



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



*Estudio de alternativas de tratamiento y  
eliminación de residuos sólidos urbanos.  
Aplicación a un plan zonal de gestión de  
la Comunidad Valenciana*

**Memoria**

**Trabajo final de máster**

*Titulación:* Máster Universitario en Ingeniería de Caminos Canales y Puertos

Curso: 2016/17

*Autor:* Salvador Bleda Quílez

*Tutor:* Javier Rodrigo Ilarri

*Cotutora:* María Elena Rodrigo Clavero

*Valencia, 22 de mayo de 2017*

## Contenido

Tabla de ilustraciones.....	3
I. Introducción y objetivos.....	6
II. Legislación de aplicación: europea, estatal y autonómica.....	8
1. Introducción .....	8
2. Listado .....	9
3. Aspectos destacables .....	13
III. Descripción de los residuos sólidos urbanos.....	17
1. Panorama general y objetivos.....	17
1.1. Residuos domésticos y comerciales.....	18
1.2. Envases.....	24
1.3. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) .....	24
1.4. Pilas y acumuladores.....	25
1.5. PCB's y PCT's y aparatos que los contienen .....	25
1.6. Residuos sanitarios.....	26
2. RSU del Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante (PZ11 – AGA6).....	27
IV. Identificación de las técnicas de gestión de RSU disponibles .....	38
1. Introducción .....	38
2. Descripción de técnicas.....	40
2.1. Incineración de residuos .....	40
2.1.1. Proceso térmico .....	44
2.1.2. Recuperación de energía .....	49
2.1.3. Tratamiento de los gases de combustión .....	49
2.1.4. Tratamiento y control de aguas residuales.....	50
2.1.5. Tratamiento y control de residuos sólidos .....	51
2.2. Tratamiento mecánico de residuos.....	53
2.2.1. Trituradoras de metal .....	53
2.2.2. Trituradoras de equipos que contienen VFCs o VHCs .....	54
2.2.3. Tratamiento mecánico de residuos con valor calorífico.....	55
2.3. Tratamiento biológico de residuos.....	56

2.3.1.	Tratamiento aerobio de residuos .....	56
2.3.2.	Tratamiento anaerobio de residuos (digestión anaerobia).....	58
2.4.	Tratamiento mecánico-biológico de residuos (MBT).....	61
2.5.	Tratamiento físico-químico de residuos.....	62
2.5.1.	Tratamiento F-Q de residuos sólidos y/o pastosos .....	62
2.5.2.	Re-refino de aceite usado.....	64
2.5.3.	Tratamiento F-Q de residuos con valor calorífico.....	65
2.5.4.	Regeneración de solventes residuales.....	67
2.5.5.	Recuperación de los residuos de reducción de contaminación y FGT.....	68
2.5.6.	Tratamiento F-Q y/o biológico de residuos líquidos/bombeables .....	71
2.5.7.	Tratamiento F-Q de residuos con POPs .....	72
2.5.8.	Tratamiento F-Q de residuos con mercurio.....	73
2.5.9.	Regeneración de ácidos .....	73
V.	Análisis comparativo y aplicación de las técnicas disponibles .....	75
VI.	Aplicación práctica al Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante (PZ11 – AGA6) .....	78
1.	Definición del problema y determinación de los objetivos .....	78
2.	Identificación de criterios.....	78
3.	Identificación de alternativas.....	80
4.	Cálculo de los pesos relativos.....	80
5.	Comparación de alternativas y orden de preferencias.....	87
VII.	Conclusiones y futuras líneas de investigación .....	104
	Bibliografía y fuentes de información .....	107

## Tabla de ilustraciones

<i>Ilustración 1: jerarquía para la gestión de residuos según</i>	14
<i>Ilustración 2: evolución de la generación de residuos 2004-2012 en España. Eurostat</i>	17
<i>Ilustración 3: generación de residuos por actividad económica en 2012. Eurostat</i>	18
<i>Ilustración 4: evolución generación de residuos municipales</i>	18
<i>Ilustración 5: evolución cantidades de residuos municipales recogidos separadamente por materiales</i>	19
<i>Ilustración 6: evolución cantidades tratadas según operaciones de tratamiento</i>	19
<i>Ilustración 7: evolución del número de instalaciones de tratamiento según operación</i>	19
<i>Ilustración 8: composición promedio de los residuos de competencia municipal</i>	20
<i>Ilustración 9: composición promedio de la fracción papel</i>	20
<i>Ilustración 10: composición promedio de la fracción de envases ligeros</i>	20
<i>Ilustración 11: composición promedia de la fracción envases de vidrio</i>	21
<i>Ilustración 12: promedio de la fracción de biorresiduos (modelo 5 fracciones)</i>	21
<i>Ilustración 13: promedio de la fracción de biorresiduos (modelo húmedo-seco)</i>	22
<i>Ilustración 14: composición promedio de la fracción resto</i>	22
<i>Ilustración 15: composición promedio de la fracción resto por materia</i>	22
<i>Ilustración 16: tratamiento de residuos de competencia municipal (2012)</i>	23
<i>Ilustración 17: tratamiento de residuos de competencia municipal por CCAA en 2012 (t)</i>	23
<i>Ilustración 18: situación en 2012 y objetivos de reciclado para 2020</i>	24
<i>Ilustración 19: objetivos de reciclado de residuos de envases para 2020</i>	24
<i>Ilustración 20: objetivos de recogida separada</i>	25
<i>Ilustración 21: población y superficie de los municipios de la Vega Baja</i>	27
<i>Ilustración 22: mapa de los planes zonales de gestión</i>	28
<i>Ilustración 23: mapa de la Vega Baja, comarca del PZ11 – AGA6</i>	29
<i>Ilustración 24: distribución espacial de la población residente en la Vega Baja</i>	30
<i>Ilustración 25: carga poblacional de los no residentes vinculados a la Vega Baja en 2011. Tabla</i>	31
<i>Ilustración 26: carga poblacional de los no residentes vinculados a la Vega Baja en 2011. Gráfico</i>	31
<i>Ilustración 27: distribución espacial de la población residente y vinculada en la Vega Baja</i>	32
<i>Ilustración 28: oferta turística en la Vega Baja en 2015</i>	33
<i>Ilustración 29: grados de ocupación turística de la Costa Blanca 1999(2005)-2016. INE</i>	33
<i>Ilustración 30: carga poblacional por turismo en la Vega Baja en 2014</i>	34
<i>Ilustración 31: carga población total para la Vega Baja 2012-2035</i>	34
<i>Ilustración 32: carga poblacional del Plan Zonal 11 – AGA6 para el período 2011-2035</i>	35
<i>Ilustración 33: producción de residuos en la Comunidad Valenciana 2010-2014</i>	35
<i>Ilustración 34: producción de residuos domésticos en la Comunidad Valenciana 1998-2009</i>	35
<i>Ilustración 35: población residente y vinculada a la Comunidad Valenciana 2011</i>	36
<i>Ilustración 36: producción de residuos por persona y año en la Comunidad Valenciana</i>	36
<i>Ilustración 37: producción residuos Plan Zonal Vega Baja PZ11 - AGA6</i>	37

<i>Ilustración 38: producción residuos Plan Zonal Vega Baja PZ11 - AGA6. Gráfico</i>	37
<i>Ilustración 39: esquema de una planta incineradora de residuos tipo</i>	40
<i>Ilustración 40: efectos de la selección y pretratamiento de residuos durante la incineración</i>	44
<i>Ilustración 41: rangos de aplicación típicos de las tecnologías de tratamiento térmico</i>	44
<i>Ilustración 42: grado de éxito de aplicación de distintas técnicas de combustión de RSU</i>	45
<i>Ilustración 43: sistemas de parrilla incineradora</i>	46
<i>Ilustración 44: rendimientos energéticos de las distintas técnicas de tratamiento térmico</i>	48
<i>Ilustración 45: combinaciones de tratamiento de gases de combustión</i>	50
<i>Ilustración 46: trituradora de metal de 4 ejes</i>	53
<i>Ilustración 47: tratamientos biológicos de residuos y sus destinos</i>	56
<i>Ilustración 48: planta de compostaje de RSU tipo</i>	57
<i>Ilustración 49: pasos del proceso de digestión anaerobia</i>	59
<i>Ilustración 50: planta de biometanización de residuos tipo</i>	59
<i>Ilustración 51: esquema de una planta de tratamiento MBT de residuos</i>	61
<i>Ilustración 52: reactivos inmovilizantes y su aplicación en residuos</i>	63
<i>Ilustración 53: tratamientos y resultados del uso de aceites usados como combustible</i>	67
<i>Ilustración 54: residuos líquidos y tratamientos aplicables</i>	72
<i>Ilustración 55: esquema de la estructura del mecanismo de decisión multicriterio AHP</i>	76
<i>Ilustración 56: RCIs para las 15 primeras dimensiones</i>	76
<i>Ilustración 57: significados de la cuantificación de preferencias de Saaty</i>	81
<i>Ilustración 58: matriz de valoración de criterios</i>	81
<i>Ilustración 59: matriz de valoración de criterios. Representación alternativa</i>	81
<i>Ilustración 60: clasificación de criterios</i>	82
<i>Ilustración 61: matriz de valoración medioambiental de alternativas</i>	83
<i>Ilustración 62: matriz de valoración medioambiental de alternativas. Representación alternativa</i>	83
<i>Ilustración 63: matriz de valoración sociocultural de alternativas</i>	84
<i>Ilustración 64: matriz de valoración sociocultural de alternativas. Representación alternativa</i>	84
<i>Ilustración 65: matriz de valoración económica de alternativas</i>	85
<i>Ilustración 66: matriz de valoración económica de alternativas. Representación alternativa</i>	85
<i>Ilustración 67: matriz de valoración técnica de alternativas. Representación alternativa</i>	86
<i>Ilustración 68: matriz de valoración técnica de alternativas. Representación alternativa</i>	86
<i>Ilustración 69: matriz y clasificación final de alternativas</i>	87
<i>Ilustración 70: clasificación final de alternativas, y representación normalizada</i>	88
<i>Ilustración 71: análisis de sensibilidad 1</i>	89
<i>Ilustración 72: análisis de sensibilidad 2</i>	90
<i>Ilustración 73: análisis de sensibilidad 3</i>	91
<i>Ilustración 74: análisis de sensibilidad 4</i>	92
<i>Ilustración 75: análisis de sensibilidad 5</i>	93

<i>Ilustración 76: análisis de sensibilidad 6</i>	94
<i>Ilustración 77: análisis de sensibilidad 7</i>	95
<i>Ilustración 78: análisis de sensibilidad 8</i>	96
<i>Ilustración 79: análisis de sensibilidad 9</i>	97
<i>Ilustración 80: análisis de sensibilidad 10</i>	98
<i>Ilustración 81: análisis de sensibilidad 11</i>	99
<i>Ilustración 82: análisis de sensibilidad 12</i>	100
<i>Ilustración 83: análisis de sensibilidad 13</i>	101
<i>Ilustración 84: análisis de sensibilidad 14</i>	102
<i>Ilustración 85: análisis de sensibilidad 15</i>	103
<i>Ilustración 86: producción residuos Plan Zonal Vega Baja PZ11 - AGA6, 2011-2035</i>	105
<i>Ilustración 87: clasificación final de alternativas</i>	106

# I. Introducción y objetivos

---

La época en la que vivimos podría caracterizarse por la implantación definitiva de una serie de realidades que están provocando los cambios más drásticos a los ritmos más vertiginosos nunca ocurridos en la Historia, tanto de nuestra especie en particular como del Universo en general. Estas realidades podrían englobarse en dos conceptos fundamentales: la Globalización del Comercio y el surgimiento y democratización de las Tecnologías de la Información y Comunicación.

Ambas realidades, íntimamente relacionadas e interdependientes, han cambiado los patrones de comportamiento y consumo de la sociedad actual. El caso del acceso a nuevas formas y fuentes de información puede ser un ejemplo paradigmático modulador de dichos patrones. Pero al mismo tiempo, estos rápidos cambios no planificados están afectando negativamente tanto a la Sociedad como al Medio Ambiente.

Una de esas afecciones es el repentino crecimiento de los consumos de materiales y de recursos (incluso llegando a acuñarse el término “Sociedad del Consumo”) y el consecuente incremento de deshechos tras la fabricación o uso de dichos productos.

La falta de planificación ante el repentino estallido consumista, comentada anteriormente, supuso y sigue suponiendo la necesidad de una permanente investigación y mejora en el campo de la prevención y gestión de residuos. Hasta este momento, la principal gestión de residuos ha sido el mero depósito en vertedero (no pocas veces incumpliendo la propia normativa sobre vertidos). No obstante, durante estos últimos años –especialmente a raíz de la entrada de España en la Unión Europea- se está cambiando (o al menos intentándolo) esta tendencia promoviendo la filosofía de la Economía Circular mediante la Jerarquía de Residuos.

Si bien es cierto que el territorio español, por su gran tamaño y escasos núcleos de población, es tremendamente propicio para el establecimiento de vertederos legales, esta técnica no nos ayuda a conseguir una Economía Circular. Por ello, tanto la simple conciencia medioambiental como el cumplimiento normativo nos empujan a dirigir nuestros esfuerzos hacia técnicas más ecológicas y que hagan un mejor aprovechamiento de los recursos.

Por otra parte, las distintas tipologías de residuos producidos obligan a una gestión diferenciada de los mismos. Así, el presente estudio se centra en la Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) dejando fuera otros tipos como sanitarios, pilas y acumuladores, aparatos eléctricos y electrónicos (AEEs)...

Es en este marco en el que se engloba el presente trabajo de investigación que persigue conocer la Mejor Técnica Disponible de gestión de residuos aplicable al Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante, cuya población empadronada ronda los 350.000 habitantes.

Para ello, el presente estudio de alternativas se divide en los siguientes apartados:

- I. Introducción y objetivos. Es el presente apartado, en el que se expone el tema a tratar, el objeto del mismo y una exposición de su estructura y de la metodología a seguir.
- II. Legislación de aplicación: europea, estatal y autonómica. Se recoge la normativa de relevancia en el campo de la gestión de residuos sólidos urbanos y además se recogen algunos aspectos clave de la misma.
- III. Descripción de los residuos sólidos urbanos. Consta de dos partes; en la primera se da un vistazo general de los residuos en España: composición, proporción, evolución, grado de cumplimiento en la gestión, etc. En la segunda se trata específicamente los RSU del Plan Zonal del estudio, estimando la cantidad de residuos a gestionar durante la vida útil de la instalación, basándonos en proyecciones de población y de producción *per capita*.
- IV. Identificación de las técnicas de gestión de RSU disponibles. Es el apartado más extenso; en él se identifican las actuales técnicas de gestión existentes y contrastadas, así como una amplia descripción de cada una de ellas. Encontramos tratamientos térmicos (distinguiendo dentro de él entre incineración, pirólisis y gasificación), mecánicos, biológicos (aerobio o compostaje y anaerobio o biometanización), tratamientos MBT y tratamientos físico-químicos.
- V. Análisis comparativo y aplicación de las técnicas disponibles. Es una descripción teórica de la metodología a seguir en el último apartado.
- VI. Aplicación práctica al Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante (PZ11 – AGA6). Se aplica la metodología expuesta en el apartado anterior para desvelar cuál es la mejor opción de gestión de RSU para el plan zonal. Se exponen las conclusiones y se indican futuras líneas de investigación.

## II. Legislación de aplicación: europea, estatal y autonómica

---

### 1. Introducción

Al contrario que en otras partes del mundo, el Estado español tiene la fortuna de ser miembro de una organización supraestatal referente mundial en temas de progreso social y respeto hacia el Medio Ambiente como es la Unión Europea. Esto nos permite disponer de valiosa información acerca de la prevención y gestión de residuos, tanto urbanos como de otros tipos.

Existe una profusión de normativa al respecto que a continuación se detalla, no exhaustivamente, distinguiendo por cada una el ámbito normativo (europeo, estatal o autonómico) del que procede y si se encargan de la gestión de residuos en sí o del control de contaminación. Es importante también indicar la distinta relevancia de unos textos con respecto a otros en lo que a relación con los residuos sólidos urbanos (en adelante RSU) se refiere. Es más bien una causa de la tremenda variedad que presenta este tipo de residuos con respecto a otros, más acotados (como pueden ser, por ejemplo, los residuos clínicos peligrosos procedentes de hospitales, perfectamente caracterizados) y con normativas más específicas.

## 2. Listado

En lo referente a normativa europea podemos encontrar, en orden de importancia y relación con los RSU:

- Decisión nº 1386/2013/UE, de 20 de noviembre de 2013, relativa al **VII Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente hasta 2020** «Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta».
- Directiva 2008/98/CE, de 19 de noviembre de 2008, sobre los **residuos** y por la que se derogan determinadas Directivas.
- Reglamento (UE) nº 1357/2014, de 18 de diciembre de 2014, por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE.
- Decisión, de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la **lista de residuos**, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE.
- Reglamento (CE) nº 1013/2006, de 14 de junio de 2006, relativo a los **traslados de residuos**.
- Reglamento (UE) nº 660/2014, de 15 de mayo de 2014, por el que se modifica el Reglamento (CE) nº 1013/2006.
- Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999, relativa al **vertido de residuos**.
- Directiva 94/62/CE, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los **envases y residuos de envases**.
- Directiva 2004/12/CE, de 11 de febrero de 2004, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE.
- Directiva 2005/20/CE, de 9 de marzo de 2005, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE.
- Directiva 2006/66/CE, de 6 de septiembre de 2006, relativa a las **pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores**.
- Directiva 2008/12/CE, de 11 de marzo de 2008, que modifica la Directiva 2006/66/CE.
- Directiva 2008/103/CE, de 19 de noviembre de 2008, que modifica la Directiva 2006/66/CE.
- Directiva 2013/56/UE, de 20 de noviembre de 2013, por la que se modifica la Directiva 2006/66/CE.
- Directiva 2012/19/UE, de 4 de julio de 2012, sobre **residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)**.
- Directiva 75/439/CEE, de 16 de junio de 1975, relativa a la gestión de **aceites usados**.
- Directiva 87/101/CEE, de 22 de diciembre de 1986, por la que se modifica la Directiva 75/439/CEE.
- Directiva 96/59/CE, de 16 de septiembre de 1996, relativa a la **eliminación de los policlorobifenilos y de los policloroterfenilos (PCB/PCT)**.

También en el ámbito europeo, y respecto de la prevención de contaminación de atmósfera, aguas y suelo:

- Directiva 2008/50/CE, de 21 de mayo de 2008, relativa a la **calidad del aire ambiente** y a una atmósfera más limpia en Europa.
- Directiva 2010/75/UE, de 24 de noviembre de 2010, sobre las **emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación)**.
- Directiva 2000/76/CE, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la **incineración de residuos**.
- Directiva 2004/107/CE, de 15 de diciembre de 2004, relativa al **arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente**.
- Directiva 2004/35/CE, de 21 de abril de 2004, sobre **responsabilidad medioambiental** en relación con la **prevención y reparación de daños medioambientales**.

Para el caso español:

- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos **PEMAR 2016-2022**.
- Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de **residuos y suelos contaminados**.
- Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002 y la Ley 22/2011.
- Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de **actividades potencialmente contaminantes del suelo** y los **criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados**.
- Corrección de errores de la Orden MAM/304/2002, por la que se publican las **operaciones de valorización y eliminación de residuos y lista europea de residuos**.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante **depósito en vertedero**.
- Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001.
- Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001.
- Real Decreto 180/2015, de 13 de marzo, por el que se regula el **traslado de residuos** en el interior del Estado.
- Ley 11/1997, de 24 de abril, de **envases y residuos de envases**.
- Real Decreto 782/1998, de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997.
- Real Decreto 1378/1999, de 27 de agosto, por el que se establecen medidas para la gestión y eliminación de los policlorobifenilos, policloroterfenilos y aparatos que los contengan (**PCB/PCT**).
- Real Decreto 106/2008, de 1 de febrero, sobre **pilas y acumuladores** y la gestión ambiental de sus residuos.
- Real Decreto 943/2010, de 23 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 106/2008.
- Real Decreto 710/2015, de 24 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 106/2008.
- Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre **residuos de aparatos eléctricos y electrónicos**.

- Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se prueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, Básica de **Residuos Tóxicos y Peligrosos**.
- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de **residuos de construcción y demolición**.
- Ley 26/2007, de 23 de octubre, de **Responsabilidad Medioambiental**.
- Real Decreto 2090/2008, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007.
- Corrección de errores del Real Decreto 2090/2008.

En relación con la protección de atmósfera, aguas y suelo español:

- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de **calidad del aire y protección a la atmosfera**.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la **calidad del aire**.
- Real Decreto 678/2014, de 1 de agosto, por el que se modifica el Real Decreto 102/2011.
- Ley 16/2002, de 1 de julio, de **prevención y control integrados de la contaminación**.
- Real Decreto 509/2007, de 20 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 16/2002.
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el **Reglamento de emisiones industriales** y de desarrollo de la Ley 16/2002.
- Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de **emisiones** a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de **grandes instalaciones de combustión**, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo.
- Real Decreto 687/2011, de 13 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 430/2004.

Finalmente, y para el caso de la legislación de ámbito autonómico de la Comunidad Valenciana:

- Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de **residuos** de la Comunidad Valenciana.
- Decreto 81/2013, de 21 de junio, de aprobación definitiva del Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (**PIRCV**).
- Orden 26/2014, de 30 de octubre, por la que se aprueba el documento de desarrollo de **medidas** articuladas en el **Programa de Prevención del PIRCV**.
- Orden 3/2013, de 25 de febrero, por la que se publica la **relación de residuos susceptibles de valorización** a los efectos del impuesto sobre eliminación de residuos en vertederos.
- Orden de 5 de diciembre de 2002, por la que se regula el **modelo de la Declaración Anual de envases y residuos de envases**.
- Decreto Ley 4/2016, de 10 de junio, por el que se establecen **medidas urgentes** para garantizar la gestión de **residuos municipales**.
- Orden 11/2012, de 26 de diciembre, por la que se regula el **censo de instalaciones y contribuyentes** y se establecen las **declaraciones de alta, modificación y cese** de las actividades sujetas al **impuesto sobre actividades que inciden en el medio ambiente**.

- Orden 12/2012, de 26 de diciembre, por la que se regula el **censo de titulares** de la explotación de **vertederos** públicos o privados de la Comunidad Valenciana y se establecen las declaraciones de **alta, modificación y cese** de la actividad de explotación de vertederos para la gestión del **impuesto sobre eliminación de residuos en vertederos**.
- Decreto 135/2002, de 27 de agosto, por el que se aprueba el Plan de descontaminación y eliminación de **PCB**.

En relación con la protección de atmósfera, aguas y suelo valenciano:

- Decreto 161/2003, de 5 de septiembre, por el que se designa el **organismo competente** para la evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente y se crea la **Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica**.
- Ley 6/2014, de 25 de julio, de **prevención, calidad y control ambiental de actividades** en la C.V.
- Orden 9/2015, de 30 de marzo, por la que se aprueba el **protocolo de vigilancia y control** para la comprobación del cumplimiento de los requisitos de autorizaciones ambientales integradas y licencias ambientales en instalaciones de la C.V.
- Decreto 22/2015, de 13 de febrero, por el que se regulan las **funciones y el Registro de entidades colaboradoras en materia de calidad ambiental** de la C.V.
- Orden de 31 de enero de 2007, por la que se establece el **procedimiento para la comunicación de datos sobre emisiones** por parte de los titulares de instalaciones sometidas al anexo I de la ley 2/2006.

### 3. Aspectos destacables

En primer lugar comenzaremos detallando una serie de definiciones clave expuestas en la Directiva 2008/98/UE de residuos:

«**Residuo**»: cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse.

«**Gestión de residuos**»: la recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente.

«**Prevención**»: medidas adoptadas antes de que una sustancia, material o producto se haya convertido en residuo, para reducir:

- la cantidad de residuo, incluso mediante la reutilización de los productos o el alargamiento de la vida útil de los productos;
- los impactos adversos sobre el medio ambiente y la salud humana de la generación de residuos, o
- el contenido de sustancias nocivas en materiales y productos.

«**Reutilización**»: cualquier operación mediante la cual productos o componentes que no sean residuos se utilizan de nuevo con la misma finalidad para la que fueron concebidos.

«**Tratamiento**»: las operaciones de valorización o eliminación, incluida la preparación anterior a la valorización o eliminación.

«**Valorización**»: cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general.

«**Reciclado**»: toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.

«**Eliminación**»: cualquier operación que no sea la valorización, incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía.

Si hubiera que rescatar una simple idea de todo el maremágnum normativo listado en el punto anterior, sin duda sería la **JERARQUÍA DE RESIDUOS** expuesta en el artículo 4 de dicha Directiva y que representa en sí misma la filosofía medioambiental de toda la política de gestión de residuos europea.



Ilustración 1: jerarquía para la gestión de residuos según la Normativa Marco de Residuos de la Unión Europea

También se identifican otros principios importantes como el de **autosuficiencia y proximidad**, el de acceso a la **información y participación** o el de quien contamina paga/**responsabilidad ampliada del productor**.

Los dos primeros anexos a esta Directiva también pueden ser considerados relevantes. El primero detalla las OPERACIONES DE ELIMINACIÓN:

- D 1 Depósito sobre el suelo o en su interior (vertido...)
- D 2 Tratamiento en medio terrestre (biodegradación de residuos líquidos o lodos en el suelo...)
- D 3 Inyección en profundidad (inyección de residuos bombeables en pozos, minas de sal o fallas geológicas naturales...)
- D 4 Embalse superficial (vertido de residuos líquidos o lodos en pozos, estanques o lagunas...)
- D 5 Vertido en lugares especialmente diseñados (colocación en celdas estancas separadas, recubiertas y aisladas entre sí y el medio ambiente)
- D 6 Vertido en el medio acuático, salvo en el mar
- D 7 Vertido en el mar, incluida la inserción en el lecho marino
- D 8 Tratamiento biológico no especificado en otros apartados del presente anexo que dé como resultado compuestos o mezclas que se eliminen mediante cualquiera de las operaciones numeradas de D 1 a D 12

- D 9 Tratamiento fisicoquímico no especificado en otro apartado del presente anexo y que dé como resultado compuestos o mezclas que se eliminen mediante uno de los procedimientos numerados de D 1 a D 12 (evaporación, secado, calcinación...)
- D 10 Incineración en tierra
- D 11 Incineración en el mar (PROHIBIDA)
- D 12 Almacenamiento permanente (colocación de contenedores en una mina...)
- D 13 Combinación o mezcla previa a cualquiera de las operaciones D 1 a D 12
- D 14 Reenvasado previo a cualquiera de las operaciones D 1 a D 13
- D 15 Almacenamiento en espera de cualquiera de las operaciones D 1 a D 14 (excluido el almacenamiento temporal, en espera de recogida, en el lugar donde se produjo el residuo)

El segundo, las OPERACIONES DE VALORIZACIÓN:

- R 1 Utilización principal como combustible u otro modo de producir energía (incineradoras de RSU con eficiencia energética de al menos el 65%)
- R 2 Recuperación o regeneración de disolventes
- R 3 Reciclado o recuperación de sustancias orgánicas que no se utilizan como disolventes (incluidos el compostaje y otros procesos de transformación biológica)(se incluye aquí gasificación y pirólisis)
- R 4 Reciclado o recuperación de metales y de compuestos metálicos
- R 5 Reciclado o recuperación de otras materias inorgánicas (incluida limpieza de suelo para obtención de materiales de construcción)
- R 6 Regeneración de ácidos o de bases
- R 7 Valorización de componentes utilizados para reducir la contaminación
- R 8 Valorización de componentes procedentes de catalizadores
- R 9 Regeneración u otro nuevo empleo de aceites
- R 10 Tratamiento de los suelos que produzca un beneficio a la agricultura o una mejora ecológica de los mismos
- R 11 Utilización de residuos obtenidos a partir de cualquiera de las operaciones numeradas de R 1 a R 10
- R 12 Intercambio de residuos para someterlos a cualquiera de las operaciones enumeradas entre R 1 y R 11
- R 13 Almacenamiento de residuos en espera de cualquiera de las operaciones numeradas de R 1 a R 12 (excluido el almacenamiento temporal, en espera de recogida, en el lugar donde se produjo el residuo)

La Ley estatal 22/2011 transpone la Directiva y entre otras cosas asigna las competencias del Ministerio del ramo (Plan Nacional de Gestión de Residuos; objetivos mínimos de reducción, reutilización, reciclado, valorización; autorización traslados...), de las Comunidades Autónomas (planes autonómicos de prevención y gestión; autorizaciones, vigilancia, inspección y sanción; registro de información...) y de las Entidades Locales (recogida, transporte y tratamiento de RSU; vigilancia e inspección...).

También se recogen en el anexo III las características que permiten distinguir si un residuo es peligroso (explosivo, oxidante, fácilmente inflamable, inflamable, irritante, nocivo, tóxico, cancerígeno, corrosivo, infeccioso, tóxico para la reproducción, mutagénico, sensibilizante, ecotóxico).

El PEMAR 2106-2022 (Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos) hace referencia a las políticas marcadas por Bruselas en la Estrategia 2020 "Hoja de ruta hacia una Europa eficiente

en el uso de los recursos". En ellas cabe destacar la mención a la **Economía Circular**, de la que por supuesto la gestión y tratamiento de residuos es factor clave, así como la mención de varios de sus objetivos para 2020:

- ✓ Reducción de generación *per capita* de residuos
- ✓ Reciclado y reutilización como opciones económicamente atractivas
- ✓ Existencia de mercado para las materias primas secundarias
- ✓ Reciclado de alta calidad garantizado
- ✓ Valorización energética limitada a materiales NO reciclables
- ✓ Desaparición práctica del depósito en vertedero

Especial mención a la estimación de la Comisión Europea sobre creación de empleo relacionado sólo con el reciclaje, que cifra en 52000 de ellos para el caso español.

El Plan destaca también las novedades que introdujo la anteriormente citada Ley 22/2011:

- La jerarquía de residuos
- El objetivo de prevención con una reducción en 2020 del 10% respecto a 2010
- 50% en reutilización/reciclado para residuos domésticos y 70% en reutilización/reciclado y valorización para construcción/demolición para 2020
- Recogida separada antes de 2015 (al menos papel, plástico, vidrio y metales)
- Mejora de gestión de biorresiduos (recogida separada, tratamiento biológico...)
- Consideración de la incineración como operación de valorización
- Conceptos de subproducto y fin de condición de residuo
- Registro único de producción y gestión de residuos y transmisión telemática
- Posibilidad de cierres o paradas ante riesgos graves para M.A. y/o salud pública
- Marco legal común para la aplicación de la responsabilidad ampliada del productor
- Creación de la Comisión de coordinación en materia de residuos

### III. Descripción de los residuos sólidos urbanos

---

#### 1. Panorama general y objetivos

Volvemos a recurrir al PEMAR para conocer la situación actual (o al menos la más actualizada) en lo que a gestión de residuos se refiere. Como primeras informaciones, se adjuntan a continuación un gráfico con la evolución de generación de residuos en España entre los años 2004 y 2012, y la contribución de las distintas actividades a la generación de residuos en 2012. Los datos provienen de la agencia estadística europea Eurostat.

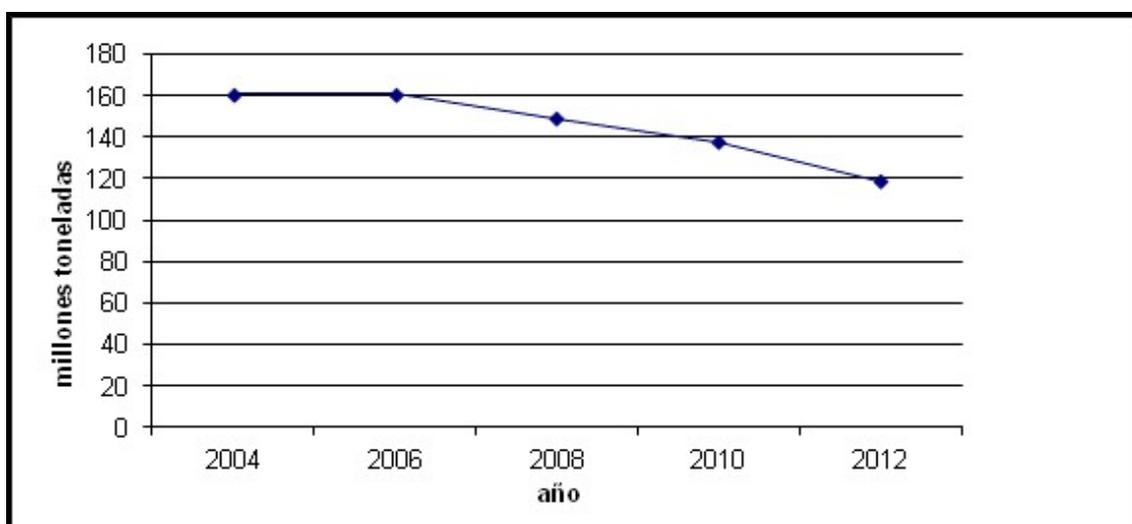


Ilustración 2: evolución de la generación de residuos 2004-2012 en España. Eurostat

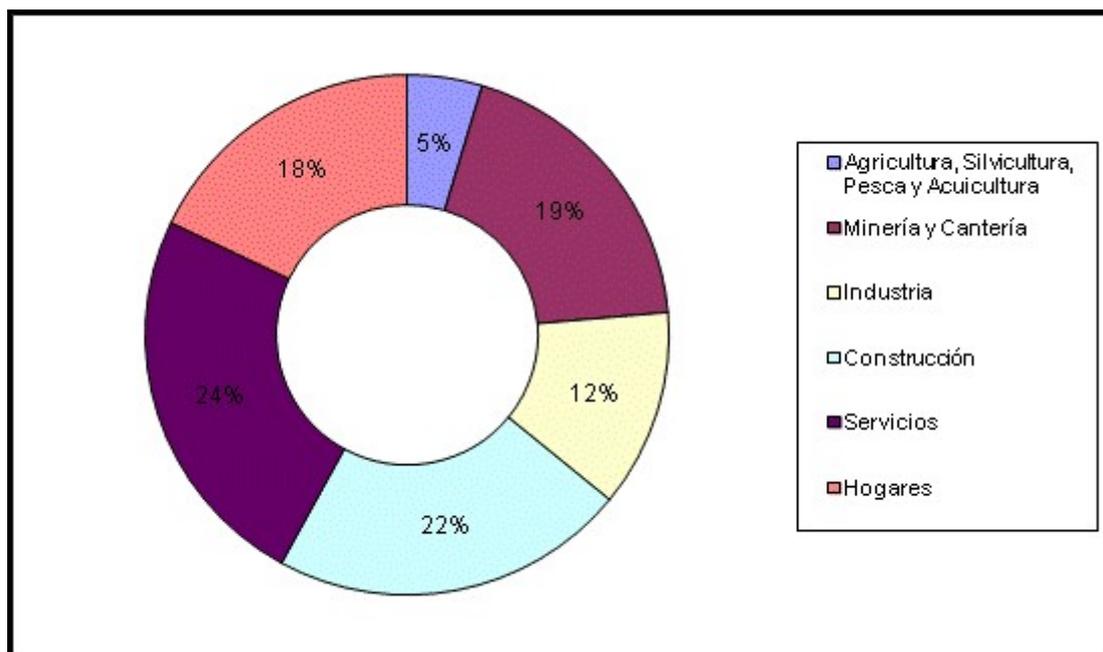


Ilustración 3: generación de residuos por actividad económica en 2012. Eurostat

Según Eurostat, en 2012 el 44% de los residuos se destinaron a vertedero a pesar de que, excepto en el caso de los residuos municipales, existen suficientes instalaciones de tratamiento de residuos.

### 1.1. Residuos domésticos y comerciales

A continuación se adjunta una serie de gráficos sobre la evolución de la gestión de residuos de competencia municipal.

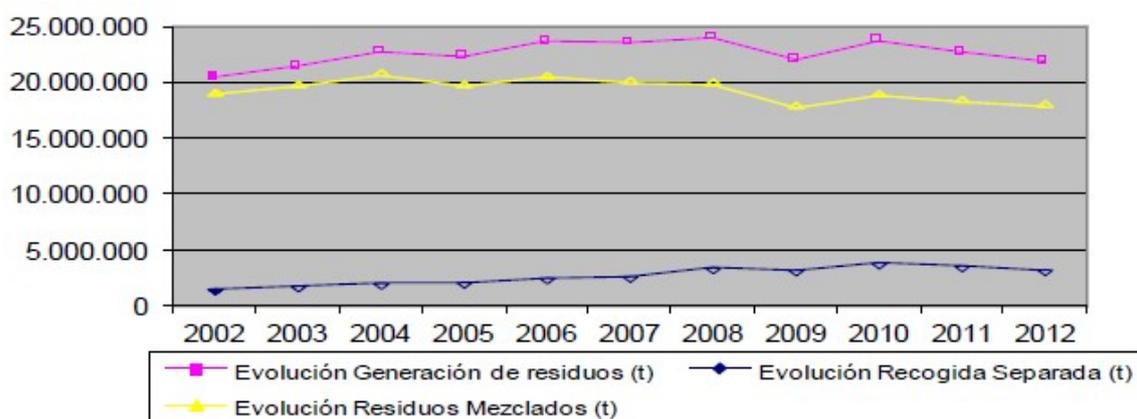


Ilustración 4: evolución generación de residuos municipales

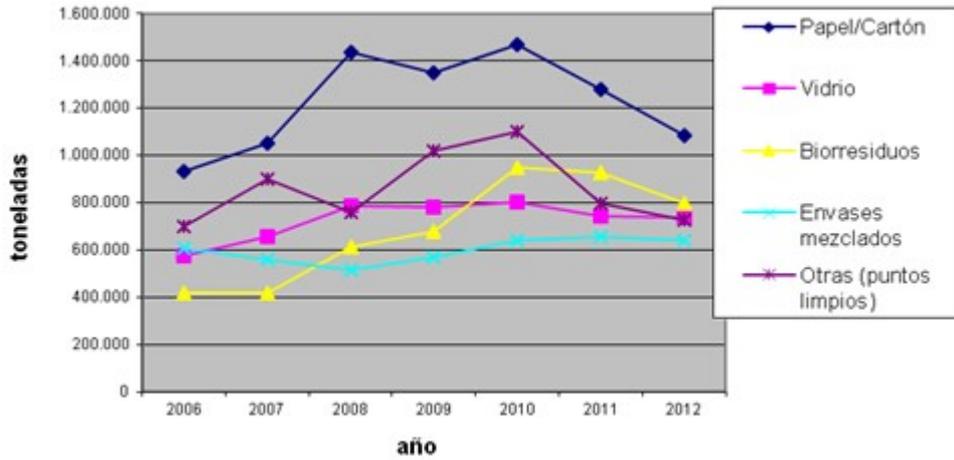


Ilustración 5: evolución cantidades de residuos municipales recogidos separadamente por materiales

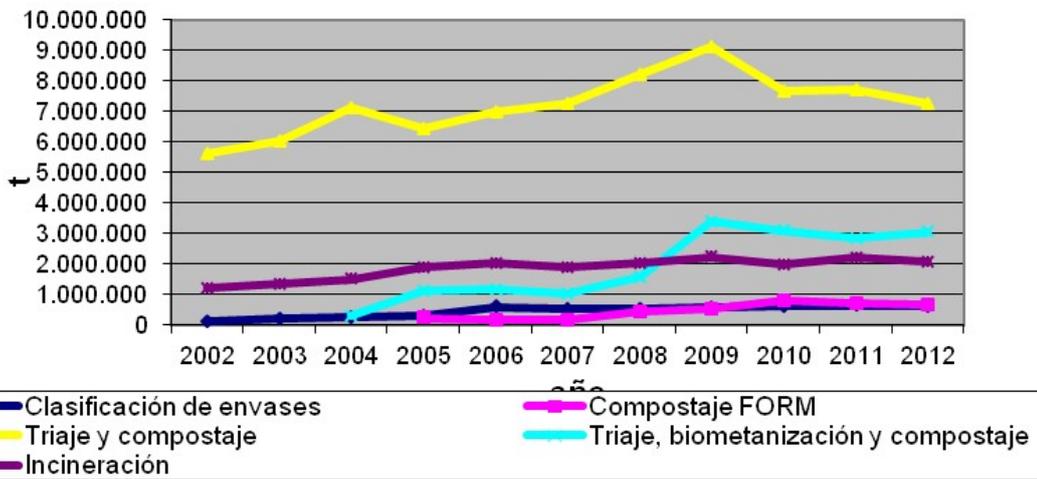


Ilustración 6: evolución cantidades tratadas según operaciones de tratamiento

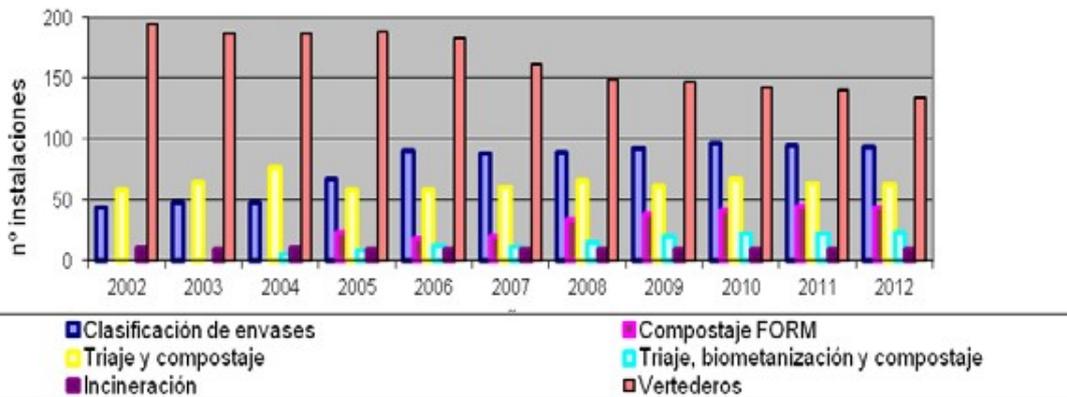


Ilustración 7: evolución del número de instalaciones de tratamiento según operación

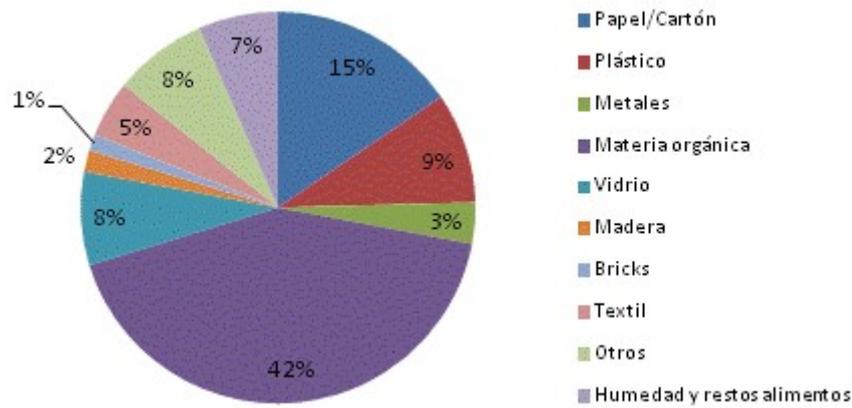


Ilustración 8: composición promedio de los residuos de competencia municipal

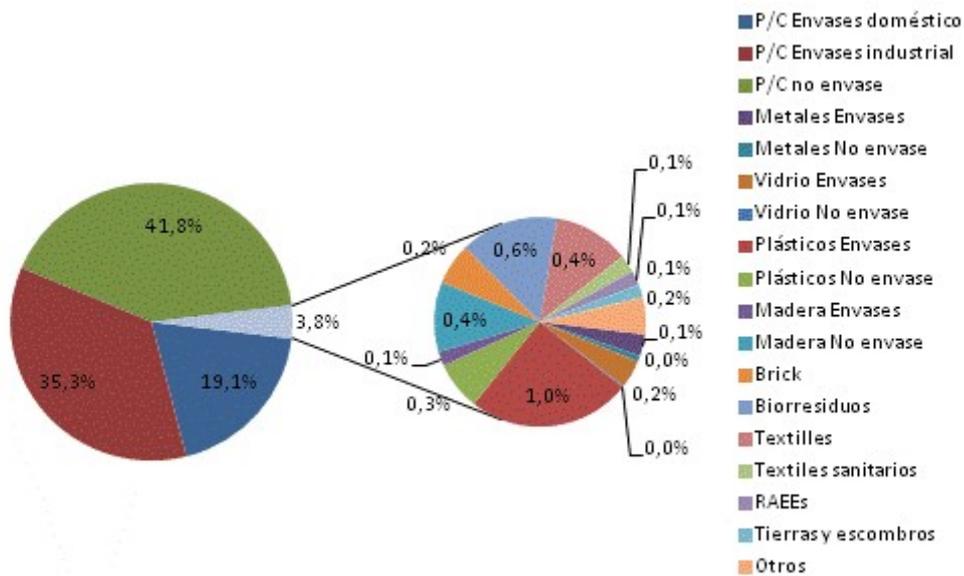


Ilustración 9: composición promedio de la fracción papel

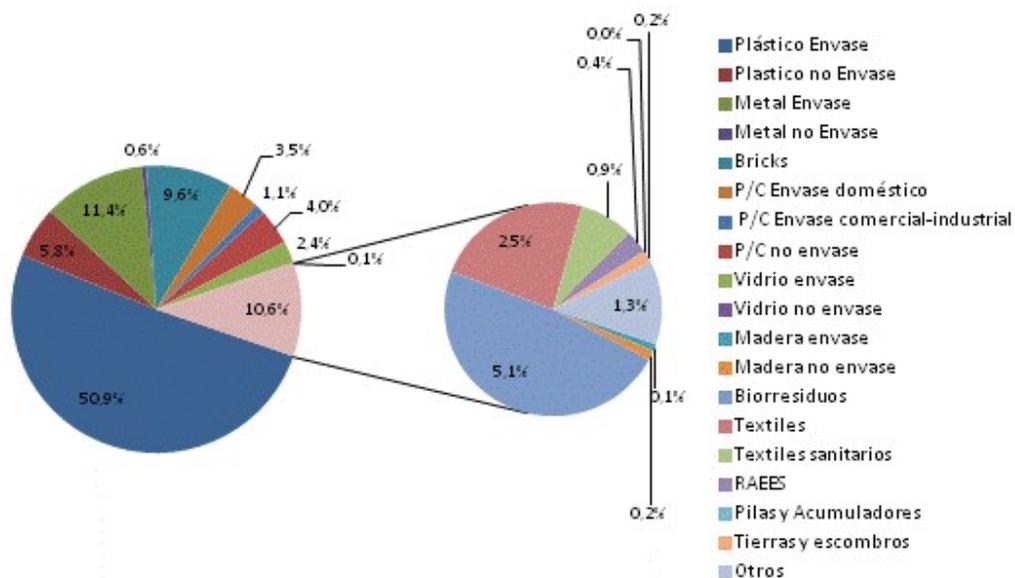


Ilustración 10: composición promedio de la fracción de envases ligeros

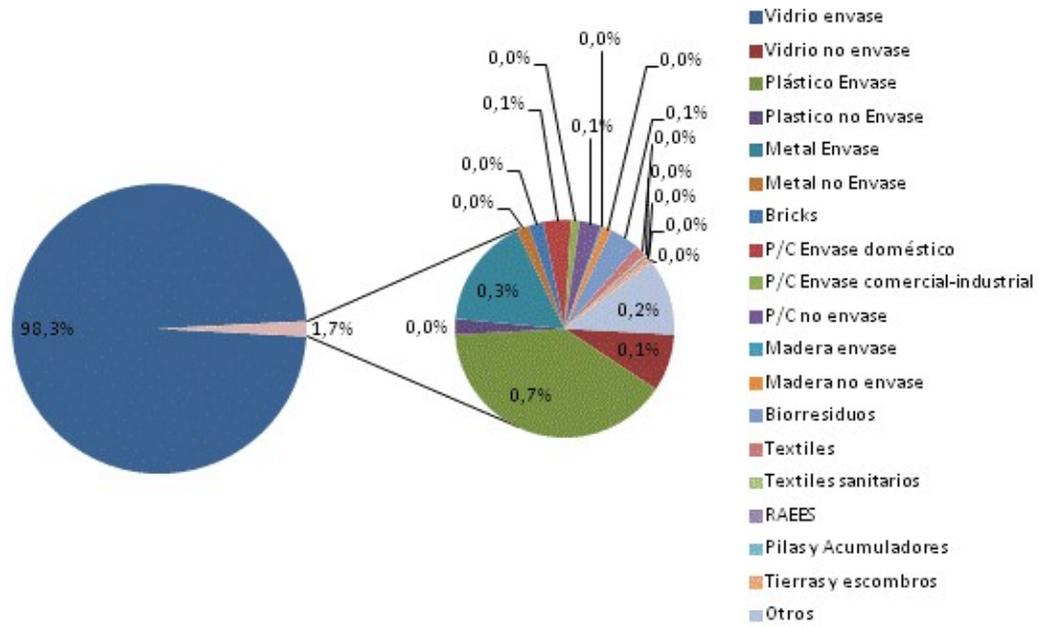


Ilustración 11: composición promedio de la fracción envases de vidrio

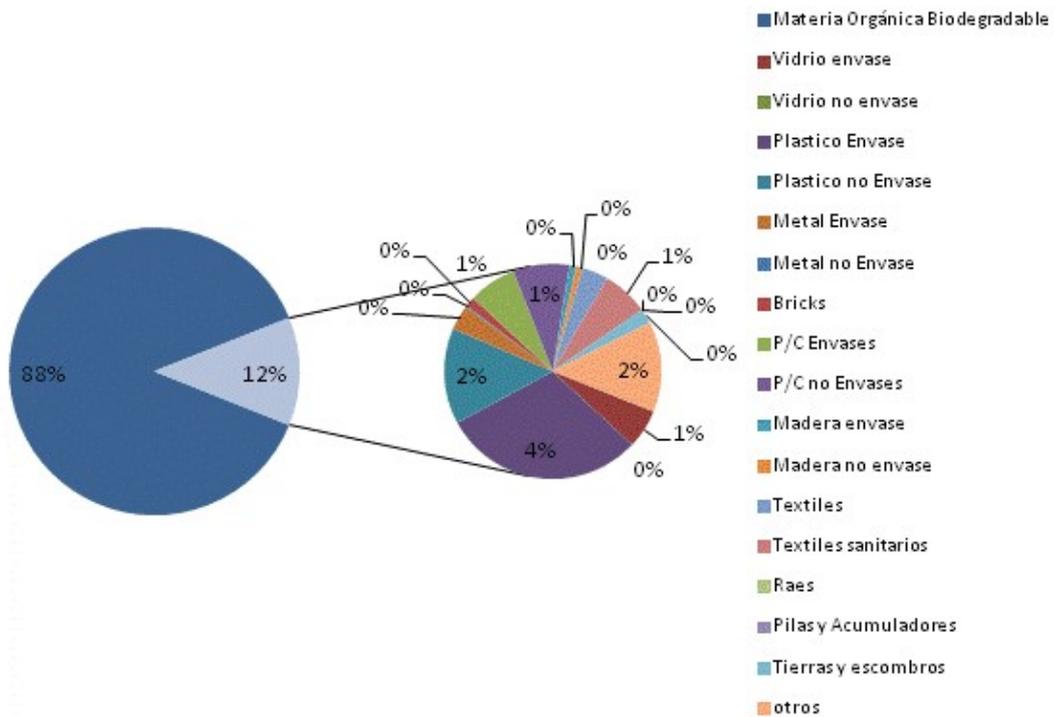


Ilustración 12: promedio de la fracción de biorresiduos (modelo 5 fracciones)

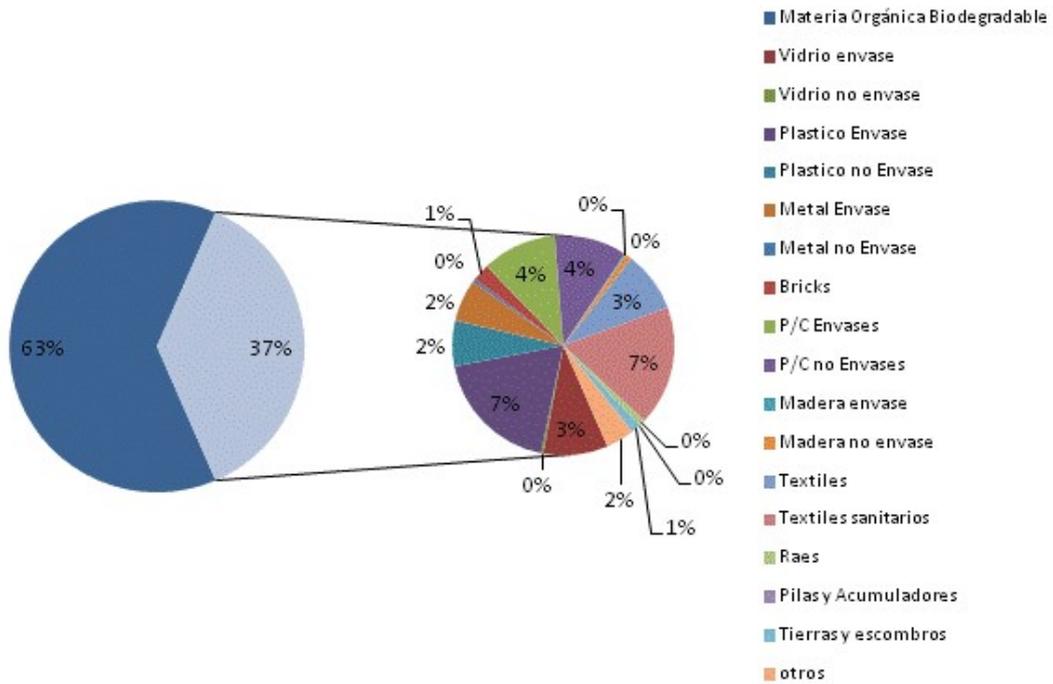


Ilustración 13: promedio de la fracción de biorresiduos (modelo húmedo-seco)

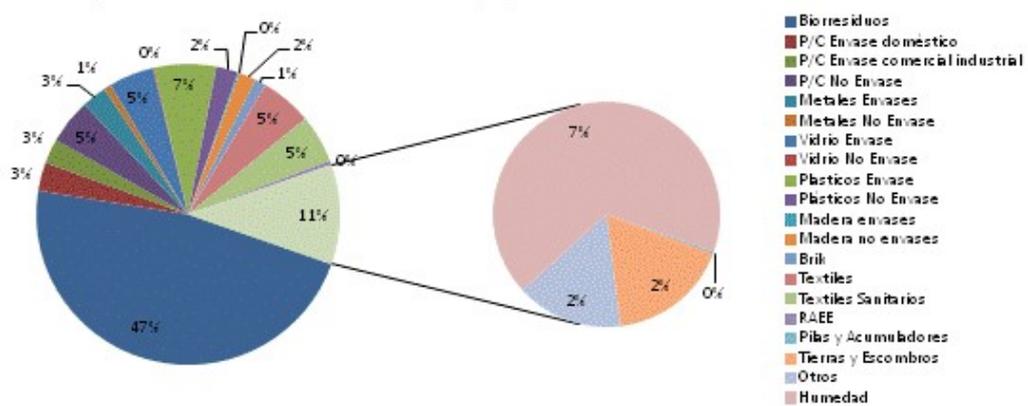


Ilustración 14: composición promedio de la fracción resto

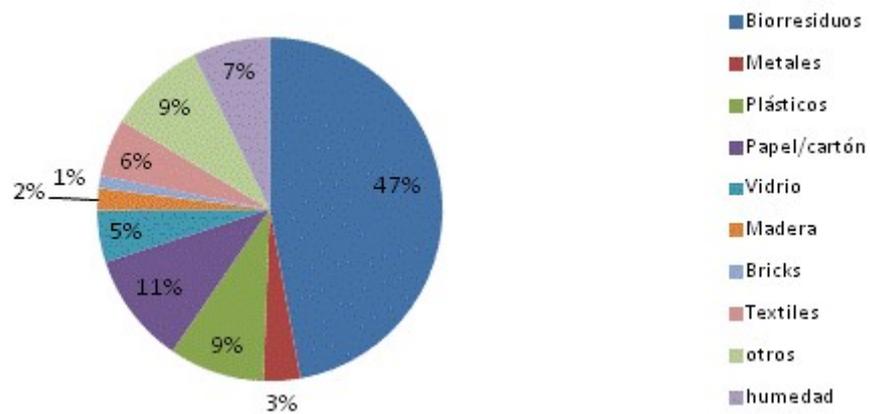


Ilustración 15: composición promedio de la fracción resto por materia



Ilustración 16: tratamiento de residuos de competencia municipal (2012)

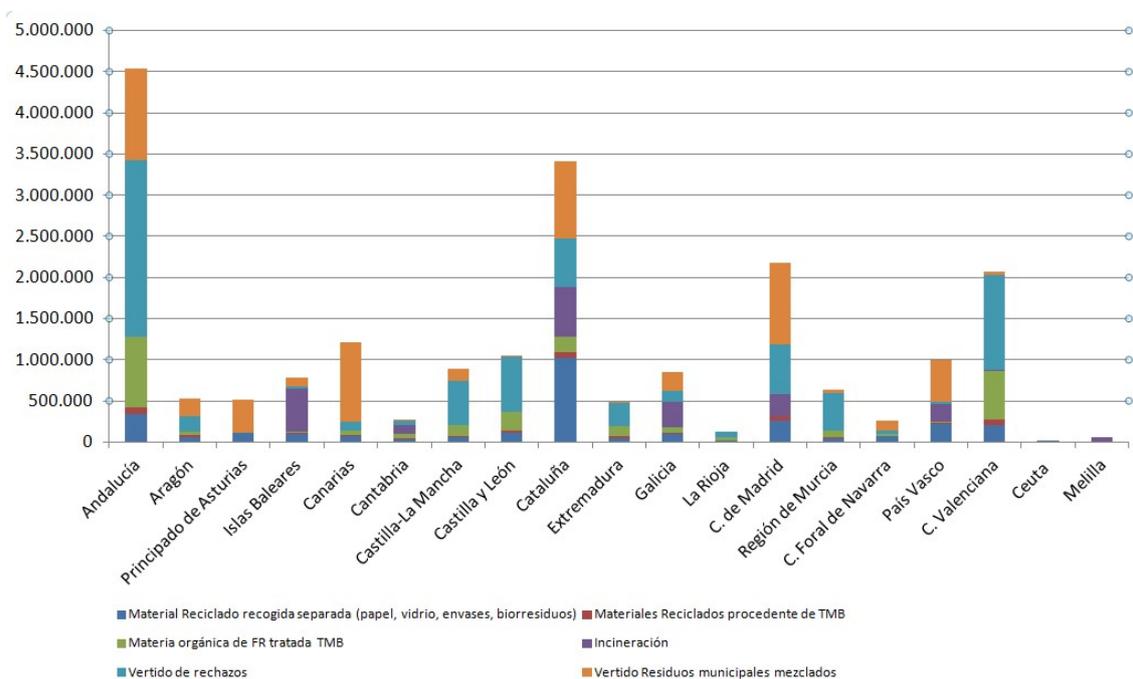


Ilustración 17: tratamiento de residuos de competencia municipal por CCAA en 2012 (t)

Como puede deducirse de las gráficas, con datos de 2012 España no está en la senda del cumplimiento del 50% de reciclado apenas alcanzando la cifra del 29% (considerando todo el material bioestabilizado usado en tratamiento de suelos); es más, sólo la mitad del reciclado es gracias a la responsabilidad de los ciudadanos y la recogida separada.

Con todo, hasta el **60%** de los residuos acaban en el vertedero, dividiéndose a partes iguales entre residuos separados y rechazos de plantas. Así, casi la mitad de los biorresiduos acabaron en vertedero en 2012, siendo el objetivo hasta 15 puntos porcentuales menor en el mismo momento de escribir estas líneas.

Con los datos probando que nuestra pirámide jerárquica de política de residuos se encuentra invertida, son imprescindibles medidas económicas que inviertan esta tendencia.

	Composición Fracción Resto (FR) (%)	Cantidades totales por materiales FR (t)	Objetivo de reciclado en porcentaje en 2020 (%)	Cantidades objetivo reciclado por materiales 2020 (t)	Situación actual reciclado neto 2012			Situación Preparación para la reutilización y reciclado neto 2020		
					Recogida separada (t) A	Recogida Mezclada (t)	Total (t)	Recogida separada adicional (t) B	Recogida Mezclada (**) (t) C	Total reciclado (t) A+B+C
Biorresiduos	47,2%	8.449.811	50%	4.224.905	541.350	2.515.909	3.057.259	1.708.997	1.509.545	3.759.892
Metales	3,4%	613.104	60%	367.862	62.470	141.246	203.716	226.616	141.246	430.332
Plásticos	8,9%	1.594.206	55%	876.813	220.724	99.097	319.821	777.716	99.097	1.097.537
Papel/cartón	10,5%	1.881.491	70%	1.317.043	1.106.831	157.803	1.264.634	1.159.240	157.803	2.423.874
Vidrio	4,9%	885.735	60%	531.441	740.289	14.077	754.366	517.364	14.077	1.271.730
Madera***	2,0%	362.692	55%	199.480			0	199.480		199.480
Bricks	1,2%	215.698	55%	118.634	35.094	11.992	47.086	106.642	11.992	153.728
Textiles *	5,5%	983.384	50%	491.692			0	491.692		491.692
Otros *	9,1%	1.636.936	10%	163.694	5.852	15.889	21.741	147.805	15.889	169.546
humedad	7,2%	1.288.408					0			0
<b>Total</b>	<b>100,0%</b>	<b>17.911.465</b>	<b>50%</b>	<b>8.291.566</b>	<b>2.712.610</b>	<b>2.956.013</b>	<b>5.668.623</b>	<b>5.335.553</b>	<b>1.949.649</b>	<b>9.997.812</b>

Ilustración 18: situación en 2012 y objetivos de reciclado para 2020

También se concluye que, al margen de todas las opciones de tratamiento que se analizarán en esta investigación, para cumplir con los objetivos de reutilización/reciclado hay que INCIDIR IRREMEDIABLEMENTE EN LA **RECOGIDA SEPARADA**.

## 1.2. Envases

Los objetivos de reciclado de envases, en función del material son:

Total	70
Por material	
Papel	85
Vidrio	75
Metales	70:70 (Aluminio:Acero)
Plástico	40
Madera	60

Ilustración 19: objetivos de reciclado de residuos de envases para 2020

En 2012, casi la mitad de los residuos de envases (tanto generados como reciclados) eran domésticos, representando éstos el 14% del total de residuos municipales.

## 1.3. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs)

Los objetivos de reciclado para estos aparatos según la Directiva son:

- 65% del peso medio de introducidos u 85% de los generados en España
- Principio de responsabilidad ampliada del productor
- La contabilización de la recogida por parte del Estado

Según el Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, los objetivos de recogida a nivel nacional anuales son:

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020-
Objetivo mínimo de recogida a nivel estatal	Cuatro kilos de RAEE domésticos por habitante (datos población INE disponible).	45% de la media del peso de AEE introducidos en el mercado español en 2013, 2014 y 2015.	50% de la media del peso de AEE introducidos en el mercado español en 2014, 2015 y 2016.	55% de la media del peso de AEE introducidos en el mercado español en 2015, 2016 y 2017.	65% de la media del peso de AEE introducidos en el mercado español en 2016, 2017 y 2018.	65% de la media del peso de AEE introducidos en el mercado español en los tres años anteriores.

Ilustración 20: objetivos de recogida separada

Los objetivos de valorización que se encuentran en su anexo XIV son mucho más complejos, divididos por categorías y fases temporales. No se representan aquí por comodidad, pero sí indicar que desde la segunda mitad de 2018 los porcentajes de valorización y reciclado oscilan entre el 70 y el 85% principalmente.

## 1.4. Pilas y acumuladores

Los objetivos de recogida son:

- Para las portátiles: 45% hasta 2021 , que será el 50%
- Para las de automoción: 98% a partir de 2019
- Para las industriales:
  - 98% a partir de 2018 si contienen cadmio o plomo
  - 70% a partir de 2021 para las restantes

Los de eficiencia en reciclado:

- 65% con plomo-ácido
- 75% con níquel-cadmio
- 50% para el resto

## 1.5. PCB's y PCT's y aparatos que los contienen

Objetivos:

- Eliminación o descontaminación de todos los aparatos con PCB acreditado, exceptuando los transformadores con concentración de PCB entre 50 y 500 ppm que podrán continuar en servicio hasta el final de su vida útil
- Demostración acreditada mediante análisis químicos, del contenido o no contenido en PCB de todos los aparatos que, por razones diversas, todavía figuren en el grupo 3 (aparatos dudosos que pueden contener PCB) del Inventario Nacional de PCB

## 1.6. Residuos sanitarios

Analizando toda la normativa existente se pueden establecer, de forma genérica, los siguientes tipos de residuos sanitarios:

- Residuos domésticos: residuos generados en los centros sanitarios: de composición similar a los residuos generados en los hogares como consecuencia de la actividad doméstica
- Residuos sanitarios no peligrosos: residuos propios de la actividad sanitaria que no llevan asociado un riesgo de infección (vendajes, gasas, guantes...) y pueden ser gestionados conjuntamente con los domésticos
- Cadáveres y restos humanos de entidad suficiente, que se han de gestionar de acuerdo al Reglamento de Policía Sanitaria Mortuoria
- Residuos sanitarios peligrosos: residuos que deben ser gestionados de forma diferenciada por su riesgo de infección. En este grupo se incluyen también los residuos cortantes/punzantes
- Residuos químicos: residuos constituidos por sustancias o mezclas químicas
- Residuos de medicamentos citotóxicos y citostáticos: residuos caracterizados por sus riesgos carcinógenos, mutágenos o para la reproducción
- Residuos radioactivos: son residuos contaminados por sustancias radioactivas. Conforme a lo establecido en la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, los residuos radioactivos están excluidos del ámbito de aplicación

Queda claro que muchos de estos residuos son peligrosos, y por lo tanto se gestionan de acuerdo con su propia línea de gestión. El resto forman parte de los RSU.

## 2. RSU del Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante (PZ11 – AGA6)

Según el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana, los **planes zonales** son principalmente los encargados de distribuir en el territorio el conjunto de instalaciones necesarias para garantizar el respeto de los principios de **autosuficiencia y proximidad** en la gestión de residuos de la zona en cuestión. En la siguiente página puede verse el mapa con las delimitaciones y nomenclaturas actuales de los planes zonales según el PIRCV. El primer objetivo será conocer la producción anual de RSU del plan zonal. Para ello nos ayudaremos tanto de los datos de población (padrón, censo) como de producción total de residuos. Con el cruce de ambos datos y las proyecciones de población (obtenidas del Instituto Valenciano de Estadística), estaremos en disposición de estimar la cantidad de residuos a gestionar en el plan zonal tanto presentes como futuras. Los datos más recientes que tenemos son el padrón (2016), el censo de (2011) y la producción de residuos (2010-2014).

El Plan Zonal 11 Área de Gestión Alicante 6, comprende los siguientes municipios de la Vega Baja de la provincia de Alicante:

MUNICIPIO	SUPERFICIE (km <sup>2</sup> )	POBLACIÓN (1-1-2016)	MUNICIPIO	SUPERFICIE (km <sup>2</sup> )	POBLACIÓN (1-1-2016)
Albatera	66	11.756	Granja de Rocamora	7	2.461
Algorfa	18	3.222	Guardamar del Segura	36	15.386
Almoradí	43	20.138	Jacarilla	12	1.939
Benejúzar	9	5.364	Montesinos (Los)	15	4.912
Benferri	12	1.920	Orihuela	370	80.359
Benijófar	4	3.163	Pilar de la Horadada	73	21.348
Bigastro	4	6.724	Rafal	2	4.218
Callosa del Segura	25	18.497	Redován	9	7.765
Catral	20	8.551	Rojales	27	17.622
Cox	17	7.193	San Fulgencio	19	7.384
Daya Nueva	7	1.750	San Isidro	7	1.915
Daya Vieja	3	672	San Miguel de Salinas	55	6.193
Dolores	19	7.264	Torrevieja	71	84.213
Formentera del Segura	4	3.995			

Ilustración 21: población y superficie de los municipios de la Vega Baja

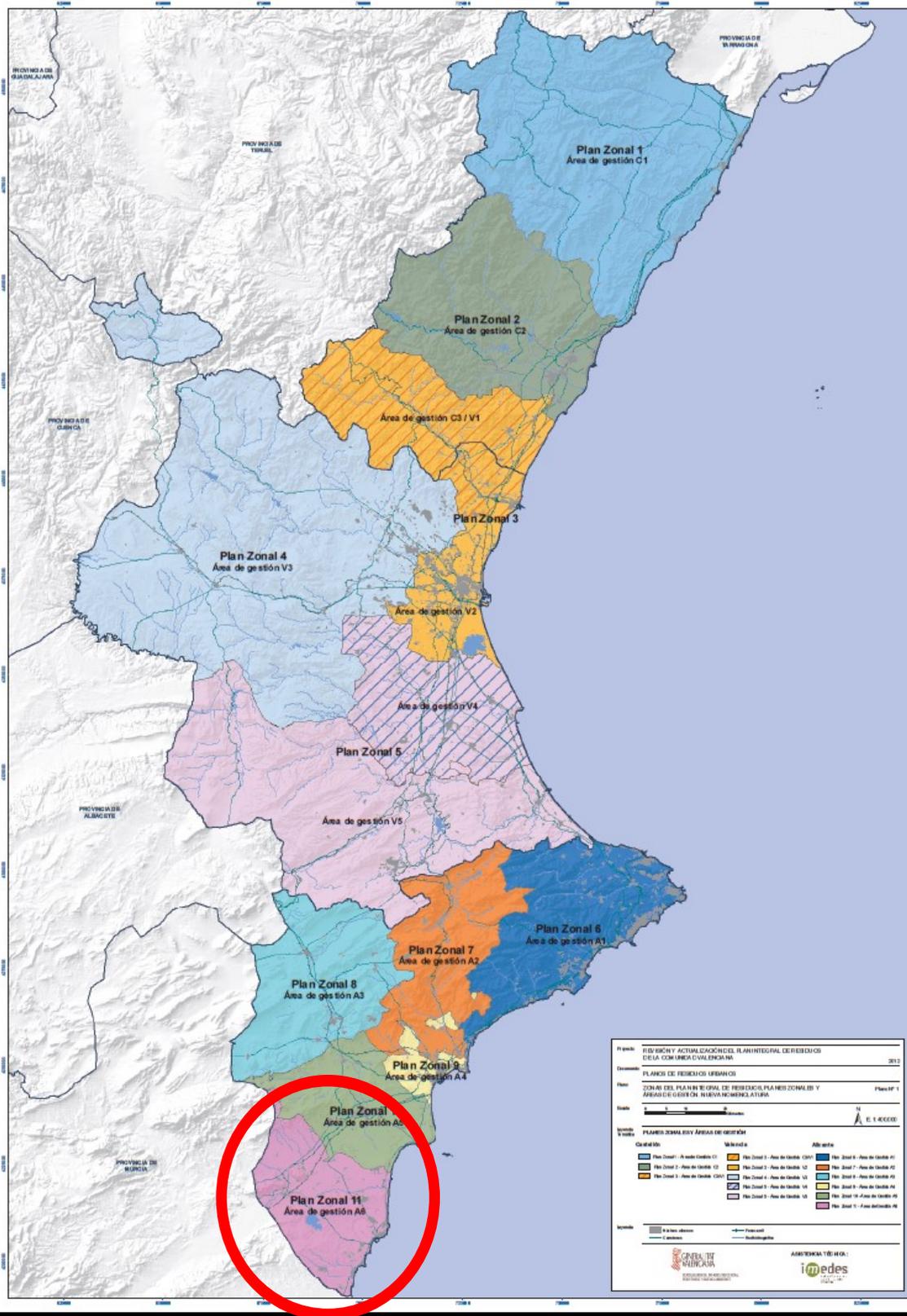


Ilustración 22: mapa de los planes zonales de gestión de residuos de la Comunidad Valenciana. PIRCV 2013

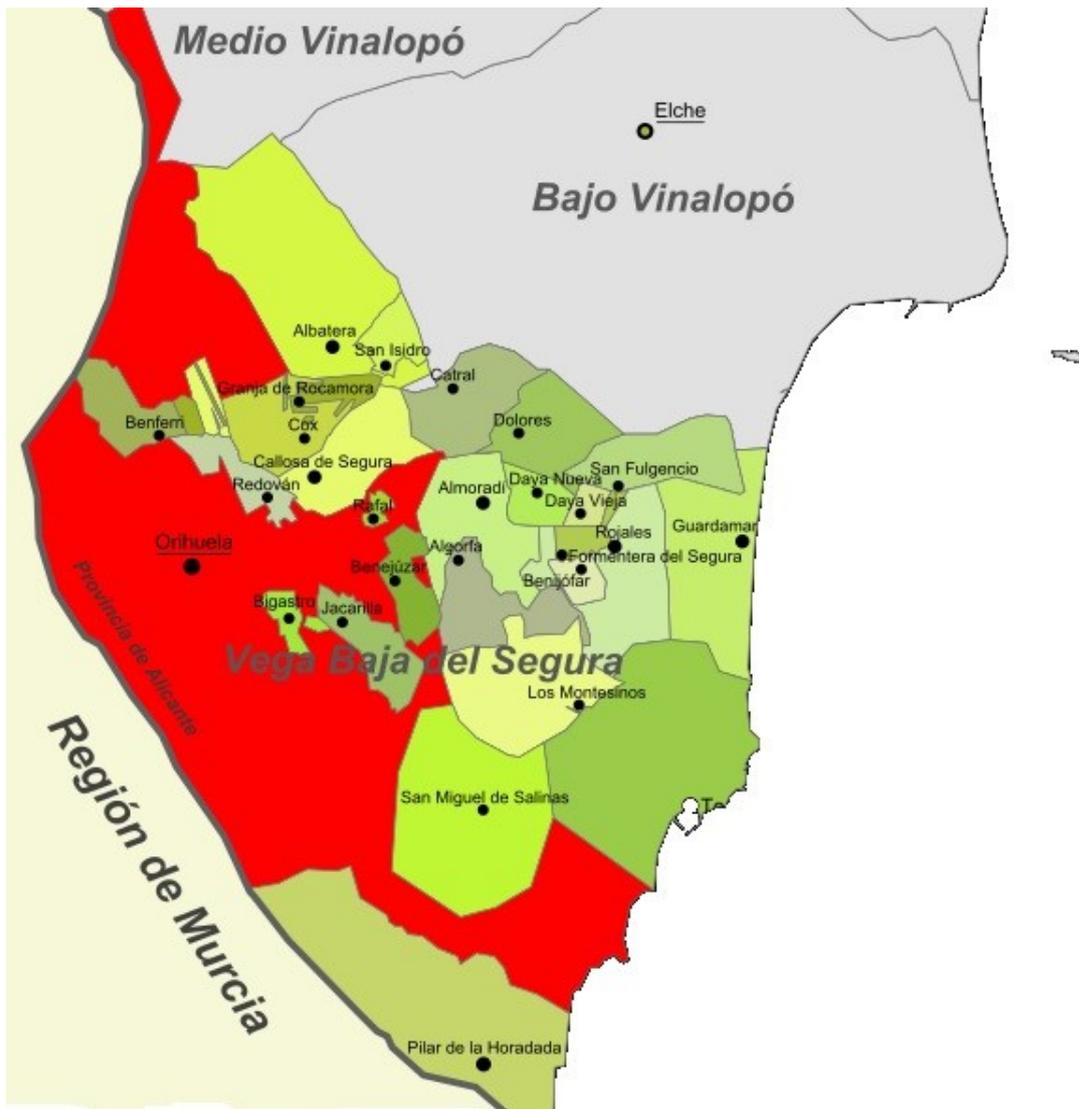


Ilustración 23: mapa de la Vega Baja, comarca del PZ11 – AGA6

Sin embargo, un aspecto fundamental a la hora de tener en cuenta la gestión de residuos (al igual que ocurre con cualquier recurso físico), es la distribución espacial de los mismos; no olvidemos que la logística asociada a su gestión es clave tanto desde el punto de vista económico como medioambiental. Las siguientes representaciones gráficas dan fe de ello, destacando especialmente dos aspectos:

- Las principales núcleos de población (Orihuela y Torrevieja) tienen una ubicación distante (relativamente y teniendo en cuenta las dimensiones del plan zonal), de 35 kilómetros aproximadamente.
- Prácticamente todos los núcleos de población están ubicados en la mitad norte del plan zonal, con la única excepción de Pilar de la Horadada. Siendo un enclave de cierta relevancia demográfica, afortunadamente no es ninguno de los dos núcleos principales.



- Estudiantes: 19% del año
- Segunda residencia: 33% del año

Tanto la población residente como la vinculada se obtienen del Instituto Nacional de Estadística (INE), recogiendo esta última sólo para municipios de más de 10.000 habitantes. Así:

	NR - Trabajo	NR - Estudio	NR- 2ª residencia	0.21*NR – Trabajo	0.19*NR – Estudio	0.33*NR2 residencia
Albatera	1391	259	707	292	49	233
Almoradí	1684	824	735	354	157	243
Callosa de Segura	1296	487	751	272	93	248
Guardamar del Segura	1666	121	29786	350	23	9829
Orihuela	7687	3042	20301	1614	578	6699
Rojales	1396	616	535	293	117	177
Torre vieja	5743	834	96988	1206	158	32006
Pilar de la Horadada	1422	401	18192	299	76	6003
				4680	1251	55438
				61369 hab equ		

Ilustración 25: carga poblacional de los no residentes vinculados a la Vega Baja en 2011. Tabla

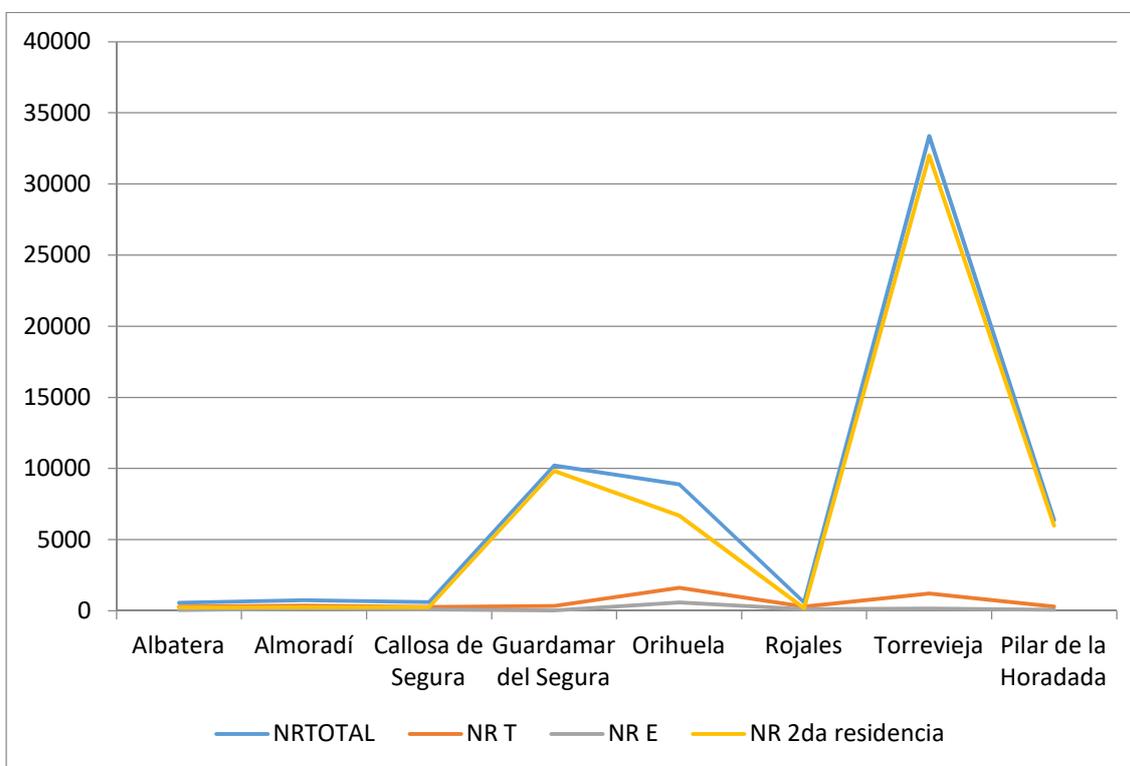
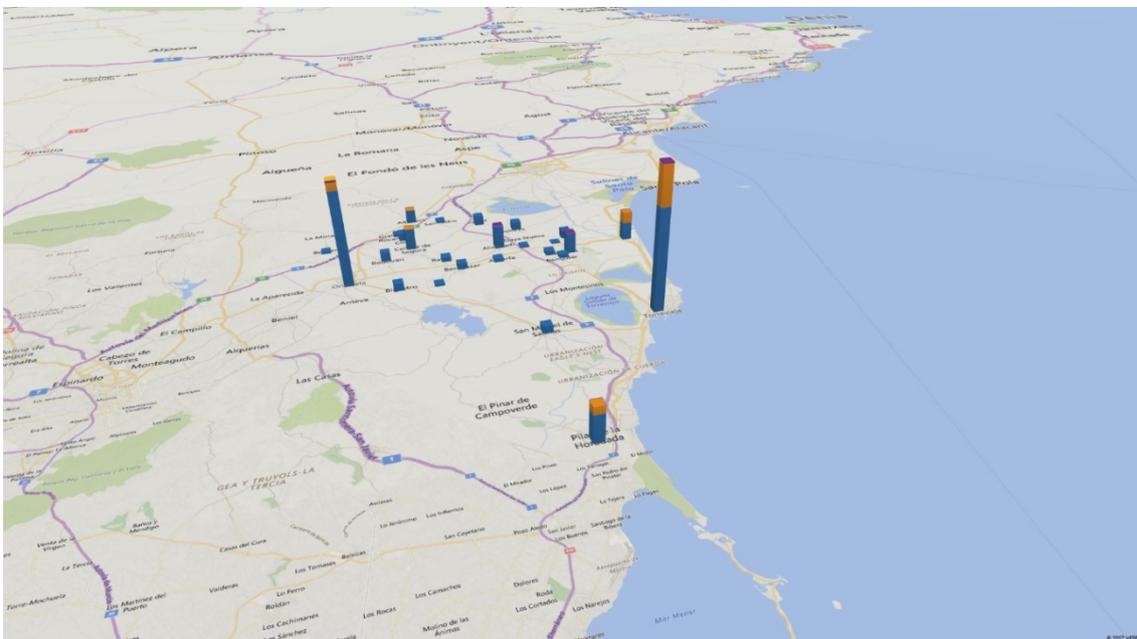
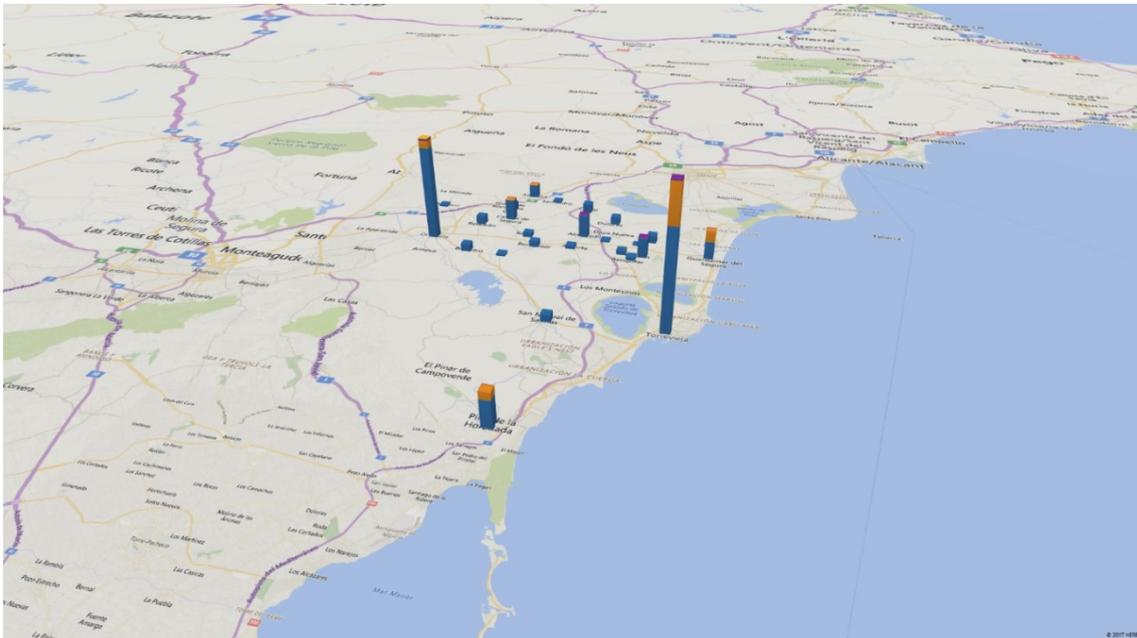


Ilustración 26: carga poblacional de los no residentes vinculados a la Vega Baja en 2011. Gráfico

Como se puede deducir del gráfico, las cargas poblacionales más importantes corresponden a los habitantes equivalentes por:

- Segunda residencia en Guardamar del Segura (9829 habitantes equivalentes)
- Segunda residencia en Orihuela (6699 habitantes equivalentes)
- Trabajadores en Orihuela (1614 habitantes equivalentes)
- Estudiantes en Orihuela (578 habitantes equivalentes)
- Trabajadores en Torrevieja (1206 habitantes equivalentes)
- Segunda residencia en Torrevieja (32006 habitantes equivalentes)



**Ilustración 27: distribución espacial de la población residente y vinculada en la Vega Baja**

En cuanto a la carga poblacional por turismo, se obtiene cruzando los datos de oferta turística proporcionados por la Agencia Valenciana de Turismo y el grado de ocupación de la misma obtenido del INE:

OFERTA TURÍSTICA VEGA BAJA (ALICANTE) 1-1-2015	
Hoteles	4877
Hostales	269
Pensiones	210
Apartamentos	8440
Campings	2724
Casas rurales y albergues	128
<b>TOTAL</b>	<b>16648</b>

Ilustración 28: oferta turística en la Vega Baja en 2015

Los grados de ocupación se obtendrán por estimación a partir de las series históricas para la Costa Blanca (Alicante) de hoteles, apartamentos y campings del INE, que se consideran representativos para las plazas turísticas Vega Baja:

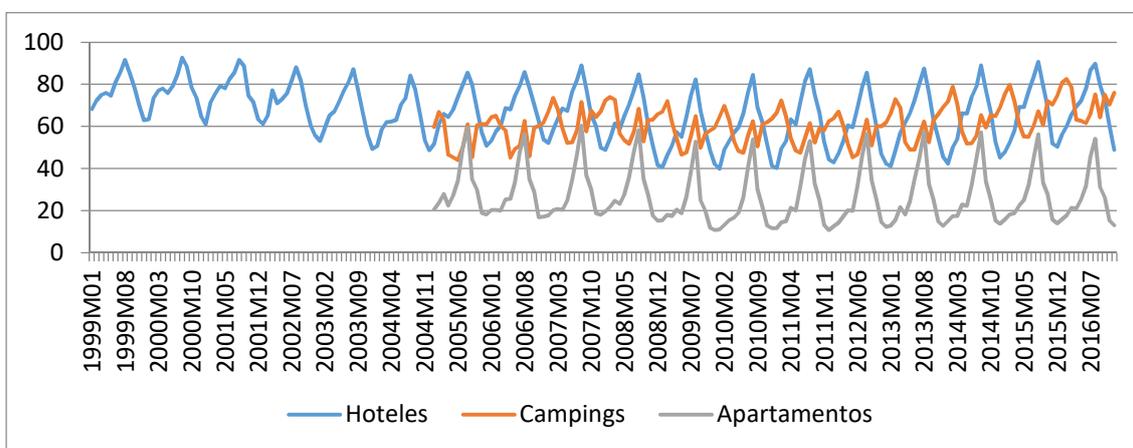


Ilustración 29: grados de ocupación turística de la Costa Blanca 1999(2005)-2016. INE

A la vista de los datos del gráfico, se establecen como razonables los siguientes grados de ocupación:

- Hoteles: 80%
- Hostales: 80%
- Pensiones: 50%
- Apartamentos: 50%
- Campings: 70%
- Casas rurales y albergues: 30%

Combinando las plazas con los grados de ocupación estimados, obtenemos una **carga poblacional por turismo** de 10.387 habitantes equivalentes para el año 2014 en la Vega Baja:

	Plazas	Grado ocupación	Hab. equivalentes
Hoteles	4877	0.80	3902
Hostales	269	0.80	215
Pensiones	210	0.50	105
Apartamentos	8440	0.50	4220

Campings	2724	0.70	1906
Casas rurales y albergues	128	0.30	38
			10387

Ilustración 30: carga poblacional por turismo en la Vega Baja en 2014

Considerando las mismas plazas en 2011 y 2014, la carga poblacional total para la Vega Baja en 2011 sería:

$$RESIDENTE + VINCULADA + TURISMO = CARGA POBLACIONAL$$

$$397.660 + 61.369 + 10.387 = 469.416 \text{ hab. equivalentes}$$

El siguiente paso sería conocer la evolución en el tiempo de dicha carga. Para ello recurriremos a las previsiones de población de la Instituto Valenciano de Estadística para la población residente hasta 2035, a lo que habría que añadir la población vinculada y la carga turística, estimada por la siguiente hipótesis:

***Las tasas de crecimiento de población vinculada no residente y turística, son las mismas que la de población residente***

Vistas estas consideraciones, la **carga poblacional total para la Vega Baja en el período 2012-2035** es:

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Residentes	401162	404501	407863	411064	414107	416996
No residentes (eq)	61910	62425	62944	63438	63907	64353
Turistas (eq)	10387	10387	10387	10469	10546	10620
TOTAL	473459	477313	481194	484970	488560	491969
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	419733	422324	424774	427097	429301	431390
	64776	65175	65554	65912	66252	66575
	10689	10755	10818	10877	10933	10986
	495198	498255	501145	503886	506486	508951
	2024	2025	2026	2027	2028	2029
	433372	435254	437039	438735	440347	441884
	66880	67171	67446	67708	67957	68194
	11037	11085	11130	11173	11214	11253
	511289	513509	515615	517616	519518	521331
	2030	2031	2032	2033	2034	2035
	443351	444757	446109	447415	448681	449913
	68420	68637	68846	69048	69243	694333
	11291	11327	11361	11394	11427	11458
	523062	524721	526316	527857	529351	530804

Ilustración 31: carga población total para la Vega Baja 2012-2035

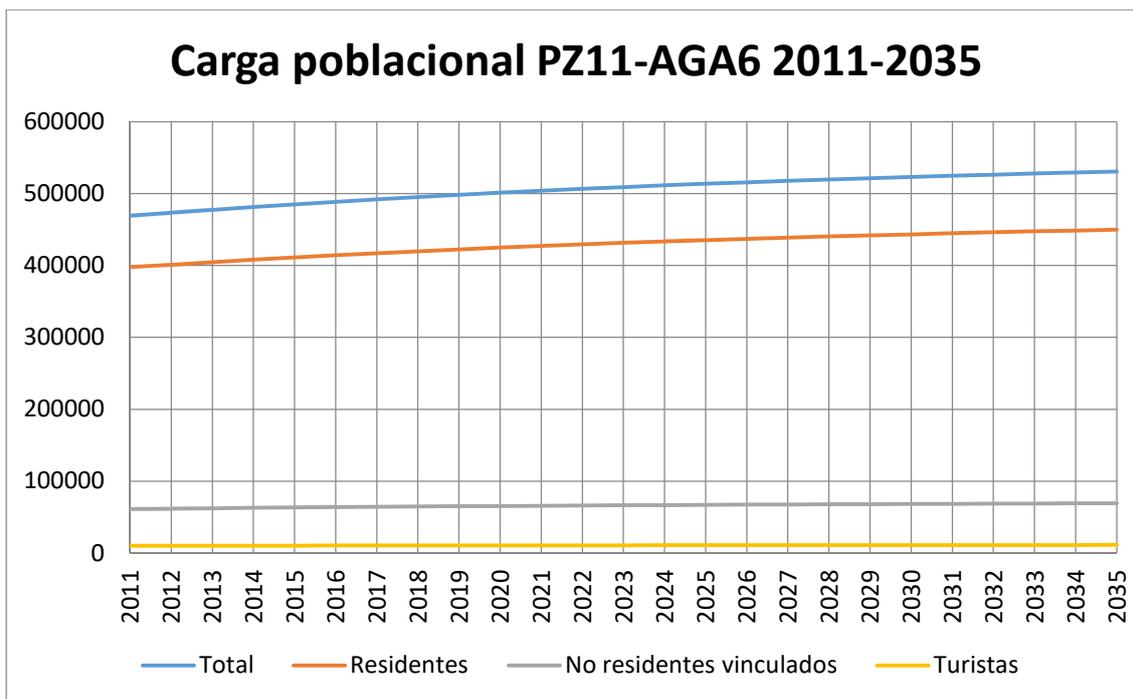


Ilustración 32: carga poblacional del Plan Zonal 11 – AGA6 para el período 2011-2035

Estimada la carga poblacional presente y futura del Plan Zonal 11, el otro conjunto de datos a estudiar es el de la producción de residuos. El INE nos proporciona la producción de residuos de la Comunidad Valenciana por una parte, y la producción de residuos *per capita* por otra. Sin embargo, ésta última sólo tiene en cuenta la población empadronada en aquel momento, por lo que la cifra *per capita* real –tenidas en cuenta población vinculada y turismo- realmente es menor. Así, la producción de residuos (la parte asimilable a RSU) en la Comunidad Valenciana durante el período 2010-2014 fue:

Toneladas/año	2014	2013	2012	2011	2010
Residuos domésticos y similares	1.596.150	1.798.999	1.811.419	1.805.042	1.869.060
Residuos domésticos voluminosos mezclados	44.376	28.634	45.969	91.753	59.550
Residuos animales y vegetales	41.173	52.175	70.675	70.792	88.836

Ilustración 33: producción de residuos en la Comunidad Valenciana 2010-2014

Además, el INE también aporta datos de la producción de residuos **domésticos** (en toneladas) para el período 1998-2009:

1998	1999	2000	2001	2002	2003
2.041.128	1.927.926	2.457.594	2.314.496	2.552.750	2.428.190
2004	2005	2006	2007	2008	2009
2.355.713	2.125.428	2.136.842	2.226.822	2.155.056	1.862.736

Ilustración 34: producción de residuos domésticos en la Comunidad Valenciana 1998-2009

A la hora de estimar la producción de residuos *per capita* del Plan Zonal 11, tomaremos como válida la siguiente hipótesis:

**La cantidad y proporción de los distintos residuos producidos en la Comunidad Valenciana y en la Vega Baja, son análogas**

Parece razonable considerarlo así ya que la Vega Baja engloba municipios costero-turísticos (Guardamar del Segura, Torrevieja, Pilar de la Horada), grandes ciudades tanto costeras como interiores (Torrevieja, Orihuela) y una serie de localidades interiores más pequeñas, exactamente como ocurre a nivel autonómico.

La nueva necesidad que se presenta ahora es el cálculo de la carga poblacional a nivel autonómico. Recurriendo una vez más al censo de 2011:

Residentes	No residentes	NR – Trabajo	NR – Estudio	NR – 2ª residen.
4.100.789	1.663.728	478.830	199.798	985.100

Ilustración 35: población residente y vinculada a la Comunidad Valenciana 2011

Aplicando los factores temporales:

- Carga trabajadores:  $478.830 \cdot 0.21 = 100.554$  hab. eq.
- Carga estudiantes:  $199.798 \cdot 0.19 = 37.962$  hab. eq.
- Carga segundos residentes:  $895.100 \cdot 0.33 = 325.083$  hab. eq.
- TOTAL CARGA VINCULADOS NO RESIDENTES: 463.599 hab. eq.

En cuanto al turismo, el dato que refleja el Anexo 6 del PIRCV “Estimación de la carga de población” para el 2011 es de 173.516 habitantes equivalentes.

Así, la carga poblacional para la Comunidad Valenciana en el año 2011 fue de:

$$5.009.931 + 463.599 + 173.516 = 5.647.046 \text{ hab. equivalentes}$$

A la hora de estimar la producción de residuos *capita* de la Comunidad Valenciana, tomaremos como constante la población durante el período 2010-2014. En consecuencia:

Kg/habitante*año	2014	2013	2012	2011	2010
Residuos domésticos y similares	282.7	318.6	320.8	319.6	331.0
Residuos domésticos voluminosos mezclados	7.9	5.1	8.1	16.2	10.5
Residuos animales y vegetales	7.3	9.2	12.5	12.5	15.7

Ilustración 36: producción de residuos por persona y año en la Comunidad Valenciana

Usaremos el **promedio** de dicho período, ya que en el caso de residuos voluminosos y vegetales hay una gran variabilidad. Así:

- **Producción residuos domésticos: 314.5 kg/hab**
- **Producción residuos domésticos voluminosos: 9.6 kg/hab**
- **Producción de residuos animales y vegetales: 11.5 kg/hab**

Finalmente, listamos a continuación las toneladas de residuos generados en el Plan Zonal durante el período de estudio, en función de si son “domésticos y similares (domésticos y vías públicas)”, “domésticos voluminosos mezclados (enseres domésticos)” o “animales y vegetales”:

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Carga poblacional	473459	477313	481194	484970	488560	491969
Domésticos (t)	148914	150127	151347	152535	153664	154736
Voluminosos (t)	4532	4569	4606	4642	4677	4709
Animal/vegetal (t)	5427	5471	5516	5559	5600	5639
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	495198	498255	501145	503886	506486	508951
	155752	156713	157622	158484	159302	160077
	4740	4770	4797	4823	4848	4872
	5676	5711	5744	5776	5806	5834
	2024	2025	2026	2027	2028	2029
	511289	513509	515615	517616	519518	521331
	160813	161511	162174	162803	163401	163971
	4894	4916	4936	4955	4973	4990
	5861	5886	5910	5933	5955	5976
	2030	2031	2032	2033	2034	2035
	523062	524721	526316	527857	529351	530804
	164516	165038	165539	166024	166494	166951
	5007	5023	5038	5053	5067	5081
	5996	6015	6033	6051	6068	6084

Ilustración 37: producción residuos Plan Zonal Vega Baja PZ11 - AGA6

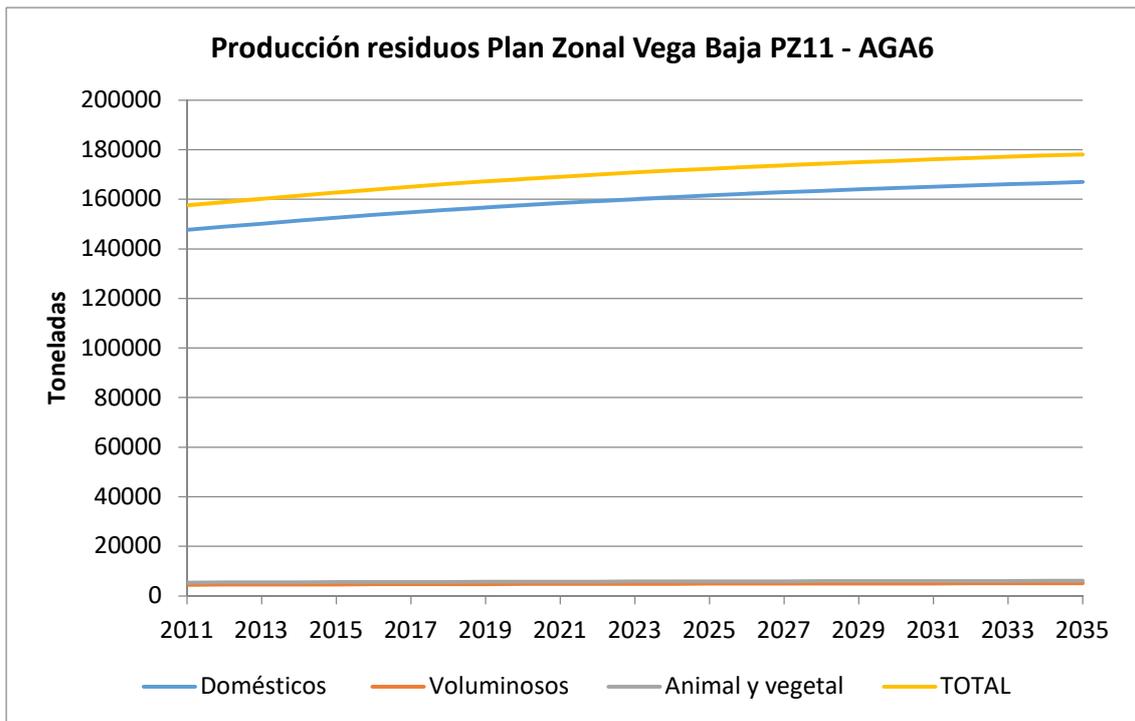


Ilustración 38: producción residuos Plan Zonal Vega Baja PZ11 - AGA6. Gráfico

# IV. Identificación de las técnicas de gestión de RSU disponibles

---

## 1. Introducción

A la hora de conocer las actuales técnicas de gestión de RSU, una vez más tenemos que agradecer la aportación de la Unión Europea y sus documentos de Mejores Técnicas Disponibles (MTD o BREF en adelante), definidos en el artículo 2(11) de la IPPC 2010/75/UE como sigue:

- «mejores»: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto;
- «técnicas»: la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación se diseña, construye, mantiene, explota y paraliza;
- «disponibles»: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios, tanto si las técnicas se utilizan o producen en el Estado Miembro correspondiente como si no, siempre que el titular pueda tener acceso a ellas en condiciones razonables.

El anexo III de la mencionada Directiva también lista los criterios usados para determinar una técnica como la mejor disponible:

- ✓ Uso de técnicas que produzcan pocos residuos
- ✓ Uso de sustancias menos peligrosas
- ✓ Desarrollo de las técnicas de recuperación y reciclado de sustancias generadas y utilizadas en el proceso, y de los residuos cuando proceda
- ✓ Procesos, instalaciones o método de funcionamiento comparables que hayan dado resultados positivos a escala industrial
- ✓ Avances técnicos y evolución de los conocimientos científicos
- ✓ Carácter, efectos y volumen de las emisiones de que se trate
- ✓ Fechas de entrada en funcionamiento de las instalaciones nuevas o existentes
- ✓ Plazo que requiere la implantación de una mejor técnica disponible
- ✓ Consumo y naturaleza de las materias primas (incluida el agua) utilizada en procedimientos de eficacia energética
- ✓ Necesidad de prevenir o reducir al mínimo el impacto global de las emisiones y de los riesgos en el medio ambiente
- ✓ Necesidad de prevenir cualquier riesgo de accidente o de reducir sus consecuencias para el medio ambiente
- ✓ Información publicada por organizaciones internacionales

Así, los principales documentos de MTD/BREF analizados para este estudio son:

- WT Tratamiento de residuos (*Waste Treatment*)
- WI Incineración de residuos (*Waste Incineration*)

Y otros documentos BREF de relevancia como:

- CWW Tratamiento de aguas y gases residuales en la industria química (*Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector*)
- EFS Emisiones por almacenamiento (*Emissions from Storage*)
- ENE Eficiencia energética (*Energy Efficiency*)
- ICS Sistemas de refrigeración industriales (*Industrial Cooling Systems*)
- LCP Grandes instalaciones de combustión (*Large Combustion Plants*)
- CLM Producción de cemento, cal y óxido de magnesio (*Production of cement, lime and magnesium oxide*)
- REF Refinado de aceite y gas natural (*Refining of Mineral Oil and Gas*)

Y dos documentos transversales más:

- ECM Efectos económicos y transversales (*Economics and Cross-Media Effects*)
- MON Principios generales de monitoreo (*General Principles of Monitoring*)

## 2. Descripción de técnicas

### 2.1. Incineración de residuos

La incineración de residuos es la oxidación de las materias combustibles contenidas en el residuo. Los residuos son por lo general materiales altamente heterogéneos, consistentes esencialmente en sustancias orgánicas, minerales, metales y agua. Durante la incineración, se crean gases de combustión que contienen la mayoría de la energía de combustión disponible en forma de calor. Las sustancias orgánicas de los residuos se queman al alcanzar la temperatura de ignición necesaria y entrar en contacto con oxígeno. El proceso de combustión en sí se produce en la fase gaseosa en fracciones de segundo y libera energía de forma simultánea. Cuando el poder calorífico del residuo y el suministro de oxígeno es suficiente, esto puede producir una reacción térmica en cadena y combustión autoalimentada, es decir, que no requiere la adición de otros combustibles.

El objetivo de la incineración de residuos, común a la mayoría de tratamientos de residuos, es tratar los residuos con el fin de reducir su volumen y peligrosidad, capturando (y por lo tanto concentrando) o destruyendo las sustancias potencialmente nocivas. Los procesos de incineración también pueden ofrecer un medio que permita la recuperación del contenido energético, mineral o químico de los residuos.

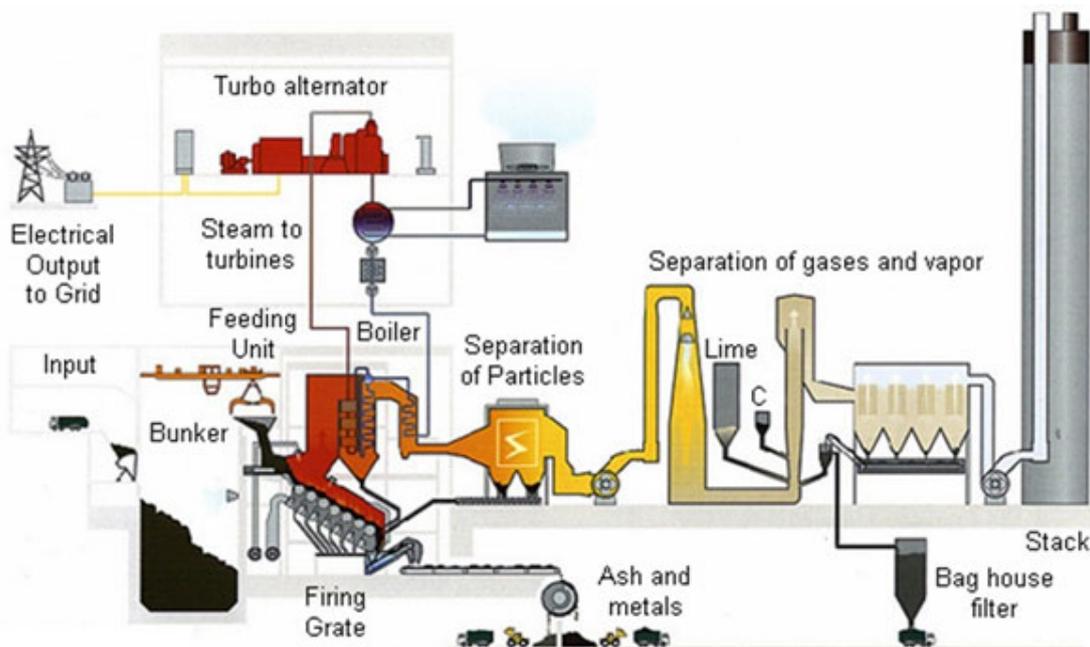


Ilustración 39: esquema de una planta incineradora de residuos tipo

Las principales etapas del proceso de incineración son:

- **Secado y desgasado:** aquí, se desprende el contenido volátil (como hidrocarburos y agua) a temperaturas generalmente entre 100 y 300 °C. El proceso de secado y desgasado no requiere ningún agente oxidante y sólo depende del calor aportado.
- **Pirólisis y gasificación:** la pirólisis es la descomposición ulterior de las sustancias orgánicas en ausencia de un agente oxidante a unos 250-700 °C. La gasificación de los residuos carbonados es la reacción de los residuos con vapor de agua y CO<sub>2</sub> a temperaturas que normalmente están entre 500 y 1000 °C, pero puede producirse a

temperaturas de hasta 1600 °C. Con ello se transfiere materia orgánica sólida a la fase gaseosa. Además de la temperatura, esta reacción se ve apoyada por agua, vapor y oxígeno.

- **Oxidación:** los gases combustibles creados en las etapas anteriores se oxidan, según el método de incineración seleccionado, a temperaturas de gases de combustión que generalmente están entre 800 y 1450 °C.

Estas etapas individuales generalmente se superponen, lo que significa que la separación espacial y temporal de estas etapas durante la incineración de residuos sólo es posible en un grado limitado. De hecho, los procesos tienen lugar parcialmente en paralelo y se influyen entre sí. No obstante, es posible, utilizando medidas técnicas en el interior del horno, influir sobre estos procesos con el fin de reducir las emisiones contaminantes. Tales medidas incluyen el diseño del horno, la distribución del aire y técnicas de control.

En la incineración plenamente oxidativa, los principales componentes de los gases de combustión son: vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno. Según la composición del material incinerado y las condiciones operativas, se forman o quedan pequeñas cantidades de CO, HCl, HF, HBr, HI, NOX SO<sub>2</sub>, VOC, PCDD/F, PCB y compuestos de metales pesados (entre otros). Según las temperaturas de combustión durante las etapas principales de la incineración, los compuestos inorgánicos (ej. sales) y metales pesados volátiles se evaporan total o parcialmente. Estas sustancias son transferidas desde el residuo entrante a los gases de combustión y a las cenizas volantes que contiene. Se crea una ceniza volante de residuo mineral (polvo) y una ceniza sólida más pesada (ceniza de fondo). En las incineradoras de residuos municipales, la ceniza de fondo es aproximadamente un 10 % en volumen y aproximadamente un 20-30 % en peso de la entrada de residuos sólidos. Las cantidades de cenizas volantes son mucho menores, generalmente sólo un pequeño porcentaje de la entrada. Las proporciones de residuo sólido varían en gran medida según el tipo de residuo y el diseño detallado del proceso.

Para una combustión oxidativa eficaz, es esencial un aporte de oxígeno suficiente. El número «n» de la relación entre el aire de incineración suministrado y el aire necesario químicamente (o estequiométrico) para la incineración está normalmente entre 1,2 y 2,5 según si el combustible es gas, líquido y sólido, y según el sistema del horno.

La etapa de combustión es sólo una etapa de la instalación de incineración global. Las incineradoras incluyen normalmente un conjunto complejo de componentes técnicos que interactúan y que, considerados en su conjunto, realizan un tratamiento global de los residuos. Cada uno de estos componentes tiene una finalidad ligeramente distinta.

El diseño preciso de una planta incineradora cambia según el tipo de residuo a tratar. Los siguientes parámetros y su variabilidad son factores clave:

- Composición química del residuo
- Composición física del residuo, como tamaño de las partículas, forma, etc
- Características térmicas del residuo, como calor calorífico, niveles de humedad, etc

El coste del tratamiento de los gases de combustión representa aproximadamente un 15-35% de la inversión total.

Los posibles impactos de las instalaciones de incineración de residuos en sí se engloban en las siguientes categorías:

- Emisiones globales del proceso a la atmósfera y al agua (incluido olor)
- Producción global de residuos del proceso
- Ruido y vibración del proceso
- Consumo y producción de energía
- Consumo de materias primas (reactivos)
- Emisiones fugitivas (principalmente del almacenamiento de residuos)
- Reducción de los riesgos de almacenamiento/manejo/proceso de residuos peligrosos

También se producen impactos antes de llegar a la instalación, con el transporte y pretratamiento de los residuos.

A continuación se presenta un resumen de las principales emisiones a la atmósfera de las emisiones de chimenea:

- Partículas
- Ácidos y otros gases (HCl, HF, HBr, HI, SO<sub>2</sub>, NOX, NH<sub>3</sub>...)
- Metales pesados (Hg, Cd, Tl, As, Ni, Pb...)
- Compuestos de carbono sin efecto invernadero (CO, hidrocarburos (COV), PCDD/F, PCB...)
- Olor
- GHGs (metano, CO<sub>2</sub>...)

Las principales fuentes potenciales de emisiones al agua (dependientes del proceso) son:

- Efluentes de los dispositivos de control de contaminación atmosférica (sales, metales pesados...)
- Descargas de efluentes finales de plantas de tratamiento de aguas residuales (sales, metales pesados...)
- Agua de calderas, purgas (sales...)
- Agua de refrigeración en sistemas de refrigeración húmedos (sales, biocidas...)
- Desagües de pavimentos y otras superficies (lixiviados diluidos...)
- Zonas de almacenaje, manejo y transferencia de residuos entrantes (residuos entrantes diluidos...)
- Zonas de almacenaje de materias primas (agentes químicos de tratamiento...)
- Zonas de manejo, tratamiento y almacenamiento de residuos finales (sales, metales pesados, compuestos orgánicos...)

En cuanto a la producción de residuos sólidos durante el proceso de incineración encontramos:

- Cenizas y/o escorias
- Cenizas de calderas
- Polvo de filtros
- Otros residuos de la limpieza de gases de combustión (cloruros de calcio o sodio...)
- Lodos del tratamiento de aguas residuales

Además, ciertos sólidos pueden ser aprovechados, como en el caso de escorias para materiales de construcción, materiales férricos y no férricos o yeso, ácido clorhídrico, carbonato sódico y cloruro sódico provenientes de la limpieza de aguas residuales.

Como fuentes de ruido encontramos:

- Traslado de vehículos
- Pretratamientos mecánicos
- Extractores de gases de combustión
- Sistema de refrigeración
- Turbinas
- Purgas de emergencia de presión en calderas
- Compresores

Las incineradoras son instalaciones que consumen energía pero también producen, llegando a conseguir una producción neta de energía.

Como aportes de energía se encuentran los propios residuos y también combustible de apoyo y en ocasiones electricidad importada. Con ello se consigue producir electricidad y calor.

En lo referente a consumo de materias primas y energía, encontramos electricidad, calor para ciertos procesos, combustibles auxiliares, agua, reactivos y aire a presión.

Finalmente, los factores relacionados con la economía de las instalaciones de incineración son:

- Coste de los terrenos
- Planificación y construcción
- Economías de escala
- Aprovechamiento de la planta
- Requisitos de tratamiento de gases y efluentes
- Gestión y valorización de cenizas
- Eficiencia energética y su valoración
- Exenciones fiscales, subvenciones, tasas...
- Requisitos arquitectónicos
- Accesos a las instalaciones
- Seguros
- Administración y personal

Los ingresos de las plantas provienen de cánones, subvenciones y ventas de energía (electricidad y/o calor) y/o productos (de cenizas o de proceso).

También es importante señalar que el rendimiento con producción de calor puede alcanzar un 80% de la energía entrante, mientras que con sólo electricidad se alcanza alrededor de un 20%, la cual alrededor de la tercera parte es usada por la misma planta.

Las operaciones que se llevan a cabo dentro de una planta incineradora son:

- ✓ Recepción
- ✓ Almacenaje
- ✓ Pretratamiento
- ✓ Carga
- ✓ Tratamiento térmico
- ✓ Recuperación de energía
- ✓ Limpieza de gases de combustión
- ✓ Descarga de gases de combustión
- ✓ Gestión de residuos de limpieza de gases de combustión, aguas residuales y cenizas

✓ Monitorización y control de emisiones

Fracción eliminada	Impactos principales sobre el resto de residuos
Vidrio y metales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento en el valor calorífico</li> <li>• reducción en la cantidad de metales recuperables en la escoria</li> </ul>
Papel, cartón y plástico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reducción en el valor calorífico</li> <li>• posible reducción en las cargas de cloro si el PVC es común</li> </ul>
Residuos orgánicos, como alimentos y residuos de jardín	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reducción en las cargas de humedad (particularmente de las cargas máximas)</li> <li>• aumento en el valor calorífico neto</li> </ul>
Residuos voluminosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• menor necesidad de extracción/trituración de tales residuos</li> </ul>
Residuos peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reducción en la carga de metales peligrosos</li> <li>• reducción de algunas otras sustancias, como Cl, Br, Hg</li> </ul>

Ilustración 40: efectos de la selección y pretratamiento de residuos durante la incineración

### 2.1.1. Proceso térmico

Tras la preceptiva recepción, aceptación y, en su caso, pretratamiento de los residuos en la planta, éstos pasan a ser tratados térmicamente. Existen variadas tecnologías, cuyo rango de carga típico de aplicación se especifica en la tabla siguiente:

Tecnología	Rango de aplicación típico (toneladas/día)
Parrilla móvil (combustión en masa)	120-720
Lecho fluidizado	36-200
Horno rotativo	10-350
Modular (defecto de aire)	1-75
Pirólisis	10-100
Gasificación	250-500

Ilustración 41: rangos de aplicación típicos de las tecnologías de tratamiento térmico

También, la siguiente tabla muestra el grado de éxito de aplicación de cada tecnología de combustión a la hora de tratar los RSU:

Técnica	Residuos urbanos sin tratar	RSU pretratados y RDF
Parrilla - reciprocante	Se aplica ampliamente	Se aplica ampliamente
Parrilla - móvil	Se aplica	Se aplica
Parrilla - oscilante	Se aplica	Se aplica
Parrilla - rodillos	Se aplica	Se aplica ampliamente
Parrilla - refrigerada por agua	Se aplica	Se aplica
Parrilla más horno rotativo	Se aplica	Normalmente no se aplica
Horno rotativo	Normalmente no se aplica	Se aplica
Horno rotativo - refrigerado por agua	Normalmente no se aplica	Se aplica
Solera estática	Normalmente no se aplica	Normalmente no se aplica
Horno estático	Normalmente no se aplica	Normalmente no se aplica
Lecho fluidizado - borboteo	Se aplica raramente	Se aplica
Lecho fluidizado - circulante	Se aplica raramente	Se aplica
Lecho fluidizado - rotativo	Se aplica	Se aplica
Pirólisis	Se aplica raramente	Se aplica raramente
Gasificación	Se aplica raramente	Se aplica raramente

Ilustración 42: grado de éxito de aplicación de distintas técnicas de combustión de RSU

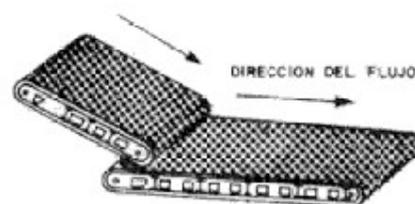
#### 2.1.1.1. Parrilla

Como se puede deducir de la tabla anterior, la incineración en parrilla es la tecnología más empleada a la hora de tratar los RSU. Con datos de 2011, el 90% de las plantas de tratamiento térmico de RSU hacían uso de parrillas.

Las incineradoras de parrillas normalmente constan de un alimentador, la propia parrilla de incineración, un descargador para la ceniza de fondo, sistemas de conducción para el aire de incineración, la cámara de incineración y quemadores auxiliares.

El tiempo de residencia de los residuos en la parrilla no suele superar los 60 minutos, y éstos pueden ser alimentados de manera continua o discontinua, dependiendo del sistema:

- Oscilante
- Reciprocante/de vaivén (inversa o de empuje)
- Móvil (menor agitación)
- De rodillos



(a) Parrillas Transportadoras

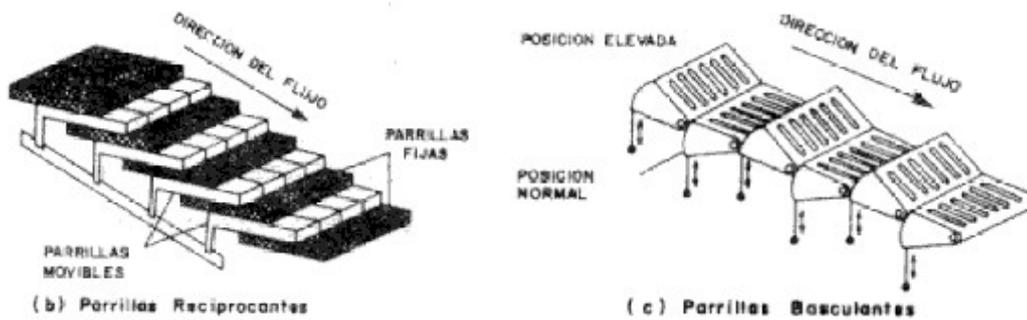


Ilustración 43: sistemas de parrilla incineradora

Además, con el fin de controlar la temperatura del metal de la parrilla y de la combustión local, ésta es refrigerada por aire o agua. La descarga de la ceniza de fondo a través de los huecos de la parrilla se resuelve en un descargador con agua que la enfría sin mayor problema.

El diseño de la cámara de incineración es más complejo y relevante a la hora de obtener un buen rendimiento global de combustión. Los factores que influyen son:

- Forma y tamaño de la parrilla
- Vorticidad y homogeneidad del flujo de gases de combustión
- Tiempo de residencia de los gases de combustión
- Enfriamiento parcial de los gases antes de llegar a la caldera

Existen tres diseños de cámaras en función de la dirección del flujo de los gases de combustión –flujo paralelo, contracorriente o flujo central- aunque los operadores de RSU no han encontrado claras ventajas entre uno u otro. La alimentación de la cámara con aire tiene como objetivos el aporte de oxígeno, refrigeración, evitar la formación de escoria en el horno y mezcla de los gases de combustión; para ello se recurre a flujos de aire primario (el soplado por debajo de la parrilla y proveniente generalmente del búnker de carga) y aire secundario (el soplado directamente en la cámara). Además se dispone de quemadores auxiliares para los arranques, paradas, o cuando la temperatura cae por debajo del umbral de funcionamiento.

Las condiciones de combustión vienen dadas por la Directiva 2010/75/UE en su artículo 50 apartados 1 y 2, que establecen:

- ✓ Se obtendrá un grado de incineración tal que el contenido de carbono orgánico total (COT) de las escorias y cenizas sea inferior al 3% o su pérdida por combustión sea inferior al 5% del peso seco de la materia.
- ✓ La temperatura de los gases derivados de la incineración de residuos se elevará a partir de la última inyección de aire por encima de los 850°C durante al menos 2 segundos, aumentando esta cifra hasta 1100°C en caso de incineración de residuos peligrosos que contengan más del 1% de sustancias organohalogenadas expresadas en cloro.

Es posible obtener con una buena combustión con valores inferiores a los del segundo apartado, pero se necesita una autorización expresa con la correspondiente prueba. En cualquier caso el contenido de gas CO es un indicador clave de la calidad de la combustión (combustiones deficientes elevan la producción de CO).

### 2.1.1.2. Horno rotativo

Es una tecnología muy robusta que permite tratar casi cualquier tipo de residuo, por lo que se destina a residuos peligrosos y clínicos más que a RSU. El tiempo de residencia del residuo oscila entre 30 y 90 minutos y el diseño y mantenimiento del material refractario es de especial relevancia.

### 2.1.1.3. Lecho fluidizado

Las incineradoras de lecho fluidizado se aplican ampliamente a la incineración de residuos finamente divididos, como RDF (combustible derivado de residuos) y lodos de alcantarillado. El tamaño de partícula tiene muchas veces un diámetro máximo de 50 mm, aunque se reporta que diámetros medios de 200 - 300 mm son aceptables para lechos fluidizados rotativos.

Un incinerador de lecho fluidizado es una cámara de combustión revestida en forma de cilindro vertical. En la sección inferior, un lecho de material inerte (arena, ceniza...) sobre una parrilla o placa de distribución se fluidiza con aire. Los residuos a incinerar son alimentados continuamente desde la parte superior o lateral. Los residuos son alimentados al reactor a través de una bomba, un alimentador rotatorio o un transportador de husillo-tubo. En el lecho fluidizado se realiza el secado, volatilización, ignición y combustión. La temperatura en el espacio libre sobre el lecho (margen libre) está generalmente entre 850 y 950°C. Sobre el material del lecho fluidizado, el margen libre está diseñado para permitir la retención de los gases en una zona de combustión. En el lecho en sí, la temperatura es inferior, y puede estar alrededor de 650°C o más.

La ventaja de esta tecnología es la uniformidad y estabilidad del proceso de combustión, a costa eso sí de tener que pretratar los residuos. Los costes de pretratamiento son relativamente elevados, por lo que es una fantástica idea combinar una efectiva recogida separada de residuos con el tratamiento por lecho fluidizado.

Pueden diferenciarse las siguientes tecnologías de horno de lecho fluidizado de acuerdo con las velocidades de los gases y el diseño de la placa de boquillas:

- Estacionario (o de borboteo) (atmosférico y presurizado): el material inerte se mezcla, pero el movimiento resultante hacia arriba de sólidos no es significativo. Se utiliza comúnmente para lodos de alcantarillado e industriales.
- Rotativo: es una variación del anterior. El lecho fluidizado gira dentro de la cámara de incineración. Esto produce un tiempo de residencia más largo en la cámara de incineración. Se permite mayor rango de valores caloríficos gracias al control de temperaturas mediante circulación y revestimiento refractario, permitiendo el tratamiento de residuos pretratados.
- Circulante: las mayores velocidades de los gases en la cámara de combustión son responsables de la retirada parcial del combustible y del lecho, que es alimentado de vuelta a la cámara de incineración por un conducto de recirculación. También es comúnmente usado con lodos de alcantarillado. Permite en cierto modo una gama mayor de residuos, y aporta mayor rendimiento calórico y uniformidad en la temperatura.

Además, existe un sistema intermedio entre parrilla y lecho fluidizado. Se trata del horno de parrilla con alimentador dispersor (Spreader-Stoker), que se centra en dispersar y tratar "por

separado” partículas finas y gruesas. En comparación con sistemas de lecho fluidizado, la uniformidad del tamaño de partícula es menos importante y hay un menor riesgo de obstrucción.

#### 2.1.1.4. Gasificación y pirólisis

Gasificación y pirólisis son técnicas avanzadas de tratamiento térmico de residuos. La diferencia primordial respecto de la combustión en lo que a proceso se refiere, es la presencia subestequiométrica (gasificación) o ausencia (pirólisis) de oxígeno. La gasificación se produce a temperaturas similares a la incineración mientras que la pirólisis ocurre en un rango más bajo (400-700°C). Su objetivo es gasificar los residuos, formando un nuevo producto conocido como **gas de síntesis** (*syngas*) que tiene varias salidas comerciales:

- Como combustible para calderas/turbinas de vapor (**valor calorífico**, menos eficiente globalmente respecto de la combustión )
- Como combustible para motores /turbinas de gas (**valor químico**, más eficiente)
- Como materia prima (metanol...)

En el caso de la **pirólisis**, además se forma otro nuevo producto llamado **coque**, con un contenido significativo de carbono y también con posibilidad de uso externo.

Otras ventajas respecto de la combustión son:

- Menor volumen de limpieza de gases de tratamiento
- Menor formación de contaminantes en dichos gases (debido a menores cantidades de oxígeno y temperatura)
- Mayor pureza de los metales (sin oxidar) y del residuo sólido en general
- Obtención de CO y H<sub>2</sub> con ayuda de una sustancia de gasificación

Sin embargo, también presentan importantes desventajas:

- Mayores requisitos de calidad y pretratamiento de los residuos (tamaño, consistencia)
- Técnica en presión
- Mayor control de temperaturas y presiones
- Mayores costes e incertidumbres

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los rendimientos energéticos entre las distintas técnicas:

Técnicas	Pirólisis/gasificación	Incineración
Caldera de vapor + turbina	10-20%	14-27%
Motor de gas	13-28%	-

Ilustración 44: rendimientos energéticos de las distintas técnicas de tratamiento térmico

### 2.1.2. Recuperación de energía

La mayor parte de energía del proceso exotérmico de combustión pasa a los gases de combustión. Dejando al margen gasificación y pirólisis, la incineración recupera dicha energía en forma de:

- Calor. Rendimientos del **80%**
- Vapor. Rendimientos del **100%**
- Electricidad. Rendimientos del **20-25%**, hasta **30%**
- Cogeneración (CHP). Rendimientos de hasta **85%** (20-25%P + 60-65%H)

Estas cifras de rendimiento son a partir de la energía que llega a la caldera. Las pérdidas gas-caldera son de un 20%.

Los factores a tener en cuenta son:

- Cantidad y calidad (valor calorífico neto, **VCN**) de los residuos, así como regularidad de suministro a corto y largo plazo (efectos estacionales, recogida selectiva...)
- Uso de técnicas para mejorar el rendimiento como:
  - ✓ Mejoras en el diseño de las caldera
  - ✓ Precalentamiento del aire de combustión
  - ✓ Refrigeración con agua (para VCN > 10 MJ/kg)
  - ✓ Condensación de los gases de combustión (sólo en climas muy fríos)
  - ✓ Uso de bombas de calor (alternativa a la anterior)
  - ✓ Recirculación de los gases de combustión "limpios" como aire secundario
  - ✓ Recalentamiento de los dispositivos de tratamiento de gases residuales
  - ✓ No reducción de la visibilidad del penacho
  - ✓ Mejoras en el ciclo vapor-agua
- Forma de energía a transformar, en función de los clientes potenciales
- Condiciones locales como acceso al agua, clima, espacio y posibles agentes afectados

### 2.1.3. Tratamiento de los gases de combustión

El tratamiento de los gases de combustión (TGC en adelante) se lleva a cabo combinando varios procesos que se encargan cada uno de cierto/s contaminante/s específico/s. A continuación se expone un esquema representando la inmensa diversidad de combinaciones de procesos posibles:

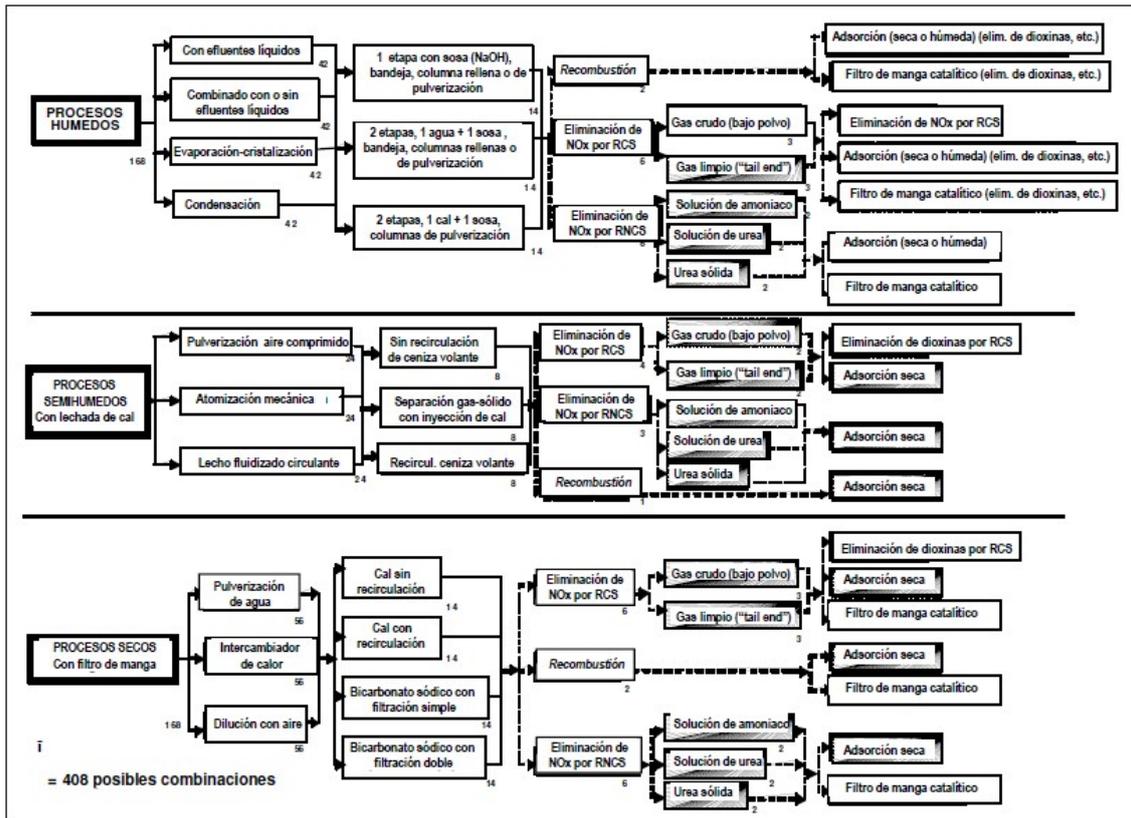


Ilustración 45: combinaciones de tratamiento de gases de combustión

#### 2.1.4. Tratamiento y control de aguas residuales

En primer lugar, es importante señalar las diversas procedencias de aguas residuales en una planta de incineración de residuos:

- Del propio proceso, en sistemas húmedos de TGC
- De la recogida, tratamiento y almacenaje de cenizas de fondo
- De otros procesos (del ciclo agua-vapor...)
- Sanitaria
- De lluvia limpia
- De lluvia contaminada
- De procesos de refrigeración

Muchas de estas corrientes son recirculadas en la misma u otras partes de la instalación, o bien tratadas en estaciones de depuración genéricas. Sin embargo, el tratamiento del efluente procedente de sistemas húmedos de TGC sí se lleva a cabo en la propia planta, por lo que su consideración frente a sistemas semi-secos o secos y, en su caso, diseño, son de capital importancia.

### 2.1.5. Tratamiento y control de residuos sólidos

Análogamente al caso de las aguas residuales, los residuos sólidos en una planta incineradora pueden provenir de varias corrientes, básicamente de la etapa de combustión por una parte, y de la de TGC por otra.

De la primera corriente se producen ceniza de fondo (gran cantidad), ceniza de caldera y ceniza volante. Cuando la operación se realiza a temperaturas especialmente altas (a más de 1400°C) las cenizas se funden/vitrifican transformándose en escoria, disminuyendo su lixiviabilidad y aumentando por tanto sus posibilidades de reciclaje. Esto ocurre particularmente con hornos rotativos o con combinaciones gasificación-combustión.

Respecto a la segunda, destacar la concentración de contaminantes, que dificultan o imposibilitan su reciclaje. Así distinguimos:

- Residuos de **TGC seco y semisecho**. Son una mezcla de sales de calcio y/o sodio, principalmente cloruros y sulfitos/sulfatos. También hay algunos fluoruros y reactivos químicos sin reaccionar (como cal o carbonato sódico). Esta mezcla también incluye restos de ceniza volante, por lo que puede incluir metales pesados y PCDD/F. La forma normal de desecho es en vertedero como residuo peligroso (cuidado con la lixiviabilidad). Los residuos de TGC derivados del proceso seco con bicarbonato sódico pueden purificarse y reciclarse en un proceso industrial (esto puede requerir la segregación de la ceniza volante y de los residuos de sal, por ejemplo con dos etapas de filtración de gases de combustión) con el fin de reducir el contenido inerte. El transporte al usuario final puede ser un factor económico crítico.
- **Torta de filtro** del tratamiento fisicoquímico del agua residual **del tratamiento húmedo** de gases de combustión. Se caracteriza por un contenido muy elevado de metales pesados, aunque también puede incluir sales de solubilidad limitada, como yeso. La forma normal de desecho es en vertedero como residuo peligroso. Pueden tener elevadas concentraciones de PCDD/F y por lo tanto a veces se tratan antes de su desecho en vertedero
- **Yeso**. También puede recuperarse yeso, con o sin limpieza, según los parámetros del proceso y los requisitos de calidad. La recuperación de yeso es posible cuando se utiliza cal o cal hidratada en un lavador húmedo de dos etapas con un separador de gotas eficiente.
- **Sales**, derivadas de la **evaporación en línea** del agua residual. Este residuo es comparable con el residuo del tratamiento (semi)seco de gases de combustión
- **Sales**, derivadas de la **evaporación separada** del agua residual. El uso o desecho de las sales depende de la composición del residuo final. Suele ser más puro cuando se ha realizado evaporación en línea.
- **Residuos de la limpieza del gas de combustión**. Las opciones para su uso dependen del adsorbente utilizado (carbón activo, coque, cal, bicarbonato sódico, zeolita). A veces se permite la incineración del residuo de carbón (activado) de reactores de lecho fijo en la propia planta de incineración de residuos, si se dan ciertas condiciones de proceso. El residuo de los sistemas de lecho arrastrado puede también ser incinerado, si el adsorbente aplicado es sólo carbón activado o coque de horno. Si se utiliza una mezcla de otros reactivos y carbón activado, el residuo es enviado generalmente para tratamiento externo o desecho, ya que puede haber riesgo de corrosión. Si se utiliza zeolita, existen en principio posibilidades para recuperar el mercurio, pero estas técnicas no están aún disponibles en la práctica.

También es posible, aparte del reciclado o del vertido genérico, usar el material como relleno de minas.

Centrándonos en el proceso de reciclaje, observamos que el alto contenido mineral de las cenizas posibilita su uso potencial como material de construcción. Se tienen en cuenta sus características de combustión, reactividad general, lixiviabilidad de metales, contenido salino y tamaño y distribución de partículas. Precisamente las cenizas de fondo provenientes de RSU son las que mejor características reúnen para este cometido.

Las cenizas de caldera y volantes presentan más dificultades en lo que a reciclado se refiere.

Los procesos de reciclado de cenizas conllevan:

- Reducción de tamaño
- Separación de metales
- Lavado
- Envejecimiento
- Aglomeración
- Tratamiento térmico

Además, es preferible que previamente se haya producido una buena combustión del carbono, la volatilización de metales pesados como Hg y Cd fuera del lecho, y la fijación de los elementos litofílicos en el fondo.

## 2.2. Tratamiento mecánico de residuos

### 2.2.1. Trituradoras de metal

El tratamiento mecánico de residuos consta esencialmente de la trituración de residuos con contenidos eminentemente metálicos. Desde el punto de vista de los RSU, se circunscribe al tratamiento de RAEEs y equipos de intercambio térmico, así como al pretratamiento previo al tratamiento térmico.

Las plantas de tratamiento mecánico de residuos están formadas por varias partes encargadas de ciertos procesos: entrega, recepción y aceptación, preselección y pretratamiento, trituración, procesos post-trituración y técnicas descontaminantes a final de línea.

La primera etapa es análoga al de otros procesos como el térmico tratado en el punto anterior. Destacable respecto a otros tratamientos, la revisión de la radiactividad en los residuos.

En la etapa de preselección y pretratamiento se separan los residuos peligrosos con el fin de operar la planta únicamente con residuos de carácter no peligroso. Muy importante aquí la adecuación del material a las características requeridas por el proceso principal con el fin de aumentar el rendimiento global de la instalación. También es posible el uso de machacadoras para compactar los residuos.

La parte operativa central de la planta es la de trituración. Aquí los residuos entran en una trituradora que consta de una caja con un rotor con martillos que machaca y tritura el material. Éste reduce su tamaño progresivamente hasta que pasa por una rejilla, donde es separado en distintas corrientes:

- Metales férricos
- Metales no férricos
- Resto



Ilustración 46: trituradora de metal de 4 ejes

Se aprovecha y monetiza todo el material posible, los metales con escaso valor se destinan a vertedero y la fracción resto se destina a otras plantas o a vertedero. El polvo es aspirado por la parte superior de la caja.

Existen tratamientos de trituración en condiciones húmedas. La separación del material se realiza de una manera distinta, se reduce la proporción de materiales de baja densidad y se produce una cantidad considerable de lodo.

Como productos de la etapa de la trituración encontramos principalmente (65-75% del peso entrante) a los compuestos férricos, de los cuales hierro y acero, razón principal para la operación de la planta, son un 98%. Los compuestos no férricos representan un 5-10% del peso entrante, conteniendo aluminio, cobre y zinc además de no metales como goma, plásticos, vidrio y piedras.

Tras la trituración el material se limpia y se separa por medio de corrientes de aire en fracción ligera y fracción pesada.

Como posibles emisiones a la atmósfera encontramos polvo (incluidas partículas metálicas, PCBs o mercurio), COVs y vapor de agua. Además, en este tipo de instalaciones (no por culpa de residuos MSW, sino por el combustible residual de los EoLVs) se producen en ocasiones incendios (incluso con la sustitución de filtros de bolsa por ciclones y depuradores venturi), que resultan en emisiones de humo, polvo y dioxinas.

En lo que respecta a emisiones al agua, estas instalaciones suelen usar procesos en seco por lo que la única fuente de agua sería la de lluvia, que es descargada al sistema de alcantarillado.

En lo que respecta al ruido, la mayor fuente es la del molino de martillos, aunque hay otras fuentes más estridentes y discontinuas, como las de descarga de residuos en la entrega.

Los consumos de energía varían notablemente de una planta a otra y de un molino a otro.

### 2.2.2. Trituradoras de equipos que contienen VFCs o VHCs

Los equipos que contienen fluorocarbonos volátiles (VFCs) o hidrocarbonos volátiles (HVCs) son básicamente los equipos de intercambio de temperatura tales como:

- Frigoríficos y congeladores
- Aparatos de aire acondicionado
- Deshumidificadores
- Refrigeradores de agua
- Dispensadores de productos fríos

El contenido de estas sustancias requiere un tratamiento específico conforme a la regulación EC/1005/2009. Así, el primer paso tras la aceptación de los residuos es la extracción de aceites y refrigerantes desde los compresores (a veces es necesario taladrar el equipo, siendo necesaria una válvula que impida el eventual escape de refrigerante). La extracción de VFCs y VHCs de los materiales de aislamiento (como la espuma de poliuretano) se realiza tras la de los compresores, mediante desgasificación de la cámara de trituración y en ocasiones

calentamiento a 110°C. Existen actualmente tres técnicas de desgasificación: criogénica, con catalizador de impacto IC y de adsorción. Estas sustancias aumentan el riesgo de incendio por lo que se toman medidas adicionales de precaución como inyección de nitrógeno o medición de sustancias (como pentanos) para paradas de emergencia preventivas. El resto del proceso, ya sin presencia de VFCs y VHCs, es análogo al del apartado anterior.

### 2.2.3. Tratamiento mecánico de residuos con valor calorífico

Es un tratamiento que tiene por objeto la obtención de un producto no peligroso para la obtención de combustible. En él se separan las fracciones con mayor valor calorífico o contenido energético del resto de sustancias con menor rendimiento como piedras, vidrio, chatarra y sustancias con demasiado contenido de humedad. Es importante indicar que este tratamiento se suele combinar con el de tratamiento biológico, dando lugar a las instalaciones de tratamiento mecánico-biológico MBT que se analizarán posteriormente.

El resultado de esta técnica son los combustibles sólidos (recuperados de residuos SRF, derivados de residuos RDF y biocombustibles), plásticos, madera y fracción incombustible. En comparación con el carbón, el combustible procedente de residuos difiere en los contenidos de azufre, cloro y metales pesados.

La principal emisión atmosférica es el polvo, seguido de compuestos orgánicos y olores. Es un proceso seco principalmente, teniendo como emisiones de agua específicas las procedentes de rociamiento de agua para reducción de polvo y la depuración húmeda. La principal fuente de energía es la electricidad y como consumibles podemos encontrar el carbón activado para tratamiento de gases.

## 2.3. Tratamiento biológico de residuos

El tratamiento biológico de residuos se caracteriza por el uso de microorganismos que descomponen la materia orgánica de los residuos en agua, CO<sub>2</sub>, sustancias inorgánicas y algunas sustancias orgánicas más simples que las de inicio. En función de la presencia o no de oxígeno, los residuos se descomponen mediante distintos procesos:

- Tratamiento aerobio
- Tratamiento anaerobio
  - Acidogénesis
  - Metanogénesis

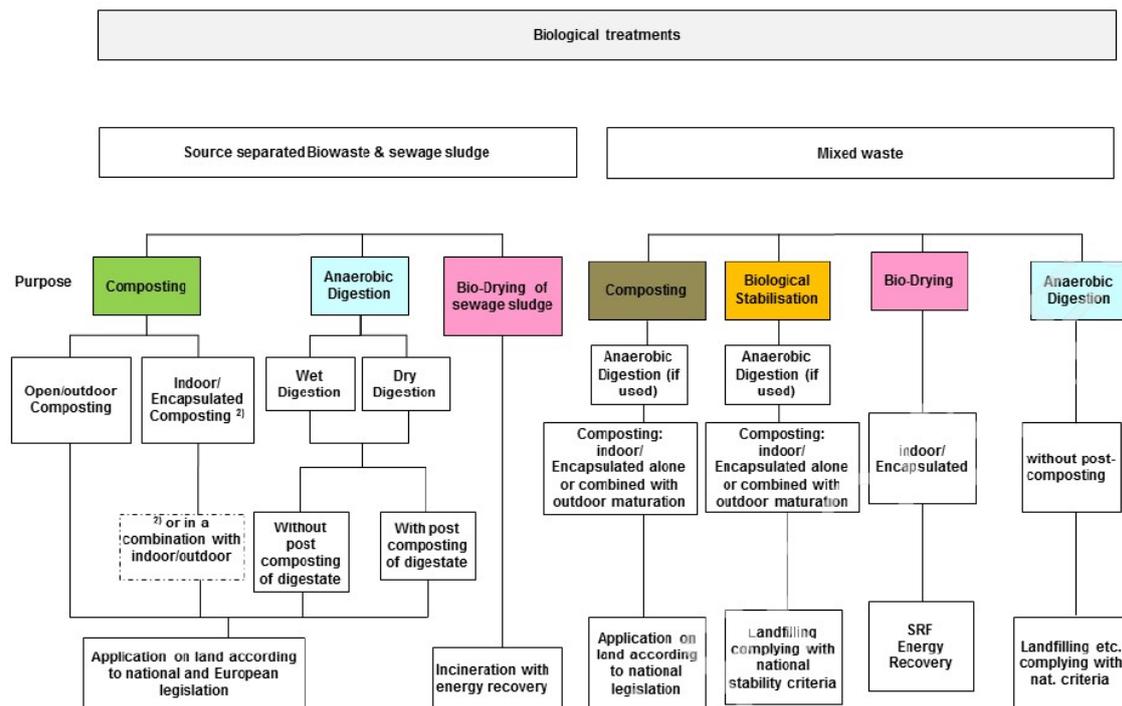


Ilustración 47: tratamientos biológicos de residuos y sus destinos

Las condiciones óptimas para un tratamiento biológico de residuos son la ausencia de toxicidad en la materia prima, un rango entre 4 y 8 de pH y una proporción 100:5:1 de compuestos carbono, nitrógeno y fósforo respectivamente.

Las emisiones específicas de estos tratamientos dependen de los compuestos volátiles de la materia prima, del tipo y cantidad de residuos tratados y del tipo de tratamiento llevado a cabo. Un inconveniente relevante en estas técnicas es la concentración de metales pesados y otros compuestos no biodegradables en los microorganismos.

### 2.3.1. Tratamiento aerobio de residuos

Mediante este tratamiento se consigue la producción de compost para fertilizante y en menor medida también combustible. Los mayores rendimientos se consiguen con una materia prima fácilmente biodegradable, húmeda y que pueda formar una estructura auto-estable que

mejore la circulación de aire (oxígeno). El rango de humedad debe ser del 25-75%, encontrándose el óptimo entre 50-65% y el ratio C:N debe ir desde 10:1 hasta 35:1, con 20:1 como valor óptimo.

Como entradas tenemos residuos orgánicos recogidos separadamente y residuos de jardines y parques como materia prima, y materias auxiliares como agua, ácido sulfúrico, ácido sulfuroso, lubricantes, aceites y gasóleo.

El proceso consta de cuatro etapas, a saber: recepción, preparación, compostaje y finalización. Durante la recepción se pesan, revisan y/o analizan los residuos entrantes. En la fase de preparación se realizan procesos como apertura de las bolsas de basura, retirada de objetos no deseados, homogenización... Tras la preparación, comienza el compostaje, en el que se distinguen dos fases:

- **Descomposición intensiva:** ocurre durante las dos o tres primeras semanas, cuando la curva de degradación es más inclinada. La mayoría de las emisiones (CO<sub>2</sub>, agua, amoníaco y calor) están ligadas a esta fase. La temperatura alcanza los 70°C en las hileras. Contenido de agua, aireación y temperaturas son los parámetros de control claves durante el proceso. Gracias a la aireación se previenen procesos anaeróbicos a la vez que se expulsa calor y humedad excesivos. El uso de aireadores (mediante o sopleo o succión) acelera el proceso. El sopleo permite una mejor y más rápida descomposición pero la succión mejora la recogida de emisiones, previene la corrosión y facilita las condiciones para los operarios (caso de que sea necesaria su entrada).
- **Maduración:** necesaria o no dependiendo del proceso, materia prima y calidad a la salida. Dura entre seis y doce semanas y se produce en hileras planas o triangulares. La materia no descompuesta libera sustancias húmicas y los macroorganismos (como gusanos) pueden, ya a menor temperatura, mezclar y reducir el tamaño del compost.

Por último durante la finalización se clasifica el material por tamaños y/o se quitan impurezas.

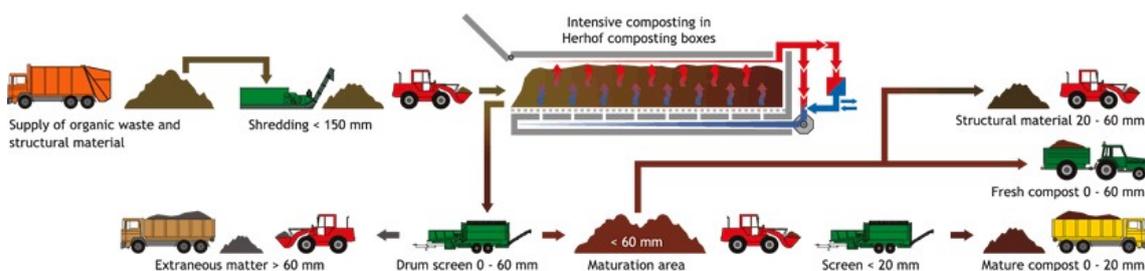


Ilustración 48: planta de compostaje de RSU tipo

Además, han surgido distintos procesos de compostaje en función del diseño de la descomposición, la disposición y mezcla de las hileras y el sistema de ventilación. Así encontramos:

- ✓ Sistema *Brikollare*: la materia prima se comprime en forma de briquetas y se envía en pallets a la sala de compostaje. Tienen un 50-62% de contenido en agua, que por capilaridad y aumento de temperatura (debido a la descomposición) es expulsada hasta bajar al 20% tras tres o seis semanas.
- ✓ Compostaje en tambor: caro de operar y en progresivo desuso. Un tambor metálico de rotación lenta incrementa la aeración de la materia prima previamente triturada y homogeneizada. Puede portar inyectores para humedad y los tiempos de residencia son de uno a siete días, pasando entonces a otras fases de compostaje.

- ✓ Compostaje en caja, contenedor o túnel: descomposición en espacios cerrados con aireación forzada, hasta niveles I o II y posterior maduración en hileras o hasta niveles III a V en caso de reentrada al compartimento.
- ✓ Compostaje lineal: líneas fortificadas al aire libre, activamente aireadas y volteadas línea a línea a máquina. Duración entre dos y doce semanas, incluyendo fase de maduración.
- ✓ Hileras planas: hileras sobredimensionadas dispuestas en una sala con volteo automático y suelo activamente ventilado y por segmentos.
- ✓ Hileras triangulares: en sala, bajo cubierta o al aire libre, el material es amontonado y volteado. Aireación pasiva, poca demanda de oxígeno, fase de maduración.
- ✓ Bajo membrana semipermeable en hileras lineales y triangulares: previene el anegamiento y contiene las emisiones de olores, COVs y demás emisiones.
- ✓ Biosecado: varios contenedores consecutivos y con sistema de aireación en los que los lotes de residuos van pasando de uno a otro, posibilitando condiciones óptimas progresivas y reduciendo el potencial de emisiones.

Las emisiones del proceso son: olores, polvo, bioaerosoles, gases (COVs, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>), ruido de los volteos y sistema de aireación y líquidos. Para ello se usan biofiltros al aire libre o a cubierto, filtros de polvo y/o depuradores de ácido.

### 2.3.2. Tratamiento anaerobio de residuos (digestión anaerobia)

El producto del tratamiento anaerobio (sin presencia de oxígeno) o digestión anaerobia (AD en adelante) de residuos son el biogás y una fracción sólida llamada digestato. El biogás es una fuente de energía renovable de electricidad, calor y/o combustible. La AD es especialmente útil en residuos con muy alta COD.

La AD consta de cuatro fases:

1. Hidrólisis: los compuestos poliméricos (carbohidratos, proteínas, grasas) son transformados a compuestos orgánicos moleculares más simples (amino ácidos, ácidos grasos y azúcares). Los microorganismos hidrolíticos liberan enzimas hidrolíticas descomponiéndose el material fuera de las propias células. Se libera algo de hidrógeno.

2. Acidogénesis (fermentación): bacterias acidogénicas descomponen la materia en ácidos menos grasos (ácidos acéticos, ácido propiónico y butírico), CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, junto con algo de ácido láctico y alcoholes.

3. Acetogénesis: bacterias acetogénicas transforman en ácido acético, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>.

4. Metanogénesis: las arqueas lo reducen todo a metano y CO<sub>2</sub>.

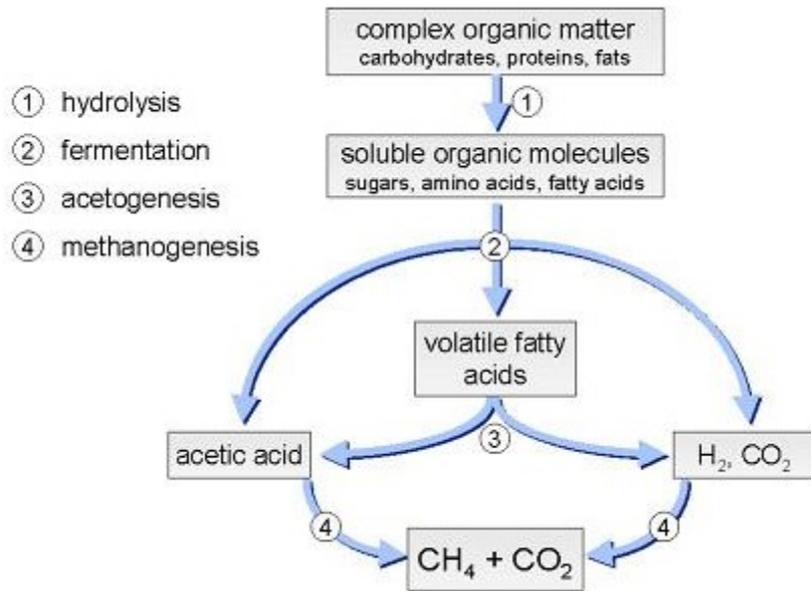


Ilustración 49: pasos del proceso de digestión anaerobia

A partir del biogás se puede producir también biometano. Se diferencia de éste por el descarte del  $\text{CO}_2$  y otras impurezas como siloxanos y sulfuro de hidrógeno, con lo que se consigue destinarlo a la red de gas natural o como combustible en motores de gas. Para ello se utilizan técnicas como precipitación, depuración o carbón activado. La mejora del biogás generalmente es energéticamente eficiente, pero también es muy costosa y no está muy extendida (especialmente en plantas pequeñas) destinándose principalmente a CHP y calderas.

El mayor inconveniente de la AD es su incapacidad para descomponer la lignina de la madera.



Ilustración 50: planta de biometanización de residuos tipo

La humedad favorece el proceso, con rangos entre 60 y 99%, siendo en ocasiones necesaria la adición de agua. La presencia de altas concentraciones de metales pesados en cambio puede

ser tóxica para las bacterias metanogénicas. También hay que revisar el contenido de sólidos volátiles ante posibles sobrecargas.

Muy importante la calidad de origen de los residuos. Biorresiduos recogidos separadamente, con máximo contenido orgánico y mínima contaminación por metales pesados, son los que mejor rendimientos proporcionan (como en compostaje), con altos volúmenes de biogás y calidad del digestato. En ocasiones se mezclan con lodos para alcanzar la mínima humedad necesaria.

El digestato, si es de calidad y lo permiten las leyes, puede ser usado como fertilizante orgánico en forma líquida (como el estiércol), semisólida (turba) o ser mejorado mediante compostaje, secado o peletización para parques, horticultura y jardines. Los nutrientes que contiene son nitrógeno, fósforo, potasio y contenido en carbono orgánico. Si no fuera de suficiente calidad por contener demasiadas impurezas, como metales pesados, su aprovechamiento energético también es otra opción para su salida comercial.

También se produce un residuo sólido tipo madera y arena. El primero puede ser aprovechado energéticamente o descompuesto aeróbicamente, y el segundo como material de construcción.

En cuando al proceso de producción en sí, las variables más importantes son el contacto residuo-biomasa, humedad y modo y grado de aireación. También podemos distinguir cuatro etapas: recepción (análoga a la de tratamiento aerobio), preparación, digestión y finalización. Durante la preparación se separan materiales indeseados y se reduce el tamaño de los útiles, además de pretratarlos mediante adición de agua (si fuera necesaria) y calentamiento. El calentamiento puede ser realizado con un pretratamiento aerobio de los residuos durante un par de días o cuatro; se pierde algo de biomasa para la AD pero ahorra la energía extra para calentarlos y aumenta el rendimiento de biogás. El calentamiento higieniza el sustrato y si es aerobio ayuda a tratar la lignina.

La fase central, de digestión, se puede llevar a cabo en diferentes condiciones de operación en función de la humedad y la temperatura:

- Termofílica, a 55°C
- Mesofílica a 40°C
- Seca (o semi-seca) con 15-40% de materia seca
- Húmeda con menos de 15% de materia seca

A falta de otras consideraciones, el proceso es más rápido cuanto mayor es la temperatura, pero también es cierto que el proceso termofílico es más difícil de controlar y necesita mayor aporte de calor. Los líquidos son añadidos para controlar el amoníaco y algunas concentraciones de sal.

Existen fermentadores verticales con agitador (comunes en digestión húmeda), horizontales con agitado lento y por flujo (seca), verticales sin mezcla y por flujo (seca) y en caja/percolación (por lotes). El sistema de mezcla pueden ser mecánico (mucho consumo eléctrico), hidráulico o neumático (tiende a formar espuma).

En la etapa de finalización, se higieniza el producto (si no se llevó a cabo previamente) y se madura aeróbicamente. La higienización dura una hora a 70°C y la maduración de dos a seis semanas.

## 2.4. Tratamiento mecánico-biológico de residuos (MBT)

El tratamiento MBT, como su nombre indica, combina los tratamientos mecánico y biológico descritos en los puntos anteriores. No obstante, esta denominación no implica la secuencia de tratamientos real llevada a cabo en la planta, así, el tratamiento mecánico puede preceder al biológico o viceversa.

Mediante esta combinación se trata de reducir volumen y contenido orgánico de los residuos, permitiendo, si es posible, su uso como RDF. Se pierde entre un 20 y un 35% de agua y material biodegradable, y las reducciones de volumen pueden superar el 60%.

En lo que respecta a la operación, la principal diferencia respecto a los tratamientos por separado, es que en MBT los residuos entrantes son más diversos y mezclados, así que la maquinaria a usar debe ser más robusta. En cuanto a los productos de salida, éstos contienen impurezas tal que conforme a la legislación vigente su uso como compost no está permitido; se usan como cierre de vertederos o se vierten directamente (si no se han reciclado ni aprovechado energéticamente). El cobre y zinc sirven como nutrientes para las plantas pero el resto de metales se consideran peligrosos.

Las emisiones del proceso son las esperables de ambos procesos: polvo, olores, bioaerosoles, VOCs, amoníaco, metano, monóxido y dióxido de carbono, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre y lixiviados (no tienen por qué ser todas, depende de las técnicas usadas en la planta en concreto).

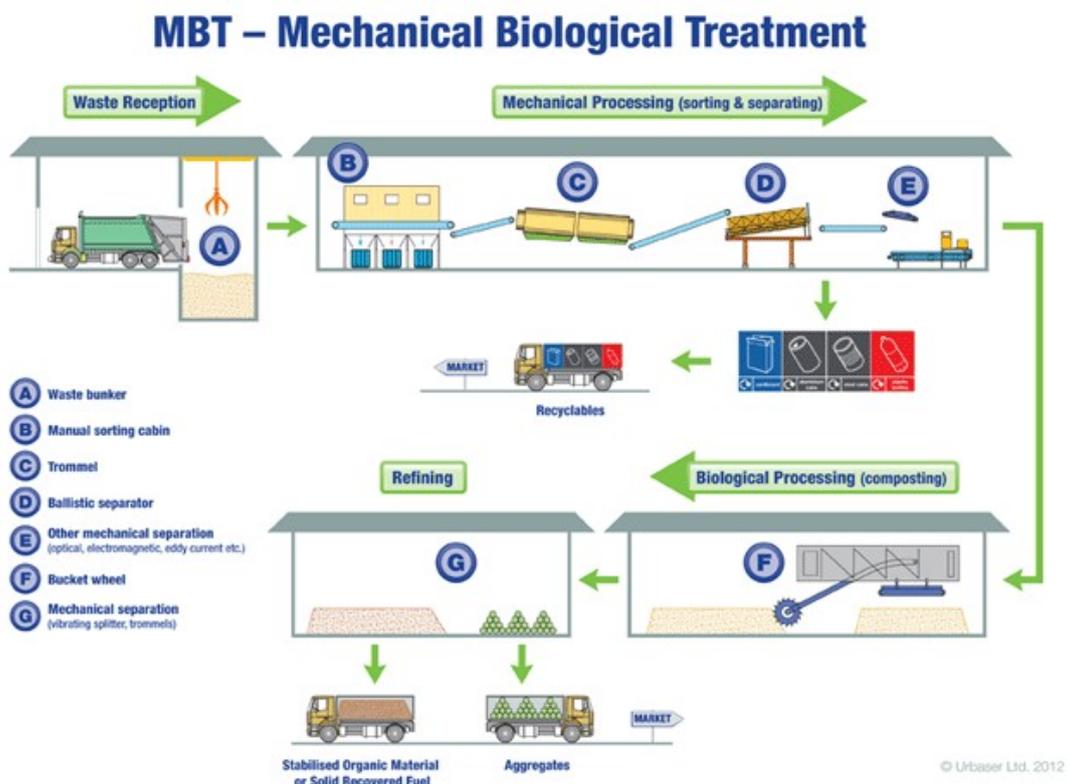


Ilustración 51: esquema de una planta de tratamiento MBT de residuos

## 2.5. Tratamiento físico-químico de residuos

### 2.5.1. Tratamiento F-Q de residuos sólidos y/o pastosos

Para residuos sólidos y/o pastosos, existen dos técnicas principales:

- Inmovilización (incluye estabilización y solidificación)
- Tratamiento previo destino a relleno

#### 2.5.1.1. Inmovilización

El objetivo principal es minimizar la afección por lixiviados, retrasando su inicio y/o reduciendo su peligrosidad.

Mientras que la **estabilización** está más relacionada con cambios químicos, la **solidificación** se centra en cambios físicos. La primera posibilita la transformación de un residuo de peligroso a no peligroso, mediante destrucción de contenidos orgánicos peligrosos o transformación de compuestos inorgánicos.

Los residuos apropiados para estos tratamientos son: amianto, escoria y cenizas, residuos de FGT, lodos, de industria metalúrgica (contenido de cromo VI), catalizadores usados, pinturas, minerales de procesos químicos, compuestos ácidos y solubles, alto contenido de arsénico y suelos contaminados. Los más apropiados son los inorgánicos, que ya presentan baja solubilidad.

Los residuos no apropiados son: inflamables, con sustancias volátiles, agentes oxidantes, olorosos, alto contenido de orgánicos solubles y COD, con molibdeno, sales inorgánicas solubles, cianuros y agentes quelantes.

Tipo de residuo	Reactivo tipo cemento	Reactivo tipo puzolana	Reactivo termofílico	Reactivo tipo orgánico polimérico
<b>Orgánicos no polares</b> como: aceites y grasas, hidrocarburos aromáticos y halogenados, PCBs	Dificulta el asentamiento. Menor durabilidad. VOCs pueden escapar. Efectivo en ciertas condiciones.	Igual que tipo cemento.	Posible evaporación de orgánicos. Efectivo bajo ciertas condiciones.	Dificulta el asentamiento. Efectivo bajo ciertas condiciones.
<b>Orgánicos polares</b> como: alcoholes, fenoles, ácidos orgánicos, glicoles	Fenoles retardan asentamiento y durabilidad	Igual que tipo cemento. Alcoholes retardan asentamiento.	Posible evaporación de orgánicos.	-
<b>Ácidos</b> como: hidroclorehídrico, hidroflorehídrico	No afección asentamiento. Cemento neutraliza ácidos. Portland II y IV mejor que I. Efectivo.	No afección asentamiento. Compatible, neutraliza ácidos. Efectivo.	Pueden ser neutralizados previa incorporación.	Igual que termofílico. Urea-formaldehído efectividad demostrada.
<b>Oxidantes</b> como:	Compatible.	Compatible.	Puede causar	Igual que

hipoclorito de sodio, permanganato de potasio, ácido nítrico, bicromato de potasio			rotura de la matriz. Riesgo de incendio.	termofílico.
<b>Sales</b> como: sulfatos, haluros, nitratos, cianuros	Mayor tiempo asentamiento. Menor durabilidad. Sulfatos pueden retardar asentamiento y causar rotura si no cemento especial. También aceleran otras reacciones.	Haluros fácilmente lixiviados y retardan asentamiento. Sulfatos pueden retardar o acelerar reacciones.	Sulfatos y haluros pueden deshidratar y rehidratar, causando fisuras.	Compatible.
<b>Metales pesados</b> como: As, Cd, Cr, Pb, Hg	Compatible. Puede aumentar t asentamiento. Efectivo en ciertas condiciones	Compatible. Efectivo bajo ciertas especies (Pb, Cd, Cr)	Compatible. Efectivo bajo ciertas especies (Cu, As, Cr)	Compatible. Efectividad demostrada con As.

Ilustración 52: reactivos inmovilizantes y su aplicación en residuos

El ratio entre la entrada y la salida del residuo es de 1.2-2.4 en peso y 0.9-1.4 en volumen. Es aconsejable garantizar que la neutralización de la fase sólida se ha completado, usar reactivos químicos complementariamente a los aglomerantes hidráulicos, considerar uso de aditivos y no confiar sólo en estabilización ante residuos difícilmente tratables e caros de incinerar (cianuros, oxidantes, quelantes, alto TOC, disolventes con bajo punto de inflamación y gases).

El incremento de alcalinidad y pH puede provocar un aumento de lixiviación en metales anfóteros (Pb, Cd con  $\text{pH} > 12.5$ ) así como en arsénico y cianuros y ciertos compuestos orgánicos. Además los sistemas basados en cemento o cal necesitan años, décadas y hasta centurias para alcanzar el equilibrio por lo que la estabilidad completa es prácticamente inalcanzable.

Las reacciones se llevan a cabo en silos específicamente diseñados y con la proporción residuo/reactivo y tiempo de residencia adecuados.

En ocasiones hay una fase previa de lavado, para disolución de sales y algunos metales (cromatos y anfóteros). Permite el tratamiento de cenizas volantes y sales procedentes de la descloración de humos de residuos tipo hogar incinerados, así como en cenizas volantes de tratamientos con cal o bicarbonato de sodio. En el último caso se disocian los componentes solubles y no solubles permitiendo el reciclado de las sales solubles. El resultado es una torta de filtro de baja toxicidad y solubilidad, y agua salada.

Otro proceso posible es el de deshidratación. La barrera entre líquido y sólido no es clara, pero un contenido superior al 10% de sólido seco se considera difícil y caro de bombear. Alcanzar este punto puede requerir algún acondicionador químico (floculantes poliméricos de alto peso molecular son particularmente efectivos). El proceso es rentable si la fase acuosa requiere poco o ningún proceso adicional. Hay gran variedad de procesos, dependiendo de la naturaleza y frecuencia de sólidos producidos y de la torta requerida (filtro de prensa, cinta de

prensa, centrifugos y tambores). El más común es el filtro de prensa, por lotes, pasando después a aclaración en una unidad DAF.

#### 2.5.1.2. *Tratamiento previo destino a relleno*

Consiste en preparar los residuos para que sean aptos como relleno en antiguas minas (de sal o potasio por ejemplo). Es apropiado generalmente para residuos de FGT. Se compactan por gravedad o por vibración, se realiza una mezcla adecuada con ellos y con posibles aditivos, y se les añade líquido y/o aglomerante para que estén listos para el bombeo. Se revisa el límite explosivo inferior (LEL) analizando gases como hidrógeno, propano, metano, CO, acetileno o etanol, y si se alcanza dicho límite se toman medidas como mayor ventilación, interrupción del proceso o desconexión de la red del sistema.

#### 2.5.2. *Re-refino de aceite usado*

El objetivo es recuperar el aceite usado como lubricante mediante operaciones de pretratamiento, limpieza, fraccionamiento y finalización.

Durante el pretratamiento se eliminan agua y sedimentos del aceite residual mediante tratamientos físicos y/o mecánicos, generalmente con tanques de asentamiento o también con centrifugadoras o destiladoras.

La limpieza incluye la eliminación de residuos asfálticos como metales pesados, polímeros, aditivos y otros compuestos de degradación, principalmente por destilación o adición de ácidos (como el sulfúrico), así como de arcilla.

El fraccionamiento separa los aceites de base mediante destilación aprovechando los distintos puntos de ebullición.

La finalización adapta los productos a las especificaciones de mercado mejorando color, olor, estabilidades térmica y oxidante, viscosidad... También puede incluir remoción de PAHs (como hidrogenación intensa a altas temperaturas y presiones) o extracción de solventes (a bajas temperaturas y presiones). Existen varias técnicas:

- Tratamiento con álcali: uso de KOH o NaOH para mejorar el color.
- Tierra blanqueante: eliminación del color negro producido por rotura del carbono. Insuficiente para motores de automóviles de turismo.
- Pulido por arcilla: uso de bentonita, peor resultado que con hidrogenación o limpieza de solvente.
- Hidrogenación: eliminación de cloro y azufre a alta temperatura en atmósfera de hidrógeno y en contacto con un catalizador para conversión en HCl y H<sub>2</sub>S, así como de fósforo, plomo y zinc. A altas presiones y temperaturas también de PAHs. Listo como producto comercial y posibilidad de reducción del H<sub>2</sub>S a azufre.
- Limpieza por disolución: mejora de color e índice de viscosidad y remoción de PAHs. Alta calidad de salida pero también necesaria en la entrada, sin metales pesados y ya fraccionado. El disolvente es regenerado. Resta alrededor de un 3% de aceite con alto contenido de PAH usado como combustible.

### 2.5.3. Tratamiento F-Q de residuos con valor calorífico

Consiste en el tratamiento físico-químico de residuos para incrementar su valor calorífico para posterior uso en incineradoras, hornos de cemento y otras instalaciones de combustión.

Las operaciones de tratamiento dependen del destino que tenga el residuo:

- Tipo de residuo
- Técnica de almacenamiento
- Tipo de alimentación al horno
- Tipo de mezcla combustible a usar
- Tipo de proceso de combustión
- Tolerancia de compuestos, robustez

A continuación se presenta una relación de tipos de residuos aptos para conversión en combustibles:

- Combustible sólido de residuos:
  - Residuos pastosos (principalmente peligrosos): disolventes de alta viscosidad, lodos de aceites, residuos de destilación, lodos del tratamiento de lodos industriales (mecánica, química, farmacéutica...), lodos de pintura y barniz, de tinta, polioles, pegamentos, resinas, lubricantes y grasas...
  - Residuos en polvo (principalmente peligrosos): carbón, tóner, pinturas, catalizadores usados, tensoactivos...
  - Sólidos (principalmente peligrosos): polímeros contaminados, serrín impregnado, de lodos del tratamiento de aguas, resinas, pegamentos, pinturas, carbón activado usado, suelos contaminados, lodos de hidrocarburo, absorbentes contaminados, orgánicos de industria química y farmacéutica, embalajes, maderas...
  - Líquidos no aptos para combustible líquido: con riesgo de polimerización.
  - No peligrosos: hogares y comercios, embalajes, maderas, papeles, cartones, textiles, plásticos, construcción y demolición...
- Combustible líquido de residuos por mezcla:
  - Orgánicos: solventes, xilenos, toluenos, *White spirit*, acetona, de petróleo, de destilación...
- Combustible líquido de residuos por fluidificación:
  - Orgánicos: solventes, orgánico pastoso (tintes, pinturas, adhesivos...), aceites, pulverulentos (como pintura en polvo), tortas de filtro, residuos de síntesis química orgánica, aceites y grasas, resinas de intercambio iónico usadas, de destilación, de industria cosmética...
- Combustible líquido de residuos por emulsión:
  - Orgánicos: emulsiones de aceite de industria mecánica y metalúrgica, del refinado de petróleo, de recogida y almacenamiento de productos petroleros, de destilación y regeneración de aceites, desechos de producción, pastosos como grasa, tinta y adhesivos, pulverulentos como pintura, de polvos de limpieza, bases usadas como el sodio, aceites usados...

Como resultado, los rangos de valor calorífico (en MJ/kg) obtenibles son:

- ✓ Peligrosos: 21 – 41.9

- ✓ Industriales no peligrosos: 12.6 – 16.8
- ✓ Municipales: 7.5 – 10.5
- ✓ Plásticos: 21 – 41.9
- ✓ Maderas: 16.8
- ✓ Neumáticos: 25.1 – 31.4

### 2.5.3.1. Combustible sólido a partir de residuo sólido

Consiste en el incremento del valor calorífico del residuo sólido mediante deshidratación y secado. La deshidratación, si es necesaria, se lleva a cabo con la ayuda de compactadores por gravedad, centrífugos, flotantes, de cinta o con tambores rotativos. El secado puede ser térmico (por convección o inducción) o biológico. En el térmico por conducción hay un 10% de los gases respecto de por convección, por lo que es más apropiado para residuos pulverulentos u olorosos.

Se suele recurrir también a la peletización y aglomeración del producto seco, mediante discos metálicos rotativos que agitan el material hasta el punto de plasticidad (en caso de plásticos).

### 2.5.3.2. Combustible sólido a partir de residuo líquido y semilíquido

Básicamente se consigue impregnando el residuo en un soporte como polvo, papel/cartón triturado o absorbentes.

### 2.5.3.3. Combustible líquido

Se trata de mezclar y homogeneizar residuos procedentes de varias fuentes y productores con el fin de optimizar la logística global del proceso. Para ello se usa la simple mezcla (para residuos líquidos orgánicos de pequeños productores), la fluidificación y la emulsión.

En la fluidificación se lleva a cabo una homogenización previa para dotar de características físicas apropiadas al residuo y prevenir posteriores problemas operativos (bloqueos...). El proceso de fluidificación en sí consta de cuatro pasos: calibración de la fase pastosa con retiro de partes metálicas indeseadas, disolución/cribado, molienda/emulsión y almacenamiento previo despacho. La emulsión es una técnica bastante análoga a la fluidificación.

### 2.5.3.4. Combustible a partir de aceites usados

El objetivo es aprovechar el valor calorífico de los aceites usados como combustible en sustitución de carbón, diesel o gasolina. Puede requerir algún tipo de tratamiento previo:

Tratamiento	Cambios	Uso	Destino
Ninguno	Ninguno	Hornos	Incineradoras de residuos, hornos de cemento, calefactores, barcos, canteras...
Reproceso ligero	Eliminación de agua y sedimentos	Mezcla con combustible original	Hornos de cemento, plantas de material de carretera, grandes

			motores náuticos, centrales eléctricas con polvo...
Reproceso severo (químico o térmico)	Desmetalizado de combustible pesado (destilación pesada)	Mezcla con combustible original	Diesel náutico, plantas de calefacción
Rotura térmica	Desmetalizado y rotura	Gasoil destilado	Gasoil, combustible pesado desmetalizado, gasoil náutico, aceite base ligero re-refinado
Hidrogenación	Reducción del contenido de azufre y PAHs	Combustible	Igual que los originales
Gasificación	<i>Syngas</i>	Combustible	Producción de metanol, grandes instalaciones de combustión

Ilustración 53: tratamientos y resultados del uso de aceites usados como combustible

Para los aceites usados es importante tener en cuenta el contenido en cloro, potencial creador de dioxinas durante la combustión y de problemas de corrosión, emisiones de gas ácido y contaminación. Los lubricantes pueden crear depósitos de carbono al quemarse, por lo que se usan en aplicaciones donde esto es irrelevante como en la industria de piedras para carretera y centrales de carbón.

Por otra parte, los aceites procedentes de combustión están sin contaminar generalmente, si acaso envejecidos. Se suelen mezclar en pequeña proporción sin tratamiento previo con originales. Tienen mayor riesgo de emisiones de VOCs aunque los PAHs son menos volátiles.

El reproceso ligero limpia el aceite usado con el fin de mejorar sus propiedades físicas mediante decantación, desmineralización, centrifugación o filtración por membrana.

La rotura térmica consiste en usar calor para romper las cadenas largas en moléculas de hidrocarburos dando como resultado combustibles líquidos menos viscosos, y más ligeros y valiosos. Una buena ventaja es que la operación es flexible, dando lugar a productos de salida (nafta, gasoil, lubricantes, pesados) variables en proporción, pudiendo adaptarse mejor al mercado. La producción de gasoil es la más exigente en términos de aporte térmico.

#### 2.5.3.5. Biodiesel

El biodiesel es un combustible a partir de los aceites vegetales residuales, conseguidos mediante limpieza por filtración y eliminación del agua.

#### 2.5.4. Regeneración de solventes residuales

Los solventes son usados ampliamente en sectores de pintura, revestimiento, tinta, industria farmacéutica y química, producción cinematográfica, fibras sintéticas, soluciones de caucho,

plástico y resinas, desengrasado, limpieza en seco, productos agrícolas, aerosoles y dispensadores. Existen cuatro modos de contaminación de disolventes:

- Con aire: cuando se disuelve una resina o polímero y queda como poso tras evaporación del disolvente. Puede dar problemas por posible reacción con el absorbente de lecho de carbono o al recuperarlo del vapor.
- Con agua: ya sea en el propio proceso o en la recaptura, puede ser un proceso simple o complejo y no rentable.
- Con un soluto: a menudo el producto requerido es separado por filtración desde la reacción. Aquí el disolvente se encarga de las impurezas restantes en un líquido de baja viscosidad. También puede ocurrir en limpieza de instalaciones, donde son importantes tanto el poder de disolución como la miscibilidad en agua.
- Con otros solventes: en procesos complejos como en las industrias química y farmacéutica.

Un amplio rango de solventes son regenerados: halogenados, no halogenados, hidrocarburos, alcoholes, glicoles (anticongelante), ácidos orgánicos (acético), productos de limpieza, líquido de frenos y refrigerantes. Indicar también que tras la regeneración no tiene por qué tener la misma calidad que en el estado previo al uso.

Los procesos más simples incluyen filtración, centrifugado o decapado, aunque el más común es la destilación.

La destilación puede ser clasificada según varias categorías: modo de operación (continua o por lotes), presión de operación (vacío, atmosférica o a presurizada), etapas de destilación (mono o multi-etapa), introducción de gases inertes (como el vapor para ayudar a la separación) o uso de compuestos adicionales (destilaciones azeotrópica o extractiva). Así, existen varios tipos de destilación: en película fina, de camino corto, flash en una etapa, en varias etapas, con oscilación de presión, azeotrópica o extractiva. Además existen separaciones más complejas como la pervaporación.

#### 2.5.5. Recuperación de los residuos de reducción de contaminación y FGT

Durante los procesos de reducción de emisiones en los distintos procesos industriales, se produce una serie de residuos que deben ser tratados. Carbón activado, resinas, catalizadores, residuos del FGT y extracción de ácidos serán puntos a tratar en este apartado.

##### 2.5.5.1. *Regeneración del carbón activado usado*

El tratamiento térmico es el proceso principal para la regeneración de carbón activado usado, mediante secado, desorción térmica y calentamiento. El carbón activo se presenta comercialmente en tres formas: extruido, granular y en polvo. Sólo las dos primeras formas admiten regeneración.

El tratamiento de aguas residuales es el mayor proveedor de carbón activado usado de lejos, aunque las industrias también aportan su parte. Los contaminantes impregnados son: cloro, COD/BOD, pesticidas, restos orgánicos (ácidos húmicos, fenoles) e inorgánicos (Ca, P), metales (Fe, Al, Cd, Hg), tintes, detergentes o explosivos.

El mejor dispositivo de regeneración es el horno de múltiples chimeneas, que optimiza mejor la temperatura del proceso.

#### *2.5.5.2. Regeneración de resinas*

Como en el caso del carbón activado, la regeneración de resinas de intercambio iónico también recurre al tratamiento térmico, pudiendo recurrir a agua caliente o vapor.

Una vez más es el tratamiento de aguas (ablandamiento) el mayor proveedor de resinas de intercambio iónico, aunque son usadas también en procesos químicos, metalurgia, alimentación y farmacia. Pueden recoger iones tóxicos (cromatos, cianuros) y metales pesados, y en tratamiento de aguas también pesticidas, cloro, fenoles e inorgánicos como Ca, Na, Mn y P.

#### *2.5.5.3. Regeneración de catalizadores*

Una parte de los catalizadores usados se destinan a vertedero, pero también es posible la regeneración de los mismos, colaborando así con los objetivos de la Economía Circular. La regeneración de catalizadores puede llevarse a cabo dentro de la propia instalación que los usa (in situ) o fuera de ella en otras instalaciones de gestión de residuos (ex situ), que son las que contemplaremos en este estudio.

La regeneración de catalizadores también recurre a la combustión como medio para eliminar el coque impregnado en ellos. Son regenerados los catalizadores de la industria de la refinación (hidrogenación, hidrorrotura, reforma e isomerización) y metales nobles (Rh, Cd, Pt, Ir, níquel de Raney y algunos catalizadores de petróleo como Ni-Co, Co-Mo y Co).

#### *2.5.5.4. Tratamiento de los residuos del FGT*

##### *2.5.5.4.1. Recuperación de sales por bicarbonato*

El objetivo es separar las partes solubles e insolubles de los residuos del FGT, solidificando la parte insoluble y purificando y reutilizando la parte soluble en forma de salmuera. Para ello se mezclan los gases ácidos (clorhídrico y fluorhídrico) y el  $\text{SO}_2$  con el bicarbonato de sodio, obteniendo un soluto (cloruro, fluoruro y sulfato de sodio), agua y  $\text{CO}_2$ . La neutralización requiere una fase térmica a más de  $140^\circ\text{C}$  para convertir el bicarbonato de sodio en carbonato de sodio de alta superficie y porosidad.

Se suelen juntar el carbón activado y el bicarbonato de sodio durante el FGT, con posterior filtración en una o dos etapas. En una, cenizas volantes y sales son recogidas en un único filtro representando éstos el 40% de la entrada. Con dos etapas, las cenizas se recogen antes del tratamiento por bicarbonato, obteniendo un 85% de sales en su recogida aguas abajo.

Como producto se obtienen la parte soluble reciclable (salmuera y demás) y la insoluble que se destina a vertedero, siendo menor al 20% de la masa inicial antes del proceso. Por ello las ventajas del proceso, poco exigente en términos de energía y agua (casi nada), son la venta de las sales (cercanía a plantas de soda recomendable) y la mayor facilidad y menor coste de inmovilización previo vertido.

#### 2.5.5.4.2. Recuperación de sales del FGT por solución/evaporación

Se trata de obtener sal, cloruro sódico, ácido clorhídrico y yeso del tratamiento húmedo de FGT. Las aguas de limpieza se tratan con NaOH y CaCO<sub>3</sub> para producir yeso (CaSO<sub>4</sub>), NaCl y CaCl<sub>2</sub>.

Evaporando la mezcla con un contenido mayor al 30% de NaCl, ésta empieza a cristalizar, pudiendo ser vendida y utilizada para deshielo de carreteras. La desventaja es el gran consumo energético del proceso de evaporación y posibles problemas de corrosión.

El yeso no presenta tantos problemas operacionales, pero sí de color. Entre 2 y 5 kg por tonelada se pueden obtener con una calidad aceptable.

En cuanto al cloruro de calcio, puede presentar problemas de extrema corrosión y de cambios a fase (entre sólido y líquido).

Sin embargo, estos procesos se hacen sólo por motivos medioambientales ya que los costes asociados son varias veces superiores a los de la obtención natural de dichos productos. Además, la gran cantidad y calidad de yeso obtenido de plantas eléctricas relega el yeso de FGT a destinos con menores requerimientos o al vertido mismo.

#### 2.5.5.4.3. Lavado de residuos del control de polución

Se lavan el polvo resultado del control de polución para poder separar con filtros de membrana las partes solubles útiles (minerales para la construcción) de otras partes no deseadas. Se reduce el nivel de cloruros, que son descargados, y los metales pesados son convertidos a especies menos solubles. El agua se va reciclando y el hidróxido de calcio, residuo peligroso, puede ser convertido en yeso añadiendo ácido sulfúrico. Tanto hidróxido de calcio como yeso son útiles para la construcción.

#### 2.5.5.5. Extracción ácida

Mediante el uso de ácido se solubilizan y extraen metales pesados y sales de los residuos sólidos. Se recupera hasta el 85% de Cd y Zn, 95% del Hg y 33% de Pb y Cu. Existen tres variantes:

- Extracción ácida: se separa el mercurio con ayuda de un filtro o de un intercambiador iónico y con un purificador ácido se extraen el resto de metales pesados y sales de las cenizas de caldera y volantes, en una proporción 4:1 de líquido-sólido y con un pH de 3.5 (añadiendo cal hidrata si es necesario). A los 45 minutos se precipita el yeso. El resto sólido es deshidratado, filtrado a contracorriente y depositado junto con la ceniza de fondo. El residuo del filtro se trata con neutralización, precipitación e intercambio iónico para recuperar más metal.
- Extracción ácida y tratamiento térmico: las cenizas de caldera y volantes son lavadas en la solución del primer depurador húmedo, deshidratadas y llevadas a un horno rotatorio a 600°C para destrucción de compuestos orgánicos y volatilización del mercurio. El gas es tratado con carbón activado y del agua se sacan los metales restantes. La solución del segundo depurador lava la ceniza de fondo y neutraliza el efluente ácido.

- Extracción ácida con sulfuro: solución 5:1 de agua y ceniza volante con NaOH, ajuste del pH a 6-8 con HCl para extracción de metales y adición de NaHS para enlace de metales como sulfuros. Adición de coagulante y deshidratación del lodo. Vertido de la torta de filtro y tratamiento con obtención de metales de las aguas residuales.

### 2.5.6. Tratamiento F-Q y/o biológico de residuos líquidos/bombeables

Es un proceso análogo al de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales. Normalmente estos residuos son una mezcla de agua con minerales, una mezcla de agua con orgánicos e incluso una mezcla de ambos. Emulsiones, refrigerantes, lubricantes, ácidos, soluciones alcalinas, salinas, agua de enjuague, con hidrocarburos, disolventes, cianuros, lodos. El producto de salida puede ser en forma de: lodo, torta de filtro, aceite/combustible residual, disolvente gastado, sólido, agua, concentrado... El lodo generado puede ser compactado para posterior tratamiento, o para mezcla con otros lodos o con residuos del FGT. Casi siempre la torta es incinerada o en caso contrario, vertida. El contenido en metales está más controlado que el de orgánicos. Los residuos del tratamiento provienen esencialmente de precipitación/floculación, concentrados del filtro de membrana, evaporación e intercambio iónico, aunque también de procesos de limpieza y drenaje, construcción y contenedores.

Debido a la gran variabilidad de los residuos bombeables, cada planta tiene un diseño particular en función de los residuos de entrada. Las operaciones que se dan en ellas pueden ser: cribado, almacenamiento, neutralización, sedimentación, precipitación, floculación, intercambio iónico, oxidación/reducción, adsorción, absorción, evaporación/destilación, filtración por membrana, separación por vapor, extracción, filtración/drenaje, separación ácida u orgánica de emulsiones, centrifugación, tratamiento biológico o finalización.

	Residuos				
	Emulsiones	Emulsiones y mezclas aceite/agua	Emulsión y residuo con contenido tóxico	Residuo acuoso con solventes orgánicos	Anterior con surfactantes
Cribado					
Sedimentación					
Ultrafiltración					
Evaporación					
Calentamiento					
Separación con vapor					
Separación con ácido					
Separación orgánica					
Oxidación/reducción					
Filtro por membrana					
Floc/precipitación					
Sedimentación					
Drenaje					

Precipitación sulfúrica					
Filtración					
Intercambio iónico					
Neutralización					

Ilustración 54: residuos líquidos y tratamientos aplicables

En lo referente a la mezcla de residuos, hay que considerar:

- No mezclar aguas residuales con halógenos adsorbibles ligados orgánicamente (AOX), cianuros, sulfuros, compuestos aromáticos, benceno o hidrocarburos (disueltos, emulsionados o sin disolver).
- En metales, usar Hg, Cd, Pb, Cu, Ni, Cr, As y Zn como parámetros de clasificación y control.
- Disponer de medidas de aislamiento de efluentes en caso de incumplimiento en la muestra, y registro de casos.

Al tratar con nitritos, evitar su mezcla con otros residuos y comprobar y evitar gases nitrosos durante oxidaciones, acidificaciones y reducciones de los mismos.

Las emulsiones son tratadas con separación ácida. Ácidos y bases gastados son usados como agentes auxiliares y el aceite es llevado a proceso. Los metales disueltos son separados por precipitación/floculación, precipitación sulfúrica e intercambio iónico.

Los residuos acuosos con solventes orgánicos recurren al uso de energía para calentamiento y separación por vapor en atmósfera inerte para eliminación de materiales vaporizables o inflamables. Según el contenido de contaminantes tras esta etapa, se sigue con un esquema de membrana, precipitación/floculación y/o neutralización.

Los residuos marinos se caracterizan por contenidos de aceite, sustancias orgánicas y sólidos como sedimentos, y los residuos fotográficos por el contenido de plata.

### 2.5.7. Tratamiento F-Q de residuos con POPs

Se trata de descontaminar equipos o sustancias impregnadas de contaminantes orgánicos persistentes (POPs) mediante: lavado con disolventes, biocidas y agentes neutralizantes, trituración, clasificación, criba, limpieza en vacío, destilación, proceso térmico, entre otros. Son equipos como transformadores eléctricos que contienen PCBs, dispositivos de análisis médico usados contaminados por agentes infecciosos, equipos con una fina capa contaminada por arsénico, residuos contaminados por mercurio (tubos fluorescentes, pilas, carbón activado usado, protectores de mercurio, termómetros, contactores). El producto de salida suele ser el equipo listo para reutilizarse, o en su defecto un residuo, que depende más del proceso que del propio residuo. En el caso de los transformadores, las partes de madera o papel son incineradas.

Un caso especial es el de los residuos que contienen policlorobifenilos (PCBs), habitualmente tratados por incineración a partir de 1100°C durante dos segundos y 30 minutos para las fracciones gaseosas y sólidas respectivamente. Otras opciones como los tratamientos móviles existen, como en el caso de aceites lubricantes contaminados al aire libre con PCBs, donde hay que evitar su diseminación a partir de 1 ppm de concentración.

Una opción es la limpieza del equipo (transformadores) contaminado, que puede llevarse a cabo por tres métodos:

- Drenaje: se drena el aceite del transformador contaminado de PCB, se descontamina químicamente por sustitución del cloro por hidrógeno, se comprueba el estado de los materiales porosos como la madera y los huecos entre partes metálicas y si todo está correcto se reinyecta el aceite limpio en el transformador.
- Relleno: drenaje y sustitución hasta bajar de 50 ppm de concentración en PCBs, medidas en condiciones estables pasados nueve meses. Pueden ser necesarios varios rellenos, denominándose relleno en serie.
- Lavado con disolvente: aceite y piezas son extraídos y lavados y reciclados, por lo que no se recupera el transformador.

El caso de los condensadores es bastante análogo. Formalmente se diferencian por el material del núcleo, aluminio en lugar de cobre. Una opción es descontaminar la carcasa mediante lavado con disolvente e incineración de núcleo, otra triturar y descontaminar también el núcleo, o también realizar un tratamiento separado para mejor la reutilización.

La otra opción es la destrucción de PCBs mediante incineración (ya descrita en puntos anteriores) o mediante tratamientos físico-químicos como: descloración con álcali metálico, descloración con KPEG (hidróxido potásico+polietilenglicol), hidrogenación (conversión total en metano) o proceso solvatado de electrones.

#### 2.5.8. Tratamiento F-Q de residuos con mercurio

La filosofía básica es separar el mercurio del resto del desecho, para su posterior tratamiento. Se destila tratando los gases con filtros de polvo y carbón activado y el destilado es incinerado o purificado. Con destilación en vacío, se evapora el mercurio a 300-650°C. El rendimiento es superior al 95%, muchas veces llegando al 99.9%.

#### 2.5.9. Regeneración de ácidos

##### 2.5.9.1. Regeneración de ácido sulfúrico

Existen dos métodos: uno es la descomposición térmica para conversión en dióxido de azufre a 1000°C, y otro basado en la reconcentración y separación de impurezas por evaporación. Hay varios procesos pero el más común se basa en evaporadores de circulación forzada. El proceso es muy dependiente energéticamente, pero la operación en vacío permite menores temperaturas y el uso de materiales más convencionales. Otros procesos usan gases calientes o combustión sumergida.

### 2.5.9.2. *Regeneración de ácido clorhídrico*

Suele ser un subproducto de procesos de cloración. Suele ser reusado en la industria química cuando es formado en fase gaseosa. Puede también ser disuelto en agua. El ácido es neutralizado.

## V. Análisis comparativo y aplicación de las técnicas disponibles

---

El proceso de elección de una técnica de gestión de residuos de entre las múltiples disponibles revisadas en el anterior apartado, es una tarea compleja puesto que en dicho proceso confluyen multitud de intereses tales como: salud pública, medio ambiente, sociedad, cultura, política, técnica, economía, etc. Para intentar facilitar este proceso, en el que se combinan múltiples alternativas con múltiples factores a tener en cuenta, se han venido desarrollando una serie de técnicas que además tratan de dar como resultado una solución más o menos justificada y por lo tanto menos sujeta a subjetividades e intereses particulares. La técnica general recibe el nombre de Análisis de Decisión Multicriterio.

Cuando algunos criterios son difíciles de cuantificar económicamente, como en este caso los medioambientales o los sociales, se descartan otros análisis como puede ser el de coste-beneficio (*Cost-Benefit Analysis CBA*) o el de análisis coste-efectividad (*Cost-Effectiveness Analysis CEA*) y se opta por el Proceso de Jerarquía Analítica (*Analytical Hierarchy Process AHP*, Thomas L. Saaty, 1970s).

El proceso AHP presenta una estructura de decisión simple pero al mismo tiempo robusta y transparente, favoreciendo la participación de las diferentes partes interesadas. En él se llevan a cabo comparaciones por parejas con el fin de obtener un ranking, siendo después comprobada la consistencia de los mismos. Se lleva a cabo tanto para los criterios como para las distintas alternativas, sintetizando todo en otro ranking, global, que desvela la solución más adecuada teniendo en cuenta todos los criterios. Así, podemos distinguir los siguientes pasos:

- ✓ Definición del problema y determinación de los objetivos
- ✓ Identificación de criterios
- ✓ Identificación de alternativas
- ✓ Cálculo de los pesos relativos
- ✓ Comparación de alternativas y orden de preferencias

El enfoque del AHP ayuda a separar el problema global en varias subpartes. En la cima se coloca el objetivo, por debajo de él los criterios a tener en cuenta a la hora de conseguir dicho objetivo, y en la base se encuentran todas las distintas alternativas a considerar para la consecución del objetivo.

Una vez identificados objetivo, criterios y alternativas, se realizan las comparaciones por parejas. Esto ocurre entre todos y cada uno de los criterios, y entre todas y cada una de las alternativas. Es un proceso mecánico consistente en la respuesta a una única pregunta del estilo:

¿Cuánta importancia/preferencia posee un criterio/alternativa respecto a otro a la hora de cumplir con el objetivo?

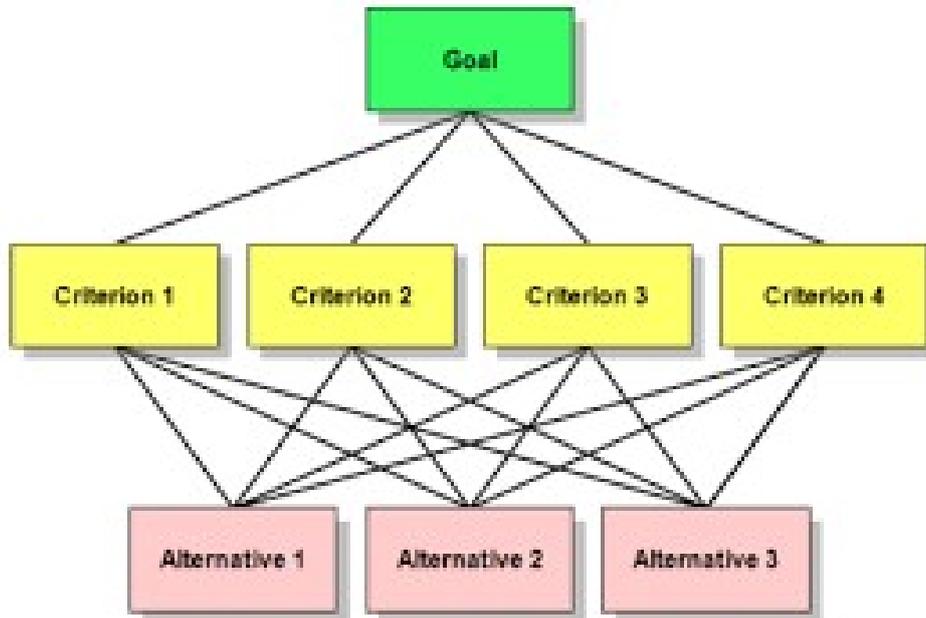


Ilustración 55: esquema de la estructura del mecanismo de decisión multicriterio AHP

La respuesta a dicha pregunta se refleja mediante un valor numérico, mayor cuanto más se aproxime al cumplimiento del objetivo, y dichos valores se recogen en una matriz que, si es lo suficientemente consistente, refleja el orden de prioridades para la pregunta en cuestión mediante un vector de propiedades, que es el vector propio de la matriz:

$$A v = \lambda v$$

Siendo **A** la matriz de comparación y  $\lambda$  y **v** valor y vector propios de dicha matriz.

La consistencia de la matriz se calcula mediante un ratio de consistencia (CR) que debe ser menor al 10%:

$$CR = \frac{CI}{RCI}$$

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1}$$

Siendo *CI* el Índice de Consistencia, *n* la dimensión de la matriz de comparación y *RCI* el Índice de Consistencia Aleatorio. Éste último resulta ser la media de los índices de consistencia de 500 matrices generadas aleatoriamente. Para las primeras 15 dimensiones los índices son:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Ilustración 56: RCI para las 15 primeras dimensiones

Una vez se obtienen todas las matrices y prioridades (vectores propios) de criterios y alternativas, el último paso es realizar la composición de dichas matrices para la obtención del

ranking global final, que es la resolución del presente proyecto. La composición se realiza multiplicando el resultado de cada alternativa respecto al criterio por el peso relativo de dicho criterio, y sumando los resultados de los criterios obtenidos para la alternativa en cuestión, dando como resultado un nuevo vector de prioridades global, solución del proyecto.

También en este caso se comprueba la consistencia de la solución mediante otro Ratio de Consistencia global  $CRg$  que también debe ser menor al 10% y que responde a la siguiente fórmula:

$$CRg = \frac{CIg}{RI} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i * CI_i}{RI}$$

Siendo  $CIg$  el Índice de Consistencia global y  $v_i$  el vector de prioridad local respecto al criterio.

Como complemento para mejorar la interpretación de los resultados el resultado final puede ser normalizado a la base 1, es decir, dando el valor del 100% a la opción que ha resultado ser la más óptima, quedando las restantes con cierto porcentaje de preferencia menor a ésta.

Finalmente, y como en todo Análisis de Evaluación Multicriterio, es conveniente realizar un análisis de sensibilidad de los resultados. Éste determina la robustez de los mismos y demuestra el grado de influencia de los pesos relativos propuestos con respecto al resultado final. Para ello, se vuelven a realizar análisis globales, pero esta vez no con los pesos relativos de los criterios procedentes de la matriz de criterios, sino con pesos relativos de control creados *ex profeso*.

Para dar por válido el resultado definitivamente, los resultados del análisis de sensibilidad y los de la solución real deben mostrar coherencia.

# VI. Aplicación práctica al Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante (PZ11 – AGA6)

---

Como se ha descrito en el anterior apartado, las fases a realizar son las siguientes:

1. Definición del problema y determinación de los objetivos
2. Identificación de criterios
3. Identificación de alternativas
4. Cálculo de los pesos relativos
5. Comparación de alternativas y orden de preferencias

A continuación se aplican las fases del proceso al presente proyecto:

## 1. Definición del problema y determinación de los objetivos

El objetivo principal del estudio, es conocer cuál es la mejor alternativa para la gestión de los residuos del Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante (PZ11 – AGA6), teniendo en cuenta todas las posibles condiciones de contorno como son: medio ambiente, economía, salud pública, política, cultura, sociedad, técnica o finanzas.

## 2. Identificación de criterios

En la definición del problema se han llegado a citar hasta nueve criterios a tener en cuenta para la elección de alternativas. Sin embargo, el alcance del presente estudio no puede llegar a detallar con tanta precisión la solución a adoptar. Así, una serie de criterios se combinarán y algunos otros quedarán fuera del análisis. La combinación además permitirá mejorar la consistencia de las matrices, ya que con la información de partida disponible es imposible distinguirlos en la práctica.

Los criterios a combinar serán el aspecto medioambiental y el de salud pública, que quedarán englobados en el medioambiental, los de cultura y sociedad, transformados en socio-cultural, y coste y finanzas, englobados en economía.

Así, en el presente estudio se tendrán en cuenta los siguientes factores:

### CRITERIO MEDIOAMBIENTAL

Engloba cualquier cambio, tanto positivo como negativo, en la tierra, los ecosistemas y la salud pública como consecuencia de una gestión de residuos deficiente y tiene en cuenta aspectos como:

- Contaminación del aire y de las aguas
- Exposición a patógenos
- Uso, requerimiento y contaminación de los suelos
- Recuperación de materiales
- Eliminación y cubierta de residuos
- Recuperación neta de energía
- Molestias por ruidos, vibraciones y olores

### CRITERIO SOCIO-CULTURAL

La característica más importante de la sociedad en lo que a gestión de residuos de refiere, es que ella misma es la productora de los mismos, estando la fase de producción estrechamente relacionada con la prevención de residuos. No obstante, en la fase de gestión también se debe tener en cuenta a la sociedad, particularmente en estos aspectos:

- Aceptación y comprensión de la tecnología a emplear
- Usabilidad y compatibilidad con la política general de gestión
- Flexibilidad ante cambios políticos/administrativos
- Facilidad de implementación
- Posibilidades de mejora en el empleo y la mejora de las condiciones de trabajo
- Vulnerabilidad (social) del área

### CRITERIO ECONÓMICO

Sin duda uno de los criterios más relevantes, abarcando cuestiones como:

- Costes de construcción y de capital
- Costes de operación y mantenimiento
- Rentabilidad y comerciabilidad de productos resultantes
- Plan financiero

### CRITERIO TÉCNICO

Engloba todo lo relacionado con la capacidad de procesamiento de residuos, su manejo y evolución futura:

- Posibilidad real de implementación
- Robustez
- Facilidad de ampliación
- Grado de especialización de los empleados
- Adaptabilidad a sistemas existentes

### 3. Identificación de alternativas

El apartado cuarto del presente estudio, daba una muestra bastante exhaustiva de las técnicas actuales de gestión de residuos urbanos recogidas en la definición de “Mejores Técnicas Disponibles”. No obstante, sólo unas pocas merecen nuestra atención pensando en su implementación en este Plan Zonal, por sus contrastados resultados para residuos y condicionantes análogos. Estas técnicas son:

- **Tratamiento biológico aerobio (compostaje)**
- **Tratamiento biológico anaerobio (biometanización)**
- **Incineración con recuperación de energía**
- **Depósito en vertedero**

### 4. Cálculo de los pesos relativos

Como se ha explicado en puntos anteriores, se usa una mecánica de comparación por parejas a la hora de determinar los pesos relativos. Para ello nos valemos de una puntuación en función de si el concepto en cuestión se acerca más o menos al cumplimiento de la pregunta objetivo.

Así, éstas han sido las preguntas objetivo para este estudio:

- *¿Cuánta importancia tiene determinado criterio comparado con otro respecto del cumplimiento de la normativa aplicable en el Plan Zonal?*
- *¿Cuál es el nivel de desempeño de una tecnología de gestión de residuos respecto del cumplimiento del criterio en cuestión en el Plan Zonal?*

Se adopta una puntuación mediante escala numérica con los siguientes significados para cada valor:

Preferencia cuantitativa	Preferencia cualitativa
1	Igual
3	Moderada
5	Esencial
7	Manifiesta
9	Extrema
2, 4, 6, 8	Posibles niveles intermedios

Ilustración 57: significados de la cuantificación de preferencias de Saaty

Por lo tanto, ya se está en disposición de evaluar la primera de las preguntas:

*¿Cuánta importancia tiene determinado criterio comparado con otro respecto del cumplimiento de la normativa aplicable en el Plan Zonal?*

Criterio	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
Medioambiental	1	4	3	9	14.10010
Sociocultural	1/4	1	1/3	5	3.45686
Económico	1/3	3	1	8	7.28177
Técnico	1/9	1/5	1/8	1	1.00000

Ilustración 58: matriz de valoración de criterios

El valor propio de la matriz es  $\lambda = 4.16827$ , y encontramos que la matriz es consistente con unos valores de CI = 0.0561 y CR = 0.0623 (<10%).

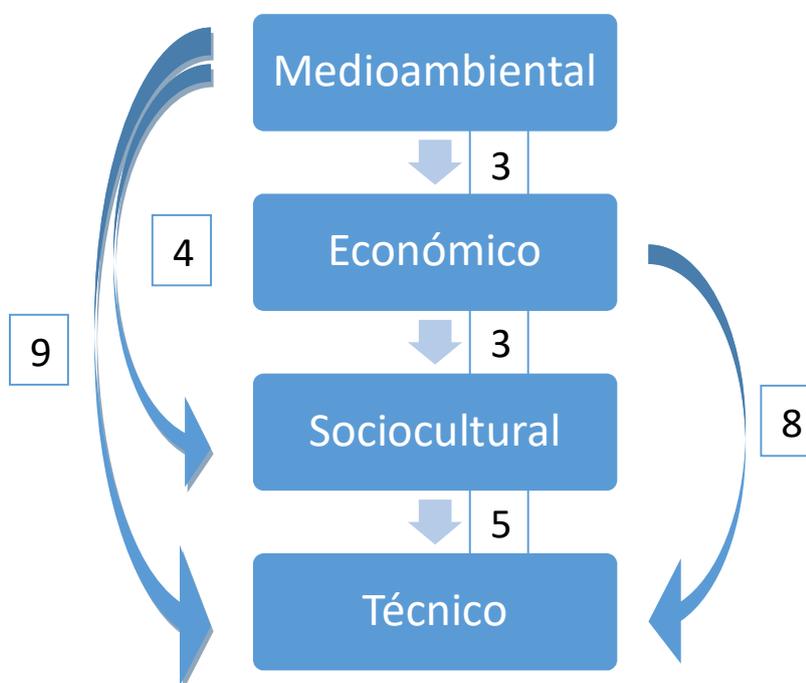


Ilustración 59: matriz de valoración de criterios. Representación alternativa

El vector de prioridad normalizado sería:

<b>Medioambiental</b>	0.54569632
<b>Sociocultural</b>	0.13378599
<b>Económico</b>	0.2818161
<b>Técnico</b>	0.03870159

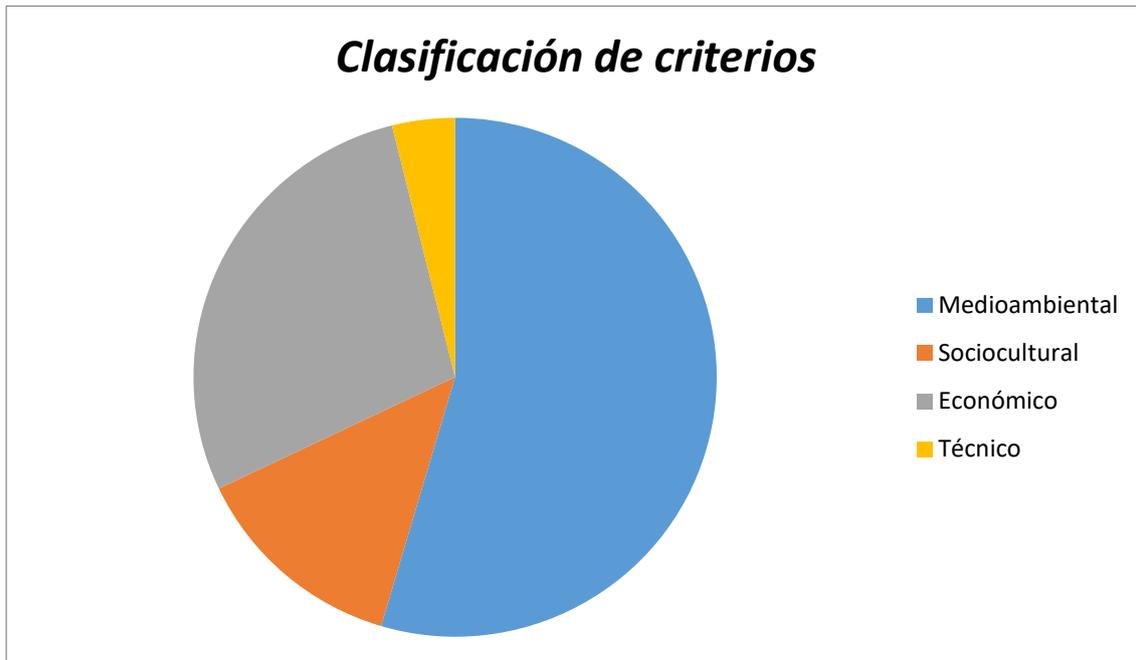


Ilustración 60: clasificación de criterios

Como cabía esperar, el criterio que tiene más peso es el medioambiental, ya que es éste el tema central que ocupan las diversas normativas de gestión de residuos, máxime habiéndolo combinado con el de salud pública. El siguiente en importancia es el factor económico, de gran protagonismo en la presente época por la escasez de recursos económicos del Estado español, especialmente cuando se trata de infraestructuras estratégicas de servicios sin beneficio electoral inmediato.

Resuelta la primera, pasamos a la segunda y última pregunta objetivo:

*¿Cuál es el nivel de desempeño de una tecnología de gestión de residuos respecto del cumplimiento del criterio en cuestión en el Plan Zonal?*

Como en este estudio hemos decidido contemplar un total de cuatro criterios, habrá asociadas a ellos cuatro matrices de comparación, es decir, una por cada uno.

Únicamente contemplando el criterio medioambiental:

Alternativa	Compostaje	Biometanización	Incineración	Vertido	Vector de prioridad
Compostaje	1	2	1/3	6	5.30757
Biometanización	1/2	1	1/5	4	3.00509
Incineración	3	5	1	9	12.97880
Vertido	1/6	1/4	1/9	1	1.00000

Ilustración 61: matriz de valoración medioambiental de alternativas

El valor propio de la matriz es  $\lambda = 4.078$ , y encontramos que la matriz es consistente con unos valores de CI = 0.026 y CR = 0.029 (<10%).

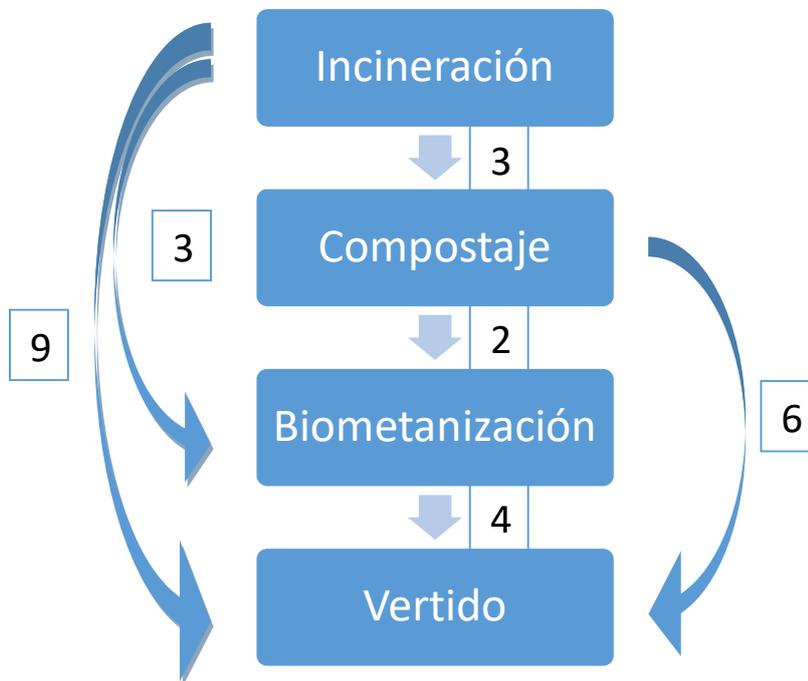


Ilustración 62: matriz de valoración medioambiental de alternativas. Representación alternativa

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
Compostaje	0.4089415
Biometanización	0.23153835
Incineración	1
Vertido	0.07704873

Es la incineración la tecnología preferible en cuanto al criterio medioambiental. Esto es así principalmente por dos motivos. Primero, porque se da por hecho que la técnicamente no

suponemos peligro de emisiones/contaminación incontroladas. Después, porque el siguiente factor medioambiental clave tras la contaminación (que obvia), es el uso del suelo; es ahí donde vertido, biometanización y compostaje flaquean, ya que éstas dos últimas también producen gran cantidad de rechazos para vertedero. Además, las hileras para compostaje también hacen uso extensivo del suelo.

Sólo contemplando el criterio socio-cultural:

Alternativa	Compostaje	Biometanización	Incineración	Vertido	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	1	3	9	7	7.26420
<b>Biometanización</b>	1/3	1	6	4	3.27730
<b>Incineración</b>	1/9	1/6	1	1/2	0.60448
<b>Vertido</b>	1/7	1/4	2	1	1.00000

Ilustración 63: matriz de valoración sociocultural de alternativas

El valor propio de la matriz es  $\lambda = 4.066$ , y encontramos que la matriz es consistente con unos valores de CI = 0.022 y CR = 0.024 (<10%).

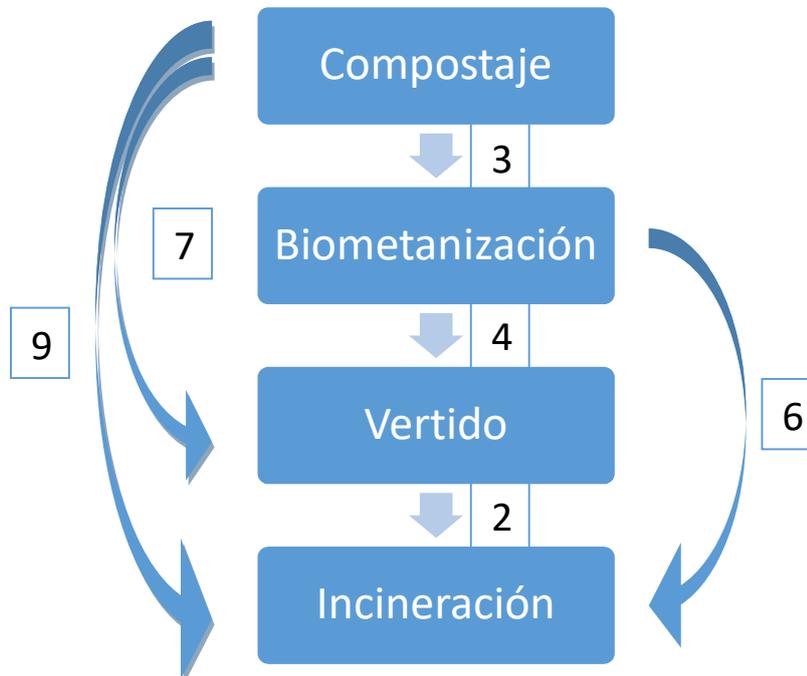


Ilustración 64: matriz de valoración sociocultural de alternativas. Representación alternativa

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
Compostaje	1
Biometanización	0.45115773
Incineración	0.08321343
Vertido	0.13766141

Resulta ser el compostaje la técnica preferible. El motivo para ello es la producción de abonos, fácilmente comercializables en la zona. Es destacable también el reflejo de la aversión socio-cultural respecto del vertido y la incineración (por otra parte comportamiento inexplicable desde un punto de vista científico, razonado).

Únicamente contemplando el criterio económico:

Alternativa	Compostaje	Biometanización	Incineración	Vertido	Vector de prioridad
Compostaje	1	3	6	1/3	0.43486
Biometanización	1/3	1	3	1/6	0.17788
Incineración	1/6	1/3	1	1/9	0.07882
Vertido	3	6	9	1	1.00000

Ilustración 65: matriz de valoración económica de alternativas

El valor propio de la matriz es  $\lambda = 4.081$ , y encontramos que la matriz es consistente con unos valores de CI = 0.027 y CR = 0.030 (<10%).

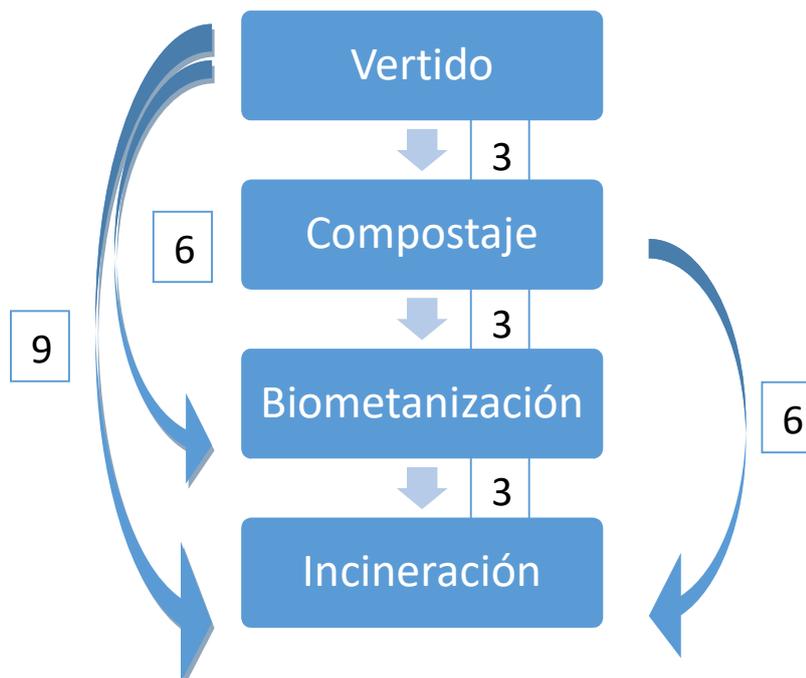


Ilustración 66: matriz de valoración económica de alternativas. Representación alternativa

El vector de prioridad normalizado se mantiene:

Alternativa	V. normalizado
Compostaje	0.434859
Biometanización	0.177879
Incineración	0.0788247
Vertido	1

Como cabía esperar también, es el vertido la opción más económica, ya que apenas requiere inversión. Se entiende la incineración como la alternativa más cara, no excesivamente lejos de las dos restantes.

Sólo contemplando el criterio técnico:

Alternativa	Compostaje	Biometanización	Incineración	Vertido	Vector de prioridad
Compostaje	1	1	1/6	1/8	0.10905
Biometanización	1	1	1/7	1/9	0.10195
Incineración	6	7	1	1/2	0.61751
Vertido	8	9	2	1	1.00000

Ilustración 67: matriz de valoración técnica de alternativas. Representación alternativa

El valor propio de la matriz es  $\lambda = 4.025$ , y encontramos que la matriz es consistente con unos valores de CI = 0.008 y CR = 0.009 (<10%).

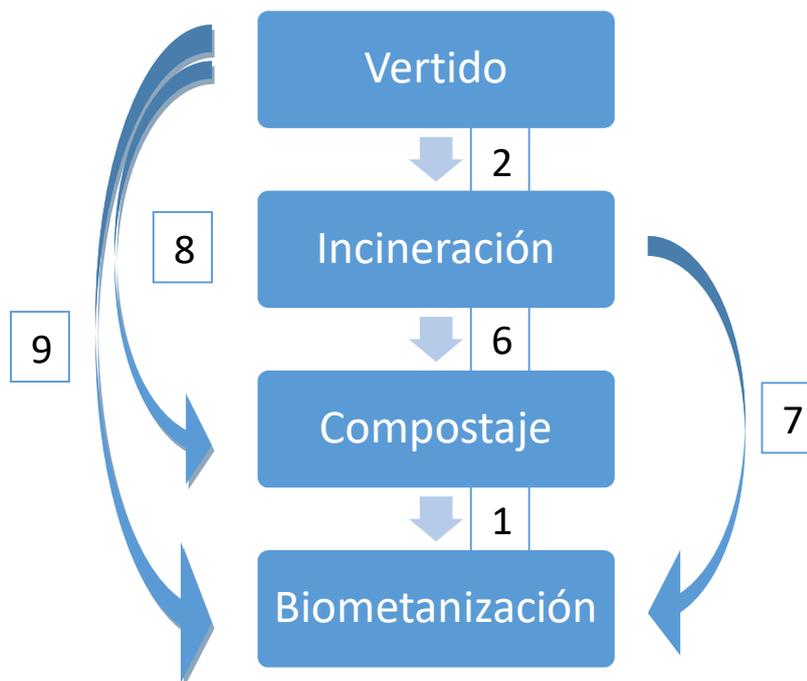


Ilustración 68: matriz de valoración técnica de alternativas. Representación alternativa

El vector de prioridad normalizado se mantiene:

Alternativa	V. normalizado
Compostaje	0.109049
Biometanización	0.101945
Incineración	0.617508
Vertido	1

Técnicamente es donde encontramos menor claridad. Destacan tanto vertido como incineración por su robustez. Prevalece el vertido principalmente por su menor complejidad. Muy por detrás quedan compostaje y biometanización, por el alto grado de exigencia respecto de los residuos aptos para su operación.

## 5. Comparación de alternativas y orden de preferencias

De acuerdo al proceso teórico detallado en el apartado global anterior, la comparación final entre alternativas resulta de la composición de las matrices previas (por debajo jerárquicamente). Igualmente, recordemos que consistía en multiplicar el resultado de cada alternativa respecto al criterio por el peso relativo de dicho criterio, y sumar los resultados de los criterios obtenidos para la alternativa en cuestión. Así obtenemos como respuesta final al estudio:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
Compostaje	0.130	0.080	0.072	0.002	0.28470
Biometanización	0.074	0.036	0.030	0.002	0.14146
Incineración	0.318	0.007	0.013	0.013	0.35058
Vertido	0.024	0.011	0.167	0.021	0.22326

Ilustración 69: matriz y clasificación final de alternativas

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa.	V. normalizado
Compostaje	0.81207649
Biometanización	0.40348945
Incineración	1
Vertido	0.63683088

Así, los resultados reflejan que la tecnología de gestión de residuos que mejor desempeño demuestra, tanto normativo como de aplicación al Plan Zonal de la Vega Baja de Alicante (PZ11

– AGA6) es la **INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y VERTIDO DE RECHAZOS**. El resto de alternativas quedan como sigue:

- ✓ En segundo lugar, con un 19% menos de atractivo, el tratamiento mediante digestión aerobia, con producción de compost y vertido de rechazos.
- ✓ En tercer lugar, con un 36% menos de atractivo, el depósito en vertedero controlado.
- ✓ En último lugar y con un 60% menos de atractivo, el tratamiento mediante digestión anaerobia, con producción de gas sintético y vertido de rechazos.

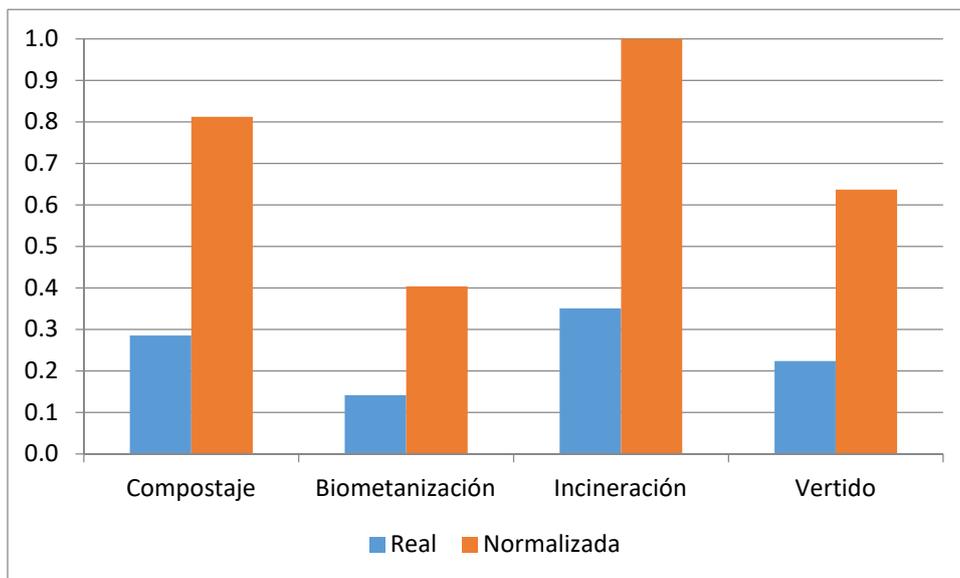


Ilustración 70: clasificación final de alternativas, y representación normalizada

Por último se realiza un **análisis de sensibilidad** de los pesos adoptados para los criterios. Para ello recurriremos a múltiples situaciones en las que:

1. Sólo un criterio es relevante
2. Dos criterios son relevantes (con igual importancia) y los otros no son relevantes
3. Tres criterios son relevantes (con igual importancia) y el otro no es relevante
4. Todos los criterios son relevantes y tienen la misma importancia

**1. Sólo un criterio es relevante**

Teniendo sólo en cuenta el factor medioambiental:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.238	0.000	0.000	0.000	0.23810
<b>Biometanización</b>	0.135	0.000	0.000	0.000	0.13481
<b>Incineración</b>	0.582	0.000	0.000	0.000	0.58223
<b>Vertido</b>	0.045	0.000	0.000	0.000	0.04486

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.4089415
<b>Biometanización</b>	0.23153835
<b>Incineración</b>	1
<b>Vertido</b>	0.07704873

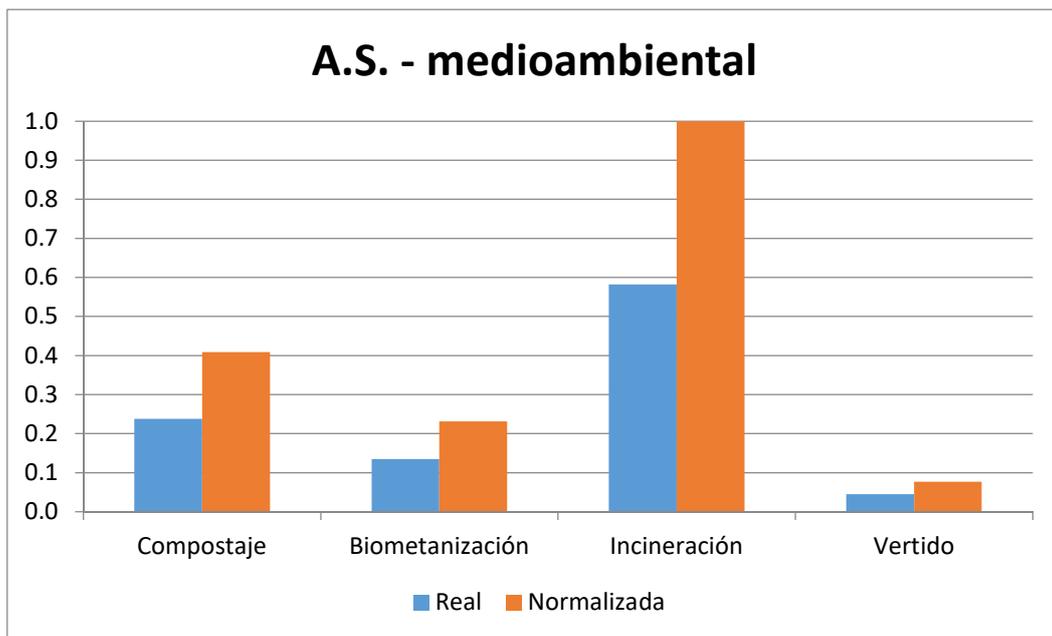


Ilustración 71: análisis de sensibilidad 1

Teniendo sólo en cuenta el factor sociocultural:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.000	0.598	0.000	0.000	0.59807
<b>Biometanización</b>	0.000	0.270	0.000	0.000	0.26983
<b>Incineración</b>	0.000	0.050	0.000	0.000	0.04977
<b>Vertido</b>	0.000	0.082	0.000	0.000	0.08233

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	1
<b>Biometanización</b>	0.45115773
<b>Incineración</b>	0.08321343
<b>Vertido</b>	0.13766141

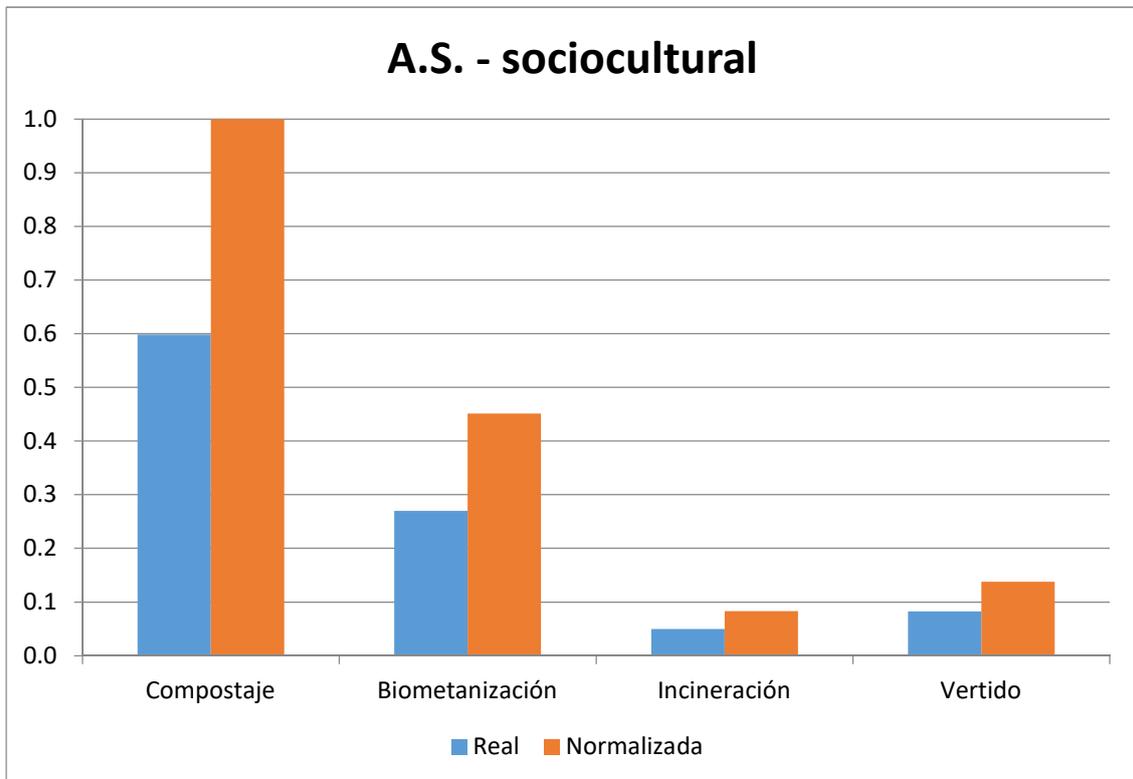


Ilustración 72: análisis de sensibilidad 2

Teniendo sólo en cuenta el factor económico:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.000	0.000	0.257	0.000	<b>0.25708</b>
<b>Biometanización</b>	0.000	0.000	0.105	0.000	<b>0.10516</b>
<b>Incineración</b>	0.000	0.000	0.047	0.000	<b>0.04660</b>
<b>Vertido</b>	0.000	0.000	0.591	0.000	<b>0.59117</b>

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.434859
<b>Biometanización</b>	0.177879
<b>Incineración</b>	0.0788247
<b>Vertido</b>	1

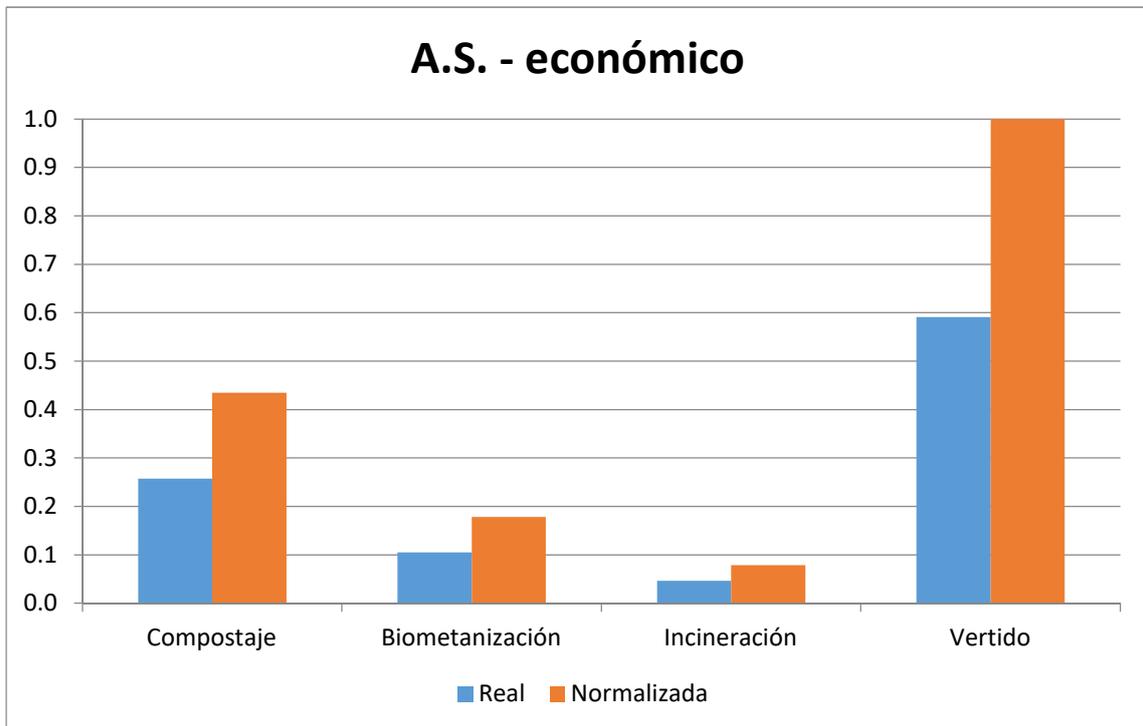


Ilustración 73: análisis de sensibilidad 3

Teniendo sólo en cuenta el factor técnico:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.000	0.000	0.000	0.060	0.05964
<b>Biometanización</b>	0.000	0.000	0.000	0.056	0.05575
<b>Incineración</b>	0.000	0.000	0.000	0.338	0.33771
<b>Vertido</b>	0.000	0.000	0.000	0.547	0.54690

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.109049
<b>Biometanización</b>	0.101945
<b>Incineración</b>	0.617508
<b>Vertido</b>	1

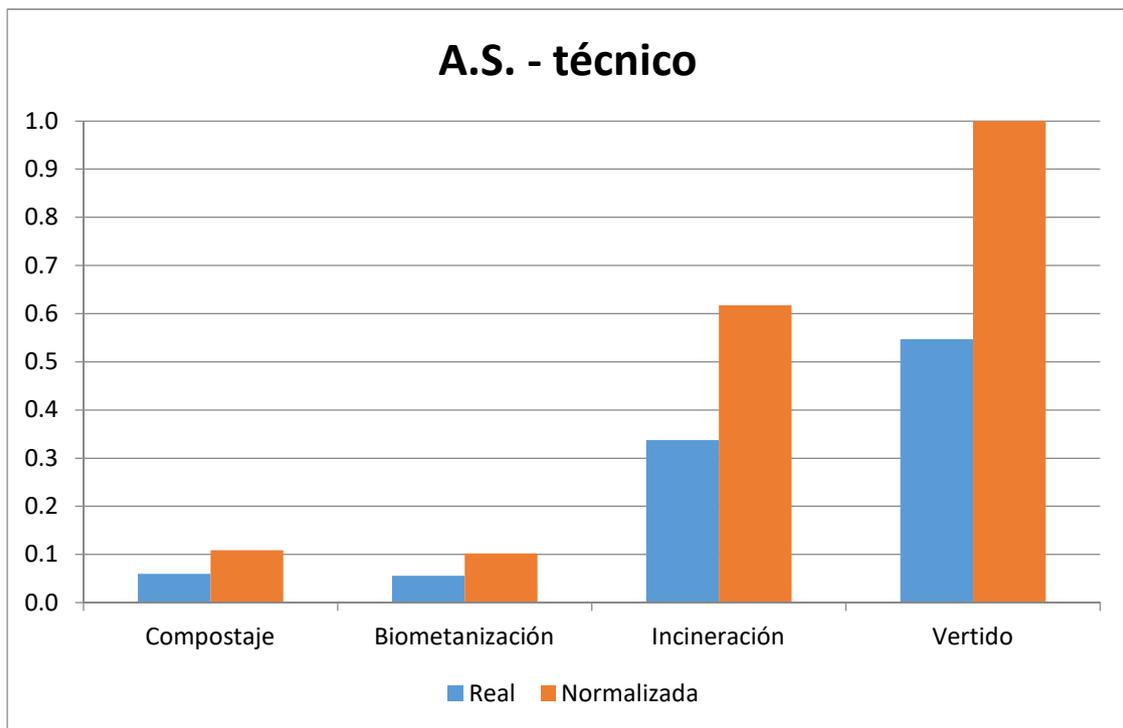


Ilustración 74: análisis de sensibilidad 4

**2. Dos criterios son relevantes (con igual importancia) y los otros no son relevantes**

Teniendo sólo en cuenta los factores medioambiental y sociocultural:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.119	0.299	0.000	0.000	<b>0.41809</b>
<b>Biometanización</b>	0.067	0.135	0.000	0.000	<b>0.20232</b>
<b>Incineración</b>	0.291	0.025	0.000	0.000	<b>0.31600</b>
<b>Vertido</b>	0.022	0.041	0.000	0.000	<b>0.06360</b>

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	1
<b>Biometanización</b>	0.4839128
<b>Incineración</b>	0.75582392
<b>Vertido</b>	0.15211202

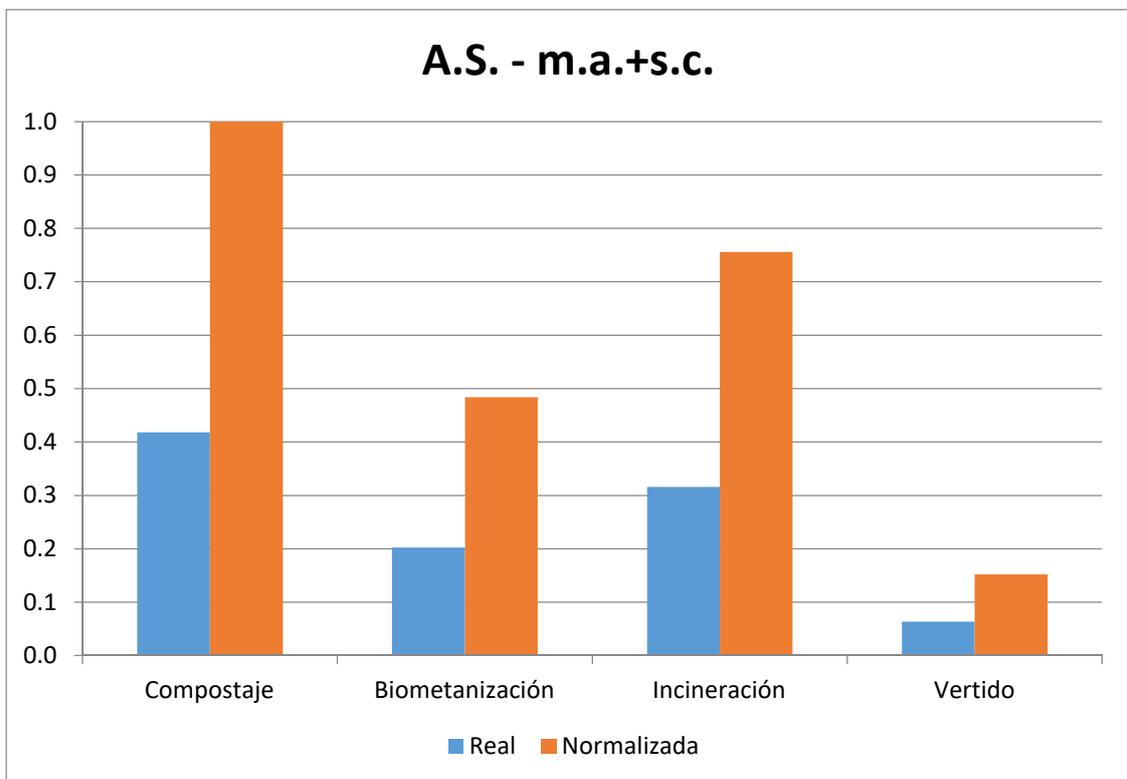


Ilustración 75: análisis de sensibilidad 5

Teniendo sólo en cuenta los factores medioambiental y económico:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.119	0.000	0.129	0.000	0.24759
<b>Biometanización</b>	0.067	0.000	0.053	0.000	0.11998
<b>Incineración</b>	0.291	0.000	0.023	0.000	0.31442
<b>Vertido</b>	0.022	0.000	0.296	0.000	0.31801

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.77853946
<b>Biometanización</b>	0.37728692
<b>Incineración</b>	0.98868153
<b>Vertido</b>	1

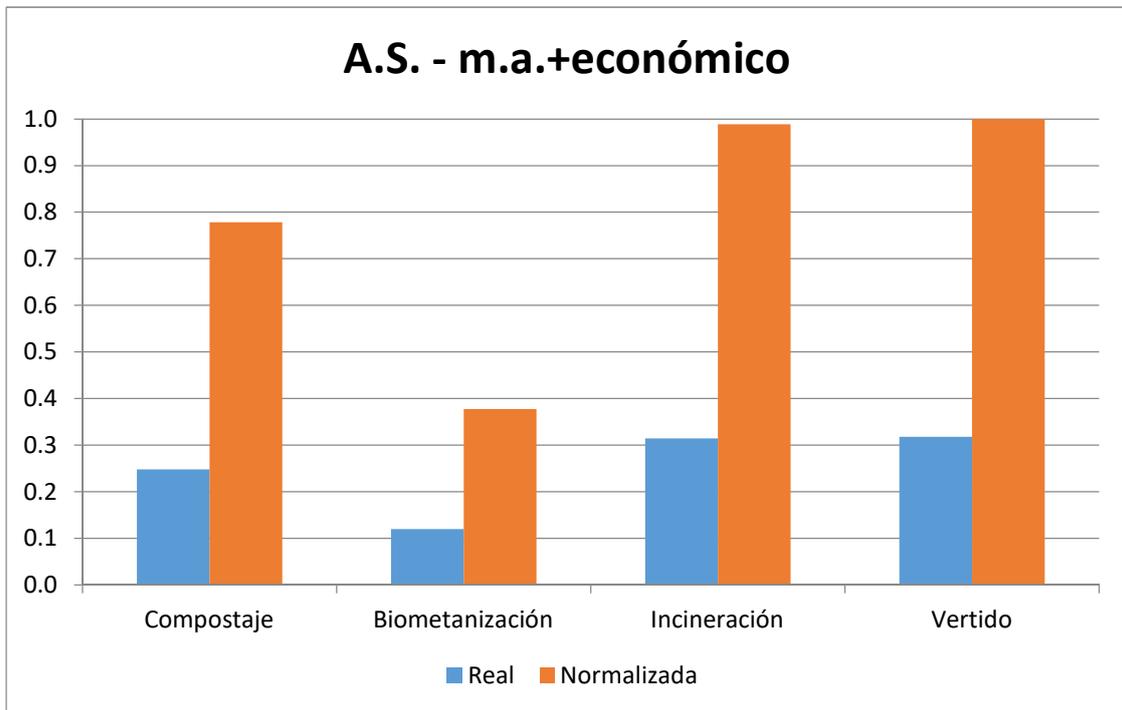


Ilustración 76: análisis de sensibilidad 6

Teniendo sólo en cuenta los factores medioambiental y técnico:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.119	0.000	0.000	0.030	0.14887
<b>Biometanización</b>	0.067	0.000	0.000	0.028	0.09528
<b>Incineración</b>	0.291	0.000	0.000	0.169	0.45997
<b>Vertido</b>	0.022	0.000	0.000	0.273	0.29588

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.32364698
<b>Biometanización</b>	0.20714546
<b>Incineración</b>	1
<b>Vertido</b>	0.64325188

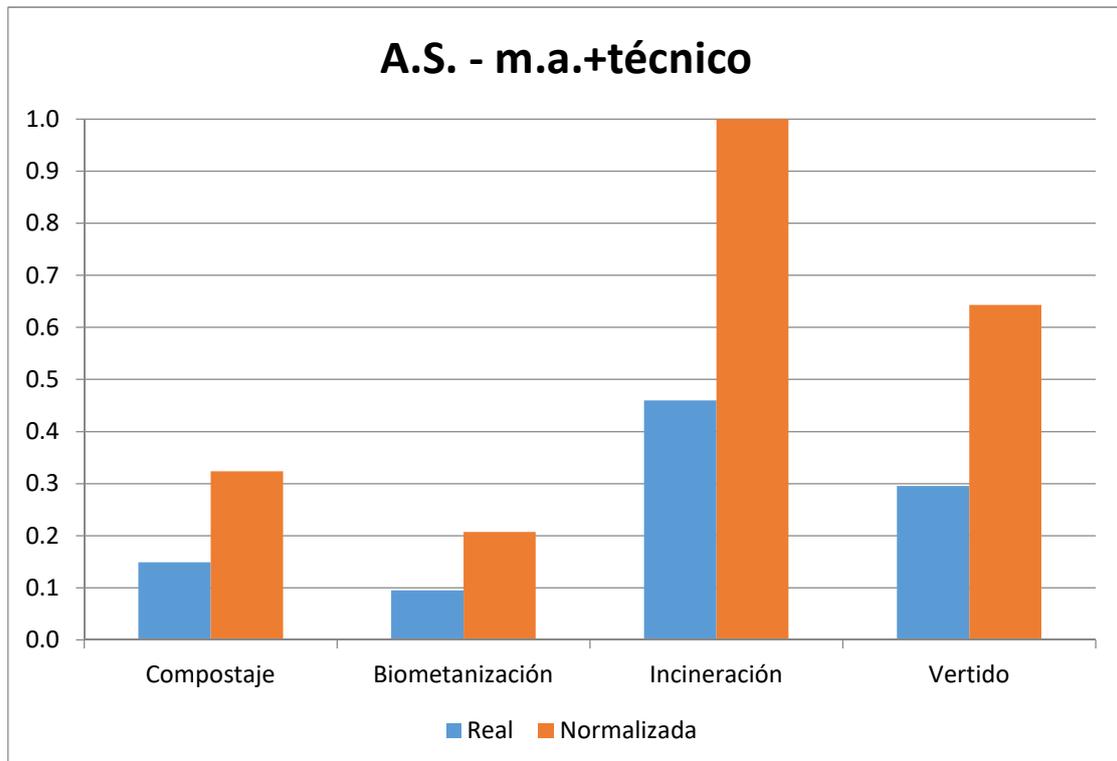


Ilustración 77: análisis de sensibilidad 7

Teniendo sólo en cuenta los factores sociocultural y económico:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.000	0.299	0.129	0.000	0.42757
<b>Biometanización</b>	0.000	0.135	0.053	0.000	0.18749
<b>Incineración</b>	0.000	0.025	0.023	0.000	0.04818
<b>Vertido</b>	0.000	0.041	0.296	0.000	0.33675

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	1
<b>Biometanización</b>	0.43849925
<b>Incineración</b>	0.1126897
<b>Vertido</b>	0.78758263

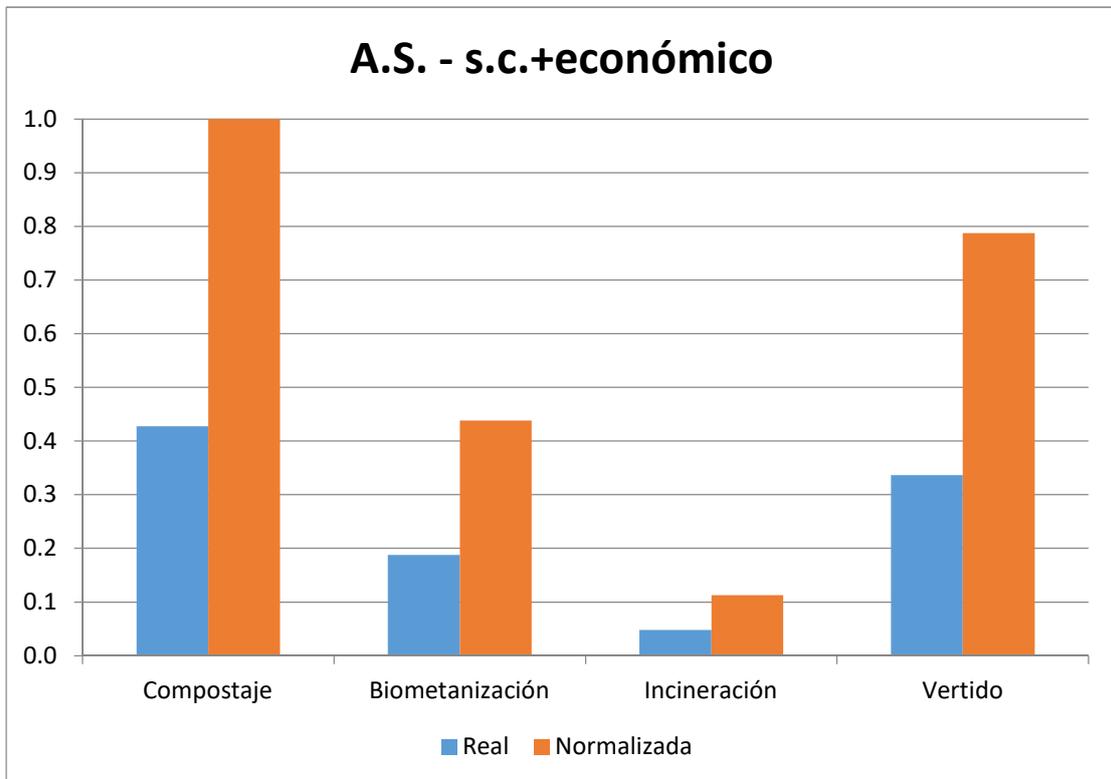


Ilustración 78: análisis de sensibilidad 8

Teniendo sólo en cuenta los factores sociocultural y técnico:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.000	0.299	0.000	0.030	0.32886
<b>Biometanización</b>	0.000	0.135	0.000	0.028	0.16279
<b>Incineración</b>	0.000	0.025	0.000	0.169	0.19374
<b>Vertido</b>	0.000	0.041	0.000	0.273	0.31461

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	1
<b>Biometanización</b>	0.49501721
<b>Incineración</b>	0.58913294
<b>Vertido</b>	0.95669027

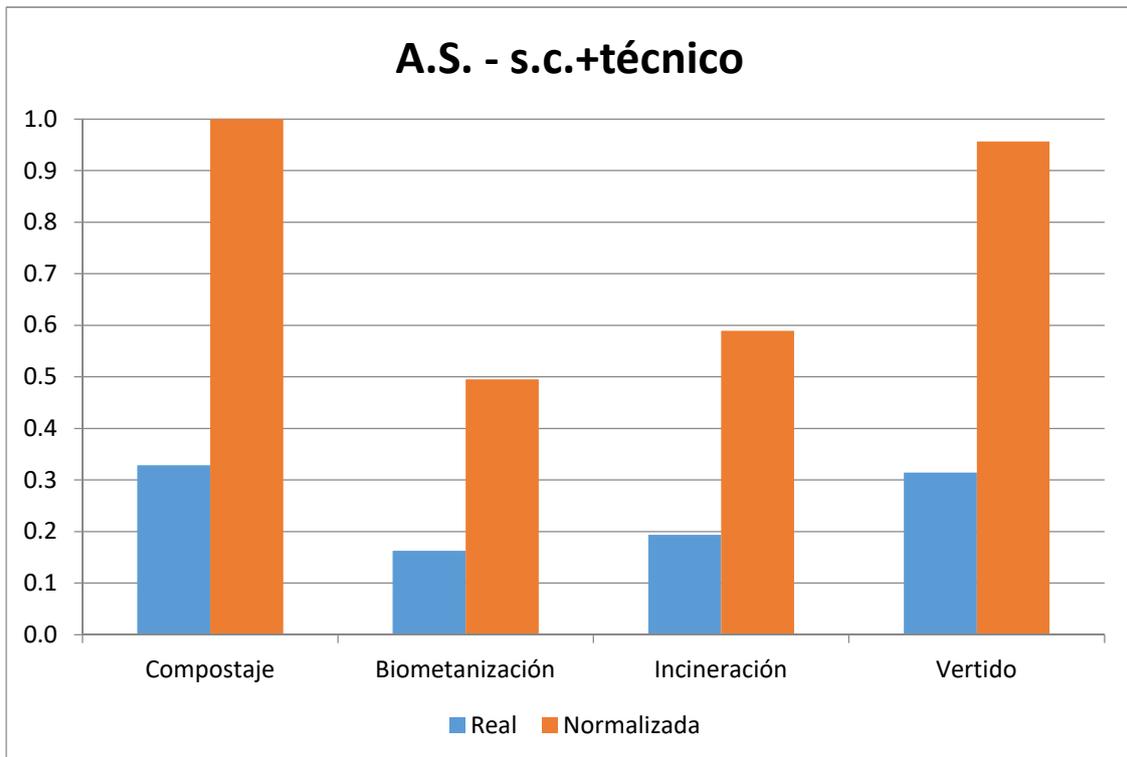


Ilustración 79: análisis de sensibilidad 9

Teniendo sólo en cuenta los factores económico y técnico:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.000	0.000	0.129	0.030	<b>0.15836</b>
<b>Biometanización</b>	0.000	0.000	0.053	0.028	<b>0.08045</b>
<b>Incineración</b>	0.000	0.000	0.023	0.169	<b>0.19216</b>
<b>Vertido</b>	0.000	0.000	0.296	0.273	<b>0.56903</b>

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.27829141
<b>Biometanización</b>	0.14138901
<b>Incineración</b>	0.33768829
<b>Vertido</b>	1

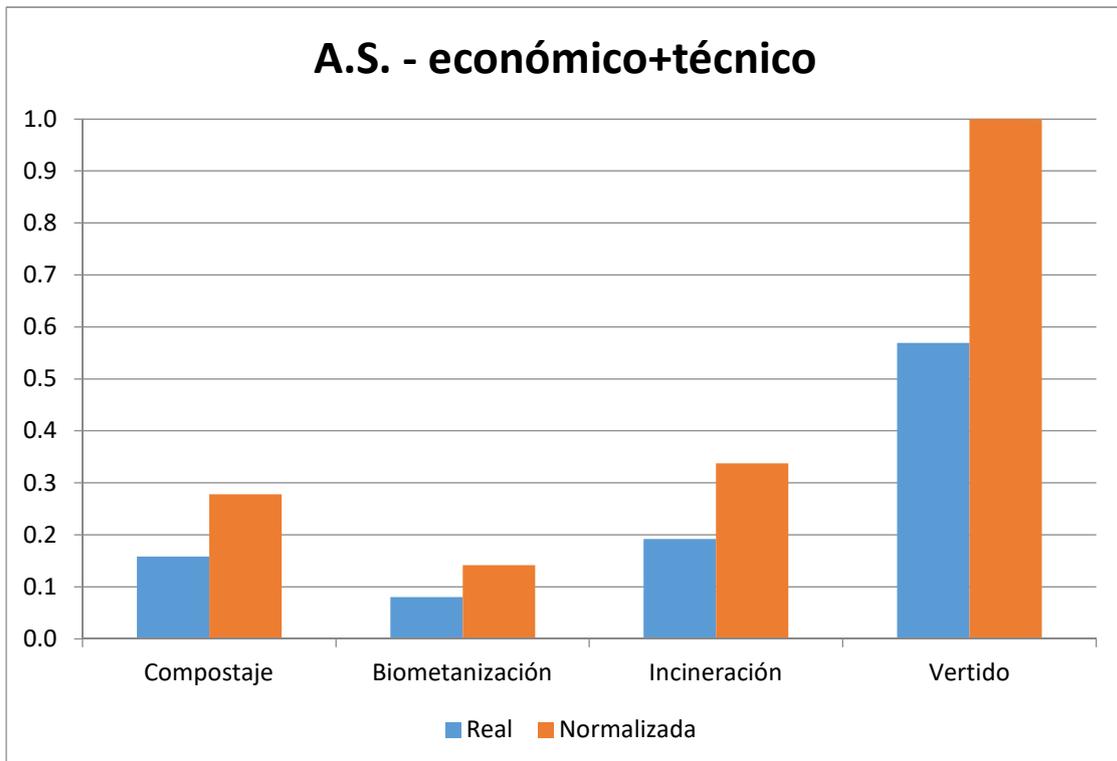


Ilustración 80: análisis de sensibilidad 10

### 3. Tres criterios son relevantes (con igual importancia) y el otro no es relevante

Teniendo en cuenta todos los factores excepto el técnico:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.079	0.199	0.086	0.000	0.36442
<b>Biometanización</b>	0.045	0.090	0.035	0.000	0.16993
<b>Incineración</b>	0.194	0.017	0.016	0.000	0.22620
<b>Vertido</b>	0.015	0.027	0.197	0.000	0.23945

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	1
<b>Biometanización</b>	0.46630891
<b>Incineración</b>	0.62071749
<b>Vertido</b>	0.65708874

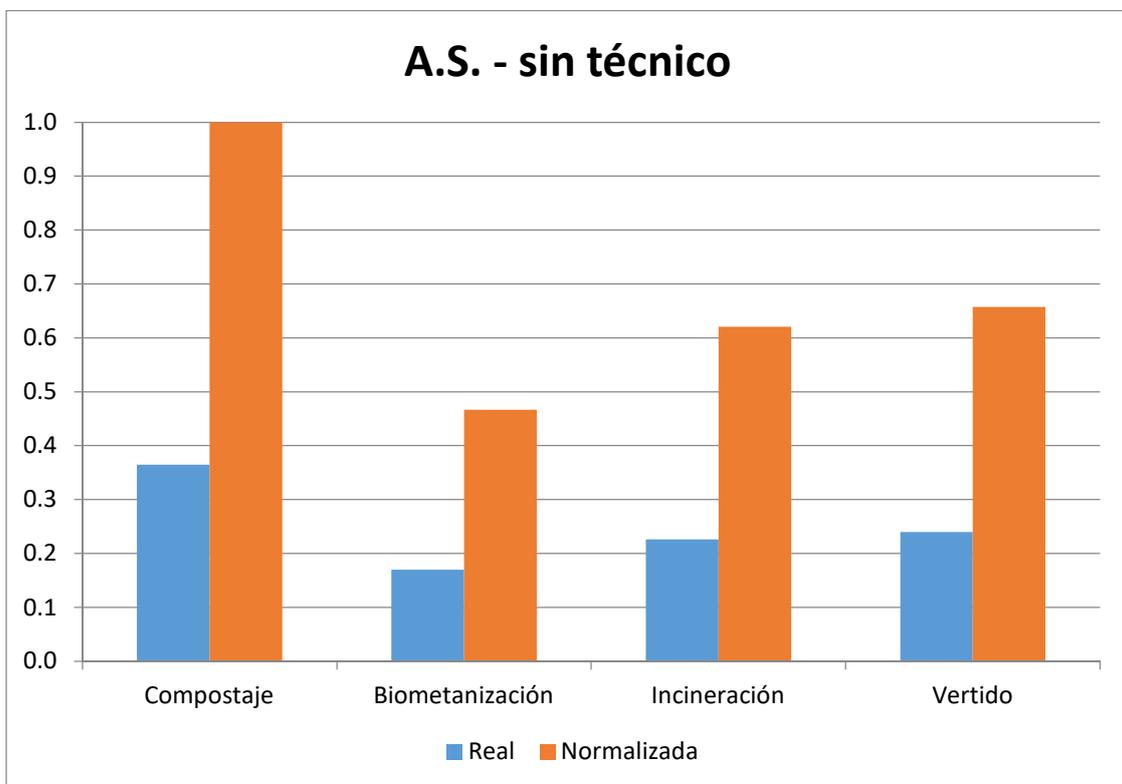


Ilustración 81: análisis de sensibilidad 11

Teniendo en cuenta todos los factores excepto el económico:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.079	0.199	0.000	0.020	<b>0.29860</b>
<b>Biometanización</b>	0.045	0.090	0.000	0.019	<b>0.15346</b>
<b>Incineración</b>	0.194	0.017	0.000	0.113	<b>0.32324</b>
<b>Vertido</b>	0.015	0.027	0.000	0.182	<b>0.22470</b>

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.92379125
<b>Biometanización</b>	0.47476787
<b>Incineración</b>	1
<b>Vertido</b>	0.69514204

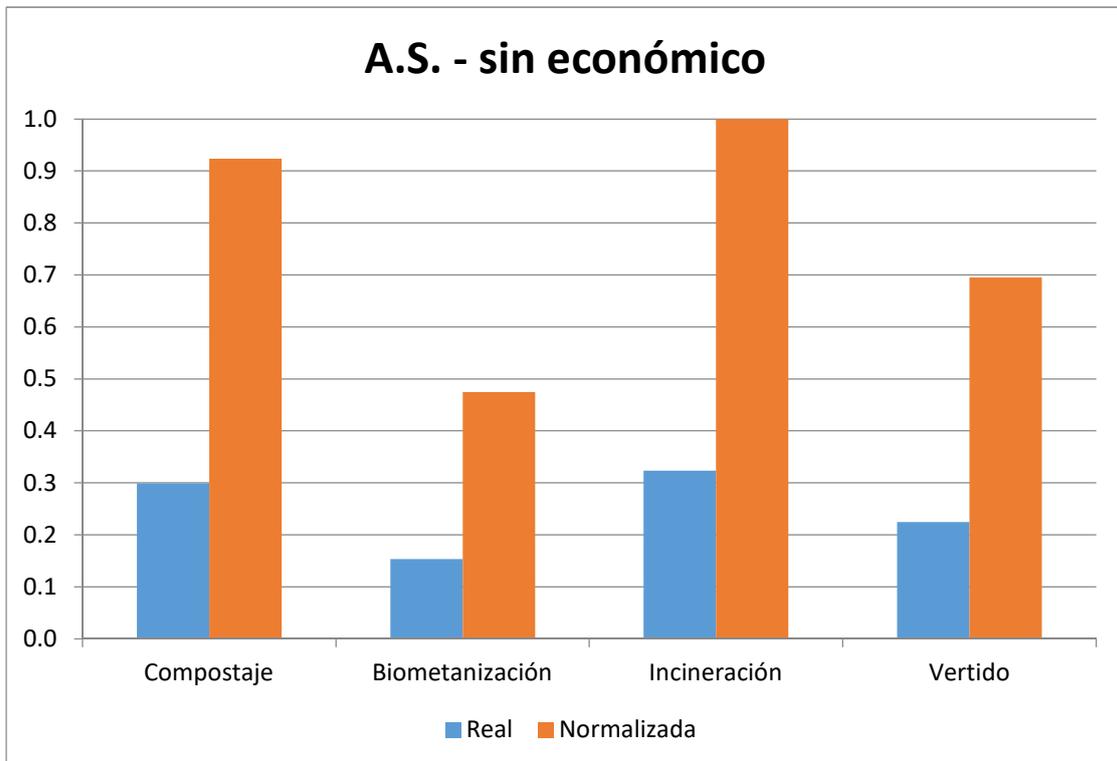


Ilustración 82: análisis de sensibilidad 12

Teniendo en cuenta todos los factores excepto el sociocultural:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.079	0.000	0.086	0.020	0.18494
<b>Biometanización</b>	0.045	0.000	0.035	0.019	0.09857
<b>Incineración</b>	0.194	0.000	0.016	0.113	0.32218
<b>Vertido</b>	0.015	0.000	0.197	0.182	0.39431

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.46901739
<b>Biometanización</b>	0.24998951
<b>Incineración</b>	0.81707879
<b>Vertido</b>	1

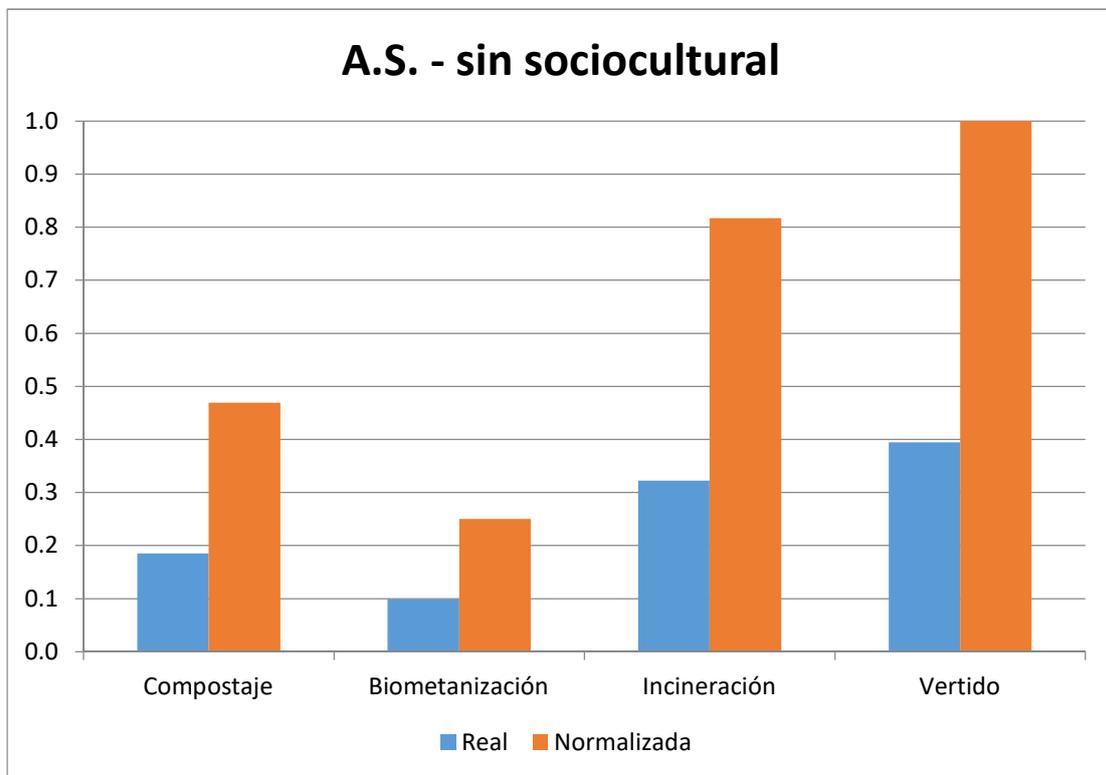


Ilustración 83: análisis de sensibilidad 13

Teniendo en cuenta todos los factores excepto el medioambiental:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.000	0.199	0.086	0.020	0.30493
<b>Biometanización</b>	0.000	0.090	0.035	0.019	0.14358
<b>Incineración</b>	0.000	0.017	0.016	0.113	0.14469
<b>Vertido</b>	0.000	0.027	0.197	0.182	0.40680

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.74958256
<b>Biometanización</b>	0.35294733
<b>Incineración</b>	0.35568682
<b>Vertido</b>	1

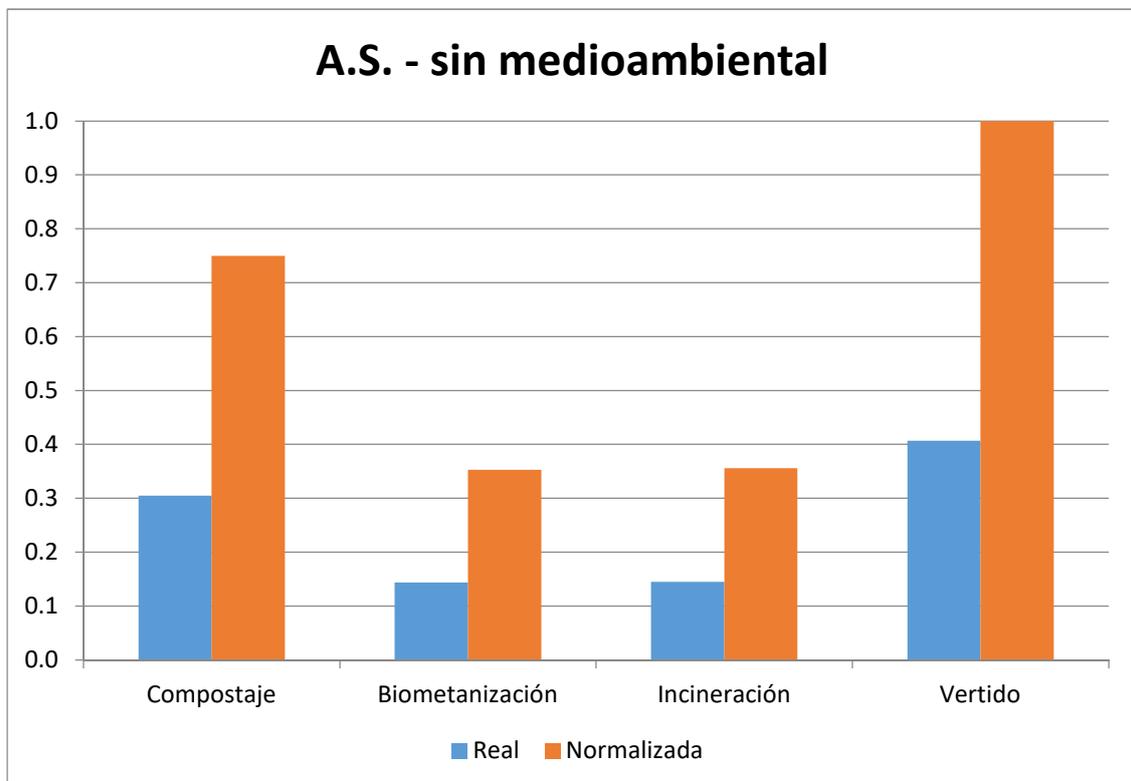


Ilustración 84: análisis de sensibilidad 14

#### 4. Todos los criterios son relevantes y tienen la misma importancia

Teniendo en cuenta todos los factores:

Alt./Crit.	Medioambiental	Sociocultural	Económico	Técnico	Vector de prioridad
<b>Compostaje</b>	0.060	0.150	0.064	0.015	0.28822
<b>Biometanización</b>	0.034	0.067	0.026	0.014	0.14139
<b>Incineración</b>	0.146	0.012	0.012	0.084	0.25408
<b>Vertido</b>	0.011	0.021	0.148	0.137	0.31631

El vector de prioridad normalizado sería:

Alternativa	V. normalizado
<b>Compostaje</b>	0.91118795
<b>Biometanización</b>	0.44698018
<b>Incineración</b>	0.80324467
<b>Vertido</b>	1

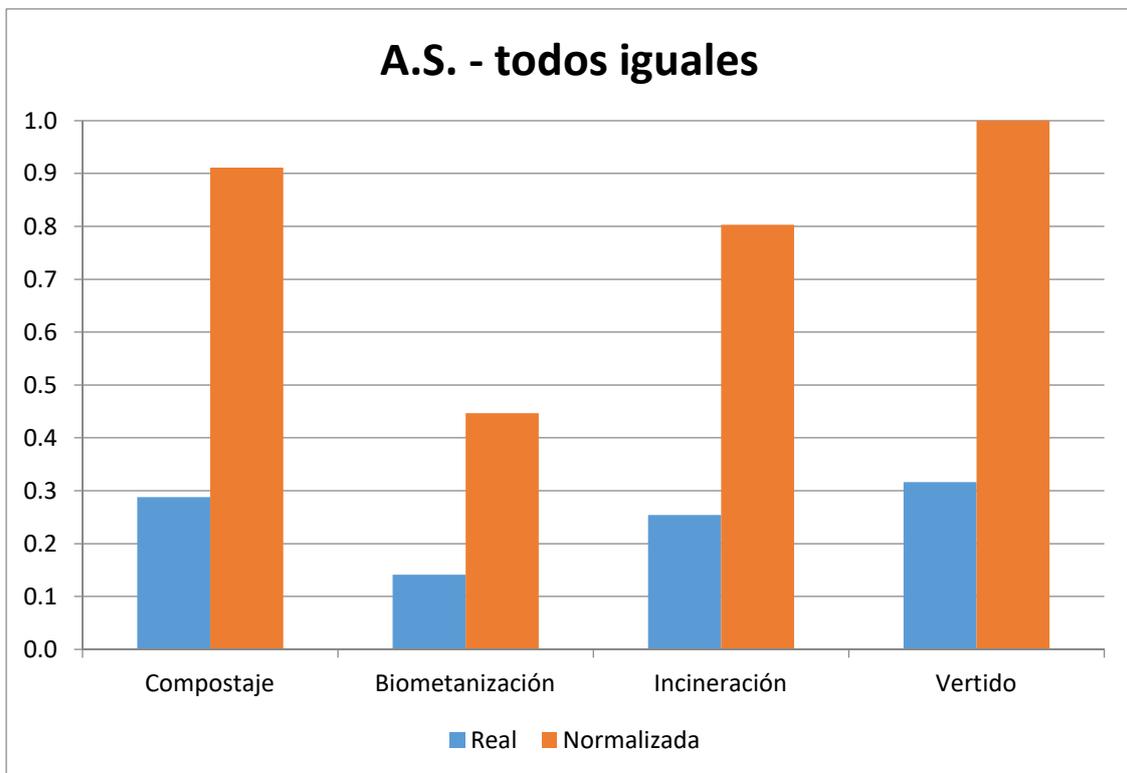


Ilustración 85: análisis de sensibilidad 15

## VII. Conclusiones y futuras líneas de investigación

---

El presente documento ha tratado de arrojar luz en el campo de la gestión de residuos sólidos urbanos en la zona de la Vega Baja del Segura. El objetivo principal del mismo ha sido conocer cuál podría ser la tecnología de gestión y/o tratamiento más apropiada para dicha zona. Para ello, se han realizado una serie de indagaciones y obtenciones de datos centrados en dos aspectos:

Por un lado, el necesario grado de conocimiento del campo de los residuos en general así como de las diferentes (y como se ha podido comprobar, múltiples) técnicas de gestión disponibles. Aquí, las fuentes de información clave ha sido la diversa normativa al respecto – destacando especialmente la Directiva 2008/98/UE de residuos y el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022- y los documentos europeos sobre Mejores Técnicas Disponibles –especialmente los de *WT Waste Treatment* (Tratamiento de Residuos) y *WI Waste Incineration* (Incineración de Residuos)--. Estos documentos nos han puesto en conocimiento dos realidades, una pesimista y otra optimista:

- El gran trabajo por hacer en España -especialmente en el caso de la Vega Baja- en lo referente a la correcta gestión de residuos. Existe muchísima normativa aplicable pero es necesario ponerla en práctica, así como mejorar en la obtención de datos y en controles.
- La gran cantidad de técnicas existentes hacen posible que siempre exista alguna que se adapte a la zona de aplicación con un grado de optimización y rendimiento muy elevados.

Por otro, la caracterización de la zona de aplicación del estudio, la Vega Baja del Segura. La comarca forma parte del Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana PIRCV 2013, y coincide con el Plan Zonal 11 – AGA6. Se ha hecho un estudio de población y de producción de residuos en la zona, con el año 2035 como horizonte, y que ha arrojado estos resultados principales:

- Horizonte temporal del estudio: año 2035
- Población a la que satisfacer en términos de gestión de residuos según el procedimiento del PIRCV 2013: 530.804 habitantes equivalentes.
- Producción de residuos domésticos y similares (domésticos y vías públicas): 166951 toneladas.
- Producción de residuos domésticos voluminosos mezclados (enseres domésticos): 5081 toneladas.
- Producción de residuos de tipo animal y vegetal: 6084 toneladas.

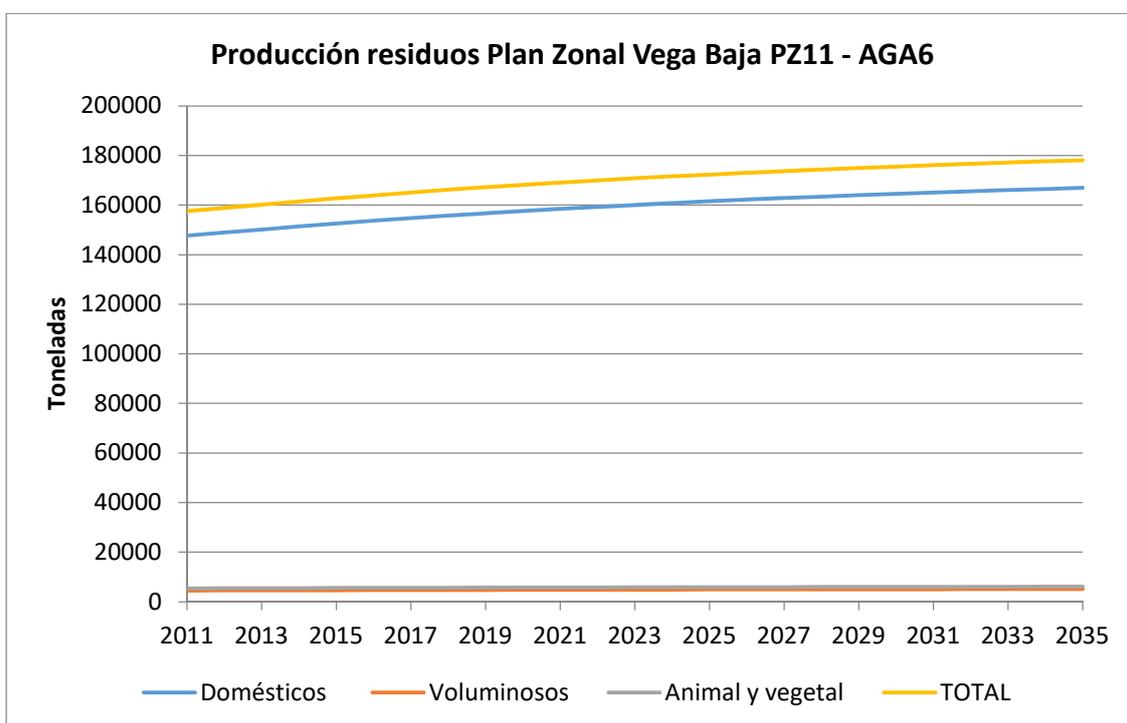


Ilustración 86: producción residuos Plan Zonal Vega Baja PZ11 - AGA6, 2011-2035

Ya caracterizadas las necesidades de gestión de residuos por una parte y las técnicas disponibles por otra, hemos estado en condiciones de buscar la/s más apropiada/s para el Plan Zonal. Para ello nos hemos ayudado de las Técnicas de Evaluación Multicriterio, y dentro de ellas hemos escogido el Proceso de Jerarquía Analítica.

Con esta herramienta y el criterio propio basado en el conocimiento de las técnicas y normativa anteriores, se han diseñado una serie de criterios de decisión, alternativas con posibilidades evidentes de aplicación y pesos de los mismos, llegando a la conclusión de que la tecnología más apropiada para la gestión de residuos para el Plan Zonal 11 – AGA6 es la incineración con recuperación de energía y vertido de rechazos. Le siguen el tratamiento mediante digestión aerobia con producción de compost y vertido de rechazos, el depósito en

vertedero controlado y el tratamiento mediante digestión anaerobia con producción de gas sintético y vertido de rechazos.

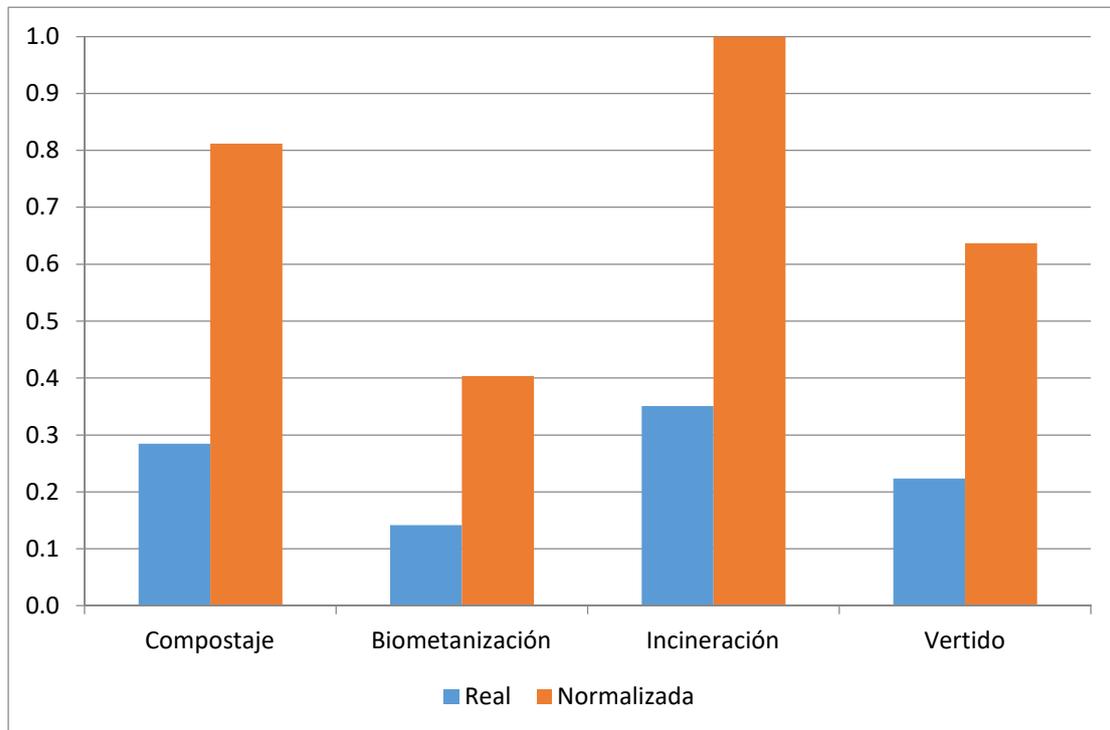


Ilustración 87: clasificación final de alternativas

Las razones que explican estos resultados son:

- ✓ La incineración es la que mejor ayuda a conseguir los objetivos comunitarios de vertido 0 ya que tanto el compostaje como la biometanización implican gran cantidad de rechazos.
- ✓ A pesar de su alto coste, es una técnica muy robusta y de resultados ampliamente contrastados.

Como futuras líneas de investigación, sería recomendable ampliar el espectro del análisis del Proceso de Jerarquía Analítica, desarrollando y especificando más (cantidad y calidad) tanto los criterios de decisión como las alternativas de aplicación. También, desde otro punto de vista sería posible usar otras herramientas de decisión distintas del Proceso de Jerarquía Analítica, siempre y cuando se obtuviera un mayor grado de conocimiento de las alternativas y de la zona de aplicación.

## Bibliografía y fuentes de información

- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (DO L 312 de 22.11.2008, pp. 3-30).
- Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación.
- Directiva 2004/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de abril de 2004, sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales (DO L 143 de 30.4.2004, pp. 56-75).
- Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) Texto pertinente a efectos del EEE.
- Directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de septiembre de 2006, relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores, y por la que se deroga la Directiva 91/157/CEE.
- Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y sus residuos.
- Directiva 75/439/CEE del Consejo, de 16 de junio de 1975, relativa a la gestión de aceites usados.
- Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos.
- Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos.
- Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 29 de enero de 2011, núm. 25, pp. 9540-9568.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 29 de enero de 2011, núm. 25, pp. 9574-9626.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 16 de noviembre de 2011, núm. 275.
- Real Decreto 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 22 de octubre de 2009, núm. 255, pp. 88201-88215.
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 19 de octubre de 2013, núm. 251, pp. 85173-85276.
- Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 19 de febrero de 2002, núm. 43, pp. 6494-6515.
- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022.
- Programa Estatal de Prevención de Residuos 2013.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 29 de julio de 2011, núm. 181, pp. 85650-85705.
- Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 18 de enero de 2005, núm. 15, pp. 1833-1843.

- Real Decreto 106/2008, de 1 de febrero, sobre pilas y acumuladores y la gestión ambiental de sus residuos. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 12 de febrero de 2008, núm. 37.
- Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. . *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 22 de abril de 1998, núm. 96, pp. 13372-13384.
- Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 21 de febrero de 2015, núm. 45, pp. 14211-14312.
- Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 14 de junio de 2003, núm. 142, pp. 22966-22980.
- Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 25 de abril de 1997, núm. 99.
- Real Decreto 782/1998, de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 1 de mayo de 1998, núm. 104, pp. 14701-14716.
- Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunidad Valenciana. *DOGVI*. Valencia, 15 de diciembre de 2000, núm. 3898.
- Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana 2013 aprobado en Decreto 81/2013.
- Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos. Madrid, agosto de 2006.
- Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) Documento de referencia sobre las Mejores Técnicas Disponibles para el sector del Tratamiento de Residuos. Madrid, agosto de 2006.
- Rodrigo, J., Rodrigo, M.E. y Fernández, J.L. (2014). *Alternativas de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos*. Valencia: ENTORNOS Diseño y percepción, S.L.
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill.