

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**INDICADORES MEDIOAMBIENTALES Y
SOCIALES APLICADOS A PLANTAS DE
RECICLAJE DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCION Y DEMOLICION**

**(Environmental and social indicators for construction and
demolition waste recycling plants)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Luis Sainz-Rozas De Castro

09 - 2022

Título: Indicadores medioambientales y sociales aplicados a plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición

Autor: Luis Sainz-Rozas De Castro

Directores: Berta Galán Corta y Javier R. Viguri Fuente

Palabras clave: Criterio medioambiental, criterio social, construcción, demolición, residuo, planta, calentamiento global

Resumen: Los indicadores medioambientales y sociales pueden interpretarse como un sistema de señales que permiten evaluar el progreso de nuestros países y regiones hacia el desarrollo sostenible. Estos indicadores se pueden aplicar a una gran cantidad de actividades industriales. En este proyecto se aplican a plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición.

En el trabajo, se parte de la descripción de dos diferentes tipos de plantas industriales de reciclaje de RCDs, así como de la descripción detallada, tras búsqueda bibliográfica, de los criterios medioambientales y sociales que serán utilizados como indicadores de sostenibilidad de su funcionamiento. Dichos criterios se aplican a diferentes tipos de plantas trabajando con valores de flujo de materiales existentes en Cantabria. Los resultados obtenidos de cada indicador se analizan tanto individual como globalmente mediante aplicación de técnicas de análisis multicriterio con el software específico Definite y aplicación de un proceso de análisis jerárquico, Analytic Hierarchy Process (AHP).

Los resultados del presente trabajo fin de grado permitirán evaluar criterios medioambientales y sociales para la toma de decisiones sobre la instalación y operación de plantas industriales de tratamiento de residuos de construcción y demolición en Cantabria.

Title: Environmental and social indicators for construction and demolition waste recycling plants

Author: Luis Sainz-Rozas De Castro

Supervisor: Berta Galán Corta and Javier R. Viguri Fuente

Keywords: Environmental criteria, social criteria, construction, demolition, waste, plant, global warming

Abstract: Environmental and social indicators can be interpreted as a system of signals to assess the progress of our countries and regions towards sustainable development. These indicators can be applied to a wide range of industrial activities. In this project they are applied to construction and demolition waste recycling plants.

The project starts with a description of two different types of CDW recycling plants and a detailed description, after a literature search, of the environmental and social criteria that will be used as sustainability indicators. These criteria will be applied to different types of plants working with material flow working in the Cantabria region. An analysis of the results of each indicator are carried out both individually and globally by applying multi-criteria analysis techniques with the specific software Definite and the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP).

The results of this final degree project will allow the evaluation of environmental and social criteria for decision-making on the installation and operation of industrial plants for the treatment of construction and demolition waste in Cantabria.

INDICE

INDICE DE FIGURAS.....	6
INDICE DE TABLAS.....	7
1.INTRODUCCION.....	9
1.1 CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES UTILIZADOS EN ACTIVIDADES INDUSTRIALES.....	9
1.2 CRITERIOS SOCIALES UTILIZADOS EN ACTIVIDADES INDUSTRIALES.....	10
1.3 HERRAMIENTA DE TOMA DE DECISIONES. ANALISIS MULTICRITERIO (MCA).....	11
2. PLANTEAMIENTO Y DEFINICION DEL PROBLEMA.....	12
2.1 RESIDUOS DE CONSTRUCCION Y DEMOLICION: SANTANDER Y ALREDEDORES.....	13
2.2 TIPOS DE PLANTA DE RECICLADO DE RCDs.....	15
2.2.1 PLANTA ORDINARIA.....	15
2.2.2 PLANTA AVANZADA.....	19
3. OBJETIVOS.....	22
4. RESULTADOS.....	23
4.1 ANALISIS DETALLADO LOS CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES.....	25
4.2 ANALISIS DETALLADO DE LOS CRITERIOS SOCIALES.....	32
4.3 APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES A LAS PLANTAS DE RCDs.....	37
4.4 APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS SOCIALES A LAS PLANTAS DE RCDs.....	49
4.5 APLICACIÓN DE MCA EN LA TOMA DE DECISION DE LAS PLANTAS DE RECICLADO DE RCDs.....	55
4.5.1 ANALISIS MULTICRITERIO (MCA).....	56
4.5.2 ANALISIS DE INCERTIDUMBRE.....	69
4.5.3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD.....	70
5. CONCLUSIONES.....	74
6. BIBLIOGRAFIA.....	75
7. ANEXOS.....	78

7.1 ANEXO 1: DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA ORDINARIA DE RECICLADO DE RCDs	78
7.2 ANEXO 2: DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA AVANZADA DE RECICLADO DE RCDs	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo cuantitativo de una planta de reciclaje ordinaria de RCDs	16
Figura 2. Diagrama de flujo cuantitativo de una planta de reciclaje avanzada de RCDs	20
Figura 3. Criterios medioambientales y sociales	23
Figura 4. Matriz de evaluación en Definite	56
Figura 5. Resultados del MCA para el Escenario 1.....	58
Figura 6. Resultados del MCA para el Escenario 2.....	58
Figura 7. Resultados del MCA para el Escenario 3.....	59
Figura 8. Resultados del MCA para el Escenario 4.....	59
Figura 9. Resultados del MCA para el Escenario 5.....	60
Figura 10. Resultados del MCA para el Escenario 6.....	61
Figura 11. Resultados del MCA para el Escenario 7.....	61
Figura 12. Resultados del MCA para el Escenario 8.....	62
Figura 13. Resultados del MCA para el Escenario 9.....	62
Figura 14. Resultados del MCA para el Escenario 10.....	63
Figura 15. Resultados del MCA para el Escenario 11.....	64
Figura 16. Preferencia de cada una de las opciones de planta de RCDs en función de los once escenarios estudiados con diferentes pesos para cada uno de los once criterios evaluados.	66
Figura 17. Resultados del MCA para todos los criterios planteados del Escenario 1.....	68
Figura 19. Resultados del análisis de sensibilidad, a) del Criterio 1 b) del Criterio 2 y c) del Criterio 3, para el escenario 1	70
Figura 20. Resultados del análisis de sensibilidad del Criterio 4 para el Escenario 1	71
Figura 21. Resultados del análisis de sensibilidad del a) Criterio 5.1 y b) del Criterio 5.2 para el escenario 1	71
Figura 22. Resultados del análisis de sensibilidad, a) del Criterio 6, b) del Criterio 7 y c) del Criterio 8, para el escenario 1.....	72

Figura 23. Resultados del análisis de sensibilidad a) del Criterio 9, b) del Criterio 10 y c) del Criterio 11 para el Escenario 1.....	73
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Corrientes de residuos que entran a la planta.....	14
Tabla 2. Resumen de las cantidades de las corrientes de residuos en la planta ordinaria	18
Tabla 3. Resumen de las cantidades de las corrientes de residuos en la planta avanzada	21
Tabla 4. Consumo de gasoil por tonelada de residuo en ambas plantas	26
Tabla 5. Forma de cálculo de cada uno de los criterios medioambientales utilizados	30
Tabla 6. Forma de cálculo de cada uno de los criterios sociales utilizados.....	36
Tabla 7. Emisiones anuales de CO ₂ debidas al consumo de combustible de la planta ordinaria.....	37
Tabla 8. Emisiones anuales de CO ₂ debidas al consumo de combustible de la planta avanzada.	38
Tabla 9. Emisiones anuales de CO ₂ debidas al consumo de energía eléctrica de la planta ordinaria.....	39
Tabla 10. Emisiones anuales de CO ₂ debidas al consumo de energía eléctrica de la planta avanzada.	39
Tabla 11. Emisiones totales de CO ₂ en ambas plantas	40
Tabla 12. Emisiones de CO ₂ por tonelada de residuo en ambas plantas.	40
Tabla 13. Emisiones anuales de SO ₂ y NO _x en la planta ordinaria.....	41
Tabla 14. Emisiones anuales de SO ₂ y NO _x en la planta avanzada	42
Tabla 15. Consumo de agua en ambas plantas	42
Tabla 16. Reducción de residuos enviados a vertedero gracias a las plantas de reciclaje de RCDs	44
Tabla 17. Cantidad de residuos enviados a vertedero en la Alternativa 1 de la planta ordinaria.....	44

Tabla 18. Cantidad de residuos enviados a vertedero en la Alternativa 2 de la planta ordinaria.....	45
Tabla 19. Cantidad de residuos enviados a vertedero en la planta avanzada.	45
Tabla 20. Toneladas de residuos recicladas y recuperadas en la Alternativa 1 de la planta ordinaria.....	47
Tabla 21. Toneladas de residuos recicladas y recuperadas en la Alternativa 2 de la planta ordinaria.....	47
Tabla 22. Toneladas de residuos recicladas y recuperadas en la planta avanzada.	48
Tabla 23. Índice de Reciclaje de recursos e Índice de Recuperación de recursos.....	48
Tabla 24. Ruido provocado por la planta ordinaria.	49
Tabla 25. Ruido provocado por la planta avanzada.....	50
Tabla 26. Emisiones anuales de PM10 de la planta ordinaria	51
Tabla 27. Emisiones anuales de PM10 de la planta avanzada.....	51
Tabla 28. Emisiones de H ₂ S derivadas de ambas plantas.	52
Tabla 29. Grado de aceptación pública de las plantas de reciclaje de RCDs	53
Tabla 30. Espacio urbano consumido por una planta de RCDs	53
Tabla 31. Puestos de empleo generados en ambas plantas.....	54
Tabla 33. Escenarios objeto de estudio generados mediante los porcentajes de pesos indicados de los 11 criterios estudiados.....	57
Tabla 34. Resumen de resultados de MCA	64

1.INTRODUCCION

1.1 CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES UTILIZADOS EN ACTIVIDADES INDUSTRIALES

La evaluación del impacto ambiental (EIA) es el procedimiento formal utilizado para predecir las consecuencias ambientales de la puesta en marcha de nuevos proyectos de desarrollo en diversos ámbitos. Los criterios medioambientales que se utilizan tanto en los procedimientos de EIA como en cualquier otro procedimiento reglado o no, se utilizan para evaluar el impacto ambiental que tienen las distintas actividades objeto de estudio.

Aplicados al ámbito particular de las actividades industriales, los criterios medioambientales conciernen a cualquier actividad de la industria que afecte de forma positiva o negativa al medioambiente y, en particular a las emisiones de gases de efecto invernadero, energías renovables, eficiencia energética, agotamiento de los recursos y contaminación química. La sostenibilidad consiste en considerar todos los impactos positivos y negativos de las operaciones implicadas y garantizar que se prioricen los máximos aspectos positivos.

La importancia de aplicar este tipo de criterios es cada vez mayor, ya que cada vez se hace más necesario revertir el constante avance del cambio climático y el agotamiento de los recursos. Gracias a los criterios medioambientales se pueden dar argumentos sólidos para la implementación de políticas de materia ambiental que contribuyan a mejorar la situación medioambiental y de agotamiento de los recursos en que se encuentra el planeta.

Las principales características que debe cumplir un criterio medioambiental son brindar información que sea de sencilla comparación con datos internacionales, tener la capacidad de relacionarse con modelos económicos, ser capaz de aplicarse a escala local, regional o nacional y tener solidez en la veracidad de las cifras.

1.2 CRITERIOS SOCIALES UTILIZADOS EN ACTIVIDADES INDUSTRIALES

En la mayoría de las ocasiones, los estudios relacionados con el análisis de la sostenibilidad se centran en criterios medioambientales y económicos y dejan a un lado los criterios sociales.

Los aspectos sociales relacionados con las actividades industriales, y más concretamente con plantas de tratamiento de residuos son un factor muy importante para tener en cuenta. Existen muchos casos en los que la existencia de plantas industriales, especialmente de tratamientos de residuos, en la zona afecta al precio de las viviendas, el cual disminuye a medida que se acerca a la planta y las molestias que causa la planta sobre la sociedad aumentan.

Los criterios sociales utilizados en actividades industriales se pueden dividir en varios tipos, por un lado, criterios relacionados con la salud de las personas que habitan cerca de la planta industrial, como pueden ser el ruido o los olores. Por otro lado, criterios relacionados con el impacto sobre el paisaje, dado que es un hecho que las zonas industriales, además de ocupar una gran cantidad de espacio que podría ser destinado a zonas verdes, suponen un notable empeoramiento del paisaje, lo que suele tener un impacto negativo sobre la sociedad. Además de los criterios anteriormente citados, existen también criterios sociales relacionados con la economía de las personas, como, por ejemplo, la cantidad de puestos de trabajo que puede generar una actividad industrial. Este último criterio suele repercutir de manera muy positiva en las personas que habitan cerca de la planta industrial.

Al igual que los criterios medioambientales, los criterios sociales deben contar con veracidad en sus cifras, contener información sencilla de comparar con datos internacionales, tener la capacidad de relacionarse con modelos económicos y ser aplicables a escala local, regional o nacional.

1.3 HERRAMIENTA DE TOMA DE DECISIONES. ANALISIS MULTICRITERIO (MCA)

Para comparar y evaluar simultáneamente diversos criterios medioambientales y sociales se puede hacer uso de herramientas de toma de decisiones, como por ejemplo el análisis multicriterio (MCA).

El análisis multicriterio frente a otras herramientas de toma de decisiones es considerado como el método más completo en cuanto a la evaluación integral de los aspectos sociales y medioambientales (Allesch and Brunner, 2014).

Es un método muy útil para evaluar diferentes opciones o alternativas comparando escenarios con respecto a objetivos contradictorios. Además, dentro del análisis, se puede incorporar una mezcla de información cuantitativa y cualitativa, siempre y cuando esta información sea comparable.

El análisis multicriterio se ha utilizado con frecuencia para resolver problemas de toma de decisiones sobre aspectos medioambientales, ya que esta herramienta es útil para evaluar diferentes opciones o alternativas considerando diferentes criterios, a menudo conflictivos. El análisis multicriterio puede aplicarse a diferentes fines, como evaluar la gestión más adecuada, localizar instalaciones industriales, o incluso para seleccionar el tipo de instalaciones de reciclaje para un caso concreto. Debido a esto, la metodología debe adaptarse cuando se aplica a cada propósito específico.

2. PLANTEAMIENTO Y DEFINICION DEL PROBLEMA

La industria de la construcción es uno de los sectores más grandes y activos de Europa, pero genera un flujo de residuos de construcción y demolición (RCDs), procedentes de derribos de edificios o de rechazos de los materiales de construcción de las obras de nueva o de pequeñas reformas, que representa entre el 25 y el 30% de todos los residuos generados en la UE. El reciclaje es un método eficaz para minimizar los impactos de los residuos de construcción y demolición. El reciclaje de RCDs cubre aspectos tecnológicos, económicos, sociales y medioambientales que deben de ser considerados. En concreto, este trabajo se centra en los criterios sociales y medioambientales.

Debido a la gran importancia del tratamiento de estos residuos y al gran volumen que suponen con respecto al total de los residuos generados, la UE publicó en 2020 un plan de acción para la economía circular que pretende reducir la producción de residuos mediante una mejor gestión de los recursos. El objetivo de este plan es hacer a Europa el primer continente climáticamente neutro. Para ello se utilizan principalmente dos estrategias: la primera consiste en doblar el índice de renovación de energía eficiente para 2030 (actualmente 1%). La segunda consiste en revisar la regulación de los productos de construcción, reconsiderar la regulación de los residuos y promover la economía circular.

El equipamiento más sencillo o avanzado de las plantas de reciclado de RCDs es uno de los factores decisivos que afectan a la calidad de los productos finales de reciclado condicionando la viabilidad de su uso y en consecuencia afecta a los criterios medioambientales y sociales. En este trabajo se consideran dos tipos de plantas: ordinaria y avanzada.

La planta de reciclaje ordinaria es una planta convencional, en la que se hace uso de una maquinaria básica y se generan productos reciclados de menor calidad que una planta avanzada. La planta de reciclaje avanzada es una planta moderna de altas prestaciones. En ella se hace uso de maquinaria especializada y avanzada gracias a las cuales se obtiene un producto final de mucha más calidad que en la planta ordinaria.

2.1 RESIDUOS DE CONSTRUCCION Y DEMOLICION: SANTANDER Y ALREDEDORES

Este proyecto está enfocado en el reciclaje de residuos de construcción y demolición en la zona de Santander, capital de la Comunidad Autónoma de Cantabria, y sus alrededores. Cantabria, comunidad autónoma del norte de España, cuenta con un total de 582.905 habitantes (INE, 2020).

Cantabria experimentó un gran crecimiento en la construcción durante el periodo conocido como burbuja inmobiliaria, que tuvo lugar entre 2003 y 2006. Sin embargo, esta tendencia cambió, debido a la crisis económica de 2008 y hubo una disminución de la actividad de construcción hasta alcanzar un valor prácticamente constante en 2010.

Hasta el año 2010, no existían en Cantabria lugares para el reciclaje de RCDs. Los RCDs generados en Cantabria eran destinados en su mayoría a vertedero, o en una mucho menos proporción, utilizado como relleno de canteras y minas antiguas. En el año 2010, se empezaron a utilizar plantas de reciclaje en Cantabria lo que supuso una gran disminución de las toneladas de RCDs destinadas a vertedero.

Durante la época de la burbuja inmobiliaria la producción de RCDs era superior a la de hoy en día, llegando incluso a las 300.000 toneladas en el año 2003. Sin embargo, a partir del año 2010, cuando empiezan a operar las plantas de reciclaje en Cantabria, la generación de RCDs se establece en torno a las 100.000 toneladas (Dosal, 2015).

Cantabria está dividida en cinco áreas en base a las especificaciones técnicas indicadas en el Plan Sectorial de los RCDs de Cantabria (BOC, 2010a) para alcanzar una óptima gestión de residuos de residuos. Dichas áreas son la siguientes: (i) Área 1: Santander, engloba la zona de la capital de la región y sus alrededores, se trata de un área densamente poblada con todo tipo de infraestructuras; (ii) Área II: Besaya, con un nivel alto de actividad industrial, es el área donde se encuentra la segunda ciudad más importante de la región; (iii) Área III: Área Este, se trata de un área con un alto nivel de turismo y con un gran valor paisajístico y medioambiental; (iv) Área IV: Área Sur, con una densidad de población baja, se trata de un área rodeada por grandes montañas, con un clima continental; (v) Área V: Área Oeste, este área, también rodeado por grandes montañas, es el área con la menor población y tiene un considerable valor paisajístico.

La población del área de Santander es de 288.832 habitantes, lo que supone prácticamente el 50% de la población total de Cantabria. Debido a esto, se estima que la producción de RCDs en el área 1, Santander y alrededores, es aproximadamente la mitad de la producción total de Cantabria, es decir, unas 50.000 toneladas.

Sin embargo, una parte de esas 50.000 toneladas no llegara a la planta de reciclaje, debido a que se considera que no se obtienen productos de valor mediante el proceso de reciclado de dichos residuos, contrariamente a lo que ocurre en el caso del reciclaje de los metales.

En la Tabla 1 se muestra la cantidad de residuos de RCDs que son enviados a la planta de reciclaje en la zona de Santander.

Tabla 1. Corrientes de residuos que entran a la planta

Grupo	%	Descripción	Ton
Pétreo	Hormigon	Hormigon	6000
	Ladrillos, azulejos y ceramicos	Ladrillos	19000
		Azulejos y ceramicos	8000
	Arena, grava y otros agregados		2000
No Pétreo		Aluminio	0
		Plomo	0
	Metales	Zinc	0
		Hierro y acero	0
		Estaño	0
		Cables	0
	Madera	Madera	2000
	Vidrio	Vidrio	250
	Plastico	Plastico	750
	Yeso	Materiales de construccion basados en yeso	100
	Desperdicio	Material aislante	3500
	Otros	Embalaje mezclado	2000
	Papel	Empaques de papel y carton	150
Total			43750

2.2 TIPOS DE PLANTA DE RECICLADO DE RCDs

2.2.1 PLANTA ORDINARIA

La planta de reciclaje ordinaria es una planta convencional, en la que se hace uso de una maquinaria básica y se generan productos reciclados de menor calidad que una planta avanzada, por lo que dispone de un proceso de reciclaje menos complejo. Los residuos que entran en la planta se dividen en residuos pétreos y residuos no pétreos.

La principal diferencia con la planta avanzada reside en las operaciones a las que se someten las corrientes de residuos a lo largo del proceso de reciclaje. En la planta ordinaria se realiza un trabajo de separación básico, ya que solo se cuenta con un equipo que lleve a cabo esta función, el tamiz por flujo de aire, obteniéndose de esta manera un producto final reciclado de menor calidad.

La descripción del funcionamiento de este tipo de plantas ya ha sido realizada en otros trabajos previos (Bermúdez, 2018), por lo que en este proyecto se realizara una descripción resumida de las características de las plantas ordinarias. No obstante, la descripción detallada del funcionamiento de la planta ordinaria, así como los cálculos llevados a cabo para conocer la cantidad de flujo de residuos en cada etapa del proceso de reciclaje han sido incluidos en el anexo 1. Todos estos cálculos han sido utilizados para poder aplicar los criterios medioambientales y sociales que permitan obtener el resultado numérico asociado a cada criterio.

En este proyecto, se analizan los resultados de la planta ordinaria desde dos puntos de vista, dando lugar a dos alternativas distintas. En la alternativa A1, se considera que aquellos residuos apartados de la corriente principal del proceso de reciclaje o aquellos que una vez terminado el proceso son considerados de muy baja calidad, carecen de ningún valor y por tanto son destinados a vertedero. En la alternativa A2, se considera que los residuos que en la alternativa 1 fueron destinados a vertedero sí que tendrían valor y podrían ser utilizados en actividades de relleno.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo cuantitativo de una planta ordinaria de reciclaje de RCDs, donde se puede observar el conjunto de etapas de los que se compone el proceso de reciclaje, además de los valores de las corrientes de residuos en cada etapa y los valores finales de las corrientes de residuos a la salida de la planta de reciclaje. En las casillas

donde aparece el nombre de los equipos utilizados en cada etapa se encuentran, entre paréntesis, las toneladas tratadas por cada uno de los equipos.

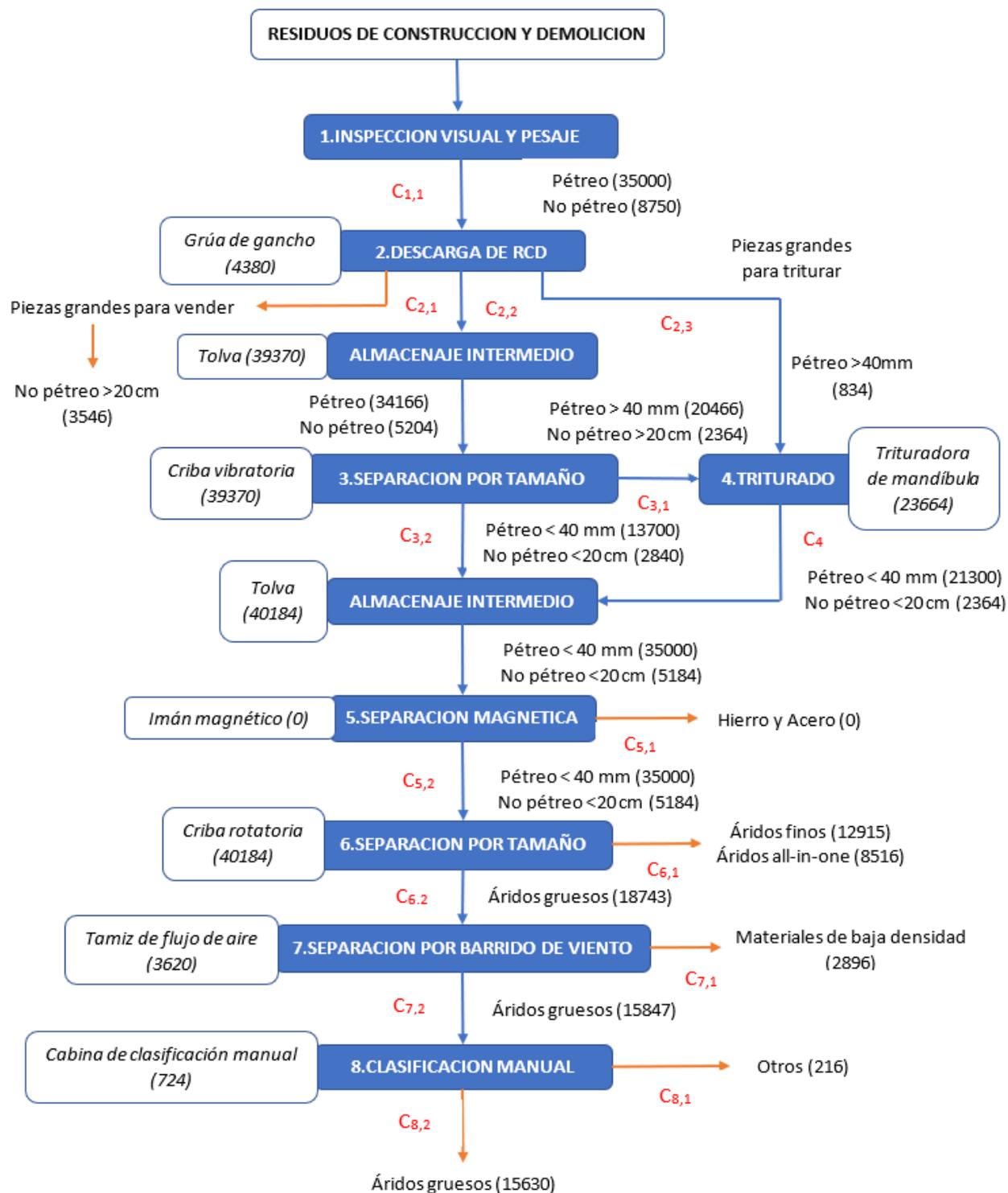


Figura 1. Diagrama de flujo cuantitativo de una planta de reciclaje ordinaria de RCDs

En la Tabla 2 se muestran las cantidades de todas las corrientes del proceso de reciclaje para cada material. Para identificar y diferenciar las corrientes cada una cuenta con dos subíndices; el primero correspondiente al equipo del que sale y el segundo correspondiente al número de corriente. Por ejemplo, de la operación 2 (Descarga de RCDs) salen tres corrientes: C_{2.1} (Piezas grandes para vender), C_{2.2} (Almacenaje intermedio) y C_{2.3} (Piezas grandes para triturar).

Tabla 2. Resumen de las cantidades de las corrientes de residuos en la planta ordinaria

Materiales		Corrientes $C_{i,j}$ (Toneladas)						
Materiales petreos	Entrada	$C_{1,1}$	$C_{2,1}$	$C_{2,2}$	$C_{2,3}$	$C_{3,1}$	$C_{3,2}$	C_4
Hormigon	6000	6000	0	5490	510	4590	900	5100
Ladrillos	19000	19000	0	18772	228	11172	7600	11400
Azulejos y ceramicos	8000	8000	0	7904	96	4704	3200	4800
Arena, grava y otros componentes	2000	2000	0	2000	0	0	2000	0
Total petreo	35000	35000	0	34166	834	20466	13700	21300
Materiales no petreos	Entrada	$C_{1,1}$	$C_{2,1}$	$C_{2,2}$	$C_{2,3}$	$C_{3,1}$	$C_{3,2}$	C_4
Madera	2000	2000	960	1040	0	640	400	640
Vidrio	250	250	75	175	0	50	125	50
Plastico	750	750	315	435	0	210	225	210
Yeso de construccion	100	100	42	58	0	28	30	28
Material aislante	3500	3500	1260	2240	0	840	1400	840
Embalaje mezclado	2000	2000	840	1160	0	560	600	560
Empaques de papel y carton	150	150	54	96	0	36	60	36
Total no petreo	8750	8750	3546	5204	0	2364	2840	2364
Total	43750	43750	3546	39370	834	22830	16540	23664

Materiales petreos	$C_{5,1}$	$C_{5,2}$	$C_{6,1}$	$C_{6,2}$	$C_{7,1}$	$C_{7,2}$	$C_{8,1}$	$C_{8,2}$
Hormigon	0	6000	3420	2580	0	2580	0	2580
Ladrillos	0	19000	10830	8170	0	8170	0	8170
Azulejos y ceramicos	0	8000	4560	3440	0	3440	0	3440
Arena, grava y otros componentes	0	2000	1200	800	0	800	0	800
Total petreo	0	35000	20010	14990	0	14990	0	14990
Materiales no petreos	$C_{5,1}$	$C_{5,2}$	$C_{6,1}$	$C_{6,2}$	$C_{7,1}$	$C_{7,2}$	$C_{8,1}$	$C_{8,2}$
Madera	0	1040	254	786	629	157	47	110
Vidrio	0	175	67	108	0	108	0	108
Plastico	0	435	133	282	226	56	17	40
Yeso de construccion	0	58	33	25	0	25	0	25
Material aislante	0	2240	549	1691	1353	338	101	237
Embalaje mezclado	0	1140	371	789	631	158	47	110
Empaques de papel y carton	0	96	24	72	57	14	4	10
Total no petreo	0	5184	1431	3753	2896	856	216	640
Total	0	40184	21441	18743	2896	15846	216	15630

2.2.2 PLANTA AVANZADA

La planta de reciclaje avanzada es una planta moderna de altas prestaciones. En ella se hace uso de maquinaria especializada y avanzada gracias a la cual se obtiene un producto final de mucha más calidad que en la planta ordinaria y que es susceptible de venta. Al igual que en la planta ordinaria, los residuos que entran en la planta se clasifican en residuos pétreos y residuos no pétreos.

En este tipo de plantas se realiza una separación de residuos mucho más específica y compleja con el uso de equipos más avanzados. De esta manera el producto final obtenido, una vez terminado el proceso de reciclado, es de una calidad superior al que se obtiene en la planta ordinaria.

Al igual que sucede con la planta ordinaria, la descripción del funcionamiento de este tipo de plantas ya ha sido realizada en trabajos previos (Bermúdez, 2018), por lo que en este proyecto se realizara una descripción resumida de las características de las plantas avanzadas. Todos los cálculos realizados para llegar a los valores de las corrientes de flujo que se obtienen al final del proceso de reciclaje se encuentran en el anexo 2.

En cuanto a la planta avanzada, a diferencia de la planta ordinaria, solo se realiza el estudio de una alternativa, alternativa B, ya que se considera que, en cualquier caso, los materiales que salen de la planta, ya sea durante o al final del proceso de reciclaje, tienen la calidad suficiente para ser empleados, al menos, en actividades de relleno.

En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo cuantitativo de una planta avanzada de reciclaje de RCDs, donde se puede observar el conjunto de etapas de los que se compone el proceso de reciclaje, además de los valores de las corrientes de residuos en cada etapa y los valores finales de las corrientes de residuos a la salida de la planta de reciclaje. Al igual que en la Figura 1, en las casillas donde aparece el nombre de los equipos utilizados en cada etapa se encuentran, entre paréntesis, las toneladas tratadas por cada uno de los equipos.

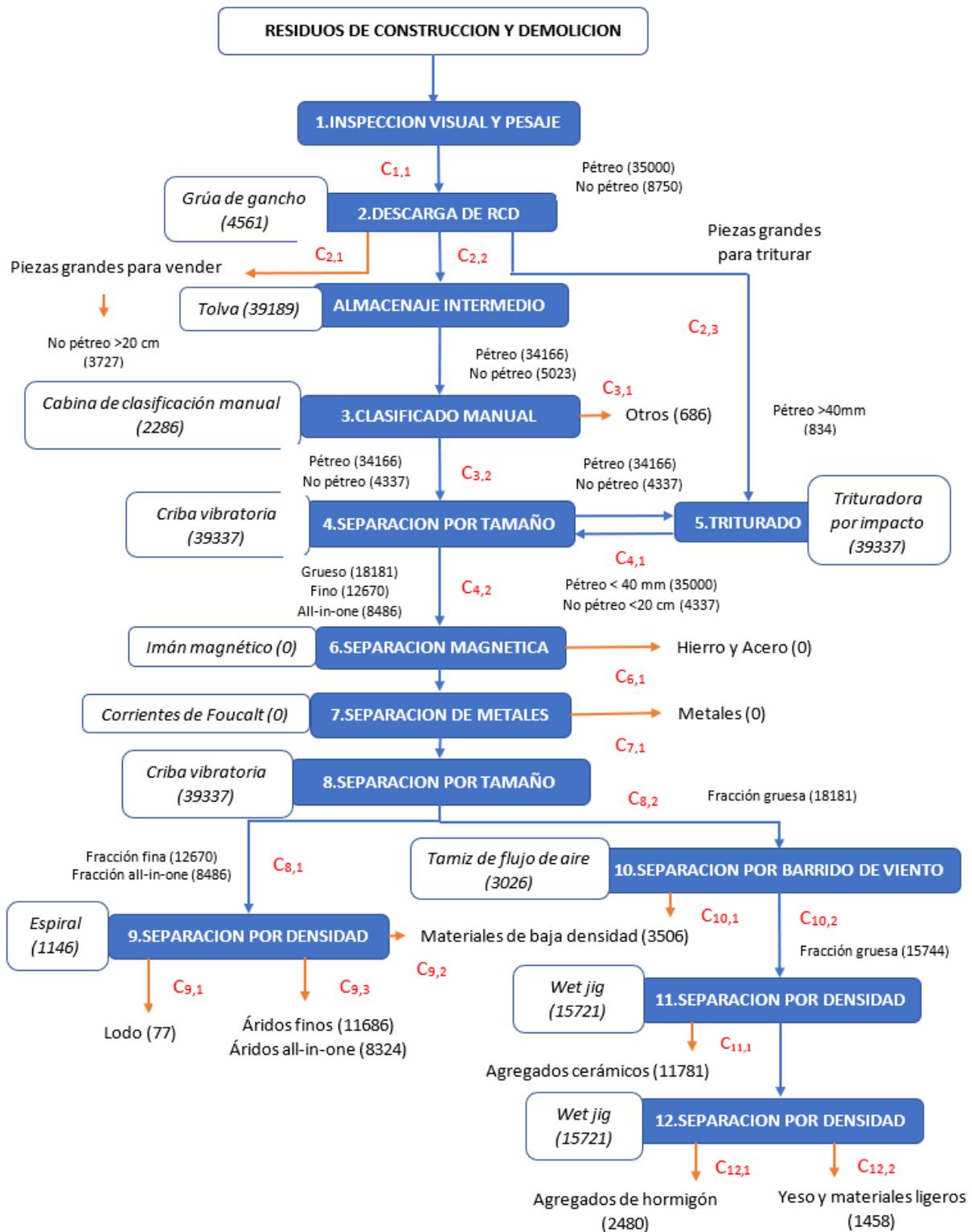


Figura 2. Diagrama de flujo cuantitativo de una planta de reciclaje avanzada de RCDs. Al igual que para la planta ordinaria, en la Tabla 3 se muestran las cantidades de todas las corrientes del proceso de reciclaje para cada material en la planta avanzada.

Tabla 3. Resumen de las cantidades de las corrientes de residuos en la planta avanzada

Materiales		Corrientes i,j (Toneladas)										
Materiales petreos	Entrada	C _{1,1}	C _{2,1}	C _{2,2}	C _{2,3}	C _{3,1}	C _{3,2}	C _{4,1}	C _{4,2}	C _{6,1}	C _{6,2}	C _{7,1}
Hormigon	6000	6000	0	5490	510	0	5490	6000	6000	0	6000	0
Ladrillos	19000	19000	0	18772	228	0	18772	19000	19000	0	19000	0
Azulejos y ceramicos	8000	8000	0	7904	96	0	7904	8000	8000	0	8000	0
Arena, grava y otros componentes	2000	2000	0	2000	0	0	2000	2000	2000	0	2000	0
Total petreo	35000	35000	0	34166	834	0	34166	35000	35000	0	35000	0
Materiales petreos	Entrada	C _{1,1}	C _{2,1}	C _{2,2}	C _{2,3}	C _{3,1}	C _{3,2}	C _{4,1}	C _{4,2}	C _{6,1}	C _{6,2}	C _{7,1}
Madera	2000	2000	1020	980	0	192	788	788	788	0	788	0
Vidrio	250	250	75	175	0	0	175	175	175	0	175	0
Plastico	750	750	345	405	0	63	342	342	342	0	342	0
Yeso de construccion	100	100	44	56	0	0	56	56	56	0	56	0
Material aislante	3500	3500	1260	2240	0	252	1988	1988	1988	0	1988	0
Embalaje mezclado	2000	2000	920	1080	0	168	912	912	912	0	912	0
Empaques de papel y carton	150	150	63	87	0	11	76	76	76	0	76	0
Total no petreo	8750	8750	3727	5023	0	686	4337	4337	4337	0	4337	0
Total	43750	43750	3727	39189	834	686	38503	39337	39337	0	39337	0

Materiales petreos	C _{7,2}	C _{8,1}	C _{8,2}	C _{9,1}	C _{9,2}	C _{9,3}	C _{10,1}	C _{10,2}	C _{11,1}	C _{12,1}	C _{12,2}
Hormigon	6000	3420	2580	0	0	3420	0	2580	15	2308	256
Ladrillos	19000	10830	8170	0	0	10830	0	8170	7353	41	776
Azulejos y ceramicos	8000	4560	3440	0	0	4560	0	3440	3096	17	327
Arena, grava y otros componentes	2000	1200	800	0	0	1200	0	800	760	2	38
Total petreo	35000	20010	14990	0	0	20010	0	14990	11224	2368	1397
Materiales no petreos	C _{7,2}	C _{8,1}	C _{8,2}	C _{9,1}	C _{9,2}	C _{9,3}	C _{10,1}	C _{10,2}	C _{11,1}	C _{12,1}	C _{12,2}
Madera	788	190	598	0	190	0	479	119	113,07	0,3	5,7
Vidrio	175	60	115	54	6	0	0	115	0,7	102,9	11,4
Plastico	342	104	238	0	104	0	190	48	45,1	0,1	2,2
Yeso de construccion	56	26	30	23	2	0	0	30	0,2	8,3	21,9
Material aislante	1988	468	1520	0	468	0	1216	304	288,9	0,8	14,4
Embalaje mezclado	912	278	634	0	278	0	507	127	98,2	0,3	4,9
Empaques de papel y carton	76	20	56	0	20	0	45	11	10,6	0	0,5
Total no petreo	4337	1146	3191	77	1068	0	2437	754	557	113	61
Total	39337	21156	18181	77	1068	20010	2437	15744	11781	2481	1458

3. OBJETIVOS

El principal objetivo de este proyecto es el análisis de los criterios medioambientales y sociales que puedan ser utilizados para analizar la viabilidad de la implementación y funcionamiento de una actividad industrial en lo que se refiere a dichos aspectos.

Para ello se busca utilizar criterios que traten aspectos de relevancia dentro de la planta industrial y en los que se obtenga un valor numérico que proporcione un resultado final que sirva para cuantificar, valorar y comparar los impactos medioambientales y sociales de las diferentes actividades industriales.

Para mostrar un ejemplo de la aplicación de estos criterios en una actividad industrial, en este proyecto los criterios medioambientales y sociales seleccionados han sido aplicados a plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición. Los criterios se han aplicado a tres alternativas de funcionamiento de las plantas industriales, las dos alternativas propuestas de la planta ordinaria, alternativa de uso de materiales como relleno y alternativa de envío de materiales a vertedero, y la alternativa de la planta avanzada.

El objetivo de la aplicación de los criterios medioambientales y sociales en las diferentes plantas de RCDs es utilizarlos como herramienta para decidir cuál de las tres alternativas propuestas es la más propicia para ser llevado a cabo en la zona de Santander y alrededores.

Para evaluar los criterios en conjunto y obtener un resultado final más fiable, el cual permita ver con claridad cuál de las tres alternativas es la más idónea, se realiza un análisis multicriterio. En dicho análisis se implementarán distintos escenarios, variando la importancia de cada criterio, otorgándoles distintos pesos, con el fin de obtener un resultado final lo más real posible.

4. RESULTADOS

En este apartado del proyecto, se utilizan distintos tipos de indicadores, tanto medioambientales como sociales, los cuales son aplicados a las plantas de reciclaje sobre las que se está realizando el estudio. El objetivo del empleo de estos de criterios es la toma de decisiones sobre la instalación y operación de plantas industriales de tratamiento de RCDs en Cantabria, y en caso de llevarse a cabo dicha instalación, decidir cuál de las dos plantas estudiadas y en qué forma de trabajo, planta ordinaria, con y sin uso de vertedero, y planta avanzada, es más conveniente desde el punto de vista medioambiental y social.

Para la elección de estos criterios se ha realizado una revisión bibliográfica y un análisis de los criterios obtenidos, con el fin de seleccionar los indicadores más significativos y de mayor importancia que permitan comprobar de la manera más precisa posible el impacto medioambiental y social que tienen las plantas estudiadas en este proyecto.

Los criterios medioambientales y sociales que se han escogido para este proyecto una vez realizada la revisión bibliográfica se muestran en la Figura 3.

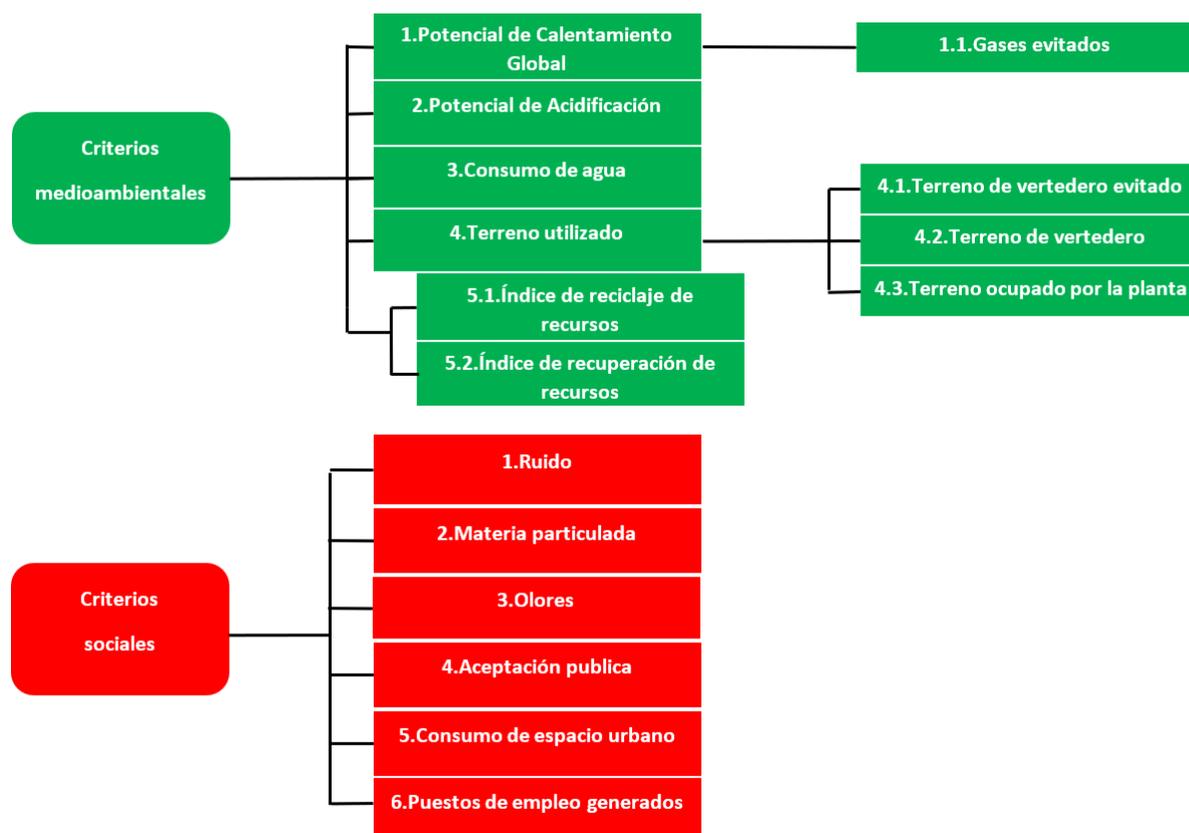


Figura 3. Criterios medioambientales y sociales

Como se puede observar en la Figura 3, se han considerado un total de cinco criterios medioambientales. En primer lugar, se encuentra el Potencial de Calentamiento Global, mediante el cual se calcula la cantidad de CO₂ emitido en las plantas de reciclaje estudiadas. El CO₂ emitido es resultado del consumo de combustible y del consumo de energía eléctrica y se mide en toneladas equivalentes de CO₂ (Teq CO₂). Además de esto, también se realiza un estudio de un subcriterio asociado al criterio de Potencial de Calentamiento Global que calcula la cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera que se evita gracias al uso de áridos reciclados en sustitución de áridos de origen natural.

El segundo criterio medioambiental utilizado es el Potencial de Acidificación, que calcula la cantidad de gases capaces de generar lluvia ácida emitidos. Estos gases se tratan principalmente del SO₂ y del NO_x y son emitidos debido al consumo de energía eléctrica en la planta. Se mide en Kg de SO₂ y NO_x emitidos.

En tercer lugar, se encuentra el consumo de agua en el proceso de reciclaje de las plantas estudiadas medido en m³.

El cuarto criterio medioambiental empleado es el de Terreno utilizado. Este criterio se divide a su vez en tres subcriterios, i) terreno de vertedero evitado debido al reciclaje llevado a cabo en las plantas (m³), ii) terreno de vertedero utilizado por los residuos desechados en las plantas (m³) y iii) terreno ocupado por la planta de reciclaje (m²).

El último criterio medioambiental utilizado es el Índice de recuperación y reciclaje de recursos, mediante el cual se obtiene un porcentaje de la cantidad de residuos reciclados y otro de la cantidad de residuos recuperados respecto al total de residuos que llegan a la planta.

En cuanto a los criterios sociales, se han considerado seis criterios diferentes. En primer lugar, se encuentra el ruido que provocan las plantas de reciclaje. Este criterio se mide analizando el ruido emitido por el equipamiento necesario en cada tipo de planta dando un valor a cada equipo en función del ruido emitido y posteriormente sumando la aportación de cada uno al total.

El segundo criterio social estudiado es la contaminación sobre el entorno de la planta, que se estima mediante el cálculo de las emisiones de partículas PM₁₀ como resultado del proceso de reciclaje de las plantas. Se mide en Kg de PM₁₀ emitido.

En tercer lugar, se estudia los olores provocados por las plantas de reciclaje. Estos olores son el resultado del yeso desechado por las plantas y destinado a vertedero donde su acumulación provoca la emisión de H_2S , siendo este gas causante de mal olor. Se mide en Kg H_2S emitidos

El cuarto criterio social utilizado es la aceptación pública de las personas que habitan cerca de la planta. Este indicador se estima mediante encuestas realizadas a la potencial población afectada.

El quinto criterio empleado es el consumo de espacio urbano ocupado por el recinto donde se sitúa la planta con respecto al terreno total de la región. Se mide en porcentaje (%).

El último criterio estudiado son los puestos de empleo generados por las plantas de reciclaje, lo cual puede significar un incentivo para la economía de la región.

4.1 ANALISIS DETALLADO LOS CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES

Criterio 1. Potencial calentamiento global (T_{eq} CO₂)

Se utiliza para estimar el impacto climático que puede causar la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de las plantas de reciclaje, lo que contribuye al calentamiento global.

Este criterio se fundamenta en la emisión de CO_2 , procedente bien del consumo de combustible o bien del consumo de energía eléctrica. Cabe destacar que la emisión de CO_2 debido al combustible se lleva a cabo en la propia planta, mientras que la debida al consumo de energía se localiza en el lugar de producción de la energía eléctrica consumida en la planta.

El combustible (principalmente diésel) es consumido por los equipos móviles de la planta (palas cargadoras y grúas de gancho). Dichos equipos se utilizan para el tratamiento manual de los residuos y para el transporte de los residuos a la entrada y salida de la planta. La grúa de gancho se encarga de la extracción de residuos de grandes dimensiones que deberán ser

separados de la corriente principal, mientras que la pala cargadora se encarga del transporte de los RCDs, llevando los residuos hacia la tolva, donde se inicia el proceso de reciclaje, y realizando la carga del camión una vez concluido el proceso de reciclaje. En la Tabla 4 se muestra el consumo de gasoil por tonelada de residuo tratada tanto para una planta ordinaria como para una planta avanzada según López y Roca, 2022.

Tabla 4. Consumo de gasoil por tonelada de residuo en ambas plantas

Equipo	Funcion	Consumo (l/t)
Pala cargadora	Carga de la tolva de alimentacion	0,356
	Carga del camion con el arido reciclado	0,238
Grua de gancho	Separacion de residuos de grandes dimensiones	0,395
Total		0,989

El resultado de las emisiones totales de CO₂ en la planta se obtiene sumando las emisiones debidas al consumo de combustible y las debidas al consumo de energía eléctrica.

Criterio 1.1 Potencial de calentamiento global evitado

El uso de áridos reciclados en sustitución de los áridos de tipo natural supone un importante ahorro de recursos minerales no naturales obtenidos en canteras. Del mismo modo, la energía consumida y la emisión de gases de efecto invernadero en la producción de áridos reciclados son considerablemente menores que las de un producto de cantera. Un estudio realizado por Tam et al., 2018 apunta que las emisiones de CO₂ por la producción de 1 tonelada de árido natural son de 0,046 toneladas.

Criterio 2. Potencial de acidificación (T_{eq} SO₂)

Mediante este criterio se mide la cantidad de gases emitidos, debido al proceso llevado en la planta, capaces de generar lluvia o deposición acida. Estos gases son emitidos junto con el CO₂ en el proceso de producción de energía eléctrica y se tratan principalmente del SO₂ y del NO_x. El Sistema Eléctrico Español (REE, 2022) establece los factores de emisión de ambos gases que son 0,654 g/kWh para el SO₂ y 0,438 g/kWh para el NO_x.

Criterio 3. Consumo de agua (m³)

Este indicador calcula el consumo de agua en la planta debido principalmente a sistemas de control de polvo y al agua utilizada por algunos equipos de separación, los cuales solo son utilizados en la planta avanzada. Mercante et al. (2012) establece el consumo de los sistemas de control de polvo en 1L por tonelada de RCD tratada, tanto en la planta ordinaria como en la planta avanzada.

En el caso del agua utilizado por los equipos de separación denominados wet jigs, para la separación de materiales con diferencias en la densidad relativa, la compañía WKD establece que las wet jigs necesitan alrededor de un total de 5 m³/t de RCDs para llevar a cabo el proceso de separación (<https://www.miningshakingtable.com>).

Por otra parte, para la separación por densidad en la espiral se necesita 2 m³ de agua por hora de trabajo (Khoza, 2016), teniendo en cuenta que este equipo trabaja con 40 toneladas por hora, según la compañía WKD, esto supone un consumo de agua de 0,05 m³/t.

Criterio 4. Terreno utilizado (m³)

Adicionalmente al criterio de terreno de ocupado por la planta de reciclaje (m²), el reciclaje de los RCDs permite una significativa reducción del espacio necesario para el depósito de estos residuos en vertederos por lo que, se tendrá en cuenta tanto el Terreno de vertedero evitado (m³) como el Terreno de vertedero necesario para residuos de la planta (m³).

Criterio 4.1 Terreno de vertedero evitado (m³)

Mediante este criterio se calcula el espacio de terreno de vertedero que se reduce gracias al tratamiento de los RCD en las plantas de reciclaje y se estima que, según un estudio realizado por Marzouk y Azab (2014), una tonelada de producto reciclado se corresponde una reducción del espacio en el vertedero de 0,6 m³. Por otro lado, según Rosado et al. (2017), el reciclaje de 1,25 toneladas de RCDs evita el depósito de 1 tonelada de RCDs en vertedero y la extracción de 0,22 toneladas de suelo.

Criterio 4.2. Terreno de vertedero necesario para residuos de la planta

La segunda forma de tener en cuenta el vertedero es el punto de vista contrario, calculándose el volumen final de residuo que es apartado de la corriente principal y destinado directamente al vertedero durante todo el proceso de reciclaje que tiene lugar en la planta. Para el cálculo de este criterio se convierte la masa de los RCD desechados en volumen, utilizando unos valores medios de densidad para cada material, los cuales se pueden observar en la Tabla XX.

Criterio 4.3. Terreno ocupado por la planta de reciclaje (m²)

Las plantas de reciclajes de RCDs necesitan de un amplio espacio de terreno para llevar a cabo su función, lo que en muchas veces supone el consumo de espacio urbano o la disminución de áreas verdes en la zona. Faleschini et al., 2016 establece que una planta de reciclaje necesita 0,15 m² por tonelada tratada para poder funcionar correctamente.

Criterio 5. Índice de recuperación de recursos (%) e Índice de reciclaje de recursos (%)

Mediante este criterio se trata de comprobar si la planta de reciclaje cumple los objetivos marcados por la Unión Europea, que se establecen en un porcentaje de recuperación de residuos del 70% para el año 2020.

Los residuos que se obtienen al final del proceso en la planta de reciclaje se dividen en dos fracciones. La fracción gruesa (>4 mm) supone aproximadamente el 42% del producto final y la fracción fina (<4 mm) supone el 58%, tanto en la planta ordinaria como en la planta avanzada. Dentro de la fracción fina se incluye también los agregados all-in-one que constituyen el 40% de ésta en la planta ordinaria y aproximadamente el 42 % en la planta de reciclaje avanzada.

Debido a esto, este criterio se divide a su vez en dos: En primer lugar, el índice de reciclaje, que recoge el porcentaje de agregados gruesos y de buena calidad que se obtienen al final del proceso. Por otra parte, el índice de recuperación de recursos, en el que además de lo anterior también se incluyen los productos de menor calidad que pueden servir para actividades como el relleno.

Para el cálculo del índice de reciclaje no se tienen en cuenta los áridos reciclados de baja calidad, como pueden ser los áridos cerámicos mixtos elaborados con fracción fina, ya que se trata de un producto de calidad bastante inferior con respecto al material original. Por otra parte, tampoco son incluidos en este criterio los residuos destinados al vertedero como el vidrio o el yeso.

En el caso de la planta ordinaria se pueden distinguir dos alternativas. En la primera, los productos de baja calidad que salen de la planta para su venta no cuentan con las propiedades necesarias para ser utilizados en ninguna aplicación y, por lo tanto, son destinados al vertedero. En la segunda alternativa, dichos productos son destinados para actividades que no requieran de áridos de alta calidad, como el relleno.

En la Tabla 5 se especifica la forma de cálculo de cada uno de los criterios medioambientales a aplicar en el presente trabajo junto con las referencias bibliográficas utilizadas para la estimación de valores necesarios para su cálculo.

Tabla 5. Forma de cálculo de cada uno de los criterios medioambientales utilizados

Criterio	Forma de Calculo	Referencias
<p>Criterio 1. Potencial calentamiento global (Teq CO₂)</p>	<p>A) Consumo de Energía Eléctrica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Factor de Emisión: 0,19 kg CO₂/kWh. - Horas de trabajo de cada equipo (h) - Consumo de cada equipo (Kwh) <p>[Teq CO₂]_{EE} = t RCDs x (h/t RCDs)_{eq.} x Consumo equipo (Kwh) x FE (Teq CO₂/kWh)</p> <p>B) Diesel consumido por la maquinaria</p> <ul style="list-style-type: none"> - Poder Calorífico Inferior (PCI): 43,08 GJ/t diesel - Factor de emisión de 73,67 Teq CO₂/TJ - Consumo de Diesel ambas plantas: 0,989 l/t - Densidad del Diesel: 850 kg/m³ <p>[Teq CO₂]_{Diesel} = FE (Teq CO₂/TJ) x PCI (TJ/t diesel) x Consumo (l diésel /t RCDs) x Densidad (t diésel /l diésel) x t RCDs</p> <p>[Teq CO₂]_{Diesel} = 73,67 (Teq CO₂/TJ) x 0,04308 (TJ/t diesel) x 0,989 (l diésel /t RCDs) x 850.10⁻⁶ (t diésel /l diésel) x t RCDs = 2,668.10⁻³ x t RCDs</p> <p>[Teq CO₂] = [Teq CO₂]_{EE} + [Teq CO₂]_{Diesel}</p>	<p>Inventario Nacional de Emisiones (2022); López y Roca, (2022); López Gayarre et al. (2016); Rashid et al. (2020); REE, 2022;</p>
<p>Criterio 2. Potencial de acidificación (Teq SO₂)</p>	<p>Consumo de Energía Eléctrica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Factor de Emisión: 0,654 g SO₂/kWh. - Horas de trabajo de cada equipo (h) - Consumo de cada equipo (Kwh) 	<p>López Gayarre et al. (2016); Rashid et al. (2020); REE, 2022;</p>

	[Teq SO₂]_{EE} = t RCDs x (h/t RCDs)_{eq.} x Consumo equipo (Kwh) x FE (Teq SO₂/kWh)	
Criterio 3. Consumo de agua (m³)	Agua consumida por la maquinaria - Factores de consumo: <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de control de polvo: 10⁻³ m³/t • Wet jig: 5 m³/t • Espiral: 0,05 m³/t [m³ Agua] = FC (m³/t) x t RCDs	Mercante et al. (2012); Khoza, 2016;
Criterio 4. Terreno utilizado (m³) - 4.1. Terreno de vertedero evitado (m ³) - 4.2. Terreno de vertedero necesario para residuos de la planta - 4.3. Terreno ocupado por la planta de reciclaje (m ²)	4.1. Terreno de vertedero evitado gracias a las plantas de reciclaje - Coeficiente de reducción de vertedero: 0,6 m ³ /t RCDs recicladas [m³ vertedero evitado]= CRV (m³/t RCDs recicladas) x t RCDs recicladas 4.2. Terreno de vertedero necesario para residuos de la planta [m³ vertedero] = t RCDs enviadas a vertedero x Densidad del material (kg/m³) 4.3. Terreno ocupado por la planta de reciclaje - Coeficiente de ocupación: 0,15 m ² /t RCDs tratadas [m² planta] = CO (m²/ t RCDs tratadas) x t RCDs tratadas	Marzouk y Azab (2014); Rosado et al. (2017); Faleschini et al., 2016;
Criterio 5. - 5.1. Índice de reciclaje de recursos (%) - 5.2. Índice de recuperación de recursos (%)	5.1. Índice de reciclaje de recursos [% reciclaje]= t RCDs recicladas / t RCDs que entran en la planta x 100 5.2. Índice de recuperación de recursos [% recuperación]= t RCDs recuperadas / t RCDs que entran en la planta x 100	Dosal, 2015;

4.2 ANALISIS DETALLADO DE LOS CRITERIOS SOCIALES

Criterio 6. Ruido (Número)

El ruido provocado por una planta de tratamiento y recuperación de RCDs es un criterio importante para tener en cuenta ya que puede generar malestar entre los vecinos que vivan cerca de la planta. Hay que tener en cuenta que este tipo de plantas trata primordialmente corrientes sólidas que son necesarias transportar, reducir de tamaño y separar por tamaños, siendo necesario el uso de operaciones de manejo de sólidos que pueden provocar un elevado nivel de ruido. En el caso de no saber dónde va a estar localizada la planta, se hace difícil calcular el impacto acústico que va a tener esta sobre la población, sin embargo, se puede optar por analizar el ruido emitido por el equipamiento necesario en cada tipo de planta y posteriormente sumar la aportación de cada uno al total. Los equipos se pueden clasificar en bajo, medio, alto o muy alto, según el ruido que produzcan, siendo los equipos de trituración los más ruidosos de todos. A cada equipo se le asigna un valor del 1 al 4 en función del nivel en el que se le haya clasificado. Otro aspecto para tener en cuenta es que los equipos no están funcionando durante todo el tiempo, lo que podría variar el resultado final.

Por lo tanto, para el cálculo de este criterio se multiplica el valor que se asigna a cada equipo en función del ruido que produzcan por su factor de funcionamiento y posteriormente se suma el resultado obtenido de cada equipo para obtener el resultado final.

Criterio 7. Contaminación sobre el entorno de la planta (kg PM10/año)

Las plantas de tratamiento y reciclaje de RCDs manejan primordialmente corrientes sólidas por lo que es un tipo de planta industrial susceptible de generar problemas por emisiones de partículas de diferente tamaño. Las partículas PM10 son todo aquel material particulado con diámetro menor a 10 μm . El cálculo de este criterio, que tiene en cuenta estas partículas, permite determinar la contaminación de las zonas cercanas a la planta debido a las emisiones de PM10 contenidas en polvo que se pueden depositar en las casas próximas a la planta, en los coches aparcados en la calle o también pueden llegar a ser inhaladas por las personas de la zona. Estas partículas pueden llegar a ser nocivas para el ser humano si la

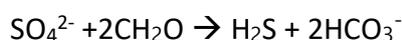
exposición a ellas es prolongada. Están detrás de numerosas enfermedades respiratorias, problemas cardiovasculares y cánceres de pulmón. Por otro lado, los estudios sobre los efectos a largo plazo han estimado que la exposición a estas partículas puede reducir la esperanza de vida entre varios meses y dos años. Por lo tanto, es conveniente que la planta se sitúe en un lugar alejado de núcleos de viviendas.

También pueden causar daño ambiental, ya que el viento puede transportar las partículas a través de grandes distancias y estas pueden instalarse en el suelo o en el agua. Esta sedimentación puede provocar varios fenómenos como que los lagos y arroyos se vuelvan ácidos, la reducción de los nutrientes del suelo o provocar daños en bosques y cultivos agrícolas.

La cantidad de PM10 generado depende de muchos factores como la naturaleza del material o el tipo de maquinaria utilizada, pero la forma más fácil de estimación se basa en el empleo de los factores de emisión obtenidos de la guía de prevención de emisión de partículas CAPV (2012). Estos factores se aplican en base a la cantidad de residuos tratados. Los resultados finales se obtienen multiplicando los factores de emisión (kg/ton) por la cantidad de toneladas tratada en la planta por cada equipo.

Criterio 8. Olores producidos por los RCDs (kg H₂S/m³)

El yeso es un importante material de construcción, utilizado para el acabado de muros, techos y placas. Debido a la falta de medidas de reciclaje efectivas, la mayoría del yeso termina en vertederos. Los residuos de yeso son la principal razón de la formación de H₂S en vertederos. El yeso (CaSO₄·½H₂O) se disuelve en el agua del vertedero formando iones sulfato y a continuación es utilizado como un aceptador de electrones por bacterias sulfato-reductoras (BSR), lo que lleva a la producción de H₂S. Durante el proceso metabólico, la BSR oxidan los compuestos orgánicos simples (representados por CH₂O), produciendo sulfuro de hidrógeno e iones bicarbonatos.



El H₂S es un gas incoloro con un olor a huevo podrido, y con un umbral de olor muy bajo (0,5 ppb). Además de causar problemas de olor, también supone un riesgo sobre la salud humana. Los efectos sobre la salud dependen de la concentración y el tiempo de exposición,

sin embargo, se pueden observar algunos efectos con bajas concentraciones de H₂S, como náuseas leves, dolores de cabeza e irritación en los ojos. La exposición a altas concentraciones puede ocasionar una falta de oxígeno en las células, resultando en una pérdida de conocimiento extremadamente rápida y la muerte. Además, la larga exposición a bajas concentraciones puede causar problemas en el sistema nervioso central, en el sistema respiratorio y en el sistema circulatorio (Chen et al.,2022).

El indicador para medir este criterio es la huella de olor, mediante la cual se cuantifica el impacto del olor considerando la persistencia de los olores. La emisión de H₂S en vertedero se estima en 24 mg/m³ (Chen et al., 2022).

El resultado final de este criterio se obtiene multiplicando el volumen total de residuos de yeso enviados a vertedero (m³) por el coeficiente de emisión de H₂S estimado por Chen et al., 2022. De esta manera se obtienen las emisiones totales en kg de H₂S debido al reciclaje de RCDs.

Criterio 9. Aceptación pública

Se trata del porcentaje de aceptación que tiene la planta de reciclaje dentro de los residentes en la zona en la que se encuentra. Este indicador se usa para medir el impacto de las actividades relacionadas con los residuos de construcción y demolición en la calidad de vida de las personas de la región. Es un indicador cualitativo y su valor se debería determinar consultando a los residentes de la zona mediante encuestas. Generalmente, las plantas de reciclaje de RCDs pueden influenciar la vida de las personas de varias formas, como se ha visto anteriormente, tanto de forma positiva (por aumento de empleo y dinamización económica entre otros) como negativa (por contaminación y uso del suelo entre otros). Por ejemplo, pueden emitir ruidos, olores, polvo o incluso los RCDs podrían llegar a esparcirse por la carretera mientras están siendo transportados hacia la planta, afectando así al entorno de la zona. Además de esto, se debe tener en cuenta la depreciación que sufre el terreno por la alta perturbación que la planta provoca en el medioambiente local, tanto en aspectos estéticos como de contaminación del aire. Por todo esto, es necesario contar con la aceptación social de los residentes en el entorno de la planta antes de llevar a cabo la construcción de esta (Yuan, 2012).

Criterio 10. Espacio urbano consumido (%)

Las plantas de reciclaje de RCDs suponen un consumo de suelo que provoca en muchas ocasiones una potencial disminución de los espacios verdes, así como del suelo de la zona que podría dedicarse para otros usos, lo que no suele ser de agrado para los residentes cercanos a la planta. Este criterio considera el espacio utilizado para el tratamiento de los RCDs en las plantas de reciclaje sobre el total del área de la región y se calcula dividiendo ambas superficies (Taelman et al.,2020).

Criterio 11. Puestos de empleo generados

Una planta de reciclaje en la región supone la creación de nuevos puestos de trabajo tanto directos como indirectos y significa un incentivo para su economía. Este criterio se utiliza para evaluar la aceptación política y social de los métodos de tratamiento y vertido de residuos de construcción y demolición. Se incluye como un aspecto social positivo para tener en cuenta a la hora de construir una planta de reciclaje. Dentro de la planta son necesarios diferentes puestos de trabajo en función necesidades de operación, mantenimiento y gestión de todas las actividades relacionadas con la planta (Dosal, 2015).

En la Tabla 6 se especifica la forma de cálculo de cada uno de los criterios sociales a aplicar en el presente trabajo junto con las referencias bibliográficas utilizadas para la estimación de valores necesarios para su cálculo.

Tabla 6. Forma de cálculo de cada uno de los criterios sociales utilizados

Criterio	Forma de Calculo	Referencias
Criterio 6. Ruido	<p>Ruido provocado dentro de la planta</p> <ul style="list-style-type: none"> - Factor de emisión de ruido: del 1 al 4, en función del ruido emitido por cada equipo - Factor de funcionamiento: 0 a 1, en función del tiempo que este operativo cada equipo <p>[Ruido] = FER x FF</p>	<p>Dosal, (2015); López Gayarre et al. (2016); Rashid et al. (2020);</p>
Criterio 7. Contaminación sobre el entorno de la planta (kg PM10/año)	<p>Emisiones de PM10</p> <ul style="list-style-type: none"> - Factores de emisión (kg/ton) <p>[kg PM10] = FE (kg/ton) x t RCDs</p>	<p>CAPV (2012);</p>
Criterio 8. Olores producidos por los RCDs (kg H₂S/m³)	<p>Emisiones de H₂S</p> <ul style="list-style-type: none"> - Factor de emisión: 24 mg/m³ - Volumen de residuos de yeso destinados a vertedero (m³) <p>[kg H₂S] = FE (mg/m³) x Volumen yeso (m³)</p>	<p>Chen et al., (2022);</p>
Criterio 9. Aceptación publica	<p>Aceptación pública</p> <ul style="list-style-type: none"> - Estimación cualitativa en función de los resultados de los otros criterios - Tres posibles resultados: *, **, *** 	<p>Yuan (2012);</p>
Criterio 10. Espacio urbano consumido (%)	<p>Consumo de espacio urbano</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coeficiente de ocupación: 0,15 m²/t RCDs tratadas - Área región: 373,5 km² <p>[% ocupación] = CO (m²/ t RCDs tratadas) x t RCDs tratadas x AR (m²) x 100</p>	<p>Taelman et al., (2020); Faleschini et al., 2016;</p>
Criterio 11. Puestos de empleo generados	<p>Generación de puestos de empleo</p> <ul style="list-style-type: none"> - Según las estimaciones realizadas por Dosal, 2015 	<p>Dosal, (2015);</p>

La aplicación de los criterios medioambientales se realizará según lo establecido en los apartados anteriores de este trabajo que se ha resumido en las Tablas 5 y 6. Los flujos de las diferentes corrientes se establecen en el Anexo y se indican en las Figuras 1 y 2.

4.3 APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES A LAS PLANTAS DE RCDs

Criterio 1. Potencial calentamiento global (Teq CO₂)

Para calcular la cantidad de CO₂ emitido debido al consumo de combustible se utiliza el factor de emisión de CO₂ proporcionado por Inventario Nacional de Emisiones (2022), el cual propone un poder Calorífico Inferior (PCI) de 43,08 GJ/Ton y un factor de emisión de 73,67 Teq CO₂/TJ para el consumo de diésel. Teniendo en cuenta que la densidad del diésel es de 850 kg/m³, se puede calcular la cantidad de CO₂ emitido. En la Tablas 7 y 8 se muestran los cálculos de Teq CO₂ emitidas para una planta ordinaria y una planta avanzada (ver corrientes en Figuras 1 y 2) utilizando los consumos de diésel establecidos por López y Roca, 2022.

Las cantidades de las toneladas tratadas se obtienen de los valores de los flujos de residuos en las plantas que se encuentran en el anexo. Estos valores se multiplican por los coeficientes de consumo de gasoil por tonelada para cada equipo, obteniendo de esta manera el consumo de gasoil en litros de la planta, el cual multiplicándolo por su densidad es pasado a toneladas. Una vez se tiene el valor del consumo de diésel en toneladas, se multiplica por el coeficiente de Poder Calorífico Inferior (PCI) para obtener el consumo de energía en Giga julios. Por último, para obtener el valor final de toneladas de CO₂ emitidas se multiplica el valor de consumo energético en Giga julios por el factor de emisión anteriormente citado.

Tabla 7. Emisiones anuales de CO₂ debidas al consumo de combustible de la planta ordinaria.

Equipo	Ton tratadas	Planta ordinaria			
		Gasoil(L)	Gasoil (t)	GJ	Teq CO ₂
Pala cargadora	39370	14016	11,91	513	37,81
	37171	8847	7,52	324	23,87
Grua de gancho	4380	1730	1,47	63	4,67
Total	80921	24593	20,90	901	66,34

Pala cargadora (Transporte de RCDs a la entrada de la planta): 34.166 (C_{2,2}) + 5.204 (C_{2,2}) = 39.370 t

Pala cargadora (Transporte de RCDs a la salida de la planta): $12.915 (C_{6,1}) + 8.626 (C_{6,1}) + 15630 (C_{8,2}) = 37.171 \text{ t}$
 Grúa de gancho: $3.546 (C_{2,1}) + 834 (C_{2,3}) = 4.380 \text{ t}$

Tabla 8. Emisiones anuales de CO₂ debidas al consumo de combustible de la planta avanzada.

Equipo	Ton tratadas	Planta avanzada			
		Gasoil(L)	Gasoil (t)	GJ	Teq CO ₂
Pala cargadora	39189	13951	11,86	511	37,64
	34273	8157	6,93	299	22,00
Grua de gancho	4561	1802	1,53	66	4,86
Total	78023	23910	20,32	876	64,50

Pala cargadora (Transporte de RCDs a la entrada de la planta): $34.166 (C_{2,2}) + 5.023 (C_{2,2}) = 39.189 \text{ t}$

Pala cargadora (Transporte de RCDs a la salida de la planta): $11.686 (C_{9,3}) + 8.324 (C_{9,3}) + 11.781 (C_{11,1}) + 2.480 (C_{12,1}) = 34.273 \text{ t}$

Grúa de gancho: $3.727 (C_{2,1}) + 834 (C_{2,3}) = 4.561 \text{ t}$

Para el cálculo de las emisiones realizadas por consumo eléctrico se necesita conocer la potencia requerida en kWh, así como la producción en toneladas por hora, de cada uno de los equipos de la planta, los cuales se pueden estimar a partir de los estudios realizados por López Gayarre et al. (2016) y Rashid et al. (2020). Una vez obtenido estos datos, solo queda multiplicarlos por el factor de emisión de CO₂ debido al consumo eléctrico, el cual se obtiene de Red Eléctrica Española (REE, 2022) y tiene un valor aproximado de 0,19 kg CO₂/kWh.

Conociendo la capacidad de tratamiento de RCDs por hora de cada equipo (toneladas tratadas/hora) y el total de RCDs tratados (t RCDs) se puede obtener el número de horas de trabajo de cada equipo. Al multiplicar este valor la unidad de potencia de cada equipo en kW se obtiene el consumo en kWh totales. Para llegar al valor final de toneladas de CO₂ emitidas se multiplica el consumo de energía en kWh por el factor de emisión de CO₂ mencionado anteriormente.

En las Tablas 9 y 10 se muestra el cálculo de las emisiones de CO₂ debidas al consumo de energía eléctrica para cada una de las dos plantas objeto de estudio.

Tabla 9. Emisiones anuales de CO₂ debidas al consumo de energía eléctrica de la planta ordinaria

Planta ordinaria						
Equipo	Consumo (kW)	(t/h)	t tratadas	Actividad (h)	kWh	Teq CO ₂
Trituradora de mandibula	75	90	23664	263	19720	3,75
Criba vibratoria	22,3	90	39370	437	9755	1,85
Iman magnetico	1,1	120	0	0	0	0,00
Criba rotatoria	30	90	40184	446	13395	2,54
Cinta transportadora horizontal	5,5	90	34600	384	12687	2,41
Cinta transportadora vertical	11	90	23068	256	5639	1,07
Tamizadora por aire	6,3	60	3620	60	380	0,07
Total	151,2	630	164506	1848	61575	11,70

Trituradora de mandíbula: $21.300 + 2.364 = 23.664$ t (C₄)

Criba vibratoria: $34.166 + 5.204 = 39.370$ t (C_{2,2})

Criba rotatoria: $35.000 + 5.184 = 40.184$ t (C_{5,2})

Tamizadora por aire (Solo actúa sobre los materiales no pétreos): 3.620 t (C_{6,2})

Tabla 10. Emisiones anuales de CO₂ debidas al consumo de energía eléctrica de la planta avanzada.

Planta avanzada						
Equipo	Consumo (kW)	(t/h)	t tratadas	Actividad (h)	kWh	Teq CO ₂
Trituradora de impacto	110	90	39337	437	48079	9,13
Espiral	11	15	1146	76	840	0,16
Criba vibratoria	22,3	90	78674	874	19494	3,70
Iman magnetico	1,1	120	0	0	0	0,00
Tamizadora por aire	6,3	60	3026	50	318	0,06
Wet jig	5,5	20	15721	786	4323	0,82
Corrientes de Foucalt	16,4	120	0	0	0	0,00
Cinta transportadora horizontal	5,5	90	51400	571	28270	5,37
Cinta transportadora vertical	11	90	23068	256	5639	1,07
Total	189,1	695	212372	3052	106962	20,32

Trituradora de impacto: $35.000 + 4.337 = 39.337$ t (C_{4,1})

Espiral (Solo actúa sobre los materiales no pétreos): 1.146 t (C_{8,1})

Criba vibratoria (Doble paso): $(35.000 + 4.337) \times 2 = 78.674$ t (C_{4,1})

Tamizadora por aire (Solo actúa sobre los materiales no pétreos): 3.026 t (C_{8,2})

Wet jig (Doble paso): $14.990 + 731 = 15.721$ t (C_{10,2})

A continuación, en la Tabla 11, se resumen los resultados de las emisiones de CO₂ generadas en la planta debido al consumo de diésel y al consumo de Energía eléctrica.

Tabla 11. Emisiones totales de CO₂ en ambas plantas

Consumo	Planta ordinaria	Planta avanzada	%RSD
	Teq CO ₂	Teq CO ₂	
Diesel	66,34	64,50	1,99
Energía eléctrica	11,70	20,32	38,08
Total	78,04	84,82	5,89

En la Tabla 11 se puede observar como las emisiones debidas al consumo de diésel son similares en ambas plantas. Esto se debe tanto la planta ordinaria como la planta avanzada utilizan la misma maquinaria para el transporte y la extracción de los RCDs y lo único que cambia son ciertos flujos de materiales.

Por otro lado, la planta avanzada tiene un consumo bastante superior de energía eléctrica que la planta ordinaria, ya que cuenta con un proceso de reciclaje más complejo y, por tanto, necesita mayor número de equipos y de mayor potencia para llevarlo a cabo. Esto se puede ver de manera clara con la trituradora de impacto de la planta avanzada, la cual consume más del doble que la trituradora de mandíbula en la planta ordinaria.

Criterio 1.1 Potencial de Calentamiento Global evitado

Para el cálculo de las emisiones de CO₂ por la producción de 1 tonelada de árido reciclado se multiplica el valor de toneladas totales de CO₂ emitidas por el valor de toneladas recicladas en cada una de las plantas; este último valor se obtiene del estudio de las corrientes de residuos en las plantas de reciclaje situado en el anexo.

En la Tabla 12 se calcula las emisiones por tonelada reciclada tanto en la planta ordinaria como en la planta avanzada.

Tabla 12. Emisiones de CO₂ por tonelada de residuo en ambas plantas.

Tipo de planta	Teq CO ₂	Ton recicladas	Emisiones por tonelada
Planta ordinaria	78,78	37071	0,0021
Planta avanzada	85,38	34273	0,0025
%RSD			11,22

Como se apuntó anteriormente, las emisiones en la producción de áridos naturales son aproximadamente 21 veces mayores que las emisiones en la producción de áridos reciclados. Esto significa una reducción muy importante en las emisiones de CO₂ a la atmosfera y puede suponer un gran incentivo para llevar a cabo la producción de una mayor

cantidad de áridos reciclados. No obstante, la diferencia entre las plantas estudiadas es de 11,22 %RSD

Criterio 2. Potencial de acidificación (Teq SO₂)

Este criterio se calcula de la misma forma que las emisiones de CO₂ debido al consumo de energía eléctrica. Se utilizan los datos de energía eléctrica consumida por la planta y los de toneladas de residuos tratadas por hora estimados por López Gayarre et al., 2016 y Rashid et al., 2020. Multiplicando el valor de toneladas tratadas por cada equipo por el de toneladas que es capaz de tratar cada hora se obtiene la actividad de cada equipo en horas. El valor de la actividad en horas se multiplica por el consumo en kWh de cada equipo y se obtiene el consumo total en kW. Multiplicando este valor por los factores de emisión de cada uno de los gases se obtiene el resultado final en Kg de SO₂ y Kg de NO_x emitidos.

En la Tablas 13 y 14 se calcula la cantidad de gases capaces de generar lluvia acida emitidos en la planta ordinaria y en la planta avanzada.

Tabla 13. Emisiones anuales de SO₂ y NO_x en la planta ordinaria

Equipo	Consumo (kW)	Planta ordinaria						
		(t/h)	t tratadas	Actividad (h)	kWh	Kg SO ₂	Kg NO _x	%RSD
Trituradora de mandibula	75	90	23664	263	19720	12,90	8,64	27,97
Criba vibratoria	22,3	90	39370	437	9755	6,38	4,27	27,97
Iman magnetico	1,1	120	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Criba rotatoria	30	90	40184	446	13395	8,76	5,87	27,97
Cinta transportadora horizontal	5,5	90	34600	384	12687	8,30	5,56	27,97
Cinta transportadora vertical	11	90	23068	256	5639	3,69	2,47	27,97
Tamizadora por aire	6,3	60	3620	60	380	0,25	0,17	27,97
Total	151,2	630	164506	1848	61575	40,27	26,97	27,97

Trituradora de mandíbula: $21.300 + 2.364 = 23.664$ t (C₄)

Criba vibratoria: $34.166 + 5.204 = 39.370$ t (C_{2,2})

Criba rotatoria: $35.000 + 5.184 = 40.184$ t (C_{5,2})

Tamizadora por aire (Solo actúa sobre los materiales no pétreos): 3.620 t (C_{6,2})

Tabla 14. Emisiones anuales de SO₂ y NO_x en la planta avanzada

Equipo	Planta avanzada							
	Consumo (kW)	(t/h)	t tratadas	Actividad (h)	kWh	Kg SO ₂	Kg NO _x	%RSD
Trituradora de impacto	110	90	39169	435	47873	31,31	20,97	27,97
Espiral	11	15	1094	73	802	0,52	0,35	27,97
Criba vibratoria	22,3	90	78338	870	19410	12,69	8,50	27,97
Iman magnetico	1,1	120	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Tamizadora por aire	6,3	60	2929	49	308	0,20	0,13	27,97
Wet jig	5,5	20	15721	786	4323	2,83	1,89	27,97
Corrientes de Foucalt	16,4	120	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Cinta transportadora horizontal	5,5	90	51900	577	28545	18,67	12,50	27,97
Cinta transportadora vertical	11	90	23068	256	5639	3,69	2,47	27,97
Total	189,1	695	212219	3046	106901	69,91	46,82	27,97

Trituradora de impacto: $35.000 + 4.337 = 39.337$ t (C_{4,1})

Espiral (Solo actúa sobre los materiales no pétreos): 1.146 t (C_{8,1})

Criba vibratoria (Doble paso): $(35.000 + 4.337) \times 2 = 78.674$ t (C_{4,1})

Tamizadora por aire (Solo actúa sobre los materiales no pétreos): 3.026 t (C_{8,2})

Wet jig (Doble paso): $14.990 + 731 = 15.721$ t (C_{10,2})

Como se puede ver en las Tablas 13 y 14, al igual que en el criterio anterior, las emisiones de este tipo gases son superiores en la planta avanzada, debido al mayor consumo de energía eléctrica por los equipos utilizados en este tipo de planta.

Criterio 3. Consumo de agua (m³)

Para el cálculo de la cantidad de agua que se utiliza en cada una de las plantas se multiplican las toneladas tratadas por cada equipo por el coeficiente de m³ de agua que utiliza cada equipo por tonelada tratada, mencionado en el apartado 4.1.

En la Tabla 15 se puede observar el consumo total de agua en ambas plantas.

Tabla 15. Consumo de agua en ambas plantas

Equipo		Planta ordinaria	Planta avanzada
Control de polvo	Ton tratadas	43750	43750
	Consumo de agua (m ³)	43,75	43,75
Wet jig	Ton tratadas	-	15721
	Consumo de agua (m ³)	-	78605
Espiral	Ton tratadas	-	1146
	Consumo de agua (m ³)	-	57,3
Total		43,75	78706

Wet jig (Doble paso): $14.990 + 731 = 15.721$ t (C_{10,2})

Espiral (Solo actúa sobre los materiales no pétreos): 1.146 t (C_{8,1})

Como se puede ver en la Tabla 15, el consumo de agua es muy superior (cuatro órdenes de magnitud) en la planta avanzada, ya que la planta ordinaria no cuenta con equipos de separación que utilicen agua para separar las corrientes de residuos.

Criterio 4. Terreno utilizado (m^3)

Adicionalmente al criterio de terreno de ocupado por la planta de reciclaje (m^2), el reciclaje de los RCD permite una significativa reducción del espacio necesario para el depósito de estos residuos en vertederos por lo que, se tendrá en cuenta tanto el Terreno de vertedero evitado (m^3) como el Terreno de vertedero necesario para residuos de la planta (m^3).

Criterio 4.1 Terreno de vertedero evitado (m^3)

Para obtener el resultado del volumen total de vertedero evitado gracias al reciclado de los RCDs se multiplica el total de las toneladas recicladas en cada una de las plantas por el volumen de vertedero evitado por el reciclaje de 1 tonelada estimado por Marzouk y Azab (2014), que es de $0,6 m^3/t$.

En este apartado también se realizan otros cálculos relacionados con la reducción de espacio de vertedero. Para el cálculo de la extracción de suelo evitada en toneladas se utiliza el coeficiente mencionado en el apartado 4.1, que establece que se evita la extracción de 0,22 toneladas de suelo por cada 1,25 toneladas recicladas. Para obtener el total de toneladas evitadas se multiplica dicho coeficiente por el total de toneladas recicladas en cada planta.

Por último, en este apartado se realiza el cálculo de la cantidad de toneladas de residuos que se evita que sean destinadas a vertedero gracias a las plantas de reciclaje de RCDs. Para ello se utiliza el coeficiente descrito anteriormente por Rosado et al., 2017 que estima que el reciclaje de 1,25 toneladas de RCDs evita el depósito de 1 tonelada en vertederos. Para obtener el resultado de toneladas totales se multiplica dicho coeficiente por el total de toneladas recicladas en cada planta.

En la Tabla 16 se muestran diferentes indicadores relacionados con la reducción de vertedero gracias a las plantas de reciclaje de RCDs.

Tabla 16. Reducción de residuos enviados a vertedero gracias a las plantas de reciclaje de RCDs

	Planta ordinaria	Planta avanzada	%RSD
Ton recicladas	37071	34273	5,55
Reduccion vertedero (m ³ /t)	0,6	0,6	0,00
Vertedero evitado (m ³)	22243	20564	5,55
Extraccion de suelo evitada (t)	6524	6032	5,55
Ton en vertedero evitadas	29657	27418	5,55

Por lo tanto, mediante el reciclado de RCDs se consigue reducir en gran medida el espacio de vertedero utilizado, en los cuales se depositan sustancias que pueden contaminar el suelo y las aguas subterráneas, desprender olores, poner a la sociedad en riesgo y devaluar el terreno de la zona, además de tener un importante impacto paisajístico. Del mismo modo, como se puede ver en la Tabla 16, se evita la extracción de más de 6.000 toneladas suelo, necesaria para la construcción del vertedero

Criterio 4.2. Terreno de vertedero necesario para residuos de la planta

Para obtener el resultado del volumen de residuos enviados a vertedero en cada planta y en cada escenario, se multiplica la cantidad, en toneladas, de cada corriente de residuos que es enviada a vertedero, valor que se obtiene de los cálculos realizados en el anexo, por la densidad de los materiales de la corriente de residuos.

En las tablas 17, 18 y 19 se muestra el volumen de cada corriente de residuos enviado a vertedero para cada alternativa propuesta.

Tabla 17. Cantidad de residuos enviados a vertedero en la Alternativa 1 de la planta ordinaria.

Tipo de residuo	Planta ordinaria (Alternativa 1-vertedero)		
	Masa (t)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)
Madera	1636	800	2045
Yeso	42	2400	18
Plastico	558	1200	465
Vidrio	75	2500	30
Materiales de baja densidad	4348	900	4831
Aridos finos	12915	1500	8610
Aridos all-in-one	8516	1500	5677
Total	5023		21676

$$\text{Madera: } 960 (C_{2,1}) + 629 (C_{7,1}) + 47 (C_{8,1}) = 1.636 \text{ t}$$

Yeso: 42 t (C_{2,1})
 Plástico: 315 (C_{2,1}) + 226 (C_{7,1}) + 17 (C_{8,1}) = 558 t
 Vidrio: 75 t (C_{2,1})
 Materiales de baja densidad: 2.154 (C_{2,1}) + 2041 (C_{7,1}) + 153 (C_{8,1}) = 4.348 t
 Áridos finos: 12.915 t (C_{6,1})
 Áridos all-in-one: 8.516 t (C_{6,1})

Tabla 18. Cantidad de residuos enviados a vertedero en la Alternativa 2 de la planta ordinaria.

Tipo de residuo	Planta ordinaria (Alternativa 2-relleno)		
	Masa (t)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)
Yeso	42	2400	17,5
Vidrio	75	2500	30
Materiales de baja densidad	4348	900	4831
Total	4465		4879

Yeso: 42 t (C_{2,1})
 Vidrio: 75 t (C_{2,1})
 Materiales de baja densidad: 2.154 (C_{2,1}) + 2.041 (C_{7,1}) + 153 (C_{8,1}) = 4.348 t

Tabla 19. Cantidad de residuos enviados a vertedero en la planta avanzada.

Tipo de residuo	Planta avanzada		
	Masa (t)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)
Yeso	1503,1	2400	626
Vidrio	75	2500	30
Materiales de baja densidad	5217	900	5797
Total	6795		6453

Yeso: 44 t (C_{2,1}) + 1.397 (C_{12,2}) + 61,1 (C_{12,2}) = 1.503,1 t
 Vidrio: 75 t (C_{2,1})
 Materiales de baja densidad: 2.243 (C_{2,1}) + 431 (C_{3,1}) + 766 (C_{9,2}) + 1.768(C_{10,1}) = 5.217 t

Como se puede observar en las Tablas 17, 18 y 19, la alternativa 1 de la planta ordinaria es la alternativa donde más residuos se destinan a vertedero (tres y cuatro veces más que las otras dos alternativas estudiadas), ya que en esta alternativa la mayoría de los residuos que son apartados del proceso de reciclaje, son enviados a vertedero y no son utilizados ni siquiera como relleno.

Sin embargo, se observa que cuando en ambas plantas los residuos de baja calidad son destinados a relleno en vez de a vertedero se destinan mayor cantidad de residuos a

vertedero en la planta avanzada. Esto es debido a que en el proceso de separación final en la wet jig en la planta avanzada se obtiene una corriente de yeso que es destinada a vertedero junto con el resto de yeso previamente separado del proceso de reciclaje; sin embargo, en la planta ordinaria este proceso de separación no se lleva a cabo.

Criterio 4.3. Terreno ocupado por la planta de reciclaje (m²)

En este caso se tratan 43.750 toneladas en ambas plantas, por lo tanto, para el cálculo del espacio total que ocupa la planta solo habría que multiplicarlo por el valor estimado por Faleschini et al., 2016 que establece 0,15 m² de espacio para la planta por tonelada tratada. De esta manera, se estima que la planta de reciclaje ocupará un total de 6562 m².

Criterio 5. Índice de recuperación de recursos (%) e Índice de reciclaje de recursos (%)

Para obtener el resultado final en este criterio se utilizan los valores de las toneladas de materiales que han suponen salidas del proceso de reciclaje. Dichos materiales son destinados a venta, vertedero o a relleno según su grado de calidad o según la alternativa de tratamiento y reciclaje propuesta para la planta.

Para el cálculo de los índices mencionados se tiene en cuenta el total de las toneladas recicladas o recuperadas en cada escenario con respecto al total de toneladas que entran en la planta.

En las Tablas 20, 21 y 22 se muestran las toneladas de residuos recicladas y recuperadas con respecto al total que sale de la planta para las distintas alternativas de las plantas ordinaria y avanzada.

Tabla 20. Toneladas de residuos recicladas y recuperadas en la Alternativa 1 de la planta ordinaria

Planta ordinaria (Alternativa 1-vertedero)					
Descripción	Destino	Salida de la planta (t)	Ton recicladas	Ton Recuperadas	
Madera	Vertedero	1636	0	0	
Vidrio	Vertedero	75	0	0	
Plastico	Vertedero	558	0	0	
Yeso	Vertedero	42	0	0	
Materiales de baja densidad	Vertedero	4348	0	0	
	Grueso	Venta	15630	15630	15630
Arido reciclado	Fino	Vertedero	12915	0	0
	All-in-one	Vertedero	8516	0	0
Total		43720	15630	15630	

Madera: $960 (C_{2,1}) + 629 (C_{7,1}) + 47 (C_{8,1}) = 1.636 \text{ t}$

Yeso: $42 \text{ t} (C_{2,1})$

Plástico: $315 (C_{2,1}) + 226 (C_{7,1}) + 17 (C_{8,1}) = 558 \text{ t}$

Vidrio: $75 \text{ t} (C_{2,1})$

Materiales de baja densidad: $2.154 (C_{2,1}) + 2.041 (C_{7,1}) + 153 (C_{8,1}) = 4.348 \text{ t}$

Áridos finos: $12.915 \text{ t} (C_{6,1})$

Áridos all-in-one: $8.516 \text{ t} (C_{6,1})$

Áridos gruesos: $15.680 \text{ t} (C_{8,2})$

Tabla 21. Toneladas de residuos recicladas y recuperadas en la Alternativa 2 de la planta ordinaria

Planta ordinaria (Alternativa 2-relleno)					
Descripción	Destino	Salida de la planta (t)	Ton recicladas	Ton Recuperadas	
Madera	Relleno	1636	0	1636	
Vidrio	Relleno	75	0	0	
Plastico	Venta	558	0	558	
Yeso	Vertedero	42	0	0	
Materiales de baja densidad	Vertedero	4348	0	0	
	Grueso	Venta	15630	15630	15630
Arido reciclado	Fino	Relleno	12915	0	12915
	All-in-one	Relleno	8516	0	8516
Total		43720	15630	39255	

Madera: $960 (C_{2,1}) + 629 (C_{7,1}) + 47 (C_{8,1}) = 1.636 \text{ t}$

Yeso: $42 \text{ t} (C_{2,1})$

Plástico: $315 (C_{2,1}) + 226 (C_{7,1}) + 17 (C_{8,1}) = 558 \text{ t}$

Vidrio: $75 \text{ t} (C_{2,1})$

Materiales de baja densidad: $2.154 (C_{2,1}) + 2.041 (C_{7,1}) + 153 (C_{8,1}) = 4.348 \text{ t}$

Áridos finos: $12.915 \text{ t} (C_{6,1})$

Áridos all-in-one: $8.516 \text{ t} (C_{6,1})$

Áridos gruesos: $15680 \text{ t} (C_{8,2})$

Tabla 22. Toneladas de residuos recicladas y recuperadas en la planta avanzada.

Planta avanzada						
Descripcion	Destino	Salida de la planta (t)	Ton recicladas	Ton recuperados		
Madera	Relleno	1881	0	1881		
Vidrio	Vertedero	75	0	0		
Plastico	Relleno	702	0	702		
Yeso	Vertedero	1503	0	0		
Materiales de baja densidad	Vertedero	5217	0	0		
Aridos ceramicos	Grueso	Calidad media	Venta	11224	11224	11224
		Baja calidad	Relleno	557	0	557
	Fino	Calidad media	Venta	20010	20010	20010
		Baja calidad	Relleno	77	0	77
Aridos de hormigon	Grueso	Calidad media	Venta	2368	2368	2368
		Baja calidad	Relleno	112	0	112
Total		43726	33602	36931		

Madera: $1.020 (C_{2,1}) + 192 (C_{3,1}) + 190 (C_{9,2}) + 479 (C_{10,1}) = 1.881 \text{ t}$

Yeso: $42 \text{ t} (C_{2,1})$

Plástico: $345 (C_{2,1}) + 63 (C_{3,1}) + 104 (C_{9,2}) + 190 (C_{10,1}) = 702 \text{ t}$

Vidrio: $75 \text{ t} (C_{2,1})$

Materiales de baja densidad: $2.243 (C_{2,1}) + 431 (C_{3,1}) + 766 (C_{9,2}) + 1.768(C_{10,1}) = 5.217 \text{ t}$

Áridos finos: $20.010 (C_{9,3}) + 77 (C_{9,1}) = 20.087 \text{ t}$

Áridos gruesos: $11.224 (C_{11,1}) + 557 (C_{11,1}) + 2.368 (C_{12,1}) + 112 (C_{12,1}) = 14.261 \text{ t};$

Tabla 23. Índice de Reciclaje de recursos e Índice de Recuperación de recursos

Tipo de planta	% Reciclaje	% Recuperacion
Planta ordinaria (vertedero)	35,75	35,75
Planta ordinaria (relleno)	35,75	89,79
Planta avanzada	77,24	84,38

Para la planta ordinaria, como se puede observar en las Tabla 23, el porcentaje de residuos reciclados no supera en ninguno de las dos alternativas el 40%. Esto es debido a la baja calidad del árido reciclado obtenido con las fracciones fina y all-in-one. En la alternativa de vertedero el porcentaje de residuos recuperados es el mismo que el de reciclados, por lo que no cumple el plan marcado por la UE para 2020. Por otro lado, en la alternativa de relleno, el porcentaje de recuperación de recursos es superior al 89%, cumpliendo de esta forma los objetivos establecidos.

En la planta avanzada, al obtener un producto final reciclado de mayor calidad que en la planta ordinaria se observa que tanto el porcentaje de residuos reciclados como el de residuos recuperados tienen valores altos, superiores al 80%. Por lo tanto, la planta de reciclaje avanzada cumple holgadamente los objetivos marcados por la UE.

4.4 APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS SOCIALES A LAS PLANTAS DE RCDs

Criterio 6. Ruido

Para el cálculo de este criterio, en primer lugar, se le asigna un valor a cada equipo en función del ruido que produzcan, otorgando el 1 a los equipos con nivel de ruido bajo y el 4 a aquellos con un ruido muy alto. Este valor se multiplica por el factor de funcionamiento de dicho equipo para obtener su valor total. El factor de funcionamiento se calcula teniendo en cuenta la actividad en horas de cada equipo, calculada en el Criterio 1. La pala cargadora es el equipo con más horas de actividad y, por tanto, recibe el valor 1. El resto de los equipos reciben un valor en función del valor de la pala cargadora.

En las Tablas 24 y 25 se estima el valor del ruido en la planta ordinaria y en la planta avanzada respectivamente.

Tabla 24. Ruido provocado por la planta ordinaria.

Planta ordinaria					
Equipo	Ruido	Valor	Cantidad	Factor de funcionamiento	Valor final
Pala cargadora	Medio	2	1	1,00	2,00
Grua de gancho	Medio	2	1	0,06	0,12
Trituradora de mandibula	Muy alto	4	1	0,20	0,82
Criba vibratoria	Alto	3	1	0,34	1,02
Iman magnetico	Medio	2	1	0,00	0,00
Criba rotatoria	Alto	3	1	0,35	1,04
Cinta transportadora horizontal	Bajo	1	6	0,30	1,79
Cinta transportadora vertical	Bajo	1	2	0,20	0,40
Tamizadora por aire	Medio	2	1	0,05	0,09
Total					7,28

Tabla 25. Ruido provocado por la planta avanzada.

Planta avanzada					
Equipo	Ruido	Valor	Cantidad	Factor de funcionamiento	Valor final
Pala cargadora	Medio	2	1	1,00	2,00
Grua de gancho	Medio	2	1	0,07	0,13
Trituradora de impacto	Muy alto	4	1	0,35	1,38
Espiral	Bajo	1	1	0,06	0,06
Criba vibratoria	Alto	3	1	0,69	2,07
Iman magnetico	Medio	2	1	0,00	0,00
Tamizadora por aire	Medio	2	1	0,04	0,08
Wet jig	Medio	2	1	0,62	1,25
Corrientes de Foucalt	Medio	2	1	0,00	0,00
Cinta transportadora horizontal	Bajo	1	9	0,46	4,12
Cinta transportadora vertical	Bajo	1	2	0,20	0,41
Total					11,50

Se pueden realizar varias medidas para prevenir y corregir la emisión de ruido. Dichas medidas se implementarán bien a través de la Autorización Ambiental Integrada de la Actividad Industrial en la que se recogerán las medidas preventivas y correctoras derivadas de la Evaluación de Impacto Ambiental. Entre ellas se pueden destacar las siguientes: en cuanto al tránsito de vehículos conviene reducir la velocidad de circulación a menos de 20 km/h, realizar una revisión y puesta a punto de motores, así como señalar las áreas de transporte. En la zona de descarga y en la zona de tratamiento de RCD ayudaría a la disminución de ruido la construcción de muros de hormigón de 4 metros y 20 cm de espesor y la implantación y mantenimiento de una pantalla vegetal, la cual puede presentar un índice de absorción de 1,5-2 dB por cada 10 m de anchura.

Criterio 7. Contaminación sobre el entorno de la planta (kg PM10/año)

Para obtener el resultado final de este criterio se utilizan los factores de emisión (kg/t) asociados a cada equipo, mencionados en el apartado 4.2, los cuales se multiplican por la cantidad total de toneladas tratadas en cada planta para obtener las emisiones totales de PM10 en kg para cada planta.

En las Tablas 26 y 27 se muestran las emisiones anuales de PM10 para cada una de las plantas.

Tabla 26. Emisiones anuales de PM10 de la planta ordinaria

Planta ordinaria			
Equipo	Factor de emision (kg/t)	t tratadas	Emisiones totales (kg)
Pala cargadora	5,00E-03	76541	382,7
Grua de gancho	5,00E-03	4380	21,9
Trituradora de mandibula	1,42E-05	23664	0,3
Criba vibratoria	4,30E-03	39370	169,3
Almacenamiento	8,00E-04	37543	30,0
Criba rotatoria	3,60E-02	40184	1446,6
Cinta transportadora	5,50E-04	34600	152,2
Total		256282	2203,1

Tabla 27. Emisiones anuales de PM10 de la planta avanzada.

Planta avanzada			
Equipo	Factor de emision (kg/t)	t tratadas	Emisiones totales (kg)
Pala cargadora	5,00E-03	73462	367,3
Grua de gancho	5,00E-03	4561	22,8
Criba vibratoria	3,60E-02	78338	2820,2
Almacenamiento	8,00E-04	39012	31,2
Cinta transportadora	5,50E-04	51900	314,0
Trituradora de impacto	1,04E-04	39169	4,1
Total		286442	3559,6

Como se puede ver en las Tablas 26 y 27, las emisiones de PM10 son superiores en la planta avanzada en 33,37 %. Esto se debe principalmente al doble paso de las corrientes de residuos por la criba vibratoria, donde se desprende una cantidad importante de polvo con alto contenido de PM10. En la planta ordinaria también se realizan dos procesos de cribado; sin embargo, en la planta avanzada, ambos pasos por la criba vibratoria tienen lugar tras pasar por la trituradora y, por lo tanto, los residuos se encuentran ya machacados, mientras que en la planta ordinaria uno de los procesos de cribado se realiza antes de que las corrientes de residuos pasen por la trituradora. De esta manera, teniendo en cuenta que los factores de emisión son considerablemente menores cuando los equipos de cribado trabajan con residuos que no han pasado por la trituradora, la planta ordinaria emitirá menos cantidad de partículas PM10 que la planta avanzada.

Criterio 8. Olores producidos por los RCDs (kg H₂S/m³)

Para calcular el total de las emisiones de H₂S en cada planta se multiplica el volumen de residuos de yeso destinados a vertedero por el coeficiente estimado por Chen et al., 2022, que propone que por cada m³ de yeso depositado en vertedero se emiten 24 mg de H₂S.

En la planta ordinaria, un total de 42 toneladas de yeso son enviadas a vertedero, lo que supone un total de 17,5 m³, mientras que en la planta avanzada se envían un total de 1.503 toneladas de yeso a vertedero, es decir, 626 m³ de yeso son descartados en la planta avanzada para su vertido.

Esta notable diferencia es debida al paso de la corriente de residuos por la wet jig, proceso que no tiene lugar en la planta ordinaria, donde al separar el hormigón de la corriente de residuos se forma una corriente húmeda de yeso. En la Tabla 28 se puede observar la cantidad total de emisiones de H₂S en cada planta.

Tabla 28. Emisiones de H₂S derivadas de ambas plantas.

Vertedero	Planta ordinaria	Planta avanzada
Yeso (m ³)	17,5	626
Emisiones H ₂ S (mg/m ³)	24	24
kg H₂S	0,42	15,024

Criterio 9. Aceptación pública

El resultado de este criterio se ha obtenido realizando una estimación cualitativa en tres niveles (*, **, ***) en función de los resultados obtenidos en los distintos criterios para poder determinar un valor adecuado en cuanto al grado de aceptación pública de cada alternativa. La alternativa con mayor grado de aceptación sería la alternativa A2, planta ordinaria con residuos destinados a relleno, ya que en ella se alcanza un alto grado de recuperación de recursos, criterio bien visto por la sociedad y tiene resultados mucho más favorables que la planta avanzada en los criterios relacionados con la salud. En segundo lugar, se encuentra la alternativa B, planta avanzada en la que se obtienen los valores más altos en cuanto a reciclaje y recuperación de recursos; sin embargo, para llegar a esos valores se necesita el uso de mucha más maquinaria y recursos que en las otras alternativas.

En último lugar, se encuentra la alternativa A1, ya que en ella se obtienen valores muy bajos de recuperación de recursos, y por ello es probable que la sociedad no encuentre justificable la implantación de la planta de reciclaje.

En la Tabla 29 se pueden observar los valores estimados en cuanto a aceptación pública para las distintas alternativas estudiadas.

Tabla 29. Grado de aceptación pública de las plantas de reciclaje de RCDs

Tipo de planta	Grado de aceptación
Planta ordinaria (A1)	*
Planta ordinaria (A2)	***
Planta avanzada	**

Criterio 10. Espacio urbano consumido (%)

Para el cálculo de este criterio se divide el resultado obtenido en el criterio 4.3, terreno total ocupado por la planta, 6.562 m² para ambas plantas, por el área total de la región a estudiar, en este caso, Santander y alrededores, 373,5 km². A continuación se multiplica el resultado por 100 para obtener el porcentaje de territorio ocupado por la planta. El resultado de este criterio es igual en las tres alternativas. En la Tabla 30 se puede observar el espacio urbano consumido por una planta de reciclaje de RCDs en relación con el área de Santander y alrededores.

Tabla 30. Espacio urbano consumido por una planta de RCDs

Terreno ocupado por la planta (m ²)	Area region (m ²)	% Ocupacion
6562	373500000	0,0018

Criterio 11. Puestos de empleo generados (Número)

Para la obtención de los resultados de este criterio se hace uso de los valores estimados por Dosal, 2015. Dichos valores se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31. Puestos de empleo generados en ambas plantas.

Puesto	Planta ordinaria	Planta avanzada
Trabajador no especializado	5	8
Operador de equipos	2	5
Supervisor local	1	2
Trabajador de oficina	1	1
Director	1	1
Total	10	17

En la Tabla 32 se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos en los distintos criterios estudiados. La Tabla 32 será utilizada a continuación como matriz de evaluación para llevar a cabo el análisis multicriterio.

Tabla 32. Tabla resumen de los resultados de los criterios analizados

Criterios	Alternativas		
	A1	A2	B
1 (Teq CO ₂)	78,04	78,04	84,82
2 (kg SO ₂)	40,47	40,47	69,91
3 (m ³)	43,75	43,75	78703
4 (m ³)	21676	4879	6453
5.1 (%)	35,75	35,75	77,24
5.2 (%)	35,75	89,79	84,38
6 (Valor)	7,28	7,28	11,5
7 (kg PM10)	2203	2203	3559
8 (kg H ₂ S/m ³)	0,42	0,42	15,02
9 (Valor)	+	+++	++
10 (%)	0,0018	0,0018	0,0018
11 (Valor)	10	10	17

4.5 APLICACIÓN DE MCA EN LA TOMA DE DECISION DE LAS PLANTAS DE RECICLADO DE RCDs

El análisis multicriterio (MCA) es un modelo de decisión que contiene: un conjunto de escenarios de decisión que deben ser clasificados o puntuados, un conjunto de criterios, normalmente medidos en diferentes unidades y un conjunto de medidas de rendimiento, que son las puntuaciones de cada escenario de decisión con respecto a cada criterio. Todos estos aspectos son incluidos dentro de la matriz de evaluación.

La matriz de evaluación sobre la que se va a realizar el análisis multicriterio fue definida en el apartado anterior y se puede observar en la Tabla 32. Una vez definida la matriz de evaluación, se procede a la aplicación del análisis multicriterio mediante el software Definite v3.1. De los diferentes tipos de análisis que se pueden realizar mediante dicho software, en este proyecto se ha llevado a cabo un análisis multicriterio, un análisis de incertidumbre y un análisis de sensibilidad.

Todos los análisis mencionados se realizan en base a la matriz de evaluación. En la Figura 4 se muestra la matriz de evaluación en Definite.

	C/B	Unit	A1	A2	B
C1	⊖	Kg CO2	78040	78040	84820
C2	⊖	Kg SO2	40,47	40,47	69,91
C3	⊖	m3	43,75	43,75	78703,00
C4	⊖	m3	21676	4879	6453
C5.1	⊕	%	35,75	35,75	77,24
C5.2	⊕	%	35,75	89,79	84,38
C6	⊖	Valor	7,28	7,28	11,50
C7	⊖	KG PM10	2203	2203	3559
C8	⊖	Kg H2S	0,42	0,42	15,02
C9		0/+++	+	+++	++
C10	⊖	m2/m2	6562	6562	6562
C11	⊕	Valor	10	10	17

Figura 4. Matriz de evaluación en Definite

4.5.1 ANALISIS MULTICRITERIO (MCA)

En este apartado del proyecto se utiliza el método Weighted Summation, dentro del software Definite para obtener los resultados del análisis multicriterio. Mediante este método se otorgan pesos a cada criterio dependiendo del punto de vista desde el que se quiera realizar el análisis. En este proyecto se han analizado 11 escenarios diferentes variando los pesos de cada criterio en cada uno de ellos con el objetivo de obtener un resultado final lo más fiable posible (Tabla 33).

Antes de empezar con los resultados del análisis cabe mencionar que para este apartado se ha realizado una subdivisión tanto en los criterios medioambientales como en los sociales para poder llevar a cabo los distintos escenarios propuestos. Por un lado, los criterios medioambientales, se han dividido en: criterios que afectan de manera global, como son los criterios de emisiones de gases contaminantes (Criterio 1 y Criterio 2) y criterios que afectan de manera local (Criterio 3, Criterio 4 y Criterio 5). Por otro lado, los criterios sociales se han dividido en: criterios relacionados con la salud (Criterio 6, Criterio 7 y Criterio 8) y criterios

más relacionados con aspectos económicos o ético/morales (Criterio 9, Criterio 10 y Criterio 11) (Tabla 33).

También es necesario mencionar que en el criterio 5 también se realiza una subdivisión. Por una parte, se encuentra el índice de Reciclaje (Criterio 5.1) y el índice de Recuperación (Criterio 5.2). Se tratarán de manera separada, sin embargo, en el análisis la suma de los dos equivale al resto de criterios por separado, es decir, en la práctica se utiliza como si fuese un único criterio.

Tabla 33. Escenarios objeto de estudio generados mediante los porcentajes de pesos indicados de los 11 criterios estudiados

Criterios Escenario	Criterios Medioambientales						Criterios Sociales					
	Globales		Locales				Salud			Economía/Etica		
	C1	C2	C3	C4	C5.1	C5.2	C6	C7	C8	C9	C10	C11
1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1		9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
2	20	20	20	20	10	10	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7
4	25	25	0	0	0	0	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
5	0	0	16,7	16,7	16,7		8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
6	10	10	10	10	10		16,7	16,7	16,7	0	0	0
7	10	10	10	10	10		0	0	0	16,7	16,7	16,7
8	50	50	0	0	0		0	0	0	0	0	0
9	0	0	33,3	33,3	33,3		0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0		33,3	33,3	33,3	0	0	0
11	0	0	0	0	0		0	0	0	33,3	33,3	33,3

En el **escenario 1**, Figura 5, se otorga a todos los criterios la misma importancia, siendo igual el peso de todos ellos, 9,1 %. En este caso, como se puede observar en la Figura 5, la mejor alternativa es la A2, planta ordinaria donde los productos de baja calidad son destinados a relleno, con un 0,56. En segundo lugar quedaría situada la alternativa A1, planta ordinaria donde los productos de baja calidad son destinados a vertedero, y por último la peor alternativa de todas sería la de la planta avanzada, con un 0,32.

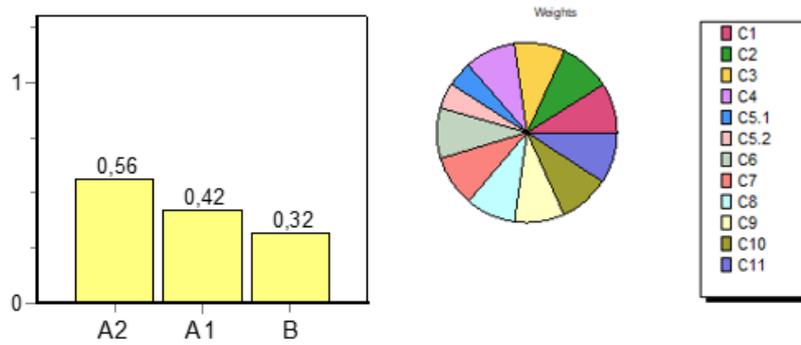


Figura 5. Resultados del MCA para el Escenario 1

En la Figura 6 se muestran los resultados del **escenario 2**. En este caso solo se han tenido en cuenta los criterios medioambientales, todos con la misma importancia. Se ha asignado un 20 % a cada uno de los 5 criterios (el Criterio 5 ha sido dividido en 2 como se mencionó anteriormente, por lo tanto, un 10 % cada subcriterio). Como se puede observar en la Figura 6, la mejor alternativa vuelve a ser la A2, con un 0,54. En segunda posición se encuentra la alternativa A1 con un 0,38, y en último lugar la alternativa B, con un 0,3.

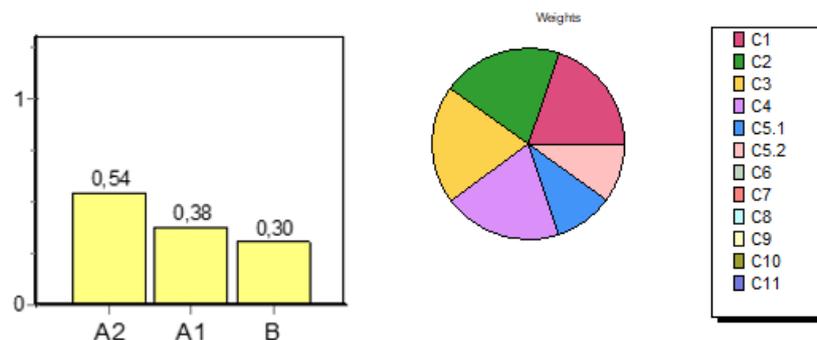


Figura 6. Resultados del MCA para el Escenario 2

En el **escenario 3**, Figura 7, solo se tienen en cuenta los criterios sociales, con un peso de 16,7 % cada uno de los 6 criterios diferentes. El resultado obtenido, como se puede observar en la Figura 7, es similar al de los dos escenarios anteriores. La mejor alternativa es A2 con

una puntuación de 0,57, seguida de la alternativa A1 con un 0,46 y en último lugar, la alternativa B con un 0,33.

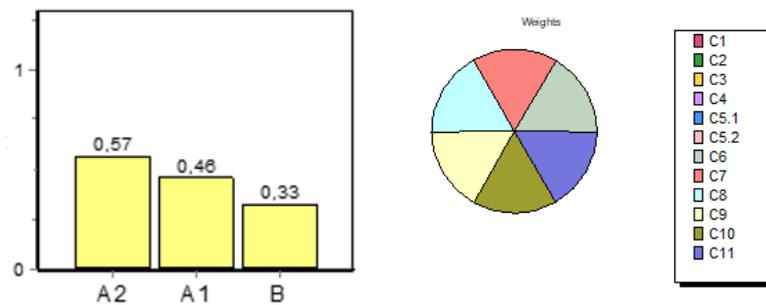


Figura 7. Resultados del MCA para el Escenario 3

En el **escenario 4**, Figura 8, se otorga el 50 % de la importancia a los criterios sociales y el otro 50 % a los criterios medioambientales de carácter global, es decir, Criterio 1 y Criterio 2. Por lo tanto, cada uno de los criterios sociales tiene un peso de 8,3 % cada uno y a los criterios 1 y 2 se les otorga un 25 %. Como se puede observar en la Figura 8, la mejor alternativa continúa siendo A2, aunque seguida más de cerca por A1. Esto es debido principalmente a que en este escenario no se tiene en cuenta el criterio 4, que calcula la cantidad de residuo destinados a vertedero, donde la alternativa A1 es la más desfavorable con mucha diferencia. La alternativa B es la más desfavorable en este caso por amplia diferencia con las otras dos, ya que en este escenario se da mucha importancia a los criterios de contaminación del aire, los cuales son mucho más desfavorables en la planta avanzada.

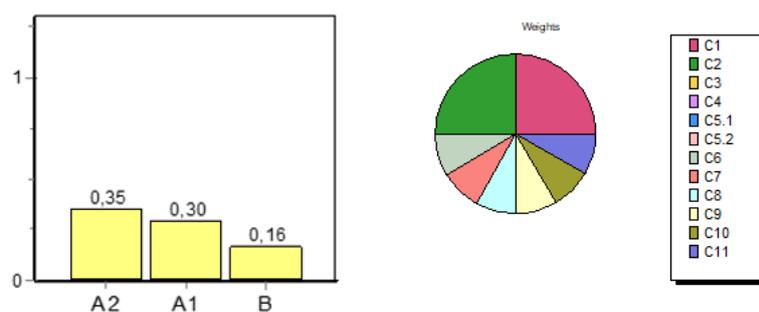


Figura 8. Resultados del MCA para el Escenario 4

En la Figura 9 se muestran los resultados del análisis multicriterio para el **escenario 5**. En este escenario se centra la importancia sobre los criterios medioambientales de impacto local, Criterios 3, 4 y 5, otorgando un 50 % al conjunto de estos 3 criterios, 16,7 % a cada uno. El otro 50 % se reparte de manera equitativa entre los 6 criterios sociales, 8,3 % a cada uno de ellos, igual que en el escenario anterior. Como resultado se obtiene, como se puede observar en la Figura 9, que la mejor alternativa es A2 con un 0,69, con un amplio margen sobre las otras 2. La alternativa B, vuelve a quedar en último lugar, pero esta vez más cerca de A1 ya que en este escenario se da bastante importancia a los criterios 4 y 5, los cuales son muy perjudiciales para la alternativa A1.

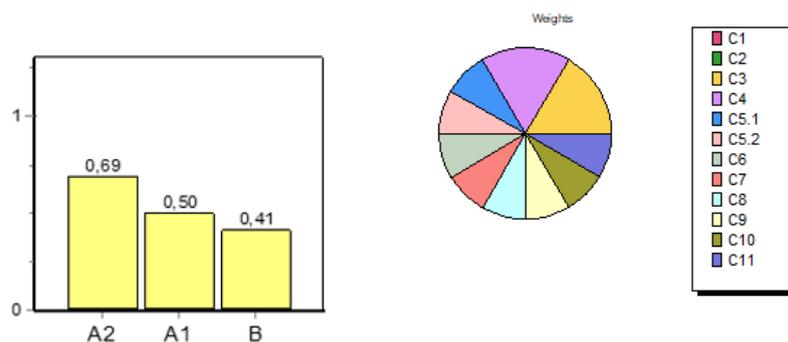


Figura 9. Resultados del MCA para el Escenario 5

El **escenario 6**, representado en la Figura 10, otorga mayor importancia dentro de los criterios sociales a aquellos relacionados con la salud de las personas que habitan cerca de la planta. Por lo tanto, en este escenario se otorga un 50 % al total de los criterios medioambientales y, por tanto, un 10 % a cada uno de ellos, y un 16,7 % a los criterios 6, 7 y 8 respectivamente. Como se observa en la Figura 10, la mejor alternativa en este caso sigue siendo A2, seguida más de cerca esta vez por A1, ya que los criterios relacionados con la salud tienen los mismos resultados en las dos alternativas. La alternativa B obtiene una puntuación muy baja en este escenario comparada con las otras dos alternativas. Esto es debido a que los resultados obtenidos de los criterios relacionados con la salud para planta avanzada son peores que los obtenidos para las dos alternativas de la planta ordinaria.

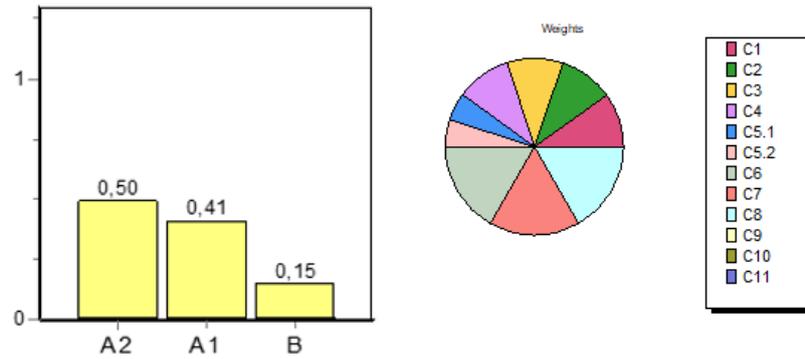


Figura 10. Resultados del MCA para el Escenario 6

En el **escenario 7**, Figura 11, se utiliza la misma estructura que en el anterior, pero en este caso teniendo en cuenta los criterios sociales más relacionados con aspectos económicos y morales de la sociedad, criterios 9, 10, 11 y dejando de lado los criterios de salud. De esta manera, se vuelve a otorgar un 50 % al total de los criterios medioambientales, 10 % a cada uno de ellos y un 16,7 % a los criterios 9, 10 y 11 respectivamente. La alternativa A2 continúa siendo la mejor de las 3 para este escenario también, sin embargo, como se puede observar en la Figura 11, en este escenario la alternativa B supera a la alternativa A1. Esto es debido principalmente a la mejor aceptación social del escenario B, Criterio 9 y a su mayor capacidad para generar puestos de empleo, Criterio 11.

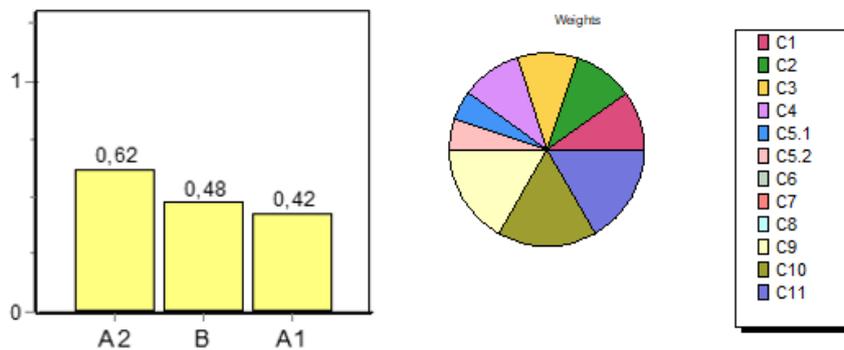


Figura 11. Resultados del MCA para el Escenario 7

En los cuatro escenarios restantes solo se tienen en cuenta cada una de las cuatro subdivisiones realizadas en los criterios medioambientales y sociales. De esta manera en el

escenario 8, Figura 12, se calculan los resultados teniendo en cuenta solo los criterios medioambientales de impacto global, Criterios 1 y 2, otorgándose un 50 % a cada uno de ellos. Como se puede observar en la Figura 12, las alternativas A1 y A2 obtienen la misma puntuación en el análisis, ya que no existen diferencias en las emisiones de gases contaminantes entre las dos alternativas. El escenario B obtiene la peor puntuación de las 3, lo cual se debe a que las emisiones de gases contaminantes en la planta avanzada son superiores a las de la planta ordinaria.

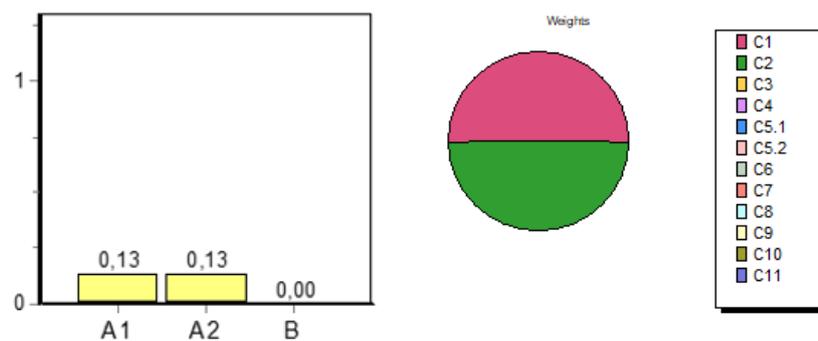


Figura 12. Resultados del MCA para el Escenario 8

En la figura 13 se muestran los resultados del **escenario 9**. En este caso se realizó un análisis solo sobre los criterios medioambientales de impacto local, Criterios 3, 4 y 5, otorgando un peso del 33,3 % a cada uno de ellos. La mejor alternativa en este caso también es A2 con un 0,83, por una amplia sobre las otras 2, ya que la alternativa A1 tiene muy malos resultados tanto en el criterio 4 como el 5 y la alternativa B en el Criterio 3, debido al elevado consumo de agua de la planta avanzada respecto a la ordinaria.

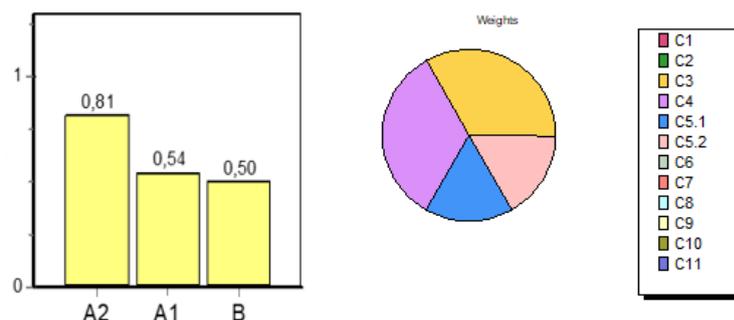


Figura 13. Resultados del MCA para el Escenario 9

En el **escenario 10**, Figura 14, se tienen en cuenta solo los criterios sociales relacionados con la salud, Criterios 6, 7 y 8, otorgando un 33,3 % a cada uno de ellos. Como se puede observar en la Figura 10, ocurre lo mismo que en el escenario 8, donde las alternativas A1 y A2 obtienen la misma puntuación y la alternativa B se quedaba en última posición con una puntuación de 0. Esto se debe a que en ambas alternativas de la planta ordinaria se obtienen los mismos resultados para los criterios de salud, los cuales son mucho más desfavorables para la planta avanzada, especialmente para el caso de los olores producidos por el reciclaje de RCDs (Criterio 8)

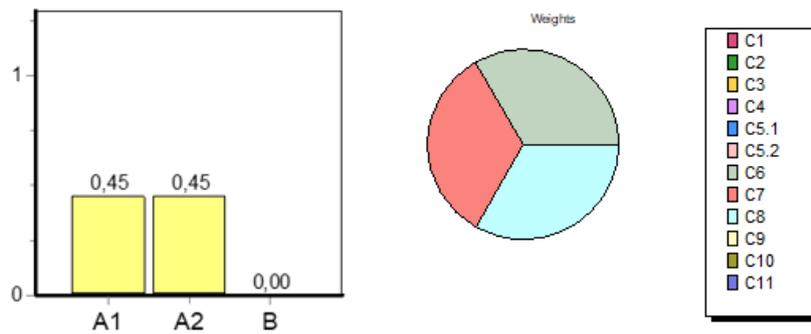


Figura 14. Resultados del MCA para el Escenario 10

En el **escenario 11**, Figura 15, se realiza el análisis sobre la última subdivisión de los criterios sociales, los Criterios 9, 10, 11, otorgando un 33,3 % a cada uno de ellos. Como se observa en la figura 15, la alternativa A2 se encuentra de nuevo en el primer lugar con un 0,69, sin embargo, en este caso, le sigue muy de cerca la alternativa B, 0,66 ya que en este escenario se da bastante importancia al Criterio 11, donde la alternativa B es ampliamente superior a las otras dos alternativas, sin embargo, la alternativa A2 obtienen mejores resultados en cuanto a aceptación social, Criterio 9. En este escenario la alternativa A1 es la peor de todas con un 0,57

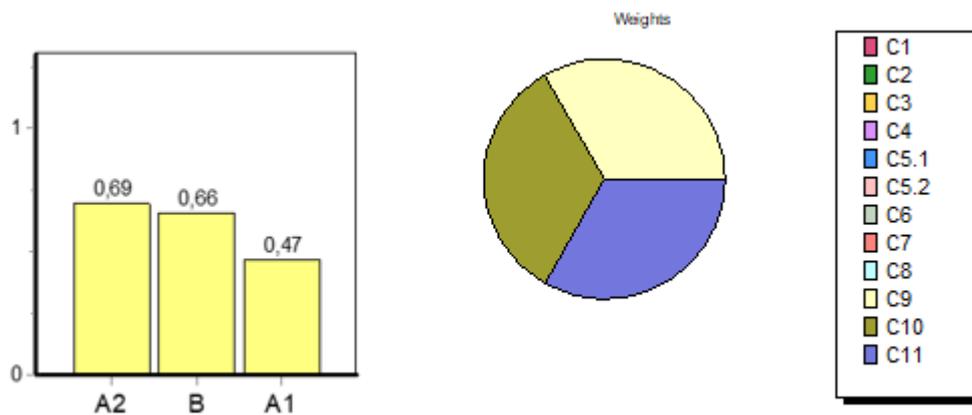


Figura 15. Resultados del MCA para el Escenario 11

En la Figura 16 se muestran los resultados de los once escenarios estudiados agrupados en función de los pesos relativos asociados a cada uno de los criterios aplicado. Como se puede observar la secuencia de preferencia $A2 > A1 > B$ se da en siete escenarios, la secuencia $A1 = A2 > B$ y $A2 > B > A1$ en dos escenarios cada una de ellas.

En la Tabla 34 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el análisis multicriterio, en donde se muestra la posición que ocupa cada alternativa en el análisis para cada uno de los escenarios propuestos.

Tabla 34. Resumen de resultados de MCA

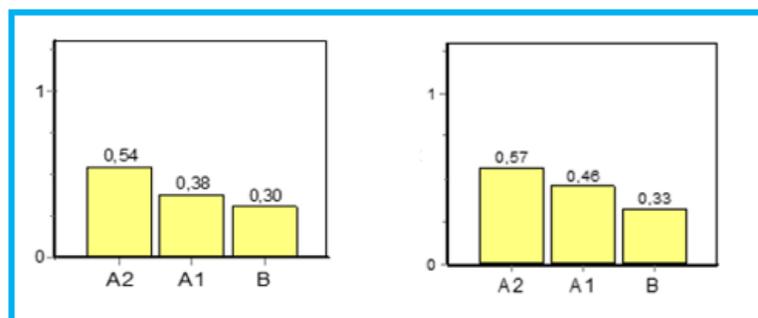
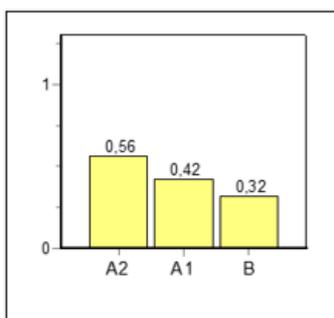
Escenarios	Alternativas		
	A1	A2	B
1	2	1	3
2	2	1	3
3	2	1	3
4	2	1	3
5	2	1	3
6	2	1	3
7	3	1	2
8	1	1	3
9	2	1	3
10	1	1	3
11	3	1	2

La alternativa A2 obtiene la mejor puntuación en el análisis para cada uno de los once escenarios estudiados (Tabla 34), siendo la alternativa más favorable para ser llevada a cabo. Esta alternativa se trata de una planta ordinaria donde los residuos que salen de la planta y que no tienen la calidad suficiente para ser vendidos y utilizados en la construcción

se utilizan en actividades de relleno. Se trata de la mejor alternativa ya que la planta ordinaria utiliza una maquinaria y un proceso de reciclaje sencillos, lo cual supone un importante ahorro en cuanto a gasto de combustible y energético, consumo de agua, ruido, emisión de polvo y olores, y, además, gracias a la aplicación del relleno se consigue recuperar y reutilizar aquellos residuos que no han alcanzado la calidad suficiente durante el proceso de reciclaje para ser vendidos y utilizados en la construcción.

La alternativa A1, obtiene la primera posición en dos escenarios, empatada con A2, y la segunda en siete escenarios. De esta manera, se puede concluir que se trata de la segunda mejor opción después de A2. Esta alternativa se diferencia de la alternativa A2 en que los residuos que salen de la planta durante o después del proceso de reciclaje y no cuentan con la calidad suficiente para ser reutilizados en la construcción, se considera que tampoco tienen las propiedades necesarias para ser utilizados en actividades de relleno. De esta forma, se reduce considerablemente el porcentaje de residuos reutilizados y se aumenta, a su vez el volumen de residuos destinados a vertedero, con respecto a la alternativa A2.

En último lugar se encuentra la alternativa B, la cual obtiene la tercera posición en nueve de los 11 escenarios y la segunda en solo dos de ellos. Esta alternativa se corresponde con la planta avanzada, en la que se hace uso de una maquinaria y proceso de reciclaje más complejo que en la planta ordinaria con el objetivo de obtener un producto final reciclado de mayor calidad. Sin embargo, como ha sido demostrado en este proyecto, la calidad del árido reciclado obtenido no es lo suficientemente mejor que la obtenida en la planta ordinaria como para contrarrestar la gran diferencia en cuanto a impacto social y medioambiental entre ambas plantas.



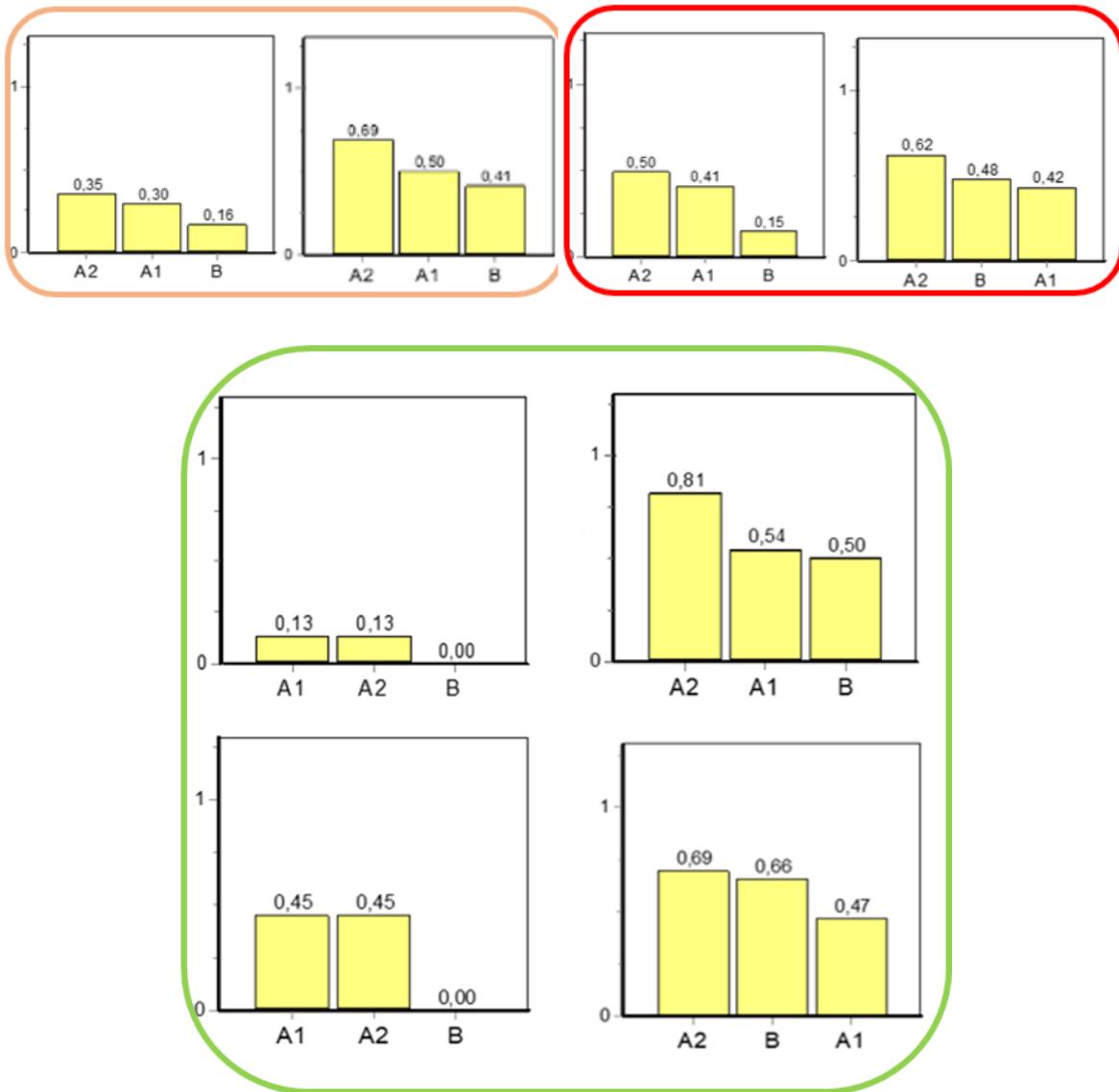


Figura 16. Preferencia de cada una de las opciones de planta de RCDs en función de los once escenarios estudiados con diferentes pesos para cada uno de los once criterios evaluados.

Por último, en la Figura 17, se muestran los resultados de cada criterio individualmente para el Escenario 1, donde todos los criterios tienen el mismo peso, 9,1 %. De forma similar a lo que ocurre en el análisis global de todos los criterios, la Alternativa A2, también es la mejor opción criterio a criterio, quedando en primera posición en 10 de los 12 criterios analizados, aunque empatada en la mayoría de los casos con la alternativa A1. Sin embargo, en la Figura 17 se observa que, al realizar el análisis individual de cada criterio, la alternativa B obtiene la mejor puntuación en dos casos, el Criterio 5.1, debido a que el porcentaje de residuos

reciclados es mucho mayor en la planta avanzada y en el Criterio 11, ya que la planta avanzada genera más puestos de trabajo que la ordinaria. Sin embargo, la mejor puntuación de la alternativa B en estos dos criterios no contrarresta la gran diferencia en su contra en los resultados con respecto a la planta ordinaria en el resto de los criterios.



Figura 17. Resultados del MCA para todos los criterios planteados del Escenario 1

4.5.2 ANALISIS DE INCERTIDUMBRE

Este análisis se realiza con el fin de determinar la robustez de los resultados obtenidos en el análisis multicriterio, observando si variarían los resultados del análisis multicriterio cuando los valores de la matriz de evaluación variasen en un intervalo definido. En el análisis de incertidumbre, cuanto mayor es el tamaño de los círculos que aparecen en la figura, mayor es la probabilidad de que cada alternativa propuesta ocupe una determinada posición en el resultado del análisis multicriterio.

En este proyecto se realiza un análisis de incertidumbre sobre el primer escenario del análisis multicriterio, donde todos los criterios tienen el mismo peso, otorgando una posible variación del 25 % en los valores de la matriz de evaluación. En la Figura 17 se muestran los resultados de dicho análisis de incertidumbre.

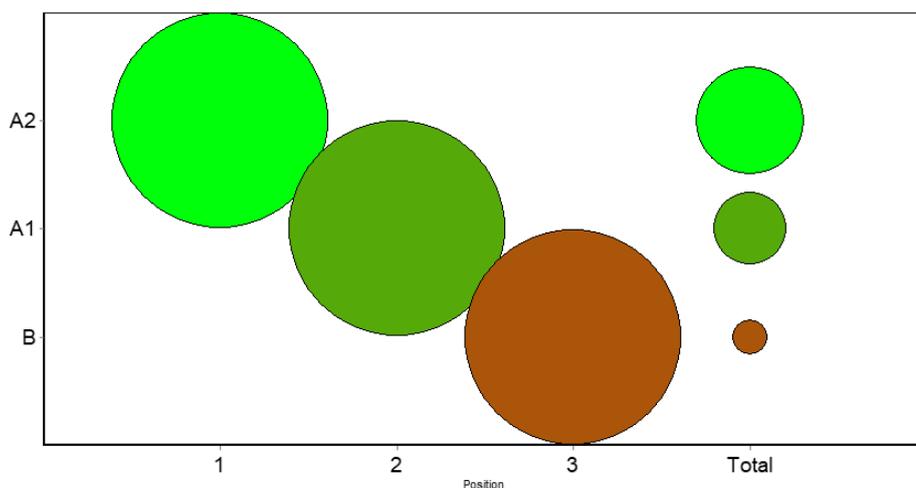


Figura 18. Resultados del análisis de incertidumbre del 25 % para el Escenario 1

Como se puede observar en la Figura 18, el resultado del análisis de incertidumbre realizado son círculos de gran tamaño en la diagonal principal, lo que indica que, aunque los valores de la matriz de evaluación sufran una variación del 25 % las alternativas propuestas en el seguirían teniendo el mismo orden de posición, demostrando de esta forma la robustez de los resultados obtenidos en el análisis multicriterio.

4.5.3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Mediante el análisis de sensibilidad se puede estudiar el comportamiento de cada una de las alternativas en función del peso que se otorgue a cada criterio por separado con respecto al total. Esto se consigue mediante una figura por cada criterio estudiado donde se analiza mediante líneas rectas el resultado que tendría cada alternativa en función del peso que se otorgue al criterio, desde el 0 hasta el 100%.

En este proyecto se realiza el análisis de sensibilidad para el escenario en el que todos los criterios tienen el mismo peso, al igual que en el análisis de incertidumbre.

En la Figura 19 a-c se muestra el análisis de sensibilidad para los Criterios 1, 2 y 3. Como se puede observar en dichas figuras en los tres criterios mencionados la posición de las alternativas se mantiene igual desde el 0 hasta el 100% de importancia para cada criterio. En los tres criterios la mejor alternativa es A2, seguida de A1 y, por último, de B, para todos los pesos.

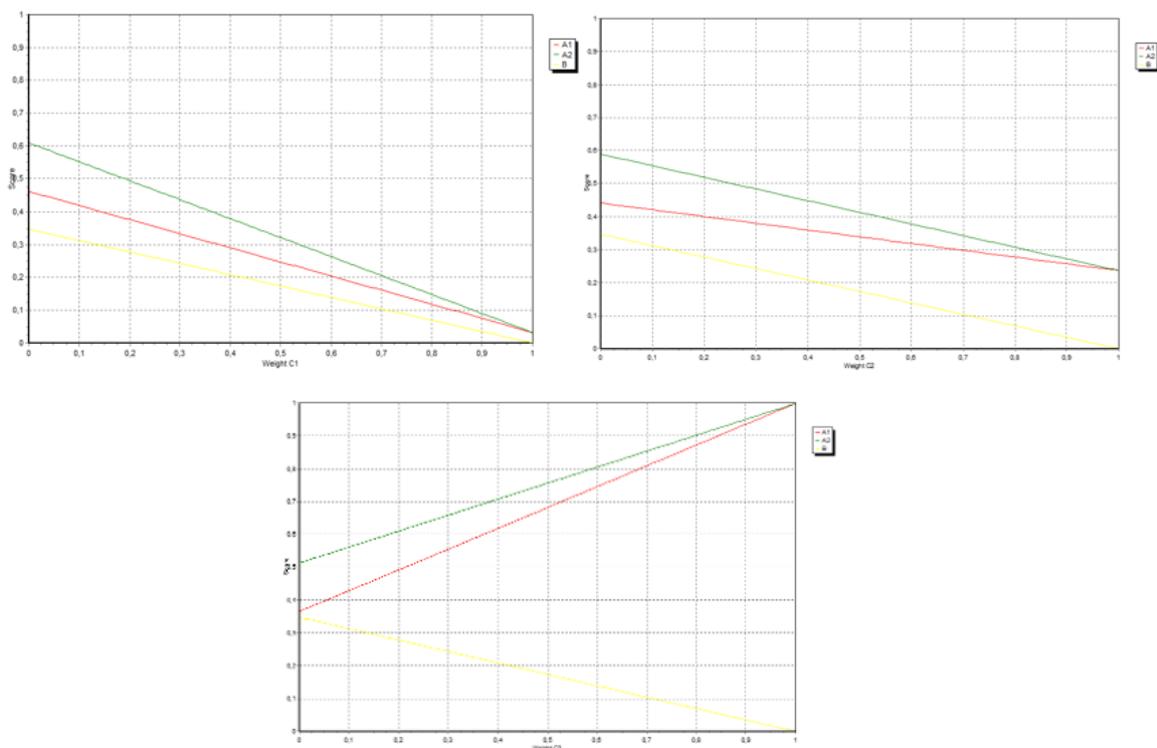


Figura 19. Resultados del análisis de sensibilidad, a) del Criterio 1 b) del Criterio 2 y c) del Criterio 3, para el escenario 1

En cuanto al análisis de sensibilidad para el criterio 4, Figura 20, se observa un cambio de posición entre A1 y B a medida que aumenta el peso de este criterio, concretamente a partir

del 25 % de importancia. Esto se debe a que este criterio es muy desfavorable para la alternativa A1, y que se trata del criterio de residuos enviados a vertedero, lo cual es la principal desventaja de la alternativa A1. Sin embargo, la alternativa A2 se encuentra en primera posición en todos los casos.

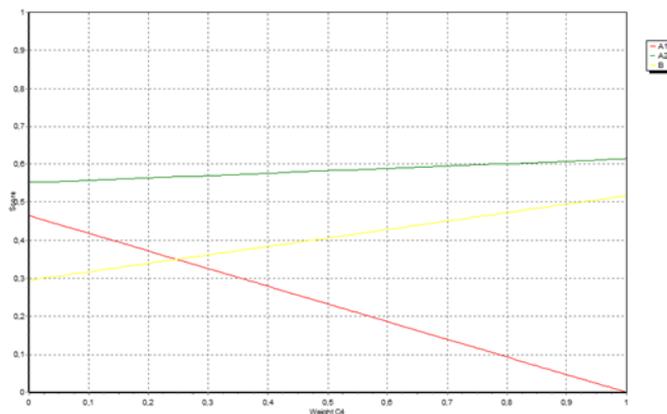


Figura 20. Resultados del análisis de sensibilidad del Criterio 4 para el Escenario 1

En la Figura 21-a, se muestra el análisis de sensibilidad para el Criterio 5.1, Índice de Reciclaje de residuos. En este Criterio, se observa un cambio de tendencia a medida que aumenta el peso. La alternativa B comienza siendo la peor opción y se convierte en la mejor alternativa a partir del 45%. Esto se debe a que cuenta con un índice de reciclaje de residuos muy superior a las otras dos alternativas.

En el análisis de sensibilidad del criterio 5.2, Índice de Recuperación de recursos, Figura 21-b, ocurre algo similar al criterio anterior. Sin embargo, en este caso, la alternativa B solo consigue superar a la alternativa A1, ya que la alternativa A2 también cuenta con un Índice de recuperación de recursos elevado.

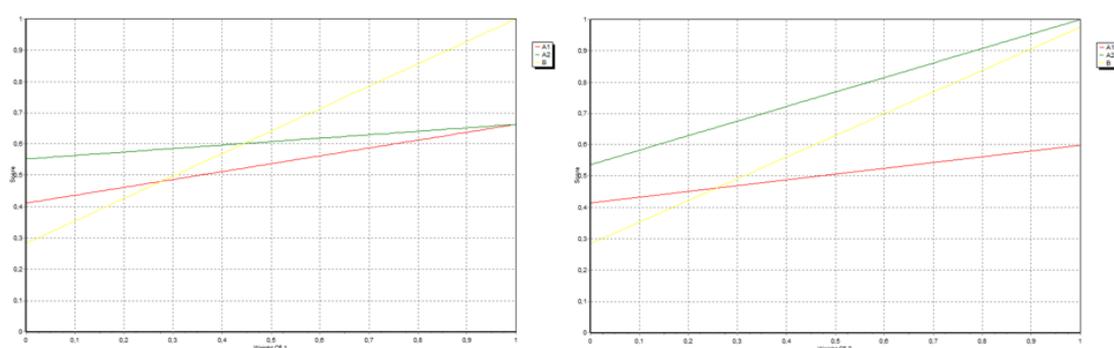


Figura 21. Resultados del análisis de sensibilidad del a) Criterio 5.1 y b) del Criterio 5.2 para el escenario 1

En las figuras 22 a-c se realiza el análisis de sensibilidad de los criterios 6, 7 y 8. En estos tres casos no existe ninguna variación en la posición de las alternativas, ya que en los tres criterios las alternativas A1 y A2 obtienen los mismos resultados mientras que la alternativa B obtiene resultados mucho más desfavorables.

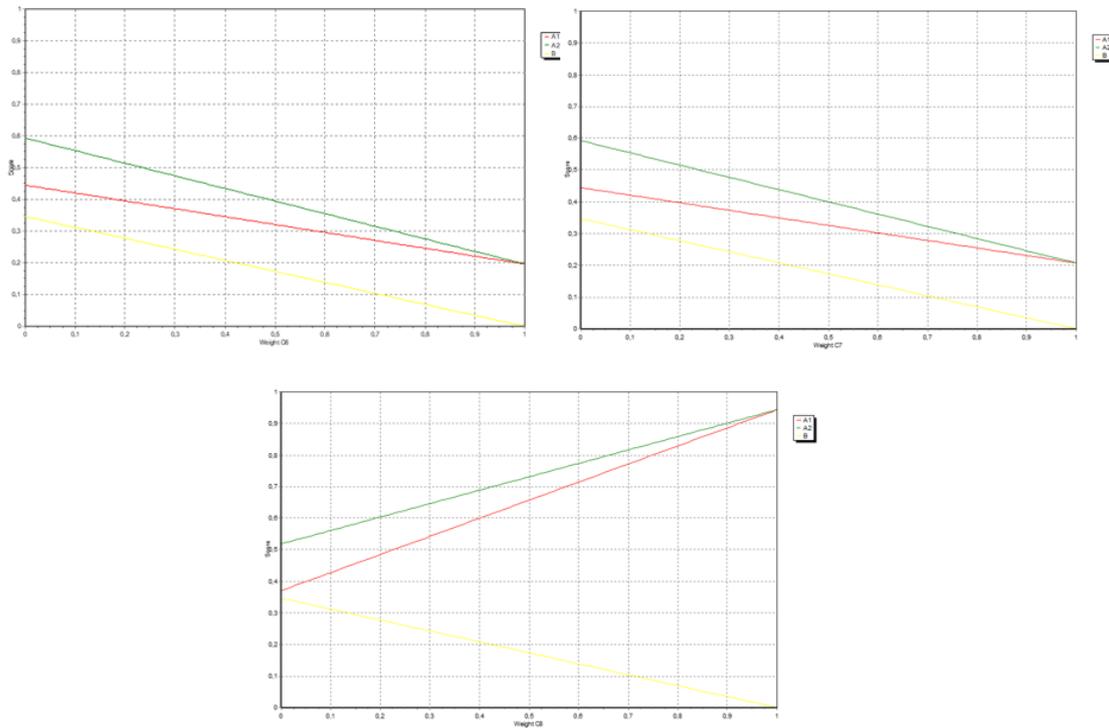


Figura 22. Resultados del análisis de sensibilidad, a) del Criterio 6, b) del Criterio 7 y c) del Criterio 8, para el escenario 1.

En el análisis de sensibilidad del criterio 9, Aceptación social, Figura 23 a, se observa una variación de posición entre A1 y B a partir del 30%. Esto se debe a que la alternativa B cuenta con un mayor grado de aceptación social que A1. La alternativa A2 se mantiene en primera posición en todo momento ya que es la alternativa con mayor aceptación social.

En la Figura 23 b muestra el análisis de sensibilidad para el Criterio 10, Espacio urbano consumido. En este caso, se observa que todas las alternativas obtienen la misma puntuación con un 100 % del peso para este criterio, ya que en este criterio se obtiene el mismo resultado para las tres alternativas.

En la Figura 23 c, se muestra el análisis de sensibilidad para el criterio 11, Puestos de empleo generados. Al igual que sucedía en el análisis del criterio 5.1, la alternativa B pasa del último al primer puesto ya que la planta avanzada genera más puestos de trabajo que la planta ordinaria.

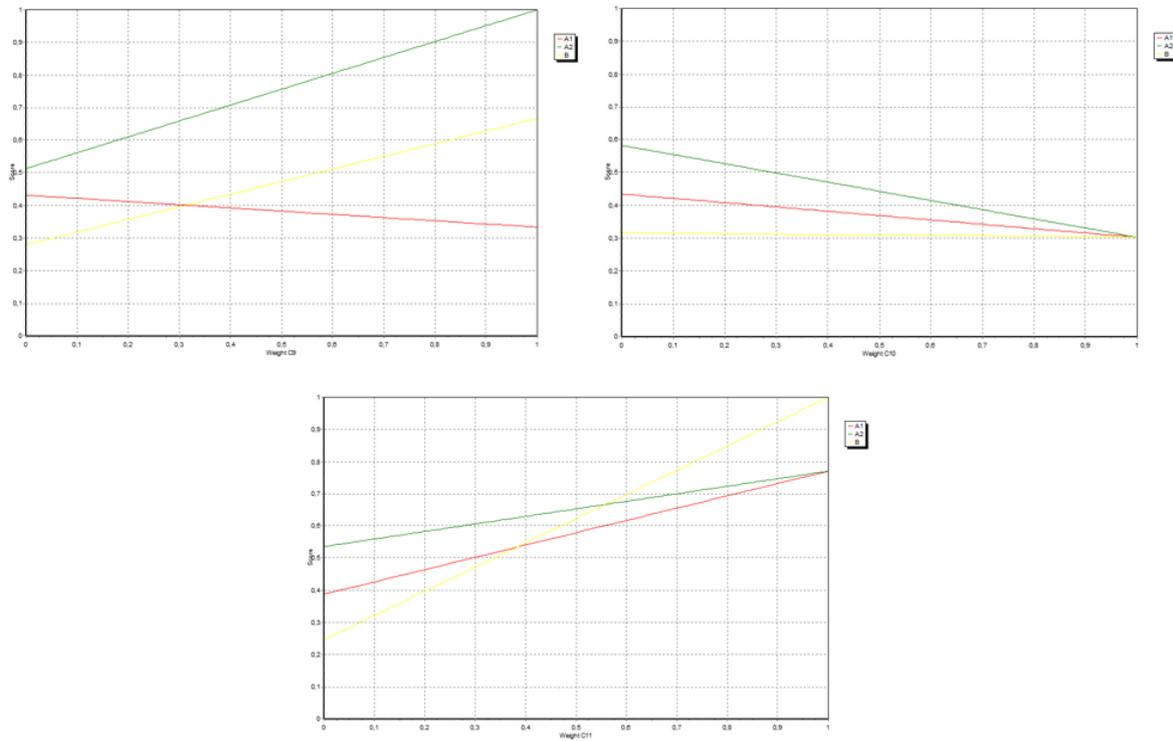


Figura 23. Resultados del análisis de sensibilidad a) del Criterio 9, b) del Criterio 10 y c) del Criterio 11 para el Escenario 1.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha sido realizado con el propósito de encontrar, describir y aplicar diferentes criterios medioambientales y sociales que puedan ser utilizados para analizar el impacto de una determinada actividad industrial. Con este fin se ha realizado una búsqueda bibliográfica y se han seleccionado 11 criterios, 5 medioambientales y 6 sociales. Los criterios seleccionados permiten realizar un análisis sobre los distintos impactos que pueden causar tanto en el medioambiente como en la sociedad la realización de una actividad industrial. Dichos criterios pueden utilizarse tanto para decidir la localización de una planta como para mejorar el funcionamiento de una planta ya existente.

Con el objetivo de mostrar un ejemplo de aplicación de estos criterios en una planta industrial y poder demostrar su validez en un caso real, se ha realizado un análisis sobre dos plantas distintas de reciclaje de RCDs, planta ordinaria y planta avanzada, dividiendo la planta ordinaria en dos alternativas distintas para su proceso de reciclaje. El objetivo de este análisis era demostrar cuál de las tres alternativas propuestas para el tratamiento de los RCDs, es la más favorable desde el punto de vista medioambiental y social para ser implantada en la zona de Santander y alrededores.

Para comparar los resultados obtenidos en cada criterio con respecto a las diferentes alternativas y obtener un resultado lo más real posible sobre de cuál de las tres alternativas es la preferible, se ha realizado un análisis multicriterio (MCA). En dicho análisis se estudian once escenarios diferentes generados con diferentes pesos relativos de los diferentes criterios.

El MCA muestra la alternativa A2 (planta ordinaria con procesos sencillos + residuos a actividades de relleno) como la preferible de los once escenarios estudiados.

La alternativa A1 (planta ordinaria con procesos sencillos + residuos a vertedero), obtiene la primera posición en dos escenarios, empatada con A2, y la segunda en siete escenarios.

En último lugar, se encuentra la alternativa B (planta avanzada + productos a mercado), la cual obtiene la tercera posición en nueve de los once escenarios y la segunda en solo dos de ellos; la calidad del árido reciclado obtenido en estas plantas no es lo suficientemente mejor que la obtenida en la planta ordinaria como para contrarrestar la gran diferencia en cuanto a impacto social y medioambiental entre ambas plantas.

6. BIBLIOGRAFIA

- Borghi, G., Pantini, S., Rigamonti, L., 2018. Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). *Journal of Cleaner Production* 184 (2018) 815-825.
- Braga, A., Silvestre, J., De Brito, J., 2017. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production* 162 (2017) 529-543.
- CAPV, 2012. Guía para la prevención de emisiones difusas de partículas, Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca.
- Chen, K., Wang, J., Yu, B., Wu, H., Zhang, J., 2021. Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis. *Journal of Cleaner Production* 287 (2021) 125071.
- Chen, Z., Feng, Q., Tue, Z., Moselhi, O., Soliman, A., Hammad, A., An, C., 2022. Construction, renovation, and demolition waste in landfill: a review of waste characteristics, environmental impacts, and mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*. Numero y Paginas
- Coelho, A., De Brito, J., 2013. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO2 emissions. *Waste Management* 33 (2013) 1258–1267.
- Coelho, A., De Brito, J., 2013. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part II: Environmental sensitivity analysis. *Waste Management* 33 (2013) 147–161.
- Colangelo, F., Petrillo, A., Farina, I., 2021. Comparative environmental evaluation of recycled aggregates from construction and demolition wastes in Italy. *Science of the Total Environment* 798 (2021) 149250.
- Compañía WKD. 2022. Consumo de agua por tonelada en una wet jig. Disponible en: <https://www.miningshakingtable.com>
- Den Boer, J., Den Boer, E., Jager, J., 2007. LCA-IWM: A decision support tool for sustainability assessment of waste management systems. *Waste Management* 27 (2007) 1032–1045.

- Dosal, E. (2015), Towards an Improved Framework for Construction and Demolition Waste Management (C&DW) Using Decision Support Tools. Berta Galán, C. & Ana Andrés, P., Directoras. Tesis Doctoral. (Universidad de Cantabria). Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/8203>
- Faleschini, F., Zanini, M., Pellegrino, C., Pasinato, S., 2016. Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a medium-size integrated plant. *Waste Management* 49 (2016) 146–155.
- Galán B., Viguri J. R., Cifrian E., Dosal E., Andres A., 2019. Influences of input streams in the CDW recycling performance of basic and advanced treatment plants. *Journal of Cleaner Production* 236 (2019) 117523.
- Inventario Nacional De Emisiones. 2022. Factores de emisión de y PCI de los combustibles. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/default.aspx>
- Iodice, S., Garbarino, E., Cerreta, M., Tonini, D., 2021. Sustainability assessment of Construction and Demolition Waste management applied to an Italian case. *Waste Management* 128 (2021) 83–98.
- Llano, T., Dosal, E., Lindorfer, J., Finger, C., 2021. Application of Multi-Criteria Decision-Making Tools for Assessing Biogas Plants: A Case Study in Reykjavik, Iceland. *Water* 2021, 13, 2150.
- Llano, T., Rueda, C., Dosal, E., Andrés, A., Coz, A., 2021. Multi-criteria analysis of detoxification alternatives: Techno-economic and socio-environmental assessment. *Biomass and Bioenergy* 154 (2021) 106274.
- Lopez Gayarre, F., Gonzalez, J., Lopez-Colina, C., Serrano, M., Lopez, A., 2016. Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production* 113 (2016) 41-53.
- Lopez, L., Roca X., Lara, C., Gasso, S., 2022. Multicriteria analysis of the environmental and economic performance of circularity strategies for concrete waste recycling in Spain. *Waste Management* 144 (2022) 387–400.
- Marzouk, M., Azab, S., 2014. Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling* 82 (2014) 41–49.

- Mercante, I.T., Bovea, M.D., Ibáñez-Forés, V., Arena, A.P., 2012. Evaluación del ciclo de vida de los sistemas de gestión de residuos de construcción y demolición. *Int J Life Cycle Assess* (2012) 17:232–241.
- Nadazdi, A., Naunovic, Z., Ivanisevic, N., 2022. Circular Economy in Construction and Demolition Waste Management in the Western Balkans: A Sustainability Assessment Framework. *Sustainability* 2022, 14, 871.
- Rashid, K., Rehman, M., De Brito, J., Ghafoor, H., 2020. Multi-criteria optimization of recycled aggregate concrete mixes. *Journal of Cleaner Production* 276 (2020) 124316.
- Red Eléctrica Española. 2022. Factores de emisión en la generación eléctrica. Disponible en: <https://www.ree.es/es/datos/generacion>
- Rosado, L., Vitale, P., Penteado, C., Arena, U., 2017. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. *Journal of Cleaner Production* 151 (2017) 634-642.
- Silva, R., De Brito, J., Dhir, R., 2017. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. *Journal of Cleaner Production* 143 (2017) 598-614.
- Suarez, S., Calderon, L., Gassó, S., Roca, X., 2018. Multi-criteria decision analysis to assess the environmental and economic performance of using recycled gypsum cement and recycled aggregate to produce concrete: The case of Catalonia (Spain). *Resources, Conservation & Recycling* 133 (2018) 120–131.
- Taelman, S., Sanjuan, D., Tonini, D., Dewulf, J., 2020. An operational framework for sustainability assessment including local to global impacts: Focus on waste management systems. *Resources, Conservation & Recycling* 162 (2020) 104964.
- Tam, V., Soomro, M., Evangelista, A., 2018. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials* 172 (2018) 272–292.
- Yuan, H. 2013. Key indicators for assessing the effectiveness of waste management in construction projects. *Ecological Indicators* 24 (2013) 476–484.

7. ANEXOS

7.1 ANEXO 1: DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA ORDINARIA DE RECICLADO DE RCDs

La planta de reciclaje ordinaria es una planta convencional, en la que se hace uso de una maquinaria básica y se generan productos reciclados de menor calidad que una planta avanzada, por lo que dispone de un proceso de reciclaje menos complejo. Los residuos que entran en la planta se dividen en residuos pétreos y residuos no pétreos.

En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo de una planta ordinaria de reciclaje de RCDs, procediéndose a continuación a la descripción del proceso de reciclaje etapa por etapa, especificando los flujos de corriente correspondientes en cada caso.

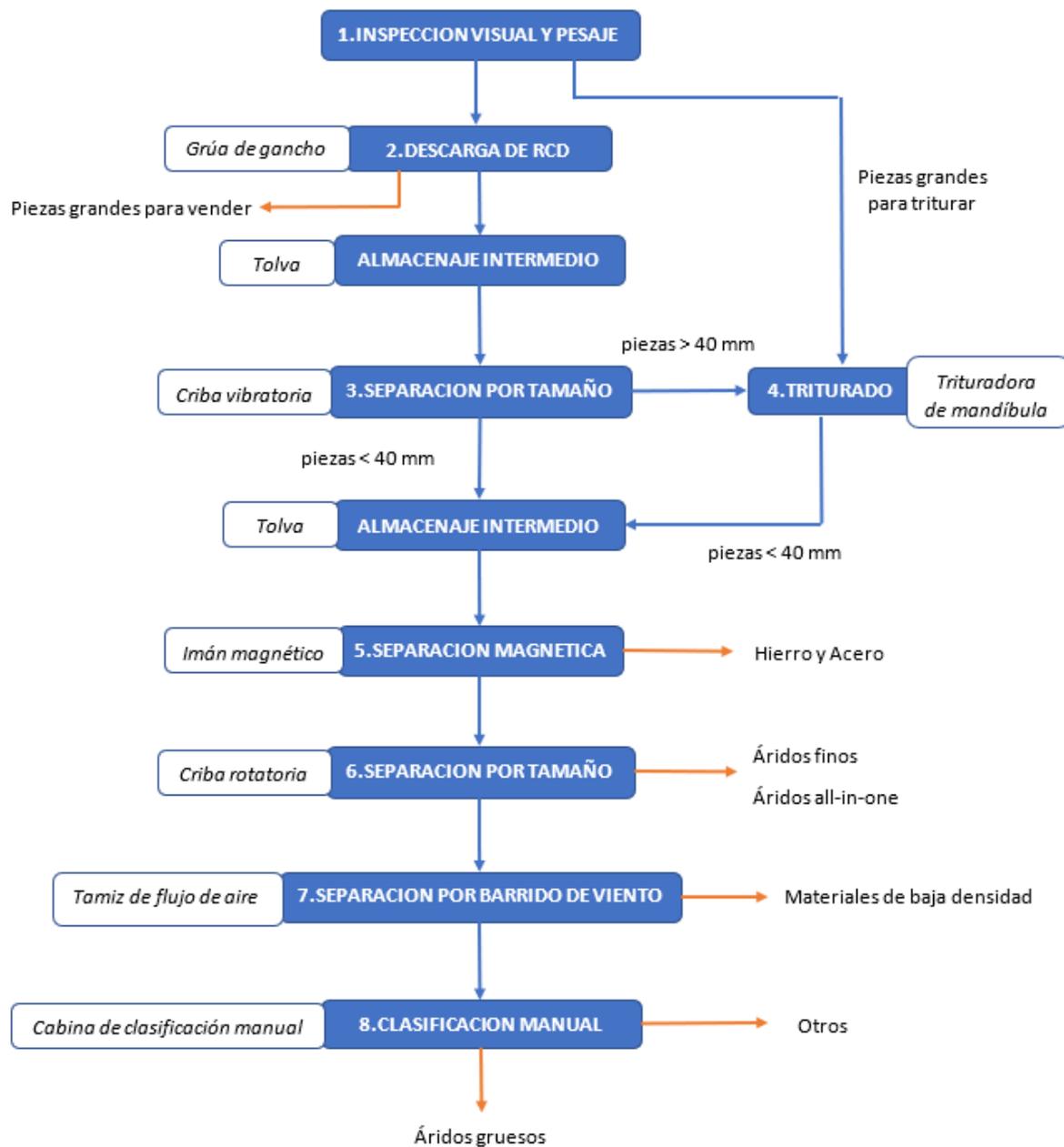


Figura 1. Diagrama de flujo de una planta ordinaria de reciclaje de RCDs

1. Inspeccion visual y pesaje

Antes de iniciar el proceso de la planta se realiza una inspección visual y pesaje de los residuos que llegan a la misma. A este punto no llegan los residuos segregados (metales y vidrio) y las mezclas de metales que fueron destinados a la venta al gestor de residuos por parte del encargado del desmantelamiento.

En este momento se prescinde de una buena parte de las corrientes de residuos segregados que llegan a la planta, como, por ejemplo, de piedras o de mezcla bituminosa, los cuales son almacenados para su venta o porque poseen impurezas que podrían perjudicar el producto final. En este caso, dichos residuos se eliminan de la corriente antes de llegar a la planta y, por tanto, no son tenidos en cuenta.

Por lo tanto, todas las 43.750 toneladas que llegan a la planta continuaran el proceso de reciclaje hacia el área de descarga una vez concluida la etapa de inspección visual y pesaje (Tabla 1).

Tabla 1. Corrientes de residuos que entran a la planta

Grupo	%	Descripcion	Ton
Pétreo	14	Hormigon	6000
	43	Ladrillos	19000
	18	Azulejos y ceramicos	8000
	5	Arena, grava y otros agregados	2000
No Pétreo	0	Aluminio	0
	0	Plomo	0
	0	Zinc	0
	0	Hierro y acero	0
	0	Estaño	0
	0	Cables	0
	5	Madera	2000
	1	Vidrio	250
	2	Plastico	750
	0	Materiales de construccion basados en yeso	100
	8	Material aislante	3500
	5	Embalaje mezclado	2000
	0	Empaques de papel y carton	150
Total			43750

2.Área de descarga

En el área de descarga se emplea la grúa de gancho para una primera clasificación. Se utiliza para la extracción de residuos de grandes dimensiones que deben ser separados de la corriente principal. En el caso de que dichas piezas grandes contengan propiedades pétreas, son llevadas a la trituradora de mandíbula, donde se reduce su tamaño para poder continuar con el proceso de reciclaje. Por otra parte, las piezas extraídas por la grúa que no tienen propiedades pétreas son destinadas al almacenado en contenedores para su posterior venta.

El resto de los residuos continúan el proceso con el almacenado intermedio en la tolva antes de ser introducidos en la criba vibratoria.

Hay que tener en cuenta que los distintos flujos de corrientes de RCD's poseen un tamaño de partícula inicial distinto dependiendo del tipo de residuo. Los residuos de carácter pétreo se distribuyen en escombros, residuos cuyo tamaño de partícula es mayor de 40 mm, promedio, tamaño de partícula entre los 40 mm y 4 mm, y las partículas menores de 4 mm. Por otro lado, los residuos de carácter no pétreo se distribuyen en piezas largas, con un tamaño de partícula de más de 20 cm, promedio, tamaño entre 20 cm y 4mm, y las partículas menores de 4 mm. En las Tabla 2 y 3 se muestra la cantidad de residuos extraídos por la grúa de gancho en el área de descarga y el destino de estos.

Tabla 2. Extracción por grúa de gancho de las corrientes de residuos pétreos

Descripción	Entrada			Extracción por grúa de gancho		Tolva Ton	Trituradora Ton
	Tamaño de partícula	% inicial	Ton	% Extracción	Ton		
Hormigon	Escombros > 40mm	85	5100	10	510	4590	510
	4 mm < Promedio < 40 mm	10	600	0	0	600	0
	< 4 mm	5	300	0	0	300	0
Ladrillos	Escombros > 40mm	60	11400	2	228	11172	228
	4 mm < Promedio < 40 mm	25	4750	0	0	4750	0
	< 4 mm	15	2850	0	0	2850	0
Azulejos y ceramicos	Escombros > 40mm	60	4800	2	96	4704	96
	4 mm < Promedio < 40 mm	25	2000	0	0	2000	0
	< 4 mm	15	1200	0	0	1200	0
arena, grava y otros agregados	Escombros > 40mm	0	0	0	0	0	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	40	800	0	0	800	0
	< 4 mm	60	1200	0	0	1200	0
Total			35000		834	34166	834

Tabla 3. Extracción por grúa de gancho de las corrientes de residuos no pétreos

Descripción	Entrada			Extracción por grúa de gancho		Tolva	Almacenado
	Tamaño de partícula	% inicial	Ton	% Extracción	Ton	Ton	Ton
Madera	Piezas largas	80	1600	60	960	640	960
	4 mm < Promedio < 20 cm	15	300	0	0	300	0
	< 4 mm	5	100	0	0	100	0
Vidrio	Piezas largas	50	125	60	75	50	75
	4 mm < Promedio < 20 cm	30	75	0	0	75	0
	< 4 mm	20	50	0	0	50	0
Plástico	Piezas largas	70	525	60	315	210	315
	4 mm < Promedio < 20 cm	20	150	0	0	150	0
	< 4 mm	10	75	0	0	75	0
Yeso de construcción	Piezas largas	70	70	60	42	28	42
	4 mm < Promedio < 20 cm	10	10	0	0	10	0
	< 4 mm	20	20	0	0	20	0
Material aislante	Piezas largas	60	2100	60	1260	840	1260
	4 mm < Promedio < 20 cm	30	1050	0	0	1050	0
	< 4 mm	10	350	0	0	350	0
Embalaje mezclado	Piezas largas	70	1400	60	840	560	840
	4 mm < Promedio < 20 cm	20	400	0	0	400	0
	< 4 mm	10	200	0	0	200	0
Empaques de papel y cartón	Piezas largas	60	90	60	54	36	54
	4 mm < Promedio < 20 cm	30	45	0	0	45	0
	< 4 mm	10	15	0	0	15	0
Total			8750		3546	5204	3546

Una vez realizada la extracción por grúa de gancho en el área de descarga se tiene que:

- 834 toneladas de residuos pétreos de grandes dimensiones son extraídas y destinadas a la trituradora de mandíbula (Tabla 2).
- 3546 toneladas de residuos no pétreos son extraídas de la corriente principal para ser vendidos o desechados a vertedero (Tabla 3).

De esta forma, un total de 39370 toneladas de residuos continúan el proceso por la planta hacia el almacenado intermedio en la tolva.

3. Separación por tamaño de partícula en la criba vibratoria

En la criba vibratoria se realiza una primera separación por tamaño de las corrientes de residuos procedentes de la tolva de almacenamiento intermedio.

La criba vibratoria separa los escombros (>40 mm) y las piezas largas (>20 cm) que no pudieron ser separadas mediante la grúa de gancho del resto de residuos, los cuales serán enviados a la trituradora de mandíbula.

Funciona mediante una cinta transportadora inclinada y agujereada en forma de malla. A medida que las corrientes de residuos avanzan a través de la malla una vibración

permanente hace que las partículas promedio o menores (<40 mm) caigan a través de las rendijas separando la mezcla en dos lotes. Por un lado, la fracción de escombros y piezas largas que será destinada a la trituradora de mandíbula, y, por otro lado, la fracción de piezas de tamaño promedio o menor que seguirá el proceso a través de la tolva.

Se estima que en la criba vibratoria el 100% de las piezas largas y escombros son separadas del resto de residuos. En las Tablas 4 y 5 se muestra las toneladas de residuos que entran a la criba, así como las toneladas a la salida y el destino de cada una de las diferentes corrientes de residuos.

Tabla 4. Separación por tamaño en la criba vibratoria de las corrientes de residuos pétreos

Descripción	Entrada a criba		Criba % Separación	Trituradora Ton	Tolva Ton
	Tamaño de partícula	Ton			
Hormigon	Escombros > 40mm	4590	100	4590	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	600	0	0	600
	< 4 mm	300	0	0	300
Ladrillos	Escombros > 40mm	11172	100	11172	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	4750	0	0	4750
	< 4 mm	2850	0	0	2850
Azulejos y ceramicos	Escombros > 40mm	4704	100	4704	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	2000	0	0	2000
	< 4 mm	1200	0	0	1200
Arena, grava y otros agregados	Escombros > 40mm	0	100	0	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	800	0	0	800
	< 4 mm	1200	0	0	1200
Total		34166		20466	13700

Tabla 5. Separación por tamaño en la criba vibratoria de las corrientes de residuos no pétreos

Descripción	Entrada a criba		Criba % Separación	Trituradora Ton	Tolva Ton
	Tamaño de partícula	Ton			
Madera	Piezas largas	640	100	640	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	300	0	0	300
	< 4 mm	100	0	0	100
Vidrio	Piezas largas	50	100	50	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	75	0	0	75
	< 4 mm	50	0	0	50
Plástico	Piezas largas	210	100	210	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	150	0	0	150
	< 4 mm	75	0	0	75
Yeso de construcción	Piezas largas	28	100	28	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	10	0	0	10
	< 4 mm	20	0	0	20
Material aislante	Piezas largas	840	100	840	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	1050	0	0	1050
	< 4 mm	350	0	0	350
Embalaje mezclado	Piezas largas	560	100	560	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	400	0	0	400
	< 4 mm	200	0	0	200
Empaques de papel y cartón	Piezas largas	36	100	36	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	45	0	0	45
	< 4 mm	15	0	0	15
Total		5204		2364	2840

Al acabar el proceso de cribado se tiene el siguiente balance en los flujos de corriente:

- 20466 toneladas de residuos pétreos y 2364 toneladas de residuos no pétreos, lo que hace un total de 22830 toneladas, de grandes dimensiones son destinadas a la trituradora para la reducción de su tamaño (Tablas 4 y 5).
- El resto de las piezas, 13700 toneladas de residuos pétreos y 2840 toneladas de residuos no pétreos son enviadas al almacenaje intermedio en la tolva donde continuarán con el proceso de reciclaje (Tablas 4 y 5).

4.Reducción del tamaño de partícula mediante la trituradora de mandíbula

En la trituradora de mandíbula los escombros y piezas largas son triturados hasta que alcanzan un tamaño de partícula medio o menor. Se considera que la fracción de escombros

y piezas largas es triturada completamente y, por tanto, no existirán residuos con este tamaño de partícula a la salida.

Una vez finalizado este proceso los residuos son introducidos en la tolva donde se reencuentran con el resto de los residuos procedentes de la criba vibratoria, ahora todos con un tamaño similar.

A la trituradora entran 834 toneladas procedentes del área de descarga y 22830 procedentes de la criba rotatoria, lo que hace un total de 23664 toneladas. En las tablas 6 y 7 se muestran las toneladas que entran a la trituradora y el tamaño de partícula una vez se ha realizado el proceso de triturado.

Tabla 6. Reducción del tamaño de partícula por trituradora de mandíbula de las corrientes de residuos pétreos.

Descripción	Entrada a trituradora		Trituradora	Tolva
	Tamaño de partícula	Ton	% Separación	Ton
Hormigon	Escombros > 40mm	5100	0	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	0	38,82	1980
	< 4 mm	0	61,18	3120
Ladrillos	Escombros > 40mm	11400	0	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	0	30	3420
	< 4 mm	0	70	7980
Azulejos y ceramicos	Escombros > 40mm	4800	0	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	0	30	1440
	< 4 mm	0	70	3360
Arena, grava y otros agregados	Escombros > 40mm	0	0	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	0	0	0
	< 4 mm	0	0	0
Total		21300		21300

Tabla 7. Reducción del tamaño de partícula por trituradora de mandíbula de las corrientes de residuos no pétreos.

Descripción	Entrada a trituradora		Trituradora	Tolva
	Tamaño de partícula	Ton	% Separación	Ton
Madera	Piezas largas	640	0	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	0	75,94	486
	< 4 mm	0	24,06	154
Vidrio	Piezas largas	50	0	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	0	65,71	33
	< 4 mm	0	34,29	17
Plastico	Piezas largas	210	0	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	0	69,47	146
	< 4 mm	0	30,53	64
Yeso de construccion	Piezas largas	28	0	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	0	54,29	15
	< 4 mm	0	45,71	13
Material aislante	Piezas largas	840	0	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	0	76,48	642
	< 4 mm	0	23,52	198
Embalaje mezclado	Piezas largas	560	0	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	0	69,47	389
	< 4 mm	0	30,53	171
Empaques de papel y carton	Piezas largas	36	0	0
	4 mm < Promedio < 20 cm	0	73,7	27
	< 4 mm	0	26,3	9
Total		2364		2364

Como se puede ver en las Tablas 6 y 7, las 21300 toneladas de la corriente pétreo y las 2463 toneladas de la corriente no pétreo que entran en la trituradora salen hacia a la tolva con un tamaño reducido. De esta forma, tras el paso por la trituradora no quedan residuos pétreos mayores de 40 mm ni residuos no pétreos mayores de 20 cm. Se reencuentran en la tolva con los residuos procedentes de la criba vibratoria y hacen un total de 40184 toneladas que continúan el proceso de reciclaje.

5.Separacion magnética mediante el imán en banda sobre cinta transportadora

La mezcla de residuos es transportada a través de una cinta transportadora. Un imán colocado sobre dicha cinta es capaz de extraer los materiales férreos gracias a su fuerza de atracción magnética. Estos materiales férreos (hierro y acero) son separados de la corriente de residuos y depositados en contenedores específicos.

En este trabajo se considera que ningún metal llegó a la planta de reciclaje, por tanto, en este punto no se extrae ninguna tonelada de la corriente de residuos.

6.Separación por tamaño de partícula en la criba rotatoria

El objetivo principal de la criba rotatoria es separar las partículas gruesas de las finas estableciendo una nueva clasificación por tamaño:

- Grueso: todas aquellas partículas de residuos con un tamaño mayor a los 4mm.
- Fino: partículas con tamaño comprendido entre los 4mm y los 0,063mm.
 - All-in-one: se encuentra dentro de la fracción todas aquellas partículas con un tamaño menor a los 2mm.

El proceso de la criba rotatoria consiste en dos etapas de separación. A medida que la mezcla de residuos avanza por la malla del tambor, en la primera etapa, se emplea la fuerza centrífuga de la criba para tamizar las partículas menores a los 2mm a través de las rendijas de la malla, formando la fracción all-in-one. La corriente principal que sigue por el interior del tambor se introduce en una segunda etapa donde la malla consta de perforaciones de un tamaño mayor, tamizando esta vez las partículas menores a los 4mm de la mezcla de residuos y formando la fracción fina. Hay que tener en cuenta que la separación realizada en la primera etapa no es perfecta, por lo que en la fracción fina se pueden encontrar partículas menores a los 2mm. No obstante, la separación en la segunda etapa se considera perfecta, por lo que la mezcla de residuos que abandona el tambor por la boca inferior solo puede estar compuesta por partículas mayores a los 4mm. En las tablas 8 y 9 se muestra el tamaño de partícula a la entrada y la salida de la criba para las diferentes corrientes de residuos.

Tabla 8. Separación por tamaño en la criba rotatoria de las corrientes de residuos pétreos.

Descripción	Entrada a criba		Salida criba		
	Tamaño de partícula	Ton	Tamaño de partícula	% Separación	Ton
Hormigon	Escombros > 40mm	0	Grueso > 4 mm	43	2580
	4 mm < Promedio < 40 mm	2580	0,063 < Fino < 4 mm	34,2	2052
	< 4 mm	3420	2 mm > All-in-one	22,8	1368
Ladrillos	Escombros > 40mm	0	Grueso > 4 mm	43	8170
	4 mm < Promedio < 40 mm	8170	0,063 < Fino < 4 mm	34,2	6498
	< 4 mm	10830	2 mm > All-in-one	22,8	4332
Azulejos y ceramicos	Escombros > 40mm	0	Grueso > 4 mm	43	3440
	4 mm < Promedio < 40 mm	3440	0,063 < Fino < 4 mm	34,2	2736
	< 4 mm	4560	2 mm > All-in-one	22,8	1824
Arena, grava y otros agregados	Escombros > 40mm	0	Grueso > 4 mm	40	800
	4 mm < Promedio < 40 mm	800	0,063 < Fino < 4 mm	20	400
	< 4 mm	1200	2 mm > All-in-one	40	800
Total		35000			35000
Aridos gruesos					14990
Aridos finos					11686
Aridos all-in-one					8324

Tabla 9. Separación por tamaño en la criba rotatoria de las corrientes de residuos no pétreos.

Descripción	Entrada a criba		Salida criba		
	Tamaño de partícula	Ton	Tamaño de partícula	% Separación	Ton
Madera	Piezas largas	0	Grueso > 4 mm	75,6	786
	4 mm < Promedio < 20 cm	786	0,063 < Fino < 4 mm	21,8	227
	< 4 mm	254	2 mm > All-in-one	2,6	27
Vidrio	Piezas largas	0	Grueso > 4 mm	61,6	108
	4 mm < Promedio < 20 cm	108	0,063 < Fino < 4 mm	32	56
	< 4 mm	67	2 mm > All-in-one	6,4	11
Plastico	Piezas largas	0	Grueso > 4 mm	68	282
	4 mm < Promedio < 20 cm	296	0,063 < Fino < 4 mm	27,4	114
	< 4 mm	119	2 mm > All-in-one	4,6	19
Yeso de construcción	Piezas largas	0	Grueso > 4 mm	43,5	25
	4 mm < Promedio < 20 cm	25	0,063 < Fino < 4 mm	47,7	28
	< 4 mm	33	2 mm > All-in-one	8,8	5
Material aislante	Piezas largas	0	Grueso > 4 mm	75,5	1691
	4 mm < Promedio < 20 cm	1692	0,063 < Fino < 4 mm	20,8	466
	< 4 mm	548	2 mm > All-in-one	3,7	83
Embalaje mezclado	Piezas largas	0	Grueso > 4 mm	68	789
	4 mm < Promedio < 20 cm	789	0,063 < Fino < 4 mm	27,4	318
	< 4 mm	371	2 mm > All-in-one	4,6	53
Empaques de papel y carton	Piezas largas	0	Grueso > 4 mm	74,5	72
	4 mm < Promedio < 20 cm	72	0,063 < Fino < 4 mm	21,7	21
	< 4 mm	24	2 mm > All-in-one	3,8	4
Total		5184			5184
Aridos gruesos					3753
Aridos finos					1229
Aridos all-in-one					202

Una vez terminado el segundo proceso de cribado se tiene un separado completo en las tres fracciones:

- 14990 toneladas de fracción gruesa procedente de residuos pétreos y 3753 toneladas procedentes de residuos no pétreos, haciendo un total de 18743 toneladas de árido grueso
- 11686 toneladas de fracción fina procedente de residuos pétreos y 1229 toneladas procedentes de residuos no pétreos, haciendo un total 12915 toneladas de áridos finos
- 8324 toneladas de fracción all-in-one procedente de residuos pétreos y 202 toneladas procedentes de residuos no pétreos, haciendo un total 8526 toneladas de áridos all-in-one

En este punto, la fracción fina y la fracción all-in-one abandonan el proceso de reciclaje y serán utilizadas para la elaboración de áridos cerámicos mixtos de baja calidad. Por lo tanto, un total de 21441 toneladas abandonan la corriente principal. Las 18743 toneladas de áridos gruesos continúan el proceso de reciclaje en el tamiz por flujo de aire.

7.Separacion por densidad en el tamiz por flujo de aire

El tamiz por flujo de aire sirve para separar los materiales de baja densidad de la corriente principal procedente de la criba rotatoria. Solo actúa sobre la fracción gruesa de los residuos de carácter no pétreo, ya que solo rinde para partículas mayores de 4 mm.

Funciona mediante ventiladores que soplan aire a través de la corriente de residuos separando los materiales de baja densidad como madera, cartón, plásticos y papel. Se considera una separación del 80%, ya que las partículas de los materiales mencionados se pueden quedar atrapadas ente otros tipos de residuos. En la Tabla 10 se muestra las toneladas de residuos separados de la corriente principal en el tamiz por flujo de aire.

Tabla 10. Separación por tamiz de flujo de aire de las corrientes de residuos de baja densidad

Descripción	Tamaño de partícula	Tamizado por flujo de aire			
		Ton	% Separación	Ton extraídas	Ton restantes
Madera	Grueso > 4 mm	786	80	629	157
Plástico	Grueso > 4 mm	282	80	226	56
Material aislante	Grueso > 4 mm	1691	80	1353	338
Embalaje mezclado	Grueso > 4 mm	789	80	631	158
Empaques de papel y cartón	Grueso > 4 mm	72	80	57	14
Total		3620		2896	724

Por tanto, 2896 toneladas de materiales de baja densidad son extraídas de la corriente principal en este punto. El resto de la fracción gruesa continúa con el proceso de reciclaje hacia la cabina de clasificación manual.

8. Separación final en la cabina de clasificación manual

En la cabina de clasificación manual se realiza el último proceso de separación. Se emplea la percepción visual de los trabajadores de la planta para extraer de la fracción gruesa de residuos, procedente del tamiz por flujo de aire, aquellos residuos que poseen propiedades perjudiciales para el producto reciclado final y que no pudieron extraerse previamente. Se estima un 30 % de separación en este proceso en el que se extraen principalmente plásticos, papel, cartón y fragmentos de madera.

Tabla 11. Extracción manual en la cabina de clasificación

Descripción	Tamaño de partícula	Extracción manual en la cabina de clasificación			
		Ton	% Separación	Ton extraídas	Ton restantes
Madera	Grueso > 4 mm	157	30	47	110
Plástico	Grueso > 4 mm	56	30	17	40
Material aislante	Grueso > 4 mm	338	30	101	237
Embalaje mezclado	Grueso > 4 mm	158	30	47	110
Empaques de papel y cartón	Grueso > 4 mm	14	30	4	10
Total		724		217	507

Como se puede observar en la Tabla 11, un total de 217 toneladas son extraídas en este proceso. De esta forma, la salida final de la planta se tratará de una fracción gruesa formada principalmente por residuos de carácter pétreo, lo cual permite elaborar áridos de mayor calidad.

Un total de 15630 toneladas de áridos gruesos forman la salida final de la planta que se destina a la elaboración de áridos cerámicos mixtos.

En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo cuantitativo de una planta ordinaria de reciclaje de RCDs.

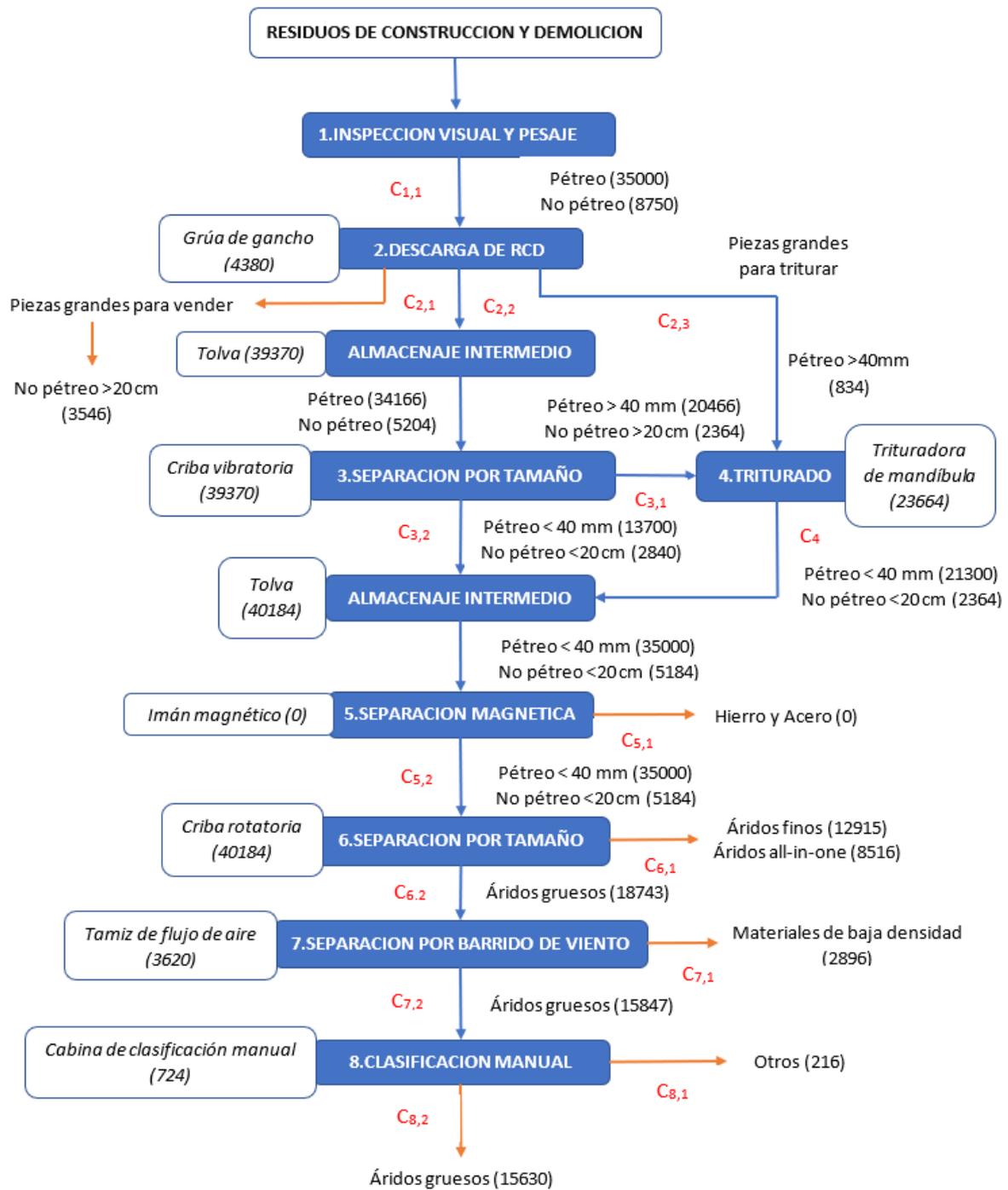


Figura 2. Diagrama de flujo cuantitativo de una planta de reciclaje ordinaria de RCDs

7.2 ANEXO 2: DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA AVANZADA DE RECICLADO DE RCDs

La planta de reciclaje avanzada es una planta moderna de altas prestaciones. En ella se hace uso de maquinaria especializada y avanzada gracias a las cuales se obtiene un producto final de mucha más calidad que en la planta ordinaria. Al igual que en la planta ordinaria, los residuos que entran se clasifican en residuos pétreos y residuos no pétreos.

En este tipo de plantas se realiza una separación final de residuos mucho más específica y compleja con el uso de equipos más avanzados. De esta manera el producto final obtenido una vez terminado el proceso de reciclado es de una calidad superior al que se obtiene en la planta ordinaria.

En la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo de una planta avanzada de reciclaje de RCDs, procediéndose a continuación a la descripción del proceso de reciclaje etapa por etapa, especificando los flujos de corriente correspondientes en cada caso.

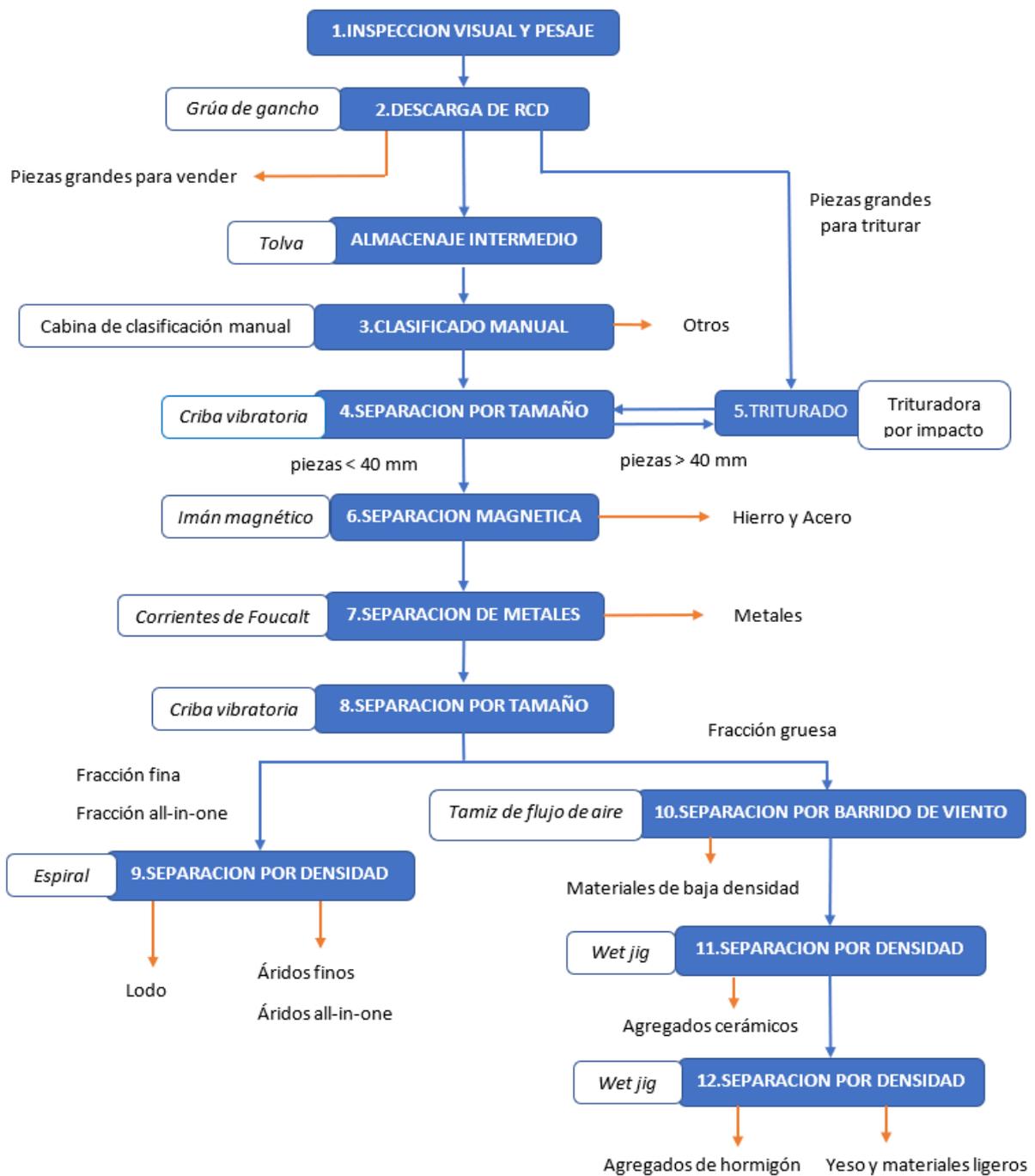


Figura 3. Diagrama de flujo de una planta avanzada de reciclaje de RCDs

1.Inspeccion visual y pesaje

Al igual que en la planta ordinaria, antes de empezar el proceso de reciclaje se realiza una inspección visual y pesaje de los residuos que llegan a la planta. Los residuos segregados

(metales y vidrio) y las mezclas de metales fueron sacados de la corriente de residuos y se destinaron al gestor de residuos para su venta por parte del encargado del desmantelamiento.

En este momento se prescinde de una buena parte de las corrientes de residuos segregados que llegan a la planta, como, por ejemplo, de piedras o de mezcla bituminosa, los cuales son almacenados para su venta o porque poseen impurezas que podrían perjudicar el producto final. En este caso, dichos residuos se eliminan de la corriente antes de llegar a la planta y, por tanto, no son tenidos en cuenta.

Por lo tanto, todas las 43750 toneladas que llegan a la planta continuaran el proceso de reciclaje hacia el área de descarga una vez concluida la etapa de inspección visual y pesaje (Tabla 12).

Tabla 12. Corrientes de residuos que entran a la planta

Grupo	%	Descripcion	Ton	
Pétreo	Hormigon	Hormigon	6000	
	Ladrillos, azulejos y ceramicos	Ladrillos	19000	
		Azulejos y ceramicos	8000	
	Arena, grava y otros agregados		2000	
No Pétreo		Aluminio	0	
		Plomo	0	
	Metales		Zinc	0
			Hierro y acero	0
			Estaño	0
			Cables	0
				0
	Madera	Madera	2000	
	Vidrio	Vidrio	250	
	Plastico	Plastico	750	
	Yeso	Materiales de construccion basados en yeso	100	
	Desperdicio	Material aislante	3500	
	Otros	Embalaje mezclado	2000	
Papel	Empaques de papel y carton	150		
Total			43750	

2. Área de descarga

Al igual que en la planta ordinaria, en el área de descarga se emplea la grúa de gancho para una primera clasificación. Se utiliza para la extracción de residuos de grandes dimensiones que deben ser separados de la corriente principal. Estos residuos son llevados directamente a la trituradora por impacto.

A parte de esto, existe una fracción de piezas muy largas no aptas para el proceso de reciclado que son apartadas de las corrientes de residuos para su venta o almacenado.

El resto de los residuos continúan el proceso en la planta con el almacenado intermedio en la tolva.

Cabe destacar que en la planta avanza la extracción por grúa de gancho es mucho más rigurosa que la realizada en la planta ordinaria. Ya que, en este caso, la grúa no solo actúa sobre la fracción de piezas grandes, sino que también lo hace sobre la fracción promedio.

En las Tabla 13 y 14 se muestra la cantidad de residuos extraídos por la grúa de gancho en el área de descarga y el destino de estos.

Tabla 13. Extracción por grúa de gancho de las corrientes de residuos pétreos

Descripción	Entrada			Extracción por grúa de gancho		Tolva Ton	Trituradora Ton
	Tamaño de partícula	% inicial	Ton	% Extracción	Ton		
Hormigon	Escombros > 40mm	85	5100	10	510	4590	510
	4 mm < Promedio < 40 mm	10	600	0	0	600	0
	< 4 mm	5	300	0	0	300	0
Ladrillos	Escombros > 40mm	60	11400	2	228	11172	228
	4 mm < Promedio < 40 mm	25	4750	0	0	4750	0
	< 4 mm	15	2850	0	0	2850	0
Azulejos y cerámicos	Escombros > 40mm	60	4800	2	96	4704	96
	4 mm < Promedio < 40 mm	25	2000	0	0	2000	0
	< 4 mm	15	1200	0	0	1200	0
arena, grava y otros agregados	Escombros > 40mm	0	0	0	0	0	0
	4 mm < Promedio < 40 mm	40	800	0	0	800	0
	< 4 mm	60	1200	0	0	1200	0
Total			35000		834	34166	834

Tabla 14. Extracción por grúa de gancho de las corrientes de residuos no pétreos

Descripción	Entrada			Extracción por grúa de gancho		Tolva	Almacenado
	Tamaño de partícula	% inicial	Ton	% Extracción	Ton	Ton	Ton
Madera	Piezas largas	80	1600	60	960	640	960
	4 mm < Promedio < 20 cm	15	300	20	60	240	60
	< 4 mm	5	100	0	0	100	0
Vidrio	Piezas largas	50	125	60	75	50	75
	4 mm < Promedio < 20 cm	30	75	0	0	75	0
	< 4 mm	20	50	0	0	50	0
Plástico	Piezas largas	70	525	60	315	210	315
	4 mm < Promedio < 20 cm	20	150	20	30	120	30
	< 4 mm	10	75	0	0	75	0
Yeso de construcción	Piezas largas	70	70	60	42	28	42
	4 mm < Promedio < 20 cm	10	10	20	2	8	2
	< 4 mm	20	20	0	0	20	0
Material aislante	Piezas largas	60	2100	60	1260	840	1260
	4 mm < Promedio < 20 cm	30	1050	0	0	1050	0
	< 4 mm	10	350	0	0	350	0
Embalaje mezclado	Piezas largas	70	1400	60	840	560	840
	4 mm < Promedio < 20 cm	20	400	20	80	320	80
	< 4 mm	10	200	0	0	200	0
Empaques de papel y cartón	Piezas largas	60	90	60	54	36	54
	4 mm < Promedio < 20 cm	30	45	20	9	36	9
	< 4 mm	10	15	0	0	15	0
Total			8750		3727	5023	3727

Una vez realizada la extracción por grúa de gancho en el área de descarga se tiene que:

- 834 toneladas de residuos pétreos de grandes dimensiones son extraídas y destinadas a la trituradora por impacto (Tabla 13).
- 3727 toneladas de residuos no pétreos son extraídas de la corriente principal para ser vendidos o desechados a vertedero (Tabla 14).

Por lo tanto, un total de 39189 toneladas de residuos continúan el proceso de reciclaje hacia el almacenado intermedio en la tolva.

3. Cabina de clasificado manual: separación manual

Los lotes de residuos provenientes de la tolva son depositados separados, por un lado, por otro mezclado pétreo y por otro, mezclado no pétreo, en una cinta transportadora. Los trabajadores son los encargados de apartar aquellos residuos que no haya sido capaz de eliminar la grúa de gancho y que puedan contener impurezas perjudiciales para el resultado final.

Se estima una separación del 30% de los residuos no pétreos de grandes dimensiones (> 20 cm). Los residuos apartados en este punto son piezas grandes de metales, plásticos, papel, cartón y fragmentos de madera.

Tabla 15. Extracción manual en la cabina de clasificado

Descripción	Extracción manual en la cabina de clasificado				
	Tamaño de partícula	Ton	% Separación	Ton extraídas	Ton restantes
Madera	Piezas largas	640	30	192	448
Plástico	Piezas largas	210	30	63	147
Material aislante	Piezas largas	840	30	252	588
Embalaje mezclado	Piezas largas	560	30	168	392
Empaques de papel y cartón	Piezas largas	36	30	11	25
Total		2286		686	1600

Como se puede observar en la Tabla 15, un total de 686 toneladas de residuos no pétreos son extraídas en este punto y separadas de la corriente principal. De esta forma, 38503 toneladas continúan el proceso de reciclaje hacia la criba vibratoria.

4-5.Reducción del tamaño de partícula en la trituradora por impacto y distribución por tamaño en la criba vibratoria

En la planta avanzada todos los residuos independientemente de su tamaño son introducidos en la trituradora por impacto, a diferencia de la planta ordinaria donde solo se introducían las fracciones de piezas largas y escombros (>40 mm).

La trituradora de impacto trabaja juntamente con la criba vibratoria. De esta forma si después del triturado existen piezas que no pueden ser tamizadas por la criba vibratoria son reintroducidas en la trituradora para volver a reducir su tamaño, asegurando la trituración de todas las piezas largas y escombros.

Se considera que la trituradora ha terminado su trabajo cuando ya no quedan fragmentos de la fracción de piezas largas y escombros (<40 mm).

En las Tablas 16 y 17 se muestra las toneladas que entran a la trituradora y el tamaño de partícula de estas a la salida de la criba.

Tabla 16. Reducción de tamaño de partícula en la trituradora y separación en la criba de las corrientes de residuos pétreos.

Descripción	Entrada a trituradora		Salida trituradora		Salida criba		
	Tamaño de partícula	Ton	%	Ton	Tamaño de partícula	%	Ton
Hormigon	Escombros > 40mm	5100	0	0	Grueso > 4 mm	43	2580
	4 mm < Promedio < 40 mm	600	43	2580	0,063 < Fino < 4 mm	34,2	2052
	< 4 mm	300	57	3420	2 mm > All-in-one	22,8	1368
Ladrillos	Escombros > 40mm	11400	0	0	Grueso > 4 mm	43	8170
	4 mm < Promedio < 40 mm	4750	43	8170	0,063 < Fino < 4 mm	34,2	6498
	< 4 mm	2850	57	10830	2 mm > All-in-one	22,8	4332
Azulejos y ceramicos	Escombros > 40mm	4800	0	0	Grueso > 4 mm	43	3440
	4 mm < Promedio < 40 mm	2000	43	3440	0,063 < Fino < 4 mm	34,2	2736
	< 4 mm	1200	57	4560	2 mm > All-in-one	22,8	1824
Arena, grava y otros agregados	Escombros > 40mm	0	0	0	Grueso > 4 mm	40	800
	4 mm < Promedio < 40 mm	800	40	800	0,063 < Fino < 4 mm	20	400
	< 4 mm	1200	60	1200	2 mm > All-in-one	40	800
Total		35000		35000			35000
Aridos gruesos							14990
Aridos finos							11686
Aridos all-in-one							8324

Tabla 17. Reducción de tamaño de partícula en la trituradora y separación en la criba de las corrientes de residuos no pétreos.

Descripción	Entrada a trituradora		Salida trituradora		Salida criba		
	Tamaño de partícula	Ton	%	Ton	Tamaño de partícula	%	Ton
Madera	Piezas largas	448	0	0	Grueso > 4 mm	75,94	598
	4 mm < Promedio < 20 cm	240	75,94	598	0,063 < Fino < 4 mm	21,52	170
	< 4 mm	100	24,06	190	2 mm > All-in-one	2,54	20
Vidrio	Piezas largas	50	0	0	Grueso > 4 mm	65,71	115
	4 mm < Promedio < 20 cm	75	65,71	115	0,063 < Fino < 4 mm	28,57	50
	< 4 mm	50	34,29	60	2 mm > All-in-one	5,71	10
Plastico	Piezas largas	147	0	0	Grueso > 4 mm	69,47	238
	4 mm < Promedio < 20 cm	120	69,47	238	0,063 < Fino < 4 mm	26,14	89
	< 4 mm	75	30,53	104	2 mm > All-in-one	4,39	15
Yeso de construccion	Piezas largas	28	0	0	Grueso > 4 mm	54,29	30
	4 mm < Promedio < 20 cm	8	54,3	30	0,063 < Fino < 4 mm	38,57	22
	< 4 mm	20	45,7	26	2 mm > All-in-one	7,14	4
Material aislante	Piezas largas	588	0	0	Grueso > 4 mm	76,48	1520
	4 mm < Promedio < 20 cm	1050	76,48	1520	0,063 < Fino < 4 mm	20	398
	< 4 mm	350	23,52	468	2 mm > All-in-one	3,52	70
Embalaje mezclado	Piezas largas	392	0	0	Grueso > 4 mm	69,47	634
	4 mm < Promedio < 20 cm	320	69,47	634	0,063 < Fino < 4 mm	26,14	238
	< 4 mm	200	30,53	278	2 mm > All-in-one	4,39	40
Empaques de papel y carton	Piezas largas	25	0	0	Grueso > 4 mm	73,7	56
	4 mm < Promedio < 20 cm	36	73,7	56	0,063 < Fino < 4 mm	22,36	17
	< 4 mm	15	26,3	20	2 mm > All-in-one	3,94	3
Total		4337		4337			4337
Aridos gruesos							3191
Aridos finos							984
Aridos all-in-one							162

A la salida de la criba se observa en las Tablas 17 y 18 que ya no existen residuos de grandes dimensiones, ahora los residuos se separan en gruesos (> 4 mm), finos (< 4 mm) y all-in-one (< 2 mm). En este punto, dichos tipos de residuos se encuentran en las siguientes cantidades:

- 14990 toneladas de fracción gruesa procedente de residuos pétreos y 3191 toneladas procedentes de residuos no pétreos, haciendo un total de 18181 toneladas de árido grueso
- 11686 toneladas de fracción fina procedente de residuos pétreos y 984 toneladas procedentes de residuos no pétreos, haciendo un total de 12670 toneladas de árido fino
- 8324 toneladas de fracción all-in-one procedente de residuos pétreos y 162 toneladas procedentes de residuos no pétreos, haciendo un total de 8486 toneladas de árido all-in-one

Una vez concluido el proceso de cribado, un total de 39337 toneladas de residuos continúan el proceso de reciclaje a través de la planta.

6. Separación magnética mediante el imán en banda sobre cinta transportada

Al igual que en la planta ordinaria, la mezcla de residuos es transportada a través de una cinta transportadora. Un imán colocado sobre dicha cinta es capaz de extraer los materiales férricos gracias a su fuerza de atracción magnética. Estos materiales férricos (hierro y acero) son separados de la corriente de residuos y depositados en contenedores específicos.

En este trabajo se considera que ningún metal llegó a la planta de reciclaje, por tanto, en este punto no se extrae ninguna tonelada de la corriente de residuos.

7. Separación metálica mediante las corrientes de Foucault

El funcionamiento de este método es bastante similar al de la separación magnética, pero haciendo uso de las propiedades metálicas de los materiales para ejercer la separación.

Mediante este proceso se separan las corrientes de metales no férricos de "Cobre, latón y Bronce" y "Aluminio", ambas contenidas en el lote de mezclado genérico de RCD's.

Para ello, se utiliza un rotor magnético con polaridad alterna, que gira rápidamente dentro de un tambor no metálico accionado por la cinta transportadora. El campo magnético que se origina crea corrientes parásitas en las partículas de los metales no férricos repeliéndolos hacia fuera del transportador, para posteriormente ser depositados en una caja separadora donde tendrá lugar su clasificación.

En este trabajo se considera que ningún metal llegó a la planta de reciclaje, por tanto, en este punto no se extrae ninguna tonelada de la corriente de residuos.

8. Separación de las fracciones de residuos en la criba vibratoria

Una vez terminada la separación magnética, los lotes son introducidos de nuevo en la criba vibratoria para realizar una última separación de las fracciones en función del tamaño.

Los residuos son separados por tamaño mediante las mallas vibratorias de la criba. En este proceso, las partículas de residuos menores de 4 mm (fracción fina y all-in-one) son tamizadas y destinadas a la espiral donde se les realiza una última separación por densidad. Por otro lado, las partículas que no son tamizadas por la malla, ya que tienen un tamaño mayor a 4 mm (fracción gruesa) siguen con el proceso recibiendo un tratamiento más duradero y específico.

Se estima que en la criba vibratoria el 100% de las piezas largas y escombros son separadas del resto de residuos. En las Tablas 18 y 19 se muestra las toneladas de residuos que entran a la criba, así como las toneladas a la salida y el destino de cada una de las diferentes corrientes de residuos.

Tabla 18. Separación por tamaño en la criba vibratoria de las corrientes de residuos pétreos

Descripción	Entrada criba vibratoria			Salida criba	
	Tamaño de partícula	Ton	% Separación	Ton	Ton
Hormigon	Grueso > 4 mm	2580	100	2580	0
	0,063 < Fino < 4 mm	2052	100	0	2052
	2 mm > All-in-one	1368	100	0	1368
Ladrillos	Grueso > 4 mm	8170	100	8170	0
	0,063 < Fino < 4 mm	6498	100	0	6498
	2 mm > All-in-one	4332	100	0	4332
Azulejos y ceramicos	Grueso > 4 mm	3440	100	3440	0
	0,063 < Fino < 4 mm	2736	100	0	2736
	2 mm > All-in-one	1824	100	0	1824
arena, grava y otros agregado	Grueso > 4 mm	800	100	800	0
	0,063 < Fino < 4 mm	400	100	0	400
	2 mm > All-in-one	800	100	0	800
Total		35000		14990	20010

Tabla 19. Separación por tamaño en la criba vibratoria de las corrientes de residuos no pétreos

Descripción	Entrada criba vibratoria		Salida criba		
	Tamaño de partícula	Ton	% Separación	Ton	Ton
Madera	Grueso > 4 mm	598	100	598	0
	0,063 < Fino < 4 mm	170	100	0	170
	2 mm > All-in-one	20	100	0	20
Vidrio	Grueso > 4 mm	115	100	115	0
	0,063 < Fino < 4 mm	50	100	0	50
	2 mm > All-in-one	10	100	0	10
Plastico	Grueso > 4 mm	238	100	238	0
	0,063 < Fino < 4 mm	89	100	0	89
	2 mm > All-in-one	15	100	0	15
Yeso de construccion	Grueso > 4 mm	30	100	30	0
	0,063 < Fino < 4 mm	22	100	0	22
	2 mm > All-in-one	4	100	0	4
Material aislante	Grueso > 4 mm	1520	100	1520	0
	0,063 < Fino < 4 mm	398	100	0	398
	2 mm > All-in-one	70	100	0	70
Embalaje mezclado	Grueso > 4 mm	634	100	634	0
	0,063 < Fino < 4 mm	238	100	0	238
	2 mm > All-in-one	40	100	0	40
Empaques de papel y carton	Grueso > 4 mm	56	100	56	0
	0,063 < Fino < 4 mm	17	100	0	17
	2 mm > All-in-one	3	100	0	3
Total		4337		3191	1146

Al finalizar este proceso la fracción gruesa se separa de la fracción fina y de la fracción all-in-one y es destinada hacia el tamiz por flujo de aire, donde recibe un tratamiento más duradero que el resto de los residuos. Como se puede ver en las Tablas 18 y 19, a la salida de la criba vibratoria se obtienen los siguientes resultados.

- 14990 toneladas de fracción gruesa procedente de residuos pétreos y 3191 toneladas procedentes de residuos no pétreos, haciendo un total de 18181 toneladas de árido grueso, las cuales son enviadas al tamiz por flujo de aire.
- 20010 toneladas de fracción fina y all-in-one procedente de residuos pétreos y 1146 toneladas procedentes de residuos no pétreos, haciendo un total de 21156 toneladas de árido fino y all-in-one, que continúan el proceso de reciclaje hacia la espiral.

9. Separación por densidad en la espiral de los residuos de las fracciones fina y all-in-one

La función de la espiral consiste en limpiar la fracción fina pétreo de aquellos materiales que pueden resultar perjudiciales para el acabado final. Esto quiere decir separar los residuos no pétreos de los pétreos.

Esto se consigue gracias a la diferencia de densidad entre los materiales. Se moja la mezcla de residuos que circula por la espiral y la fuerza centrífuga separa la trayectoria en dos corrientes. Una corriente densa, superior a 2000 kg/m³ (residuos pétreos) con los materiales pesados y otra menos densa con los materiales menos pesados y gran parte de agua.

En la Tabla 20 se muestra el proceso de separación realizado en la espiral sobre la fracción fina y la fracción all-in-one de las corrientes de residuos no pétreos.

Tabla 20. Separación en la espiral de las corrientes de residuos de baja densidad

Descripción	Entrada espiral			Salida espiral			
	Tamaño de partícula mm	Cantidad Ton	Densidad kg/m ³	Corriente alta densidad % Separación	Corriente baja densidad Ton	% Separación	Ton
Madera	0,063 < Fino < 4 mm	170	800	0	0	100	170
	2 mm > All-in-one	20	800	0	0	100	20
Vidrio	0,063 < Fino < 4 mm	50	2500	90	45	10	5
	2 mm > All-in-one	10	2500	90	9	10	1
Plástico	0,063 < Fino < 4 mm	89	1200	0	0	100	89
	2 mm > All-in-one	15	1200	0	0	100	15
Yeso de construcción	0,063 < Fino < 4 mm	22	2400	90	19	10	2
	2 mm > All-in-one	4	2400	90	4	10	0
Material aislante	0,063 < Fino < 4 mm	398	600	0	0	100	398
	2 mm > All-in-one	70	600	0	0	100	70
Embalaje mezclado	0,063 < Fino < 4 mm	238	900	0	0	100	238
	2 mm > All-in-one	40	900	0	0	100	40
Empaques de papel y cartón	0,063 < Fino < 4 mm	17	900	0	0	100	17
	2 mm > All-in-one	3	900	0	0	100	3
Total		1146			77		1069

Como se puede ver en la Tabla 20, a la salida de la espiral, se obtienen dos corrientes de residuos diferentes:

- 1069 toneladas de residuos no pétreos de baja densidad, las cuales se descartan para la elaboración de productos reciclados y son almacenadas para su vertido.
- 77 toneladas de una corriente húmeda pétreo de alta densidad que se aprovecha para la elaboración de áridos reciclados cerámicos de baja calidad.

Por otra parte, la fracción pétreo que no recibe este tipo de tratamiento y que forma una mezcla pétreo de residuos limpia de 20010 toneladas se destina para la elaboración de áridos cerámicos reciclados de calidad media.

10. Separación por densidad en tamiz por flujo de aire de la fracción gruesa

El tamiz por flujo de aire se emplea para separar los materiales de baja densidad de la corriente principal. Este proceso solo se aplica al lote de residuos no pétreos, debido a que es el único con una proporción alta de residuos de baja densidad.

Funciona mediante el empleo de ventiladores que soplan aire a través del flujo de residuos para extraer materiales de baja densidad como el papel, cartón, plásticos y madera. Se considera una separación del 80%, ya que las partículas de los materiales mencionados se pueden quedar atrapadas entre otros tipos de residuos.

En la Tabla 21 se muestra el proceso de separación en el tamiz por flujo de aire de las corrientes de residuos no pétreos de baja densidad

Tabla 21. Separación por tamiz de flujo de aire de las corrientes de residuos no pétreos de baja densidad

Descripción	Tamaño de partícula	Tamizado por flujo de aire			
		Ton	% Separación	Ton extraídas	Ton restantes
Madera	Grueso > 4 mm	598	80	479	120
Plástico	Grueso > 4 mm	238	80	190	48
Material aislante	Grueso > 4 mm	1520	80	1216	304
Embalaje mezclado	Grueso > 4 mm	634	80	507	127
Empaques de papel y cartón	Grueso > 4 mm	56	80	45	11
Total		3046		2437	609

Como se puede ver en la Tabla 21, un total de 2437 toneladas de materiales de baja densidad son extraídas de la corriente principal y almacenadas para su vertido. El resto de las toneladas pertenecientes a la fracción gruesa, un total de 15744, continúan el proceso de reciclaje en la wet jig.

11-12. Separación por densidad mediante wet jig de la fracción gruesa

Al igual que las máquinas utilizadas anteriormente, este equipo funciona teniendo en cuenta las distintas densidades de los materiales. Su función consiste en la depuración de corrientes de residuos gruesas.

Este proceso consta de dos fases. La primera se utiliza para separar el hormigón del resto de materiales y se obtienen dos corrientes de salida. El hormigón que es reintroducido al

equipo y una corriente mayoritariamente de materiales cerámicos que sale del proceso. En la segunda fase se separa el hormigón reintroducido del yeso.

En la Tabla 22 se muestra la primera y segunda fase de separación realizada en la wet jig para las corrientes de residuos pétreos.

Tabla 22. Separación en la wet jig de la fracción gruesa las corrientes de residuos pétreos.

Descripción	Entrada			Primera etapa			Segunda etapa		
	Tamaño de partícula mm	Cantidad Ton	Densidad kg/m ³	Separación %	Hormigón Ton	Cerámicos Ton	Separación %	Hormigón Ton	Yeso Ton
Hormigón	Grueso > 4 mm	2580	2500	99,4	2565	15	90	2308	256
Ladrillos	Grueso > 4 mm	8170	2200	10	817	7353	5	41	776
Azulejos y cerámicos	Grueso > 4 mm	3440	2200	10	344	3096	5	17	327
Arena, grava y otros agregados	Grueso > 4 mm	800	2000	5	40	760	5	2	38
Total		14990			3766	11224		2368	1397

Como se puede observar en la Tabla 22, se consiguen separar un total de 11224 toneladas de residuos en la primera etapa. Esta corriente está conformada principalmente por materiales aislantes cerámicos y se destina a la elaboración de áridos cerámicos de calidad media.

En la segunda etapa se obtiene una corriente de hormigón más pura. Se consiguen separar 1397 toneladas de residuos de la corriente de hormigón, que forman una corriente húmeda con características similares al yeso, la cual es almacenada para su vertido. Las 2368 toneladas de hormigón restante se emplean en la elaboración de hormigón reciclado de calidad media.

En la Tabla 23 se muestra la primera y segunda fase de separación realizada en la wet jig para las corrientes de residuos no pétreos.

Tabla 23. Separación en la wet jig de la fracción gruesa las corrientes de residuos no pétreos.

Descripción	Entrada			Primera etapa			Segunda etapa		
	Tamaño de partícula mm	Cantidad Ton	Densidad kg/m ³	Separación %	Hormigón Ton	Cerámicos Ton	Separación %	Hormigón Ton	Yeso Ton
Madera	Grueso > 4 mm	120	800	5	6	113,7	5	0,3	5,7
Vidrio	Grueso > 4 mm	115	2500	99,4	114	0,7	90	102,9	11,4
Plástico	Grueso > 4 mm	48	1200	5	2	45,1	6	0,1	2,2
Yeso de construcción	Grueso > 4 mm	30	2400	99,4	30	0,2	27,4	8,3	21,9
Material aislante	Grueso > 4 mm	304	600	5	15	288,9	5	0,8	14,4
Embalaje mezclado	Grueso > 4 mm	103	900	5	5	98,2	5	0,3	4,9
Empaques de papel y cartón	Grueso > 4 mm	11	500	5	1	10,6	5	0,0	0,5
Total		731			174	557,4		112,6	61,2

En el caso de los residuos no pétreos, en la primera etapa se separan 557 toneladas (Tabla 23) de residuos de materiales ligeros con menor proporción de cerámicos que en el caso de los residuos pétreos. Esto supone una menor calidad en el resultado final de los áridos cerámicos reciclados.

En la segunda etapa se extraen 61 toneladas de residuos de la corriente principal, las cuales forman el yeso de salida. Las 112 toneladas de hormigón restantes se emplean para la elaboración de hormigón reciclado de baja calidad.

En la figura 4 se muestra un diagrama de flujo cuantitativo de una planta avanzada de reciclaje de RCDs.

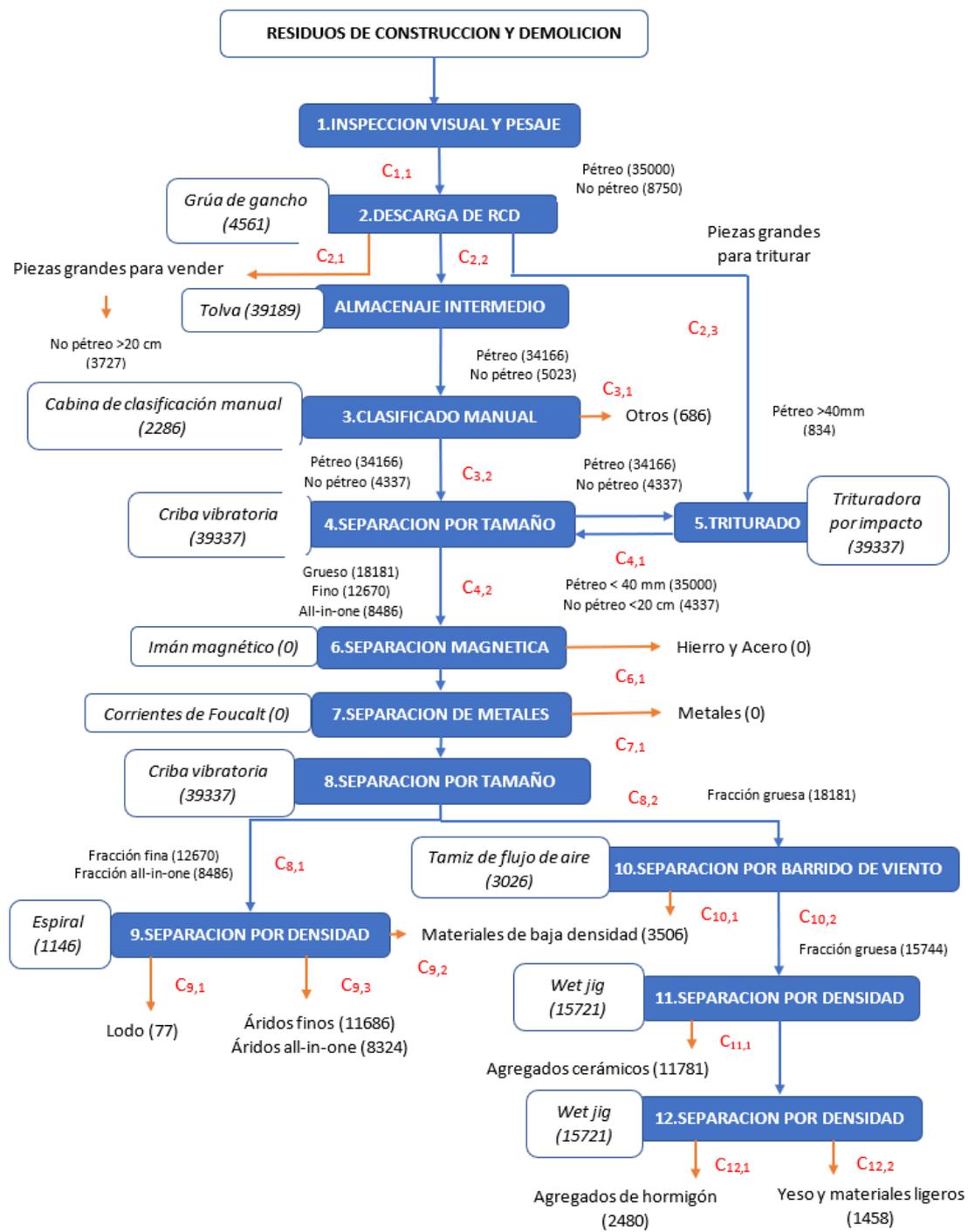


Figura 4. Diagrama de flujo cuantitativo de una planta de reciclaje avanzada de RCDs

