Lodos de acería	0.5 Mt
Refractarios	0.33 Mt
Cenizas de central térmica	1.8 Mt
Escombros de derribos y movimientos de tierras	1.8 Mt
Dolomías, cal y basuras	0.8 Mt

Tabla 9 Estimación de los residuos depositados en la escombrera modelo.

Los residuos predominantes en el vertedero tienen un tamaño de grava, existiendo zonas en las que predomina el tamaño arena.

Los vertidos se pueden localizar en zonas diferenciadas según el tipo de residuo depositado. Así se pueden identificar zonas con predominancia de escorias, escombros, cenizas o lodos.

La superficie afectada se considera cercana a 25Ha, anexa a un área industrial.

6.1 HIDROLOGÍA

El vertedero se encuentra en la Cuenca Costero Central la cual, cuenta con una superficie de 542.896.202 metros cuadrados. Presenta un relieve moderado a bajo con colinas suaves y redondeadas y un gran espacio de rasa costera.

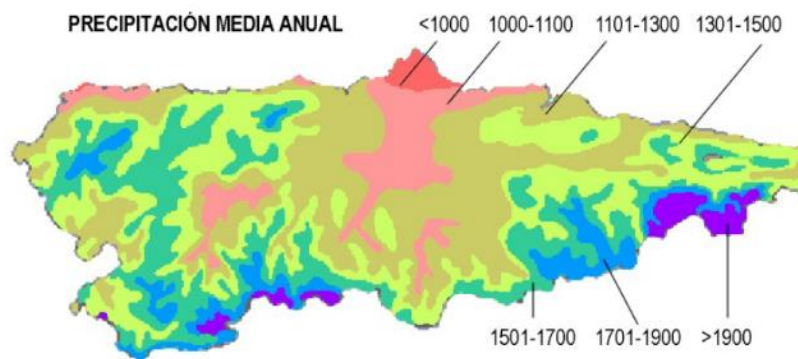
La Cuenca Costero Central es una zona densamente poblada y muy industrializada, por lo que los cauces y vegas se encuentran muy antropizados, aumentando los riesgos de que se produzcan daños en caso de desbordamiento.



Mapa 2 Cuencas hidrográficas de Asturias. Fuente: Indurot 2003.

La Cuenca Costero Central se divide en un total de 7 subcuencas. La zona que se ha seleccionado para la ubicación se encuentra en la subcuenca del río Tabaza, siendo esta una de las tres más importantes de las subcuencas junto con la del río Piles y la del río Aboño. Cuenta con una superficie de 175.143.901 m². El río Tabaza desemboca en la ría de Avilés. Gran parte del agua de esta cuenca está regulada por pequeños embalses. Existen dos, Trasona y Corvera y su objetivo es suministrar agua a ArcelorMittal. En el Norte del vertedero hay un manantial de agua potable.

Las precipitaciones anuales en la zona del vertedero se sitúan entre los 1000 y 1100 litros por metro cuadrado, siendo este valor medio de los más bajos de los registrados en el Principado de Asturias. Este factor es muy importante ya que estima el agua media recibida o que se precipita sobre el vertedero, influyendo en la estabilidad y movilidad de los contaminantes.



Mapa 3 Mapa de precipitaciones anuales medias en el Principado de Asturias. Fuente: Universidad de Oviedo. <http://www6.uniovi.es/~feli/Clima/Lluvias.html>



6.2 GEOLOGÍA

La zona elegida se dispone sobre cuatro formaciones geológicas distintas, tres de ellas de edad Devónica, otra Mesozoica y por último Triásica:

- Devónico:
 - o Areniscas del Naranco.
 - o Calizas de Candás.
 - o Areniscas de Candás.
- Mesozoico:
- Triásico.

1) Areniscas del Naranco

Sigue la serie litológica a la Caliza de Moniello y hace fácil su distinción. Se trata de una formación compuesta principalmente por areniscas, en su mayoría ferruginosas además de pizarras, aunque en la parte inferior puede haber presencia de calizas dependiendo de la zona. Al igual que otras formaciones Devónicas es un depósito de escasa profundidad, unos 400 metros.

2) Calizas de Candás

Su espesor es considerablemente mayor, alcanzando unos 400 m. Aunque la sucesión esta interrumpida en Luanco por la presencia de un retazo de materiales del Cretácico Inferior, el intervalo pedido no debe ser muy importante. La sucesión es de abajo a arriba como sigue: (J. Truyols et M. Julivert, 1976)

1. Muro: arenisca del Naranco.
2. Calizas algo margosas (este nivel forma la punta de la vaca al N. de Luanco). Su potencia es de 60 m.
3. Areniscas de grano fino. Potencia de 45 m.
4. Pizarras y margas con algunos braquiópodos, que forman el acantilado al N. del muelle de Luanco. Estos materiales podrían formar continuidad con las pizarras que aparecen inmediatamente al S. del afloramiento de Cretácico, por lo que se reúnen aquí en un solo nivel. El espesor no puede ser predeterminado por consiguiente con exactitud. Potencia entre 50-100 m.



5. Calizas, predominantemente arrecifales, que culminan con un banco masivo de estromatopóridos, en El Astillero. Potencia de 200 m.
6. Areniscas amarillentas y ferruginosas alternando con niveles pelíticos. Potencia de 80 metros.
7. Calizas y margas grises, con niveles algo arenosos, con un nivel de areniscas finas de 10 m, situado a 70 m de la base. Potencia 150 m.

Las principales diferencias de las calizas de Candás en esta ubicación es que presenta un mayor contenido en arcillas, así como un mayor espesor haciendo de ellas un material poco permeable.

3) Areniscas de Candás

A la caliza de Candás le sigue una formación arenosa denominada Areniscas de Candás. La arenisca de candás es una formación formada por areniscas y por pizarras alternantes con un gran predominio de las primeras. Presenta a menudo estratificaciones cruzadas y son en general ferruginosas. El espesor total de la formación es de unos 375 metros.

4) Triásico

Se sitúa discordante sobre el Mesozoico, estando en contacto a través de una falla en la zona del vertedero. Esta falla es de escala local, y atraviesa el vertedero de noreste a sureste. Las obras del polígono industrial de Tabaza II ofrecen un corte de entre 15 a 20 metros en varios taludes.



Figura 4 Foto de un talud triásico de la zona durante obras en el 2006.

Se trata de un tramo rojizo, caracterizado por una alternancia de areniscas arcillosas y arcillas, generalmente arenosas o limoníticas, siendo frecuente que los bancos de areniscas presenten estratificación cruzada. Las areniscas son de grano fino con y a



menudo tienen oquedades rellenas de arcilla roja, no sobrepasando los diferentes bancos el metro de espesor.

6.3 HIDROGEOLOGÍA

El manantial situado al Norte del vertedero se emplaza en la intersección del triásico con las Areniscas de Candás y las Calizas de Candás. Mientras los materiales triásicos son impermeables y no forman acuífero, las calizas y las areniscas son materiales permeables, aunque de distinta naturaleza.

Estudios propios de la empresa llevados a cabo en 2006 concluyeron que las areniscas de Candás son de grano fino y presentan oquedades y porosidad rellenas de arcillas rojas, por lo que no son un buen material para funcionar como acuífero. Si se tiene en cuenta que en la zona se produce una surgencia natural que forma un arroyo que desembocaba unos cientos de metros ladera abajo en el cauce del río Tabaza, y que en el cauce de este arroyo era grande debido a la presencia de molinos, estamos ante una surgencia natural de gran caudal, más coincidente con la transmisividad de un acuífero cárstico que de un acuífero libre de baja porosidad y baja transmisividad.

El flujo de las aguas subterráneas tiene un gradiente de norte a sur, y la surgencia se produce en el punto donde se produce una discontinuidad del material que forma el acuífero, en este caso la falla que pone en contacto el Triásico con el Devónico.

El vertedero siempre se encuentra aguas abajo de la surgencia del pozo de abastecimiento. Este hecho es de especial importancia ya que los lixiviados producidos al atravesar el agua de lluvia la masa vertida, presenta igual que el agua subterránea un gradiente hacia el sur, por lo que estos nunca pueden llegar a una interfase en la que se pudiesen infiltrar al mismo. Los lixiviados llegarían al terreno natural en donde se encontrarían con materiales triásicos o con areniscas de Candás. Sobre estas últimas existe una importante formación de cubrición cuaternaria de naturaleza clástica y con abundante matriz mixta. En sondeos situados en esta zona se ha encontrado un importante nivel de base de arcillas, muy compactadas por el peso del depósito superior y que forman un excelente nivel impermeable. Los lixiviados no penetrarían esta barrera por lo que circularía como si el vertedero fuese un acuífero libre entre la intersección entre el terreno natural y el vertido, siguiendo el gradiente que marca la antigua morfología de la ladera, en dirección al cauce del río Tabaza.



6.4 CARACTERISTICAS GEOTECNICAS

El vertedero se encuentra cerrado desde hace más de 10 años, no produciéndose desde entonces ningún tipo de deslizamiento, ni caída de material a las zonas circundantes. Por lo que puede considerarse como un vertedero estabilizado.

Se sitúa sobre un antiguo valle o curso torrencial que en la actualidad se encuentra entubado y que divide en dos las laderas sobre las que se asienta el vertedero. La zona oeste del vertedero se sitúa sobre una ladera que buza al sur de manera suave con una pendiente que varía entre el 10-15 %, mientras en la zona este del vertedero se sitúa sobre una ladera que buza al oeste con pendientes que oscilan entre los 15 y los 25 grados. Los taludes del vertedero presentan pendientes de hasta 35 grados. A pesar de ello las características de los materiales depositados en él, mayoritariamente escorias siderúrgicas le confieren una gran estabilidad a la masa de vertido. No existiendo procesos de inestabilidad en las laderas del vertedero.

No existen fallas activas, ni estratificaciones muy marcadas en las laderas sobre las que se asienta el vertedero.

La erosión del vertedero es baja gracias a las características del material que forma los taludes. Las escorias de procesos siderúrgicos tienen un tamaño de grano grueso y una vez depositadas sufren un proceso de cementación si se encuentran expuestas a las inclemencias del tiempo y el agua. Los taludes se encuentran poco cubiertos de vegetación y el régimen de precipitaciones sea elevado, no se aprecian cárcavas ni canales de escorrentía en las superficies de los taludes.

Dentro del vertedero existen dos torres de tensión que pueden verse afectadas por un posible deslizamiento. En los límites del vertedero podrían ser afectados por un deslizamiento distintas infraestructuras. Entre las que enumeraremos las carreteras As 110, Ce-2, una carretera comarcal, la captación de agua potable situada al norte del vertedero, las viviendas de la Granda y las instalaciones de Arcelor España, de gran riesgo ya que en la zona se encuentran varios depósitos de sustancias peligrosas.

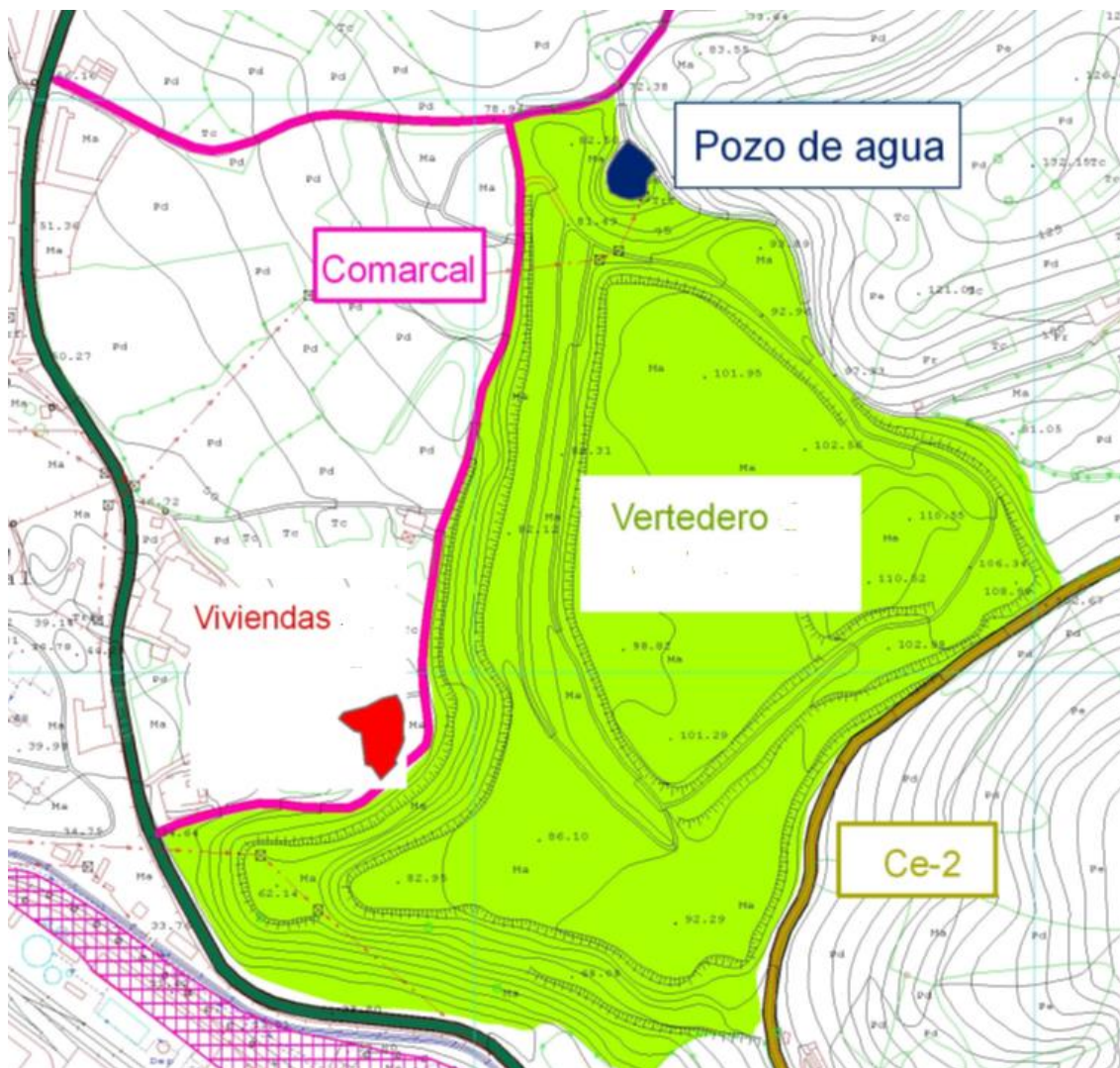


Figura 5 Elementos que se pueden ver afectados por deslizamientos del vertedero. SITPA modificado.

En la figura 11 se muestra lo comentado anteriormente, los taludes podrían afectar a determinadas poblaciones o instalaciones industriales si llegase a darse un deslizamiento por rotura del talud.



7 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES

La caracterización de los materiales existentes en el vertedero requiere además de tomas superficiales, la realización de sondeos profundos. Dado el coste de los sondeos y la confidencialidad de la información, no es posible detallar toda la información referente a una escombrera específica. Con el fin de demostrar la viabilidad del método se presenta aquí información procedente de varias zonas y se modela como correspondiente a un vertedero único. De esa forma se obtienen 25 sondeos, unos del tipo a rotación con recuperación de testigo intacto para fines geotécnicos y otros a circulación inversa con fines medioambientales que se consideran ubicados en una malla tal como se presenta en la siguiente figura. Todo el resto de tratamientos y conclusiones se refiere a la información de estos datos sobre esta superficie sintética.

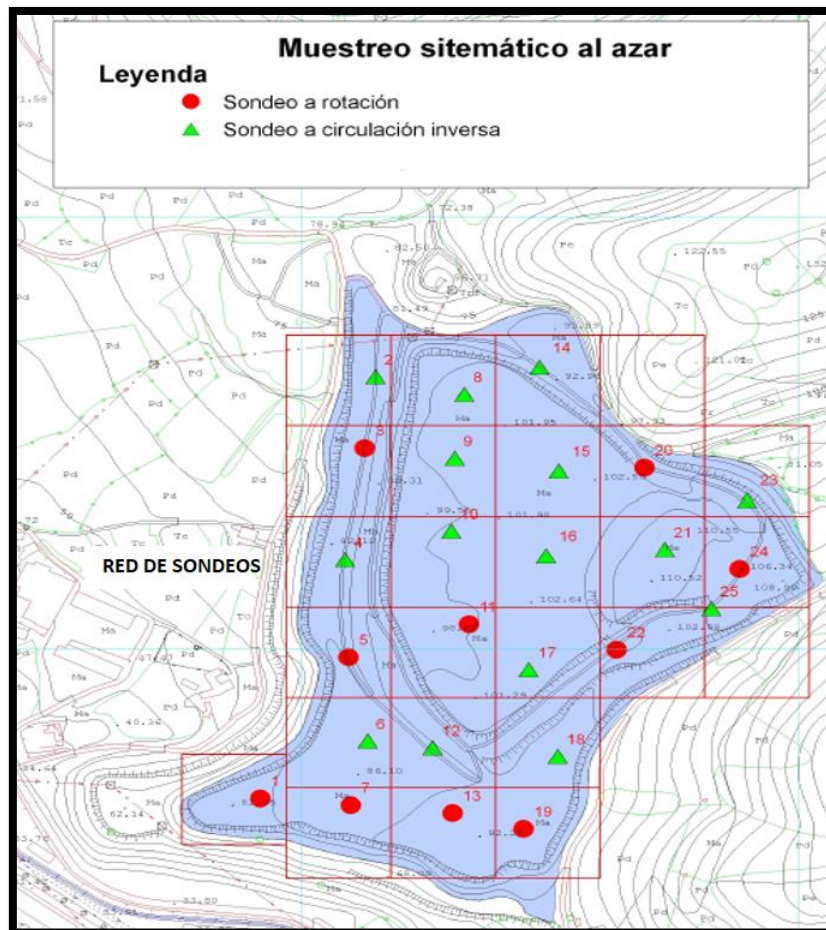


Figura 6 Red de muestreo de sondeos llevada a cabo en el vertedero.



Como el objetivo a alcanzar eran 71.5 metros se hizo una tabla resumen recogiendo cada sondeo con su cota de cabeza de sondeo su longitud total, que nos permite calcular su profundidad exacta y su número de muestras a la cota que se tomaron.

Sondeo	Cota	Metros	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	83,467	15,5					75	71.5
2	81,613	10,15					75	71.5
3	81,692	13,5					75	71.5
4	81,634	10,35					75	71.5
5	83,385	15				83	75	71.5
6	86,527	15,2				83	75	71.5
7	87,231	19				83	75	71.5
8	100,459	29		98	91	83	75	71.5
9	100,175	28,5		98	91	83	75	71.5
10	99,515	28,5		98	91	83	75	71.5
11	98,43	30,5		98	91	83	75	71.5
12	88,677	16,5				83	75	71.5
13	90,358	22,5				83	75	71.5
14	89,739	18,5				83	75	71.5
15	101,73	48,5		98	91	83	75	71.5
16	100,699	29,05		98	91	83	75	71.5
17	100,056	30,5		98	91	83	75	71.5
18	101	28,5		98	91	83	75	71.5
19	92,5	24,85			91	83	75	71.5
20	98	14			91	84		
21	110,345	37	105	98	91	83	75	71.5
22	98,042	24		98	91	83	75	
23	102,702	25		98	91	83		
24	106,18	17,8	105	98	91			
25	103,947	21,9		98	91	83		

Tabla 10 Representa los puntos de muestreos y el número de muestras a tomar en cada punto en función de su longitud y altura. Fuente: ArcelorMittal 2006.

7.1 TÉCNICAS DE PERFORACIÓN

En este apartado se comentarán brevemente las diferencias existentes entre los dos tipos de sondeos que se han ejecutado.



7.1.1 SONDEOS DE ROTACIÓN

El fundamento de avance consiste en la transmisión de una fuerza en modo de presión que tiene por consecuencia el avance y de un par transmitido al eje que tiene por consecuencia un giro a un útil de corte. En este caso se utilizó como útil de corte una corona de perforación. Este método está especialmente indicado cuando se desea realizar un muestreo en continuo de suelo, requerimiento para la caracterización geotécnica y mecánica de los materiales. El grado de dureza de los materiales (escorias de acería, parcialmente cementadas y que presentan una elevada resistencia mecánica) determinarán que se utilice una corona de diamantes y la necesidad de uso de fluidos de perforación, en este caso agua, como refrigerante de la corona, pero sólo en caso de que el avance sea absolutamente necesario para la consecución de los objetivos marcados y éste sea técnicamente imposible sin la adición de agua. El agua adicionada debe ser analizada previamente y encontrarse libre de cualquier posible contaminante y no de interferir en la composición química con el suelo si después se quiere hacer un muestreo químico.

-Ventajas:

- Recuperación continua del testigo.
- Bajo grado de alteración de la muestra.
- Buen registro del perfil perforado.

-Inconvenientes:

- Necesita aporte de gran cantidad de agua para la perforación de materiales duros como los presentes en el vertedero. El diseño y emplazamiento del sondeo tiene que estar muy bien calculado para que esta agua no produzca lixiviados que afecten al acuífero inferior.
- Presenta problemas de recuperación del testigo en materiales poco cohesivos. En el vertedero se aprecian escorias cementadas, similares a una roca, y escorias granulares con una cohesión semejante a la de gravas.
- Avance lento.

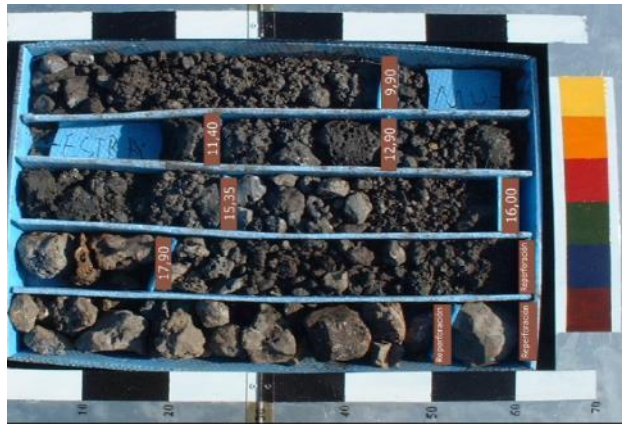


Figura 7 Testigos extraídos de un sondeo a rotación directa.

7.1.2 SONDEOS A CIRCULACIÓN INVERSA

Estos sondeos se han situado en zonas próximas al acuífero en las que no existía la necesidad de conocer las características mecánicas y geotécnicas de los depósitos.

En este sondeo la sonda ejerce un movimiento de avance y rotación, por medio de una mesa de rotación, al útil de corte, en este caso un martillo de fondo. El perfil dentado favorece la acción de corte y trituración del terreno, formando ripios. Para recoger estos la sonda utiliza aire. Este aire se transmite a través de unas aberturas del varillaje y del tricono ascendiendo a gran velocidad por el espacio anular y en su ascenso arrastra los ripios de perforación expulsándolos al exterior. Todo el material de salida pasa por un ciclón y en circuito cerrado cae al sistema de recogida, bolsa o bote de muestreo.

El medio auxiliar que debe acompañar a la sonda o máquina perforadora será básicamente un compresor que pueda proporcionar presiones máximas de 14-16 kg/cm² y caudales máximos de 20 a 25 m³/min. Este método se aplica fundamentalmente a suelos consolidados y rellenos heterogéneos.

-Ventajas:

- Avance muy rápido.
- Alta movilidad del equipo.
- Ausencia de adición de agua en la perforación y de generación de lixiviación a niveles inferiores o acuíferos.



- Gran grado de recuperación de materiales.

-Inconvenientes:

- Presenta disgregación y alteración de la muestra.
- Testificación dificultosa.
- La ejecución de los sondeos de circulación inversa requiere la adicción en el interior del tubo de un aceite para lubricar el martillo de fondo, este hecho puede originar contaminación de la muestra en hidrocarburos totales, dando un falso nivel de contaminación

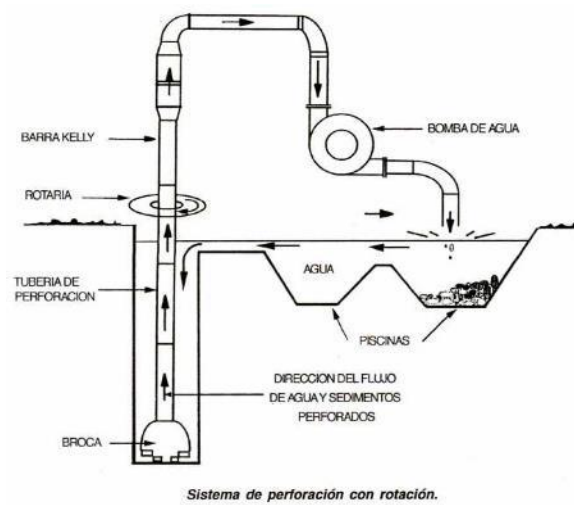


Figura 8 Esquema de un sondeo a circulación inversa.
Fuente: Sistema de Bibliotecas SENA.



7.2 DATOS DEL CONTENIDO EN HIERRO DE LOS SONDEOS

A continuación, se describirán todos los datos sobre el contenido en hierro en los sondeos con lo que más adelante se podrá elaborar un modelo de bloques en tres dimensiones con el que podrá hacer una estimación de los recursos y del valor de esta escombrera.

CONTENIDO EN HIERRO EN PARTES POR MILLÓN (PPM)						
SONDEO	COTA	ESCORIA	FINOS	T. NATURAL	ESCOMBRO	OTROS
1	75	202514				
	71.5	163337				
2	75				26231	
	71.5				12601	
3	75	25595				
	71.5	197325				
4	75				29203	
	71.5				39069	
5	83				27670	
	75	150566				
	71.5	166776				
6	83	169181				



	75	171361				
	71.5	173189				
7	83	114642				
	75	157381				
	71.5					9879
8	98	118910				
	91	166336				
	83	117899				
	75	112370				
	71.5	122913				
9	98	117707				
	91	146231				
	83	116506				
	75				34435	
	71.5				28117	
10	98	95547				
	91		31763			



	83	135280				
	75		106473			
	71.5		162783			
11	98	197325				
	91	88624				
	83		46415			
	75		22333			
	71.5		19647			
12	83	4187				
	75	14744				
	71.5	1075				
13	83	54414				
	75	11516				
	71.5	3092				
14	83				22806	
	75				26636	
	71.5				25466	



15	Sup.				16883	
	98	136937				
	91	17760				
	83		18535			
	75		19522			
	71.5		21635			
16	98	138189				
	91	148307				
	83		20156			
	75		23631			
	71.5		25309			
17	Sup.				64206	
	98	14014				
	91	163617				
	83				37421	
	75				15001	
	71.5				21501	



18	98	122330				
	91	141973				
	83	51340				
	75	25993				
	71.5	33225				
19	91				10182	
	83	147553				
	75	7871				
	71.5	21460				
20	91	171973				
	84			120676		
21	105		122864			
	98		80493			
	91		174985			
	83		86027			
	75		67014			
	71.5		35828			



22	98	145344				
	91	142235				
	83		57015			
	75		23150			
23	98		142643			
	91		31425			
	83		28568			
24	105		25825			
	98		32102			
	91		37899			
25	98		22211			
	91		37577			
	83		30319			



7.3 MODELIZACIÓN DEL CONTENIDO EN HIERRO

Con objeto de hacer una estimación del potencial explotable de esta escombrera se procederá a su valorización a partir de los datos expuestos anteriormente. Para ello, se hará uso del programa RecMIN. El RecMIN (Recursos Mineros) es un software libre que se puede descargar en la página (http://recmin.com/WP/?page_id=93) ha sido desarrollado y patentado por el profesor Dr. Ingeniero de Minas de la Universidad de Oviedo Cesar Castañón Fernández.

7.3.1 INTRODUCCIÓN DEL MODELO TOPOGRÁFICO

Como se ha señalado anteriormente la escombrera tiene una topografía no homogénea, presenta terrazas y se encuentra depositada en una depresión. A partir de un levantamiento topográfico y taquimétrico se puede delimitar el perímetro de la escombrera, dotándola de coordenadas UTM para el emplazamiento de los sondeos de carácter exploratorio.

Se toman un total de 107 puntos, número suficiente para dotar de coordenadas a la carretera que circunda el perímetro del vertedero y a los sondeos geológicos.

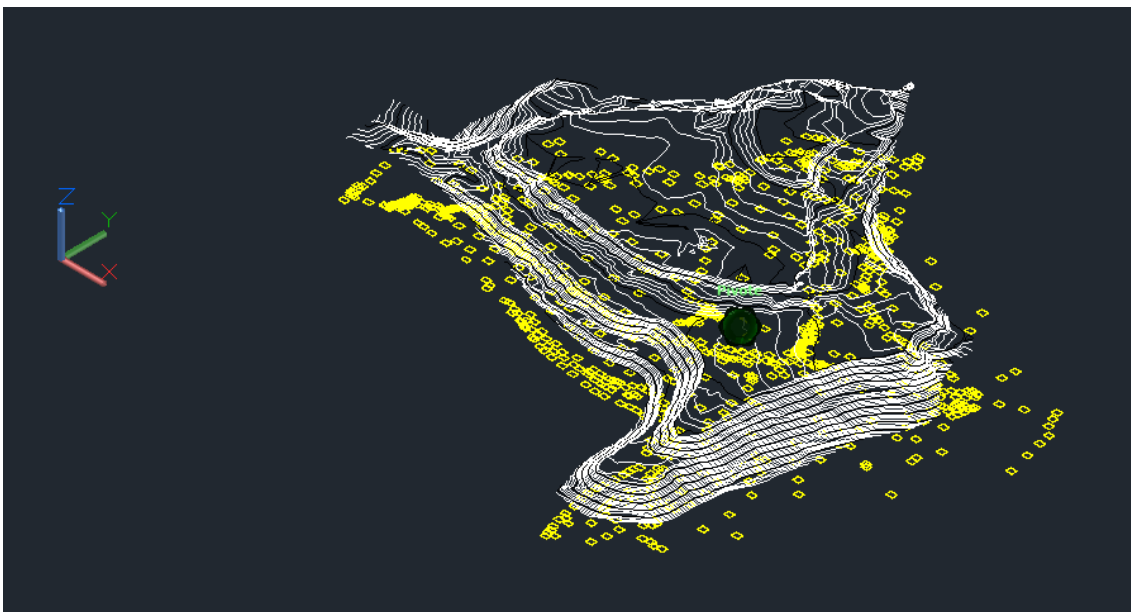


Figura 9 Curvas de nivel referenciadas sobre puntos de levantamiento topográfico en Autocad, formato DWG.

Mediante la opción “exportar a” de Autocad, se ha convertido el archivo .DWG en un archivo de extensión .DXF con el que Recmin puede trabajar. Una vez conseguido este



archivo, se ha importado desde la interfaz del RecMIN y se ha generado una superficie RecMIN de extensión *.su con la que poder trabajar en el módulo gráfico.

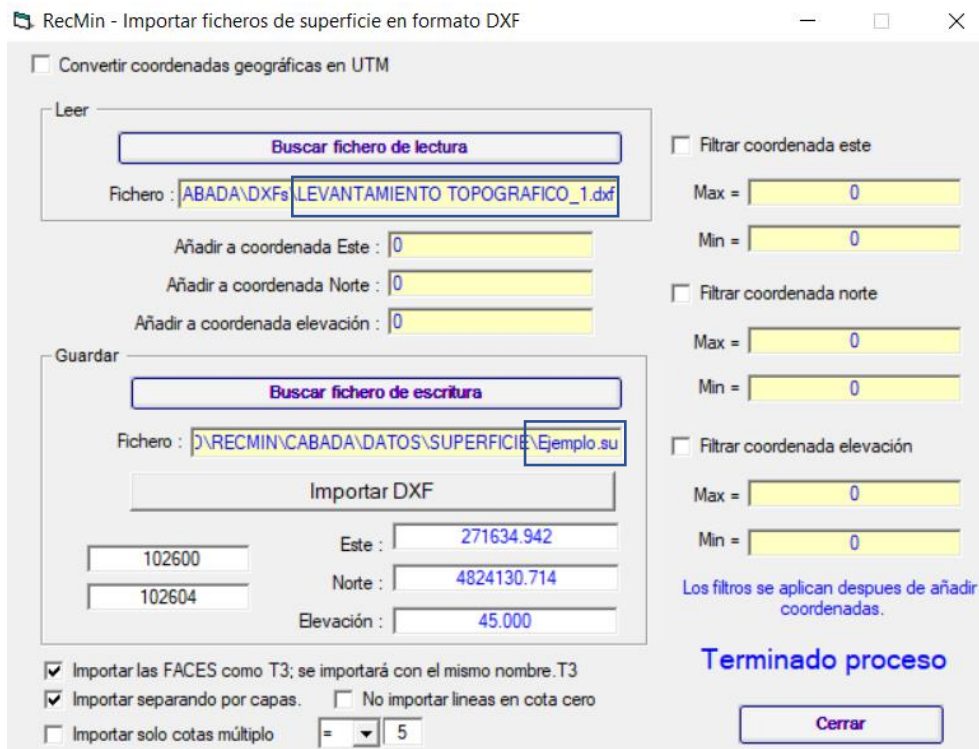


Figura 10 Convirtiendo archivo .DXF a *.su mediante el RecMIN para operar en el módulo gráfico.

Una vez conseguido el archivo superficie, vamos al módulo de dibujo del RecMIN y ya se puede dibujar la topografía.

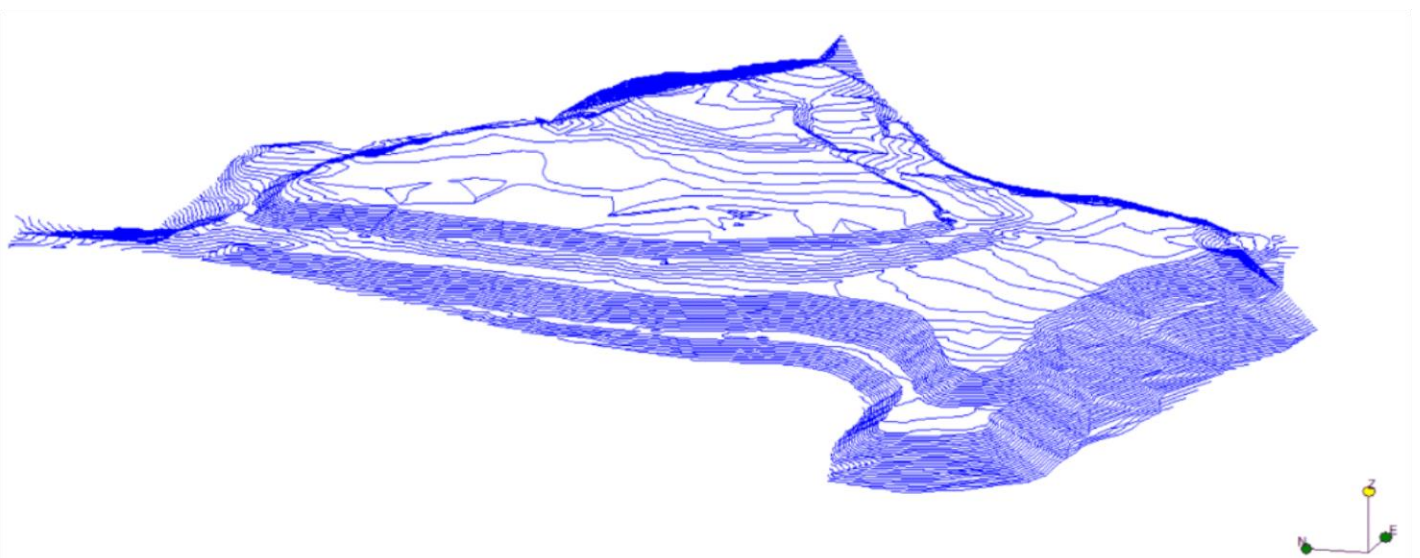


Figura 11 Modelo 3D de las curvas de nivel del vertedero en RecMIN.



Como se puede apreciar el nivel de detalle conseguido es muy bueno aun así se puede conseguir una topo triangulada para su visualización en tres dimensiones, haciendo un archivo tipo .T3. como el que podemos ver a continuación.

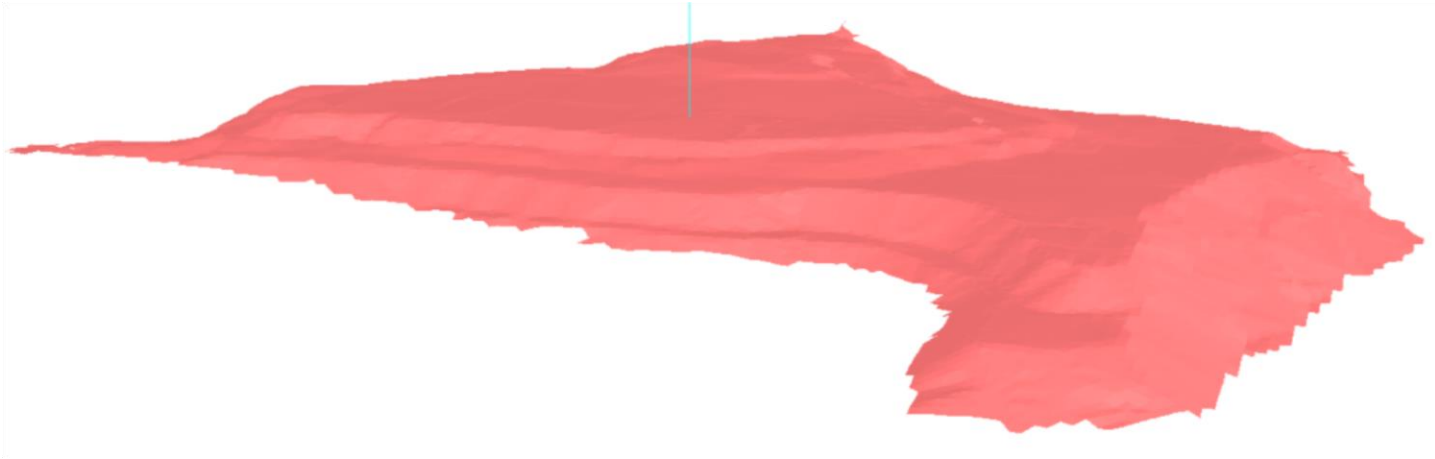


Figura 12 Modelo triangulado en 3D de la escombrera en RecMIN.

7.3.2 INTRODUCCIÓN DE SONDEOS

Para la introducción de los sondeos, fueron generados varios archivos de texto .txt los cuales, fueron importados por el RecMIN para añadirlos a su base de datos tipo access. Se separaron en:

1. Posición de la cabeza del sondeo
2. Desviaciones de los sondeos

Como todos los sondeos que se hicieron fueron verticales, el archivo de desviaciones fue modificado de manera rápida en la propia base de datos



SONDEO	ESTE	NORTE	ELEVACION
1	271237.4	4824231.9	83.467
2	271357.3	4824734.5	81.613
3	271340.3	4824624.1	81.692
4	271324.8	4824545	81.325
5	271330.5	4824394.1	85.2
6	271343.2	4824288.3	86.385
7	271327.6	4824219.2	87.231
8	271477.1	4824703	100.459
9	271441.9	4824659.2	100.175
10	271429.2	4824536.5	99.515
11	271448.9	4824416.6	98.43
12	271416.5	4824284.1	88.677
13	271393	4824200	90.358
14	271501.1	4824749.5	89.739
15	271566	4824579.1	101.73
16	271491.2	4824481.5	100.699
17	271534.3	4824428.8	100.619
18	271527	4824254	94.2
19	271468.7	4824178.3	92.419
20	271633.7	4824608.5	98
21	271649.2	4824519.6	110.345
22	271606.4	4824408.8	98.042
23	271739.5	4824571.8	102.702
24	271701.2	4824477.3	106.18
25	271669.2	4824450.5	102.947

IDSONDEO	DISTANCIA	INCLINACION	DIRECCION
1	0	-90	0
1	5	-90	0
1	15	-90	0
3	0	-90	0
3	13	-90	0
4	0	-90	0
4	10.4	-90	0
5	0	-90	0
5	15.2	-90	0
6	0	-90	0
6	15	-90	0
7	0	-90	0
7	19	-90	0
8	0	-90	0
8	29	-90	0
9	0	-90	0
9	28.5	-90	0
10	0	-90	0
10	29	-90	0
11	0	-90	0
11	30.5	-90	0
17	0	-90	0
12	16.5	-90	0
13	0	-90	0
13	23	-90	0
14	0	-90	0
14	18.5	-90	0
15	0	-90	0

Tabla 11 Tabla de posiciones de los sondeos en la base de datos usada por el RecMIN.

Tabla 12 Fragmento de la tabla de desviaciones extraída de la base de datos usada por el RecMIN.

Una vez introducidos correctamente en la base de datos ya es posible visualizarlos en el módulo de dibujo.

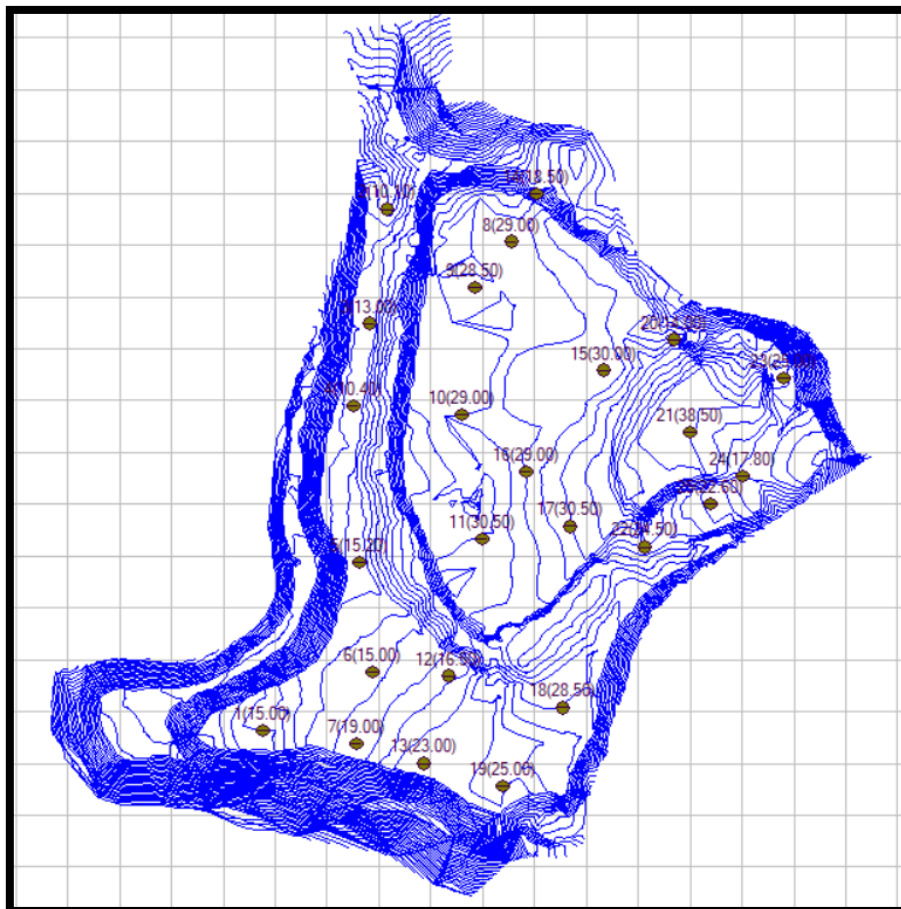


Figura 13 Vista de los sondeos sobre la topografía de la escombrera en RecMIN. Plano XY.



7.3.3 INTRODUCCIÓN DEL MODELO LITOLÓGICO

Los sondeos presentan unas columnas litológicas muy dispares debido a los años en los que se explotó la escombrera, no se hizo un plan de distribución de distintos materiales por zonas, así que, aunque predomine la escoria no es raro encontrarse fino, escombros, RSUs en tramos intermedios por lo que se ha hecho necesario hacer una simple agrupación de los distintos elementos en tres categorías básicas.

1. Escorias
2. Finos
3. Otros (refractarios, cemento, RSU)

Al fin y al cabo, el interés es el contenido en hierro, por lo que la distribución litológica interesa solamente para determinar las zonas predominantes de escoria de escorias, que son las que más contenido en hierro tienen, así como es el material más fácil de tratar.

IDLITOLOGIA												
NOMBRE CO	COLOR	ESTILO	DESCRIPCION	COLORPRINT	ESTILOPRINT	IDLITO	VER	DENSIDAD	BMP	BMPprint	ORDEN	
ESCORIAS	16711680	0		16711680	0	1	-1	2.8				1
FINOS	12615808	0		12615808	0	2	-1	1.8				2
OTROS	4227200	0		4227200	0	3	-1	2.2				3

Tabla 14 Tabla de identificación de la litología dentro de la base de datos usada por el RecMIN.

ID	DESDE	HASTA	IDSONDEO	IDLITO	
1236	0	1.5	1	3	
1237	1.5	15	1	1	
1239	0	10.1	2	1	
1241	0	3.5	3	1	
1242	3.5	5.5	3	3	
1243	5.5	13	3	1	
1244	0	10.35	4	1	
1245	0	15.1	5	1	
1246	0	0.5	6	3	
1247	0.5	15	6	1	
1248	0	1.6	7	3	
1249	1.6	13	7	1	
1250	13	14.5	7	3	
1251	14.5	19	7	1	
1258	0	4	8	3	
1259	4	7	8	2	
1260	7	9	8	3	
1261	9	13	8	1	
1262	13	14	8	3	
1263	14	29	8	1	
1264	0	2.7	9	3	
1265	2.7	5	9	1	
1266	5	14	9	2	
1267	14	28.5	9	1	
1268	0	7	10	1	

Tabla 13 Extracto de la base de datos de la litología para usar en el RecMIN.



Como se puede apreciar en las tablas, la densidad es un parámetro definido por lo que al hacer la estimación en el modelo de bloques se va a poder estimar el peso total o el peso de determinados sectores definidos.

7.3.4 INTRODUCCIÓN DE LAS MUESTRAS

El siguiente paso ha sido añadir todos los valores del elemento “Hierro” por cada sondeo y por profundidades de acuerdo a la tabla del contenido en hierro por sondeo y por cota. Esto se ha hecho al igual que los apartados anteriores en el menú de yacimientos del programa. Una vez metidos estos datos se podrá generar un diagrama de bloques para una posterior estimación.

ID	DESDE	HASTA	IDSONDEO	ELEMENTO 1
4052	0	7	1	200000
4054	7	15	1	160000
4055	0	6.6	2	25000
4056	6.6	10.1	2	12500
4057	0	6.7	3	15000
4058	6.7	10.2	3	200000
4059	0	6.6	4	15000
4060	6.6	10.2	4	40000
4061	0	2.5	5	25000
4064	2.5	10	5	150000
4065	10	13.5	5	160000
4066	0	15	6	170000
4073	0	2	9	110000
4074	2	9	9	130000
4075	9	17	9	130000
4076	17	25	9	60000
4077	25	28.5	9	29000
4078	0	4	7	90000
4079	4	12	7	135000
4080	12	15.5	7	50000
4081	0	2	8	110000
4082	2	9	8	145000
4083	9	17	8	135000
4084	17	25	8	115000
4087	25	28.5	8	118000
4088	0	1.5	10	95000
4089	1.5	8.5	10	55000

Tabla 15 Extracto de la base de datos de la escombrera en la que se detalla el contenido en hierro por sondeo y cota.



7.3.5 CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS DE BLOQUES

Una vez que ya se hubo introducido todos los datos necesarios a la base de datos del proyecto, se procedió a crear una nueva base de datos por bloques. Es decir, se procedió a dividir todo el volumen físico de trabajo en bloques de una determinada dimensión asignándole así unos ciertos valores litológicos, de masa y finalmente de contenido en hierro específico a aquellos bloques situados en las cotas de los sondeos.

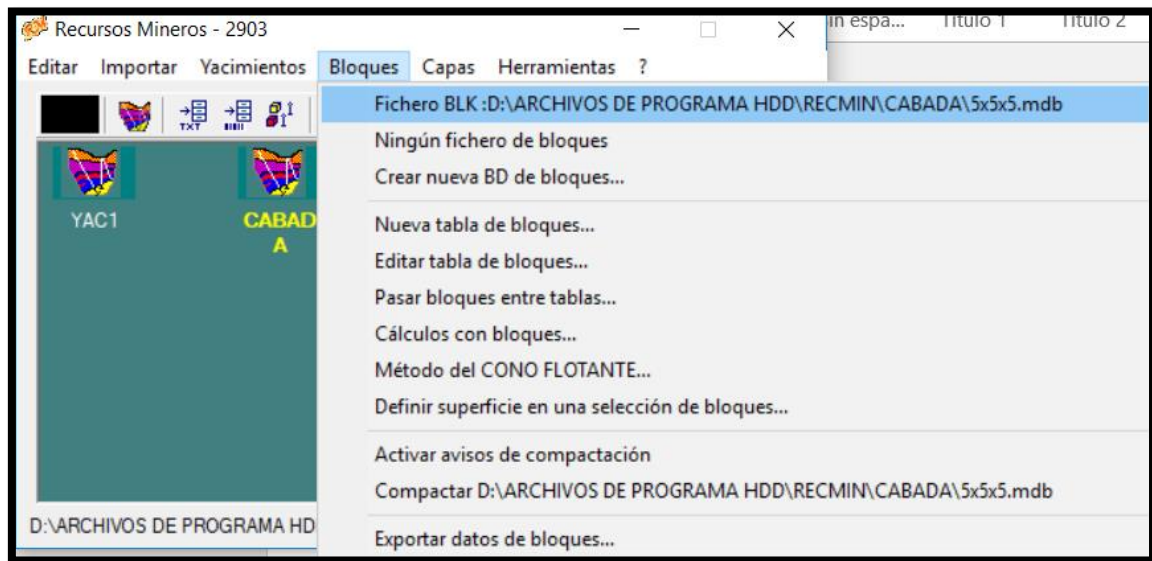


Figura 14 Creación de una base de datos de bloques en RecMIN

A continuación, se ha creado una tabla dentro de esa base de datos. En la tabla se definen las coordenadas X, Y, Z de comienzo para la generación de los bloques, así como también se define el tamaño de bloque, en este caso por mejor visualización se ha escogido un tamaño de bloque de 5x5x5. Los datos totales son los siguientes:

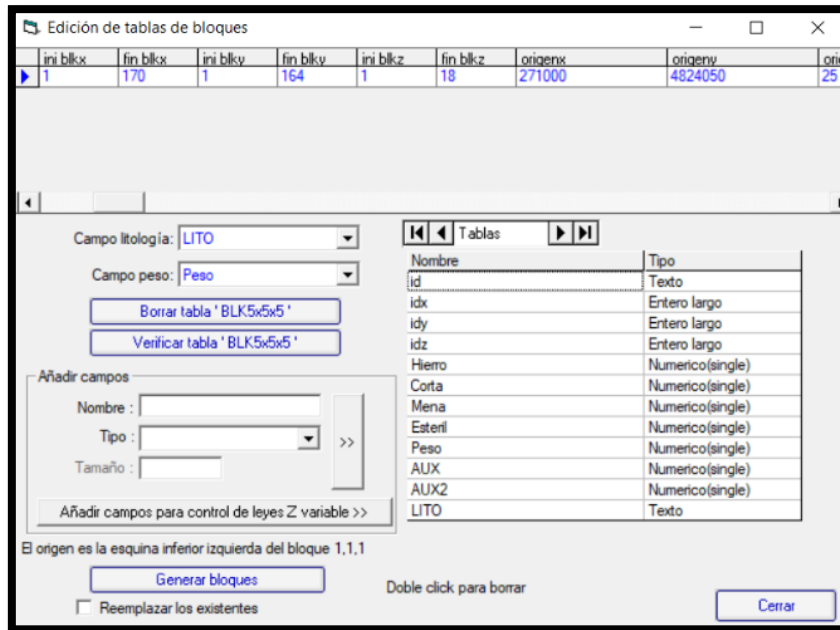


Figura 15 Creación de una tabla de bloques de tamaño 5x5x5 en el modelo .

Para este proyecto se han generado 62730 bloques en total, estos no son los bloques que representan el volumen de la escombrera ya que se encuentran sin filtrar, simplemente son una base de trabajo para los cálculos que se hicieron a continuación.

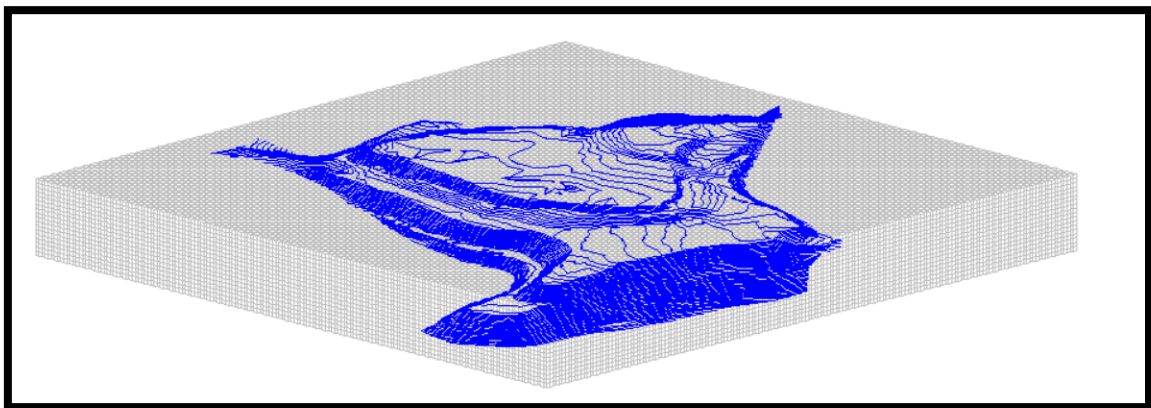


Figura 16 Base de bloques sobre la que trabajar.

Mediante las opciones de editar bloques con las que cuenta el programa es posible filtrar los bloques de la Figura 16 hasta que queden solo aquellos que representan el volumen real de la escombrera. Con las opciones desactivar bloques con la superficie, mediante cortes por plano en cota mínima de escombrera y mediante la desactivación por el perímetro de la superficie se puede conseguir algo como esto.

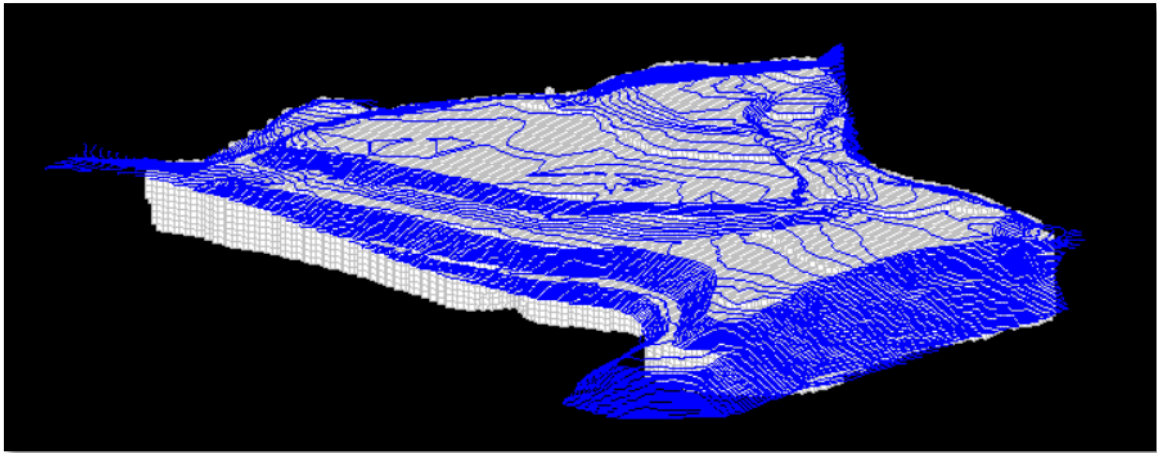


Figura 17 Modelo de bloques filtrado que representa el volumen real aproximado de la escombrera

7.3.6 ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS DE HIERRO

Una vez conseguida la base de bloques final sobre la que trabajar se puede hacer un cálculo de bloques en los que aplicando un método geostatístico, en este caso se ha hecho un krigiado exponencial, se puede inferir el contenido en hierro en bloques adyacentes a los sondeos que son bloques con parámetros definidos de inicio.

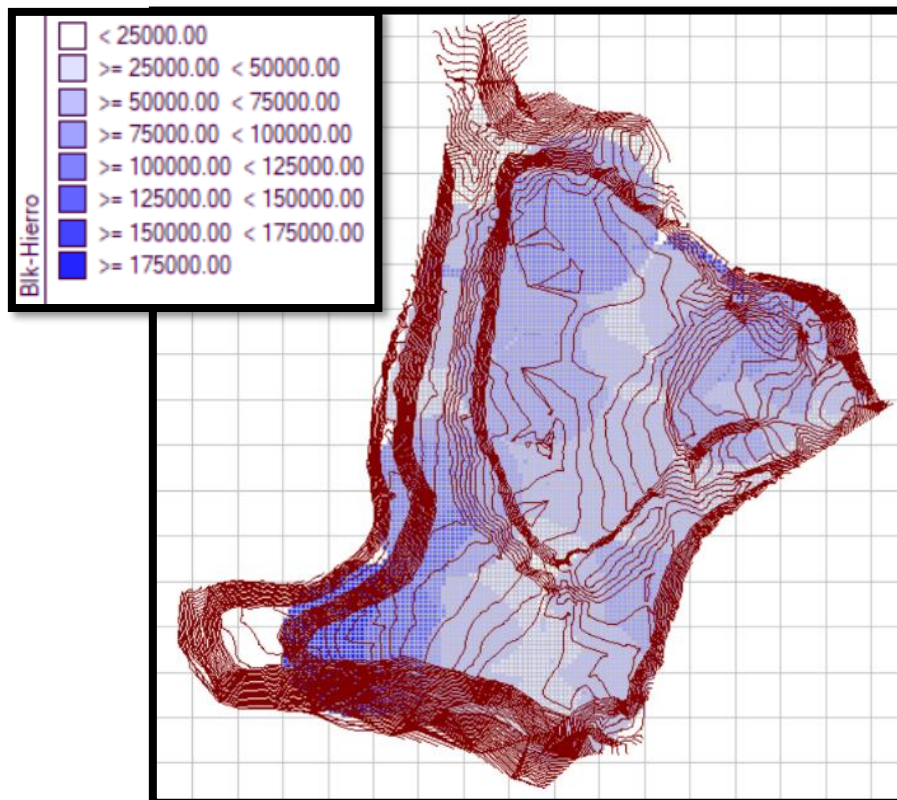


Figura 18 Distribución del contenido en hierro en g/t en el vertedero.



Como se puede apreciar en la Figura 18 la distribución del hierro es totalmente heterogénea, algo que era previsible ya que en los años en los que la escombrera estaba bajo operación no se seguían los criterios actuales de deposición. Como se puede observar la zona suroeste es la más propicia en el caso de hacer una explotación, aunque previamente sería interesante realizar más tomas de muestras en la zona sin definir ya que podría albergar gran cantidad de hierro y ser potencialmente explotable o ser totalmente estéril y quedar descartada ya que vista la heterogeneidad de las muestras caben ambas posibilidades.



8 PROPUESTA DE ACTUACIÓN

Dado que el objetivo de este proyecto es demostrar la potencial viabilidad de un aprovechamiento de recursos en escombreras, se ha hecho un modelo en él que se ha modelado de manera bastante aproximada una posible explotación.

Como se ha visto en la *Figura 18*, las mayores concentraciones de escorias con alto contenido en hierro se encuentran predominantemente en el talud Sur, por lo que se ha elegido este emplazamiento como un punto potencial para realizar una futura explotación.

Esta parte de la escombrera presenta otras ventajas adicionales más allá de su alto contenido en hierro: una de las dos entradas principales, con una explanada, está justo al lado y está comunicado con una buena carretera de acceso no muy transitada, facilitando así la operación de carga y transporte que podría hacerse dentro de la explanada de la escombrera y los camiones circularían casi sin tráfico hasta la planta de tratamiento.

En el estudio de la potencial explotación se han diseñado tres cortas distintas con el objetivo de averiguar cómo se comporta rentabilidad en función de distintos volúmenes y leyes con precios y costes actuales.

Todas las cortas se han elaborado con mismos datos de altura de banco y ancho de berma por lo que resultan taludes y ángulos iguales.

8.1 CASO DE EXPLOTACIÓN 1

Esta es la más grande de las tres cortas. Aunque aparentemente en la parte izquierda de los bloques aparezcan bloques con concentración de hierro cero (color blanco), esto se debe a que no se ha muestreado esa zona por lo que no puede realizarse la interpolación mediante geoestadística en esa zona. Es justo, por tanto, decir que esta corta está evaluada por debajo de sus posibilidades puesto que resulta evidente que la concentración de la punta del talud no es cero en la realidad.

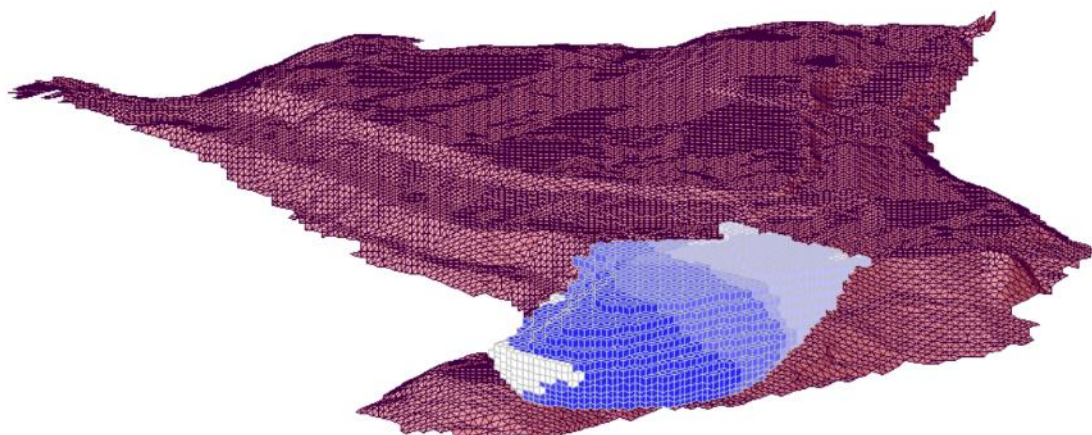


Figura 19: Diseño de la Corta 1 con sus bloques explotables elaborada en *RecMIN*.

8.1.1 DATOS DE LA CORTA 1

Los siguientes datos han sido extraídos de *RecMIN* mediante la opción “*Información*” situada en el menú de “*Bloques*”.

Nº de bloques	10,468
Volumen [m³]	1,308,500
Peso [toneladas]	3,510,725
Hierro Total [toneladas]	471,164
Ley media [ppm]	134,207
Densidad media [t/m³]	2.68

Tabla 16 Datos de los bloques correspondientes a la Corta 1.



8.1.2 DISEÑO POST-EXPLOTACIÓN

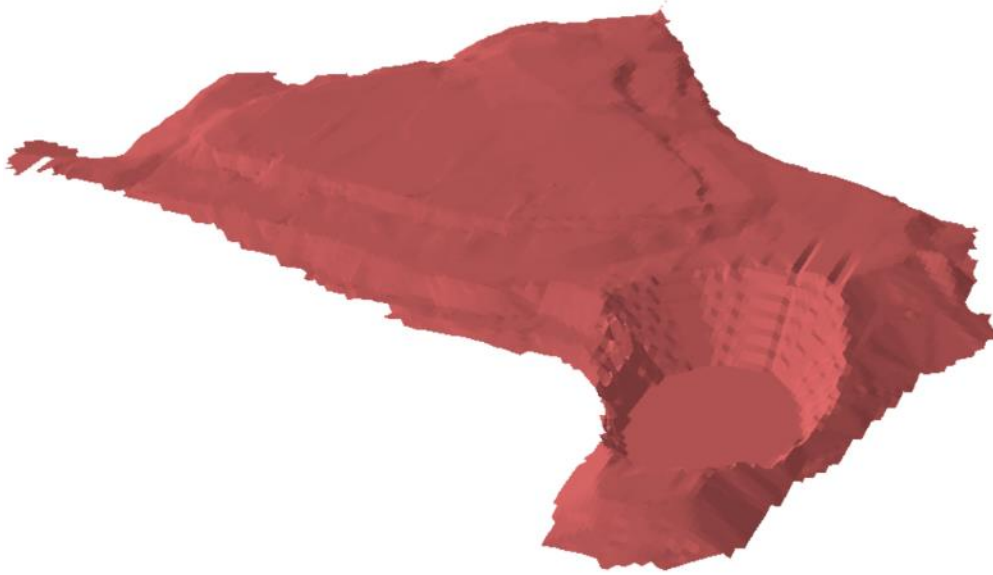


Figura 20 Diseño final de la Corta 1.

Como se puede apreciar en la *figura 20* la corta abarcaría gran parte del Sur de la escombrera. Esta zona, por el conocimiento litológico derivado de los sondeos ha sido caracterizada como predominantemente escoria, lo cual significa que tendrá baja erosionabilidad y buena estabilidad. Después de la total extracción se habría de proceder a la restauración.

8.2 CASO DE EXPLOTACIÓN 2

Esta corta se centra en buscar la máxima ley posible si bien es la más pequeña, siendo su volumen menos de la mitad que el anterior. Al igual que la corta 1 presenta algunos bloques vacíos por lo anteriormente comentado.

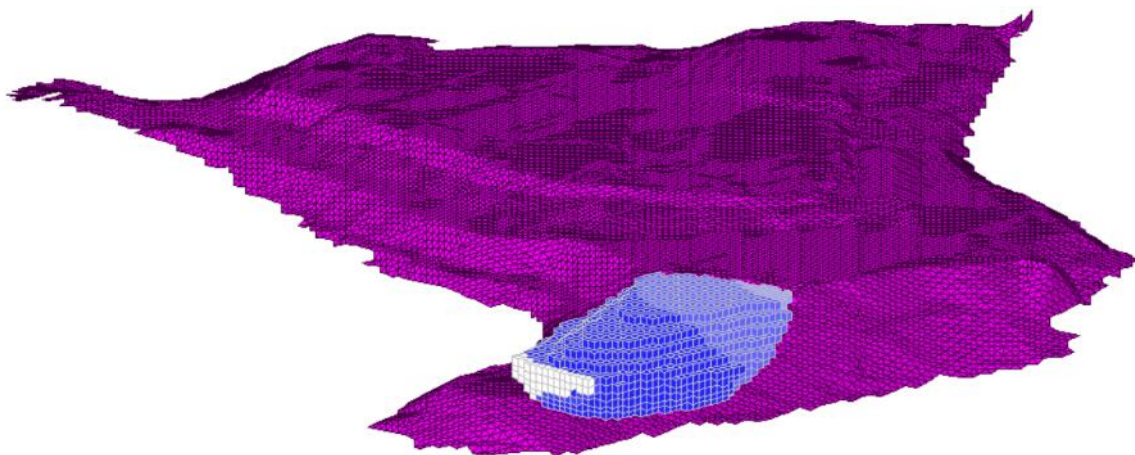


Figura 21 Diseño de la Corta 2 con sus bloques explotables elaborada en *RecMIN*.

8.2.1 DATOS DE LA CORTA 2

N° de bloques	4,771
Volumen [m³]	596,375
Peso [toneladas]	1,652,150
Hierro Total [toneladas]	264,058
Ley media [ppm]	159,839
Densidad media [t/m³]	2.77

Tabla 17 Datos de los bloques correspondientes a la Corta 2.



8.2.2 DISEÑO POST-EXPLOTACIÓN

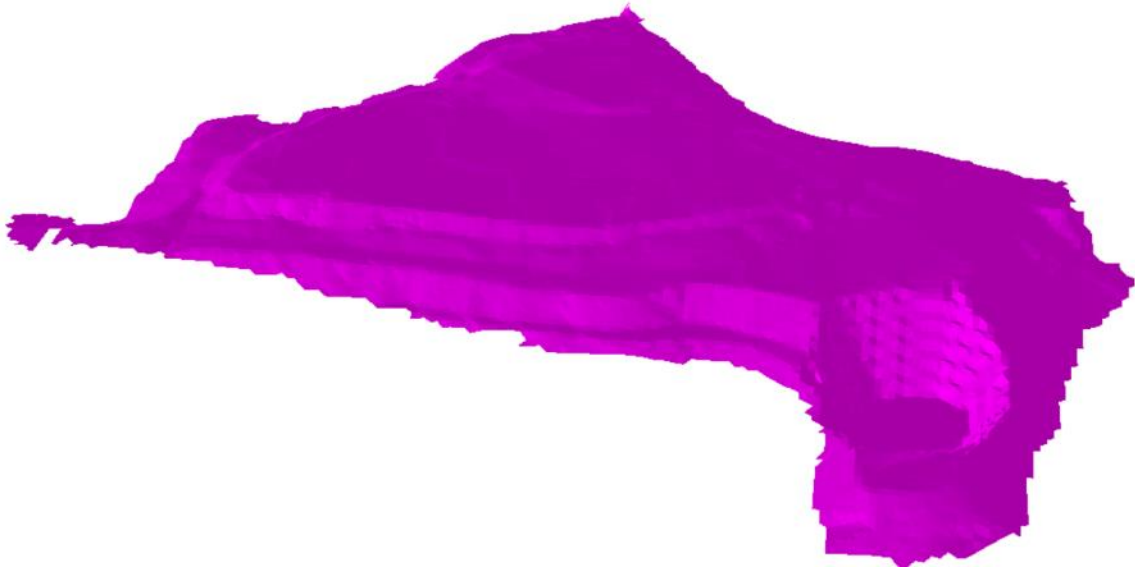


Figura 22 Diseño final de la Corta 2.

Como se puede apreciar en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 22,* esta corta es sensiblemente menor que la del primer diseño. Su restauración sería más fácil y su impacto paisajístico menor.

8.3 CASO DE EXPLOTACIÓN 3

La Corta 3 se ha basado en la experiencia de la dos anteriores, intentando encontrar una relación óptima entre la superficie explotada y la máxima ley posible. En consecuencia tiene un tamaño un poco menor que la Corta 1 y una ley media un poco menor que la Corta 2.

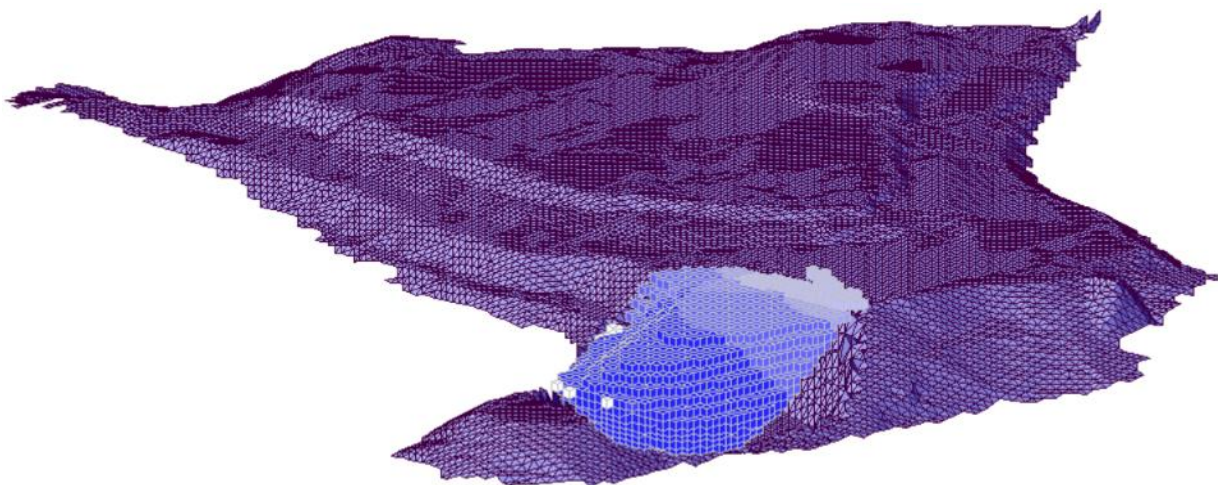


Figura 23 Diseño de la Corta 3 con sus bloques explotables elaborada en RecMIN.



8.3.1 DATOS DE LA CORTA 3

Nº de bloques	6,762
Volumen [m³]	861,625
Peso [toneladas]	2,380,450
Hierro Total [toneladas]	366,318
Ley media [ppm]	154,012
Densidad media [t/m³]	2.76

Tabla 18 Datos de los bloques correspondientes a la Corta 3.

8.3.2 DISEÑO POST-EXPLOTACIÓN



Figura 24 Diseño final de la Corta 3.

Esta corta es algo intermedio entre las dos anteriores como se ha comentado, al igual que las otras necesitaría una restauración y cabría repetir que la punta de la escombrera no se



ha explotado porque se carece de los datos necesarios para poder caracterizarla por completo al contrario que el volumen restante. Este hecho tiene una importancia fundamental ya que se sitúa al lado de las zonas con mayores concentraciones de hierro; en caso de que esa zona presentase concentraciones similares la rentabilidad podría crecer en gran medida.

Este hecho podría de alguna manera justificar una futura exploración para poder tener la información completa.



9 VALORACIÓN DE LA VIABILIDAD

9.1 Viabilidad Técnica: TECNOLOGIA DE RECUPERACION DEL HIERRO

Algunas empresas ya recuperan actualmente el hierro de sus escorias de horno alto y de acería LD mediante separación magnética. Generalmente constan de una etapa de trituración y tamizado para su clasificación por granulometrías posteriormente se hace una separación magnética en la que se obtienen varios productos magnéticos y uno no magnético. Los productos magnéticos se envían de vuelta a la acería excepto la fracción más fina que se envía a la planta de sinterizado para su aglomeración mientras que el producto no metálico se envía a su deposición en escombrera.

Esta línea de actuación no es única ya que (Lan Y. et al. 2017), en su artículo se propone un nuevo método para mejorar la eficiencia del proceso de separación entre el hierro magnético y la escoria de acería, así como para mejorar el desgaste de los equipos y ahorrar en mantenimiento y recambios. En este artículo se alude a otro estudio (G. Zhang et al. 2013) en él se concluye que la cantidad de sulfuros desciende mucho al hacer una separación magnética entre la escoria y el hierro por eso se centra en mejorar la eficacia de la separación ya que cuanto mejor sea esta, menos sulfuros habrá y por tanto menos desgaste se producirá y más eficiente será todo el proceso.

La manera de separar el hierro de la escoria está fuertemente condicionada por la manera en la que se ha enfriado la escoria y su composición química. Mayoritariamente las separaciones magnéticas comprenden una molienda hasta tamaño de liberación y tamizado por fracciones granulométricas y una posterior separación con métodos magnéticos.

Los tres sistemas de separación más comunes en estos casos de hierro y escorias de acería son el separador de bandas cruzadas, separador de tambor magnético y el separador de cabeza inducida.

Un esquema típico de separación magnética podría ser el siguiente:

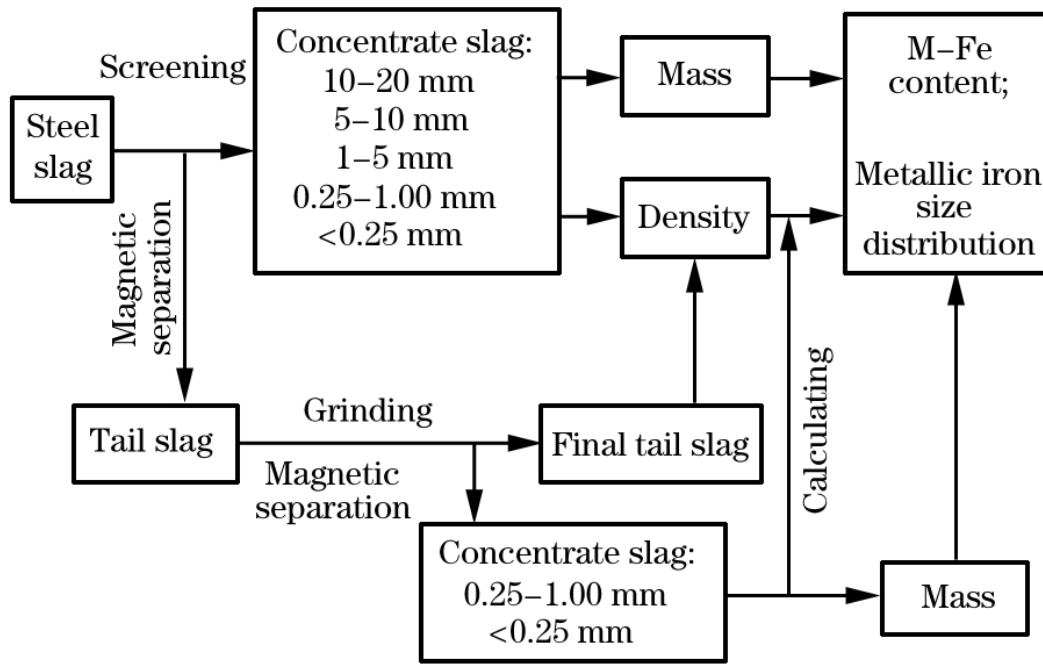


Figura 25 Esquema de separación de Hierro-Escoria por fuerzas magnéticas. Fuente: Lan Y. et al. 2017

Como vemos la distribución granulométrica del esquema propuesta como ejemplo por (Lan Y. et al. 2017) tiene consonancia con la granulometría Figura 26 existente en las zonas de predominio de las escorias (Parte Sur) de la escombrera .

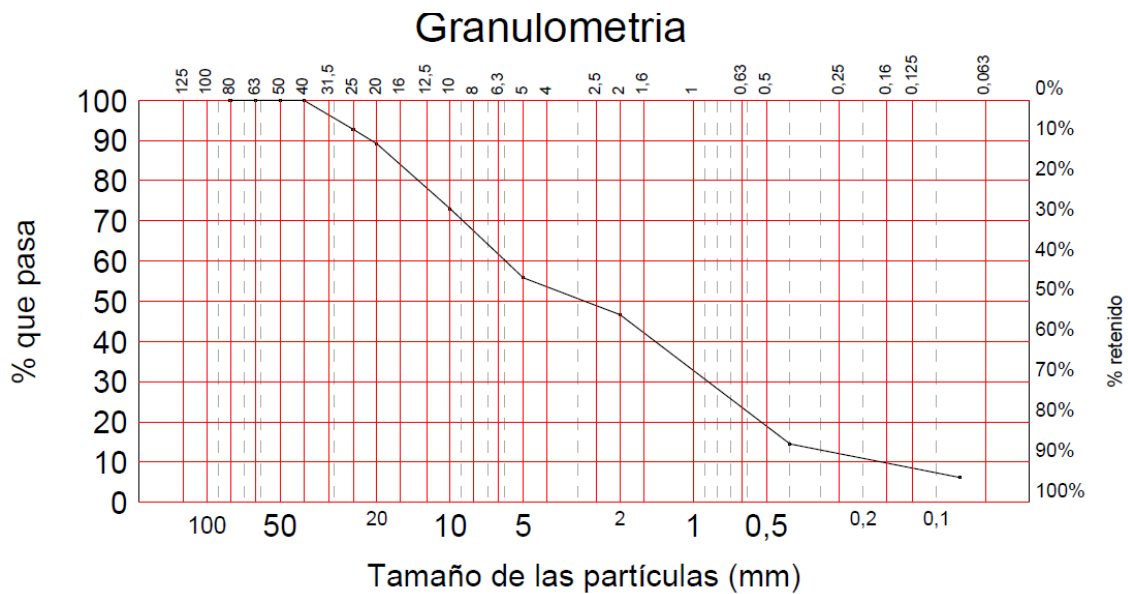


Figura 26 Análisis granulométrico del Sondeo 1, situado al sur de la escombrera . Fuente: Arcelor Mittal.



Para evaluar la eficiencia en la recuperación de hierro mediante separadores magnéticos se usa la siguiente fórmula:

$$\eta_r = \frac{M_r}{w_{Fe} \times M} \times 100$$

Donde:

η_r : Ratio de recuperación

M_r : Masa de hierro

w_{Fe} : Parámetro de separación

M : Masa total

De acuerdo a las propiedades intrínsecas del proceso que es simplemente separar la escoria del hierro con unas granulometrías suficientemente grandes como para no tener que hacer un gran tratamiento previo de finos (Deslamado), (Lan Y. et al. 2017) ha propuesto los siguientes dos esquemas para la mejora del proceso de separación.

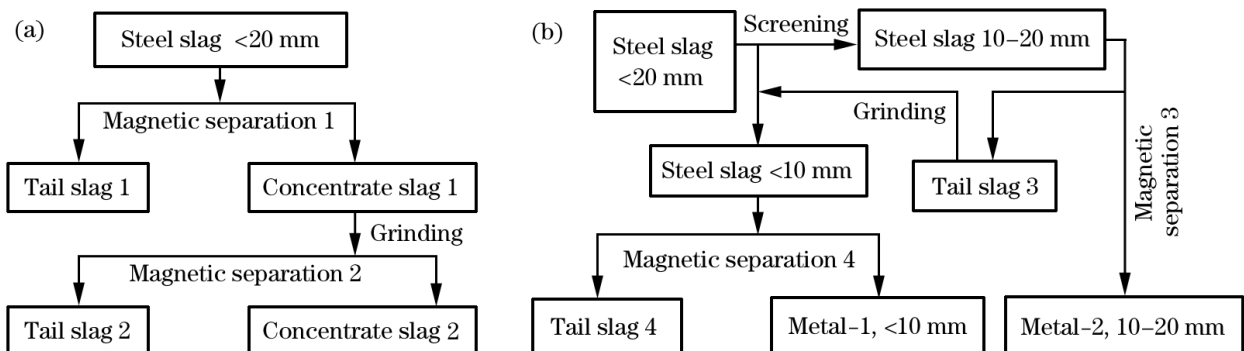


Figura 27 Proceso de separación de hierro de la escoria original y mejorado. Fuente: (Lan Y. et al. 2017)

En el caso del vertedero la gran heterogeneidad presente en los materiales contrasta con la homogeneidad granulométrica de cada material ya que las pruebas realizadas en los sondeos dan curvas granulométricas muy similares, aunque los materiales se diferencien en 20 años. Esto se debe principalmente a que los procesos siderúrgicos son procesos que dada la gran cantidad de inversión que es necesario realizar tienen producciones continuas e iguales durante mucho tiempo.



En ese estudio se recogieron los resultados e recuperación y se me claramente una mejora en los porcentajes. Debido principalmente a reclasificación de las colas del primer cribado. Los resultados son los siguientes.

Item	M_r in optimized process	$\tau_{Fe}/\%$	η_r in optimized process	η_r in original process
Slag A	42.40	45.49	93.20	83.62
Slag B	35.55	38.44	92.48	85.37
Slag C	16.95	19.75	85.82	79.58

Tabla 19 Resultados de recuperación del Hierro con los dos esquemas de separación propuestos en el estudio. Fuente: (Lan Y. et al. 2017)

Por lo que fácilmente se concluye que el cribado extra para la fracción gruesa con su posterior molienda ayuda a mejorar la recuperación. Este hecho tiene mucho sentido desde el punto de vista teórico ya que al hacer la molienda de la parte más gruesa se conseguirá mayor grado de liberación de los elementos y más fácil será su separación, por otro lado, habría que hacer un estudio económico para valorar sus implicaciones sobre el beneficio final.

9.2 VIABILIDAD ECONÓMICA

La viabilidad económica depende fuertemente de las tecnologías que se estén usando para la clasificación y extracción de esos materiales. Recientes estudios como (Zhou et al. 2014) y (Jones et al. 2013) muestran de qué dependen estas condiciones económicas con más detalle, proponiendo las siguientes cuestiones:

1. El consumo eléctrico para los procesos tecnológicos y los precios de la electricidad juegan un rol tremendamente importante sobre la eficiencia general de los proyectos de minería de vertederos.
2. La distancia de transporte entre el vertedero y la planta de tratamiento o reciclado juega un rol importantísimo.
3. La localización geográfica del vertedero es asimismo esencial, ya que ocurre el caso en el que, en ciertos países con mucha materia prima, como China, no resulta rentable aún la minería de vertederos.



4. El proyecto de clausura con sus métodos de prevención y restauración del terreno es muy importante y debe enfocarse a su posible reutilización.
5. La viabilidad está fuertemente condicionada a la aceptación social, ligada al entorno sociocultural de la zona.

Todo apunta a que la viabilidad general, incluyendo la viabilidad económica, mejorará en el futuro cercano. La decisión de la comisión europea de dirigirse hacia la minimización de los efectos de los residuos redundará en la implementación de restricciones y nuevas legislaciones. (Council Directive 1999/31/EC, 1999) cuyo primer paso es el informe “*Roadmap for a Resource Efficient Europe*” que prevé que en 2020 los residuos sean ampliamente considerados como una fuente de recursos.

El cálculo efectivo de la viabilidad económica trasciende con mucho el alcance de este trabajo. A modo general, considerando que sería posible utilizar las instalaciones de machaqueo y tratamiento de escorias existentes en todas las instalaciones siderúrgicas, se puede evaluar la sensibilidad de algunas de las variables implicadas.

Mediante el uso de una hoja Excel, se han tomado los datos de cada uno de los tres diseños propuestos en el apartado de casos de explotación y se han calculado los ingresos y los gastos como:

$$\begin{aligned} \text{Ingresos} = & \frac{50}{100} x Fe(\text{total}) x \text{PrecioInterno}(\text{fracción gruesa}) \\ & + \frac{50}{100} x Fe(\text{total}) x \text{PrecioInterno}(\text{fracción fina}) \end{aligned}$$

$$\text{Gastos} = \text{PesoTotal} x \text{CosteTotal}$$

$$\text{CosteTotal} = \text{CosteExcavación} + \text{CosteTransporte} + \text{CosteTratamiento}$$

Una vez se obtienen los ingresos y los gastos esperables a día de hoy, se calculan simplemente el beneficio como la resta de ambos y se proponen una serie de escenarios en los que los costes variarán, fundamentalmente basados en precios altos de electricidad y combustible que afectarían respectivamente a la planta de tratamiento como al transporte y a la excavación.

Esos escenarios se recogen en un gráfico lineal el cual resulta muy interesante para poder decidir cuál de los diseños de explotación resulta más beneficioso.

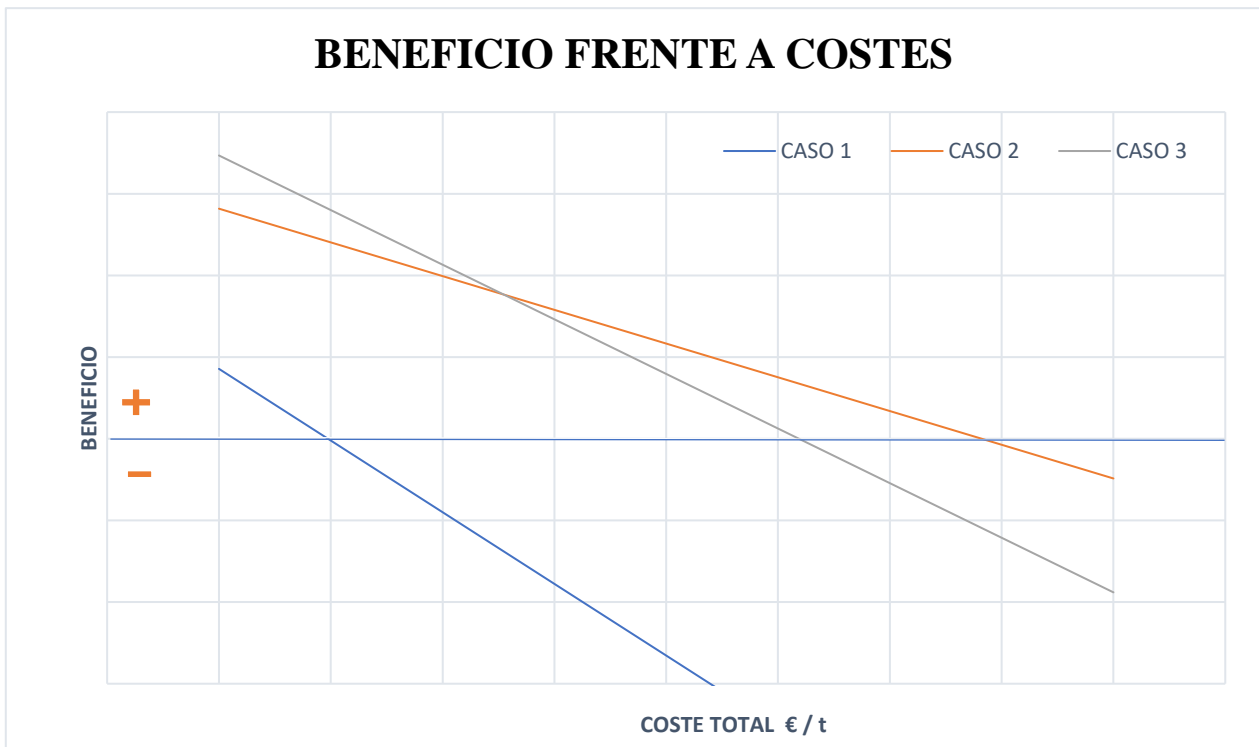


Figura 28 Gráfico que muestra la variación de los beneficios considerando la variación del coste total por cada caso de explotación propuesta.

Como se puede ver en la figura hay muchos datos reseñables.

1. Para un coste acorde a día de 22/06/2017 la corta 3 sería la más beneficiosa.
2. En el caso de que los costes subiesen o exista una perspectiva al alza del precio de la luz o del combustible, quizás la elección más rentable y segura de cara al futuro de la explotación fuese la 2.
3. La corta 1 sufre por su gran volumen y en especial por la gran cantidad de bloques que están sin definir, por eso un buen camino a seguir sería elaborar una mejor caracterización de la zona, llegando también a mayor profundidad para poder tener información más precisa.

9.3 Viabilidad estratégica.

Al margen de los factores meramente económicos o técnicos, no es menos importante el factor estratégico. De forma simplificada se puede decir que la fabricación de 1 tonelada de arrabio requiere unas dos toneladas de mineral de hierro. Por otra parte, en Asturias, de acuerdo a los datos de la Autorización Ambiental Integrada, se producen cada año 440.000 toneladas de escoria de acería para menos de 5 Mt de acero. Para unas concentraciones del 28% de óxido de hierro en dicha escoria, esto supone 123.000 t/año



de óxido. Dado el escaso mercado que este tipo de escoria ha tenido, frente a la abundante venta de escoria de horno alto en el sector de la construcción, se puede estimar que existen más de 25 años almacenados en nuestro entorno, de modo que existen 3,3Mt de óxidos de hierro altamente concentrados y ubicados en Asturias cerca de los centros de fabricación. Comparado eso respecto a los minerales con concentraciones del orden del 65% de óxido, esto supone suficiente material para sustituir aproximadamente medio año de mineral.

El valor de este depósito antrópico como reserva de contingencia es, por tanto, incalculable para casos en los que se pueda producir un desabastecimiento por problemas de transporte (coste de fletes, ausencia de barcos, ...), conflictos políticos o bélicos, desabastecimiento por exceso de demanda o, incluso, subidas excesivas de precio. Cabe recordar que en 2015 se produjo una subida del precio de mineral en un 81% en un solo año.



10 CONCLUSIONES

De acuerdo a lo desarrollado se puede concluir que:

- Las enormes cantidades de residuos generadas por la industria siderúrgica deben ser compensadas con nuevos usos que eviten la acumulación de grandes volúmenes de residuos de acuerdo a los criterios de la economía circular.
- La idea aquí presentada, denominada “*Enhanced Landfill Mining*” contempla, no solo la extracción y posterior uso o tratamiento de los materiales valiosos, sino la consideración de los vertederos como meros depósitos temporales hasta que llegué el momento en que sea económicamente viable dar un uso a los materiales que alberguen.
- Las cantidades de hierro existentes en los vertederos de escorias de acería pueden atender la demanda de la industria con tres ventajas fundamentales.
 - Ahorro de costes e impacto ambiental del transporte al hacerse una utilización local.
 - Liberación de terrenos ocupados que de otra forma serían improductivos.
 - Disminución de la necesidad de extracción de nuevos minerales con los consiguientes impactos en estas zonas.

Todo ello sin contar además el carácter estratégico para este tipo de industria.

- Los residuos forman menas antrópicas con concentraciones de hierro del 15 % que, comparadas con las leyes de las minas más importantes en actual explotación que van desde un 40 hasta un 70 % , puede parecer baja pero si tenemos en cuenta que las escombreras son un cielo abierto con fácil acceso y sencilla excavación y que en muchos casos ya pertenecen a la empresa siderúrgica (Legislación, propiedad del suelo) tampoco sería justo hacer una comparación exacta con las mismas, se requeriría de un análisis económico en profundidad.
- Con el dato de producción de residuos siderúrgicos por tonelada de acero producido se concluye que en los últimos años se han formado en Europa yacimientos antrópicos por un total de 4 Mt/año aproximadamente que de no explotarse seguirán creciendo más y más hasta el punto de que no haya ninguna duda sobre la rentabilidad futura de los mismos.



- Considerar la posibilidad de extracción debe condicionar la forma en que las escombreras se diseñan y gestionan, recogiendo la documentación de topográfica y geotécnica, priorizando la homogeneidad del material depositado en cada zona y realizando un seguimiento de la evolución del material almacenado y su enriquecimiento.
- Aunque este estudio se ha centrado en el hierro, se debería valorar la posibilidad de extraer otros elementos que pudiesen ser también de interés, fundamentalmente metales.

En resumen, si bien no se puede garantizar la viabilidad económica en condiciones normales de mercado, sí se puede considerar que los vertederos de escorias de acería son constituyen una reserva estratégica de mineral de hierro que puede ser explotada en momento en que las condiciones, económicas o geopolíticas, así lo exijan. Sería una buena inversión de cara al futuro el hacer una determinación de los recursos de estas características por parte de las empresas del sector siderúrgico ya que el precio del hierro en el mercado de minerales ha sufrido grandes variaciones en las dos últimas décadas como se puede observar en la



Figura 29 Variación del precio del mineral de hierro en las dos últimas décadas. Fuente: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=mineral-de-hierro&meses=180>



11 REFERENCIAS

B. Das et al. / *Resources, Conservation and Recycling* 50 (2007) 40:57

Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. Official Journal L 182, 16/07/1999 P. 0001 – 0019.

Comisión Europea, 2010 European Commission. Critical raw materials for the EU (2010) Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.

Comisión Europea, 2011 European Commission. Roadmap to a Resource Efficient Europe (2011).

Danthurebandara, M., Van Passel, S., Van Acker, K. 2013. Life cycle analysis of Enhanced Landfill Mining: Case study for the Remo Landfill. In: Second International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining, Houthalen- Helchteren, Belgium.

Danthurebandara, M., Vanderreydt, I., Van Acker, K. 2014. The Environmental Performance of Plasma Gasification Within The Framework of Enhanced Landfill Mining: A Life Cycle Assessment Study. In: Venice 2014: Fifth International Symposium on Energy from Biomass and Waste, San Servolo, Venice, Italy.

De Vocht, A., Descamps, S. 2011. Biodiversity and Enhanced Landfill Mining: Weighting Local and Global Impacts. In: Proceedings of the Enhanced Landfill Mining symposium, Houthalen-Helchteren, Belgium.

FDEP, 2009. Landfill Reclamation Demonstration Project, Perdido Landfill. Escambia County Neighborhood and Community Services Bureau. Florida Department of Environmental Protection.

Frändegård P, Krook J, Svensson N, Eklund M. A novel approach for environmental evaluation of landfill mining. 2013; 24–34.

Jones PT, Geysen D, Tielemans Y, Van Passel S, Pontikes Y, Blanpain B, et al. Enhanced Landfill Mining in view of multiple resourcerecovery: a critical review. 2013; 55:45.

Krook J, Svensson N, Eklund M. Landfill mining: a critical review of two decades of research. *Waste Management* 2012; 32:513 – 20.



Lan Y., Liu Q., Meing F., Niu D., Zhao H. Optimization of magnetic separation process for iron recovery from steel slag. *Journal of Iron and Steel Research, International* 24. 2017; 165-170.

Sarma B, Downing KB, Aukrust E. Recovery of iron, carbon and zinc from steel plant waste oxides using the AISI-DOE post combustion smelting technology. *Steelmaking Conference Proceeding* 1996; 79: 667–84.

Savage, G.M., Gouleke, C.G., Stein, E.L., 1993. Landfill mining: past and present. *BioCycle* 34, 58–61.

Truyols J. y Julivert M. La Sucesión Paleozoica entre Cabo Peñas y Antromero (Cordillera Cantábrica). *Trabajos de geología* nº 8. Fac. de ciencias de la Universidad de Oviedo. 1976 pp 5-30.

UNEP, 2010. Framework of Global Partnership on Waste Management, note by the Secretariat. United Nations Environment Programme.

UNEP, 2013. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure: A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. United Nations Environment Programme.

Rockström J, *et al.* A safe operating space for humanity *Nature*, 461 (2009), pp. 472-475

Van Passel, S., Dubois, M., Eyckmans, J., de Gheldere, S., Ang, F., Jones, P.T., Van Acker, K., 2012. The economics of enhanced landfill mining: private and societal performance drivers. *J. Cleaner Prod.* 55, 92–102.

Winterstetter, A., Rechberger, D., Laner, H., Fellner, J., 2014. Old landfills: anthropogenic resources or reserves? In: *Proceedings, SUM 2014, Second Symposium on Urban Mining Bergamo, Italy, 19–21 May 2014.* CISA Publisher, Italy.

Wolfsberger, T., Höllen, D., Sarc, R., Aldrian, A., Budischowsky, A., Zöschner, A., Pomberger, R., Lorber, K.E., 2014. Landfill mining – case study: characterization and treatment of excavated waste from Austrian sanitary landfill sites and estimation of the resource potential. *ISWA World Congress 2014, Brazil.*



Zhang G, Yang Q., Yang Y., Wu P., McLean A. Journal of Iron and Steel Research, International 52 (2013) 153-159.

Zhou C, Fang W, Xu W, Cao A, Wang R. Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. 2014; 80 – 6.

➤ REFERENCIAS INTERNET

<https://sede.asturias.es/bopa/2009/08/19/2009-19706.pdf>

<https://www.eurelco.org/>

<http://www.eurofer.org/>

<https://www.eia.gov/>

<http://www.sciencedirect.com/>