INFORME
sobre el
POTENCIAL DE VALORIZACIÓN
de residuos en plantas cementeras
de ANDALUCÍA
2019

Informe realizado para la Fundación Laboral Andaluza del Cemento y el Medio Ambiente (FLACEMA) por:

Benito Navarrete Rubia

Luz Marina Gallego Fernández

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla

Potencial de valorización de residuos en las plantas cementeras de Andalucía

Actualización año 2019

ÍNDICE

Página

INTRODUCCIÓN..... 2

Capítulo 1. Contexto y Marco Legal..... 3

Capítulo 2. El empleo de residuos como combustibles y materias primas alternativas en el proceso de fabricación de cemento. Una contribución a la mejora medioambiental..... 7

Capítulo 3. Residuos valorizables en Andalucía..... 21

Capítulo 4. Análisis del potencial de valorización energética de residuos en las plantas cementeras de Andalucía..... 27

Capítulo 5. Conclusiones..... 34

Bibliografía e información consultada..... 36

INTRODUCCIÓN

El presente informe ha sido elaborado por el Grupo de Ingeniería Ambiental y de Procesos del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, en colaboración con la Fundación Laboral Andaluza del Cemento y el Medio Ambiente (FLACEMA), con objeto de actualizar y dar continuidad al estudio que se publicó en 2016 para analizar el potencial de valorización de residuos en la industria cementera andaluza.

Para el estudio se han utilizado como datos de base las estadísticas de producción de residuos en Andalucía, facilitadas por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía, los estudios y publicaciones sobre valorización de residuos en la industria cementera realizados por FLACEMA, AFCA, Oficemen, Fundación CEMA y el Observatorio de la Economía Circular de la Industria Cementera, así como bibliografía científica y técnica especializada.

En este trabajo se hace un repaso del contexto administrativo y del marco legal que condiciona todas las actuaciones necesarias para la valorización material y energética de residuos en la industria y el papel que estas acciones juegan en la consecución de una economía descarbonizada y circular, de acuerdo con los postulados y directrices de la Unión Europea.

Se hace un análisis de la producción de residuos en Andalucía en 2019, especialmente de aquellos que son susceptibles de ser valorizados energéticamente por no cumplir los requisitos necesarios para su reutilización o reciclaje y que, por tanto, solo tendrían como alternativa la incineración o el depósito en vertedero. Los datos de producción de residuos en Andalucía se comparan con los correspondientes a la situación nacional y europea.

Posteriormente se realiza una evaluación del potencial de uso de residuos valorizables energéticamente ante distintos escenarios en los que se hace variar la capacidad de producción de clínker en las cementeras andaluzas, la tasa de sustitución térmica alcanzada y el reparto entre las tres principales tipologías de residuos en base a la presencia creciente de biomasa. Como resultado se aportan las capacidades de uso de combustibles alternativo en cada supuesto, y el CO_2 evitado que se conseguiría en base al porcentaje de biomasa presente en el mix de residuos empleado.

Capítulo 1. CONTEXTO Y MARCO LEGAL

El sistema productivo mundial está abocado a afrontar un profundo cambio de paradigma, principalmente dirigido a dar solución a dos problemas acuciantes, derivados de la falta de sostenibilidad que presentan las bases de nuestra economía global:

1) El cambio climático originado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, como consecuencia del uso creciente de los combustibles fósiles desde el comienzo de la revolución industrial hasta nuestros días. La dependencia de los combustibles fósiles en las fuentes de energía primaria a nivel mundial supera aún el 80%. Prescindir de estas fuentes de energía para atajar el cambio climático de forma efectiva supone un reto extraordinariamente importante que obligará a acelerar el desarrollo e implantación de fuentes energéticas alternativas no emisoras de GEI, principalmente renovables, y a modificar toda la infraestructura de suministro energético mundial en un tiempo récord.

   El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) de la ONU dio la voz de alarma sobre la gravedad del efecto del aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera a principios de la década de los 90 del siglo pasado y la comunidad internacional comenzó a tomar conciencia sobre esta problemática hasta adquirir los compromisos que se alcanzaron con la firma del protocolo de Kioto en 1997. Ello supuso la puesta en funcionamiento la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, comprometiendo a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de GEI de conformidad con las metas individuales acordadas para cada estado.

   Las sucesivas conferencias sobre el Clima han ido reafirmando este compromiso. Destaca por su importancia la Conferencia de París (COP21), que alumbró el primer acuerdo universal y jurídicamente vinculante sobre el cambio climático adoptado en diciembre de 2015, en el que se establece un marco global para evitar un cambio climático peligroso, manteniendo el calentamiento global por debajo de los 2 °C a final del presente siglo y prosiguiendo los esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C. También aspira a reforzar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y a apoyarlos en sus esfuerzos.

2) La escasez de materias primas naturales. La escasez de recursos naturales es un hecho constatable en numerosos sectores industriales. Su uso, igual que el de los combustibles fósiles, tampoco resulta sostenible, puesto que se trata de recursos finitos no reemplazables, que tarde o temprano se agotarán. Buena prueba de ello es la situación de escasez de materias primas que se ha desencadenado en 2021 como consecuencia de la brusca caída temporal de la producción y los desequilibrios que se han originado en los mercados globales con la recuperación de la actividad tras la fase aguda de la pandemia de COVID-19.

Como contraste, la sociedad de consumo actual se caracteriza por mantener una exagerada tendencia a la filosofía del "usar y tirar", en la que los materiales, las máquinas y los bienes producidos terminan desechándose en gran medida enterrados en vertederos.

Contra esa tendencia es obligado emprender políticas que conduzcan a una progresiva desmaterialización de la economía a través de la reutilización y el reciclado de residuos y el empleo creciente de materias primas renovables para contribuir a la implantación de una verdadera economía circular. Adicionalmente, la valorización de residuos no reutilizables y no reciclables que sean susceptibles de ser empleados como combustible industrial, constituye una vía medioambientalmente segura para cerrar el ciclo de ciertos tipos de residuos que no tendrían otra salida que la incineración o su envío a vertedero.

Las alternativas para combatir esta doble problemática están presentes en los postulados de la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible que aprobó la ONU en 2015, como guía para que los países y sus sociedades emprendan un nuevo camino con el que mejorar la vida de todos y la salud del planeta. La Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los que destacan, en relación a la actividad industrial y al cambio climático, los objetivos 7: Energía asequible y no contaminante, 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación, y 13: Acción por el Clima.

1.1 Marco Europeo

En este contexto, la Unión Europea está imponiendo un decidido liderazgo en la implantación de políticas activas de descarbonización y economía circular. En concreto, La UE se ha comprometido a lograr la neutralidad climática antes de 2050. Para conseguir este objetivo será necesaria una transformación de la sociedad y de la economía europea, que se pretende sea rentable, justa y socialmente equilibrada.

En este sentido, la Comunicación de la Comisión Europea sobre el Pacto Verde Europeo se erige en la hoja de ruta de las políticas sostenibles de la UE para las próximas décadas, estableciendo una serie de iniciativas estratégicas destinadas a ayudar a la UE a alcanzar su objetivo de neutralidad climática para 2050. En diciembre de 2020, el Consejo Europeo confirmó su determinación de llevar a cabo la transición ecológica de la UE y se fijó un nuevo objetivo vinculante para la UE: lograr de aquí a 2030 una reducción interna neta de las emisiones de gases de efecto invernadero del 55%, como mínimo, con respecto a los valores de 1990, superando así el objetivo acordado en 2014 de reducir las emisiones en al menos un 40 % para 2030. Los dirigentes de la UE pidieron al Consejo y al Parlamento que reflejasen este nuevo objetivo en la «Ley Europea del Clima».

La Ley Europea del Clima propuesta tiene por objeto garantizar que todos los sectores de la economía y la sociedad contribuyan al objetivo de reducir a cero las emisiones netas de aquí a 2050 y expone un marco para la evaluación de los avances hacia ese objetivo.

En julio de 2021, la Comisión ha presentado un paquete de medidas «Objetivo 55», un conjunto de propuestas e iniciativas cuyo objetivo es revisar y actualizar la legislación de la UE a fin de adaptarla a los objetivos climáticos de la UE para 2030 y 2050.

La UE cuenta con la industria europea para dirigir las transiciones hacia la neutralidad climática y el liderazgo digital. El objetivo consiste en que la industria de la UE llegue a ser acelerador y motor del cambio, la innovación y el crecimiento. En marzo de 2020, la Comisión publicó su nueva Estrategia Industrial, alineada con los objetivos de descarbonización y economía circular.

En noviembre de 2020, el Consejo adoptó unas Conclusiones sobre la nueva estrategia en las que expuso cómo podía utilizarse la recuperación tras la crisis de la COVID-19 para potenciar una industria europea más dinámica, resiliente y competitiva. Reiteró que la recuperación debería ser justa, articularse en torno a los principios de competitividad, integración del mercado único, sostenibilidad, cohesión, integración, solidaridad, circularidad y protección del medio ambiente, y respetar las normas sociales.

La normativa comunitaria en materia de residuos, por otra parte, orienta su estrategia hacia la sostenibilidad, persiguiendo la extracción de la máxima porción de materiales y energía de cada residuo y limitando el vertido al mínimo posible, todo ello desde los máximos niveles de protección ambiental en cada una de las etapas de la gestión.

En el marco de estas políticas, la industria europea deberá afrontar una profunda transformación para conseguir una descarbonización prácticamente total antes de 2050. Las herramientas para conseguirlo son principalmente la eficiencia energética, el uso de fuentes de energía libres de emisiones de GEI, el empleo de materias primas alternativas descarbonizadas en la fabricación y la captura, usos y almacenamiento de CO_2. Al mismo tiempo, tendrá que ir asumiendo el empleo de materias primas alternativas basadas en residuos que contribuyan a la circularidad del proceso productivo.

1.2 Marco Nacional

En el ámbito nacional destaca la regulación que emana del Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 y la normativa asociada de las comunidades autónomas. El Plan es el instrumento para orientar la política de residuos en España en los próximos años, y tiene como fin impulsar las medidas necesarias para mejorar las deficiencias detectadas y promover las actuaciones que proporcionen un mejor resultado ambiental y que aseguren que España cumple con los objetivos comunitarios.

El objetivo final del Plan, al igual que lo es el de la política comunitaria de residuos, es convertir a España en una sociedad eficiente en el uso de los recursos, que avance hacia una economía circular. En definitiva, se trata de sustituir una economía lineal basada en producir, consumir y tirar, por una economía circular en la que se reincorporen al proceso productivo una y otra vez los materiales que contienen los residuos para la producción de nuevos productos o materias primas.

El avance hacia la economía circular se refleja en el PEMAR a través de la aplicación, en todos los flujos de residuos incluidos, del principio de jerarquía establecido en la normativa comunitaria. Este principio, establece que la prevención debe ser la prioridad principal en relación con la política de residuos, seguida por este orden: por la preparación para la reutilización, el reciclado, otras formas de valorización, incluida la valorización energética, siendo la eliminación de residuos, fundamentalmente a través del depósito en vertedero, la última opción de la jerarquía para gestionar los residuos. Opción que debe reducirse para todos los flujos de residuos.

Como novedad de este Plan frente a los anteriores, se establece que, para garantizar el cumplimiento de los objetivos nacionales, las CCAA deberán cumplir como mínimo esos objetivos con los residuos generados en su territorio, salvo que la normativa sectorial establezca criterios específicos de cumplimiento. Cuando los objetivos afecten a residuos de competencia municipal, las entidades locales pondrán todos los medios a su alcance para el cumplimiento de dichos objetivos. En todo caso, las CCAA en sus planes autonómicos de gestión de residuos podrán establecer la contribución de las entidades locales, de forma independiente o asociada, al cumplimiento de los objetivos aplicables a los residuos de competencia municipal.

1.3 Marco andaluz

El Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía aprobó el pasado mes de abril de 2021 el Decreto que regula el "Plan Integral de Residuos de Andalucía. Hacia una Economía Circular en el Horizonte 2030" (PIRec 2030). Este Plan dota a Andalucía de un nuevo marco estratégico de cara a los retos de la próxima década en materia de prevención y gestión de residuos. Además, se trata del tercer pilar en la transición andaluza hacia una economía circular, junto con el Plan Andaluz de Acción por el Clima y la Ley de Economía Circular de Andalucía. Entre sus objetivos figuran los establecidos por la Unión Europea en la materia para 2035, destacando la reducción al 10% la cantidad de residuos municipales depositados en vertedero.

La decisión de unificar la planificación en materia de residuos que incluye el PIRec introduce una importante simplificación, tanto en relación con los procedimientos administrativos de aprobación y su posterior revisión, como en el ámbito del seguimiento, lo que sin duda facilitará su uso en las plantas cementeras.

Entre las principales novedades del plan se encuentra la recogida separada de biorresiduos, los centros de preparación para la reutilización o la atención a la creciente presencia de residuos plásticos en la costa y el reforzamiento de la mejora continua de la separación de envases y residuos, el incremento de los medios para una mejora en la gestión de los restos agrícolas y la innovación técnica en las instalaciones de valorización y eliminación de residuos municipales.

En su apuesta por la circularidad, se impulsa la innovación y la simbiosis industrial como instrumentos para un uso eficaz de los recursos y la valorización material, con el objetivo de reducir la generación de residuos y la cantidad final que se elimina en vertederos.

Capítulo 2. EL EMPLEO DE RESIDUOS COMO COMBUSTIBLES Y MATERIAS PRIMAS ALTERNATIVAS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO. UNA CONTRIBUCIÓN A LA MEJORA MEDIOAMBIENTAL.

2.1 Características de la fabricación del cemento

En el contexto analizado en el capítulo anterior, la industria cementera se caracteriza por ser uno de los sectores industriales que más contribuye a las emisiones de CO_2. Actualmente se fabrican en el mundo alrededor de 4.000 millones de toneladas de cemento, actividad que genera aproximadamente el 8% de las emisiones mundiales de CO_2.

El cemento es el material de construcción más utilizado en el mundo. Se puede decir que es el conglomerante por excelencia, dadas sus propiedades. Es un producto esencial en la actividad y en el desarrollo de las sociedades modernas, debido a que es el principal constituyente del hormigón y de algunos morteros, pieza esencial de las grandes infraestructuras, todo tipo de obra civil y de la construcción de edificios en nuestros días.

Entre las ventajas de las construcciones basadas en hormigón destacan su capacidad para ser moldeado, su resistencia mecánica, su estabilidad ante el fuego y sus propiedades como aislante acústico. Especial interés marca también su inercia térmica, cada vez más valorada en términos de eficiencia energética y, por tanto, de sostenibilidad.
El cemento tiene una composición química variada, dependiendo de la cual se pueden distinguir distintos tipos de cementos comerciales con características y usos potenciales diferenciados. Básicamente contiene una mezcla de diversos tipos de óxidos, entre los que destaca la sílice (SiO_2) la alúmina (Al_2O_3), el óxido de hierro (Fe_2O_3), la cal (CaO), el yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), la magnesia (MgO) y óxidos de álcalis (Na_2O y K_2O), que adquieren el estado químico responsable de sus propiedades puzolánicas, al someter a las materias primas naturales (caliza, yeso, margas, arcillas, arenas y mineral férrico, principalmente), a un proceso térmico a alta temperatura (hasta alcanzar casi los 1.500ºC). Este tratamiento le confiere al producto resultante una serie de propiedades que hacen que, al ser finamente molido y entrar en contacto con el agua, se aglomere y fragüe como un sólido duro, moldeable y resistente. El proceso es muy intensivo en energía, dada la necesidad de alcanzar temperaturas tan altas, y normalmente se han venido utilizando combustibles sólidos como el carbón o el coque de petróleo, para proporcionar ese nivel térmico.

El proceso seco estándar de fabricación industrial del cemento consta de cuatro etapas principales:

- 1ª La extracción, trituración, dosificación, corrección y molienda de las materias primas.
- 2ª La producción de clínker. Las materias primas molidas son homogeneizadas en equipos de almacenamiento para producir el crudo para la fabricación que, posteriormente, se somete a un precalentamiento, calcinación, tostación y fusión parcial en hornos cilíndricos rotativos para producir el clínker, constituyente base de la composición del cemento.
- 3ª Extracción del horno, enfriado con aire, transporte y almacenamiento del clínker.
- 4ª Por último, al clínker producido se le añade cierta cantidad de aditivos, principalmente yeso, con objeto de darle estabilidad al producto al fraguar. A continuación, se muele la

mezcla de clínker y aditivos, quedando como producto resultante lo que se conoce como cemento.

La producción de clínker en Andalucía alcanzó una cifra de 3.457.856 toneladas en 2019. Actualmente, la "Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050", publicada por Oficemen, sitúa la huella de carbono promedio del cemento en España en 0,73 toneladas de CO_2/tonelada de cemento. En la tabla 1 se recogen los datos de emisiones de CO_2 y producción de clínker particularizado para Andalucía, según la información proporcionada por Oficemen para la memoria de sostenibilidad de FLACEMA.

Tabla 1. Producción de clínker y emisiones de CO_2 en las plantas cementeras de Andalucía (2019). Fuente: OFICEMEN

	CO_2 (toneladas)	CO_2/t clínker	% Total
Emisión CO_2 total	2.713.196	0,79	
CO_2 proceso	1.773.405	0,51	65,36%
CO_2 combustión	1.058.188	0,31	34,64%
CO_2 evitado por biomasa	118.397	0,03	
Producción Clínker (t/año) 3.457.856			

Figura 1. Fuentes de las emisiones de CO_2 en la producción de cemento en Andalucía en 2019.

Respecto al proceso de producción, aproximadamente el 60-65% de las emisiones de CO_2 (65,3% en Andalucía, según datos del sector del cemento andaluz de 2019) proviene del proceso de calcinación por descomposición del $CaCO_3$ en CaO y CO_2. El resto de emisiones (35-40%), se producen en la combustión de los combustibles necesarios para alcanzar los niveles térmicos que necesita el proceso (Figura 1).

El proceso es muy intensivo en energía y la media de consumo para la fabricación de cemento se cifra actualmente en Andalucía en 3.743 MJ/t clínker, en 2019. El sector viene haciendo un continuo esfuerzo de mejora de eficiencia energética, lo que ha conducido a unos ahorros superiores al 40% de la energía consumida en las fábricas, frente a la que se precisaba en 1975. Estas cifras han colocado al sector cementero español como uno de los más eficientes de Europa.
La producción mundial de cemento ha aumentado en más de treinta veces desde 1950 y casi cuatro veces desde 1990. China usó más cemento entre 2011 y 2013 que Estados Unidos en todo el siglo XX. Con la estabilización del consumo chino en los próximos años, se espera que la mayor parte del crecimiento futuro de la construcción se produzca en los mercados emergentes del sudeste asiático y el África subsahariana, impulsados por la rápida urbanización y el desarrollo económico.

Las previsiones indican que las áreas edificadas del mundo se duplicarán en los próximos 40 años, lo que requiere que la producción de cemento aumente un 25% de cara al 2030.

2.2 El empleo de residuos en la fabricación del cemento.

El proceso de fabricación del cemento permite el empleo de una amplia gama de residuos que pueden sustituir tanto a las materias primas naturales como a los combustibles fósiles, convirtiendo esos residuos en recursos. Ello puede contribuir de manera decisiva al ahorro de recursos naturales y a la reducción de la huella de carbono de este producto, bajando significativamente las emisiones de CO_2.

Las características inherentes al tratamiento térmico de producción del clínker, lo hacen especialmente ventajoso a la hora de aplicar un reciclado material y energético, que contribuya a la mejora medioambiental, a la circularidad y a la sostenibilidad. Esta práctica está plenamente incorporada a los procesos de fabricación en las plantas cementeras españolas, se ajusta perfectamente a la jerarquía establecida por la UE para una adecuada gestión de residuos y trae consigo una serie de beneficios ambientales derivados del aprovechamiento de unos materiales cuyo destino actual viene siendo mayoritariamente el vertedero.

En este sentido, se conoce con el nombre de materias primas alternativas a todo tipo residuos que puedan sustituir a alguno de los componentes naturales de la fabricación del clínker y que, por tanto, pueden formar parte de la recuperación material en la industria del cemento. La sustitución de materias primas naturales por residuos se puede llevar a cabo en dos puntos del proceso de fabricación de cemento, uno al inicio y otro al final:

1. Como parte integrante del crudo que se alimenta al horno para la producción de clínker.
2. Como adición al clínker ya elaborado para la producción de cemento.

En el caso de la sustitución en el crudo, si además se trata de un residuo descarbonatado, el beneficio ambiental no sólo conlleva un ahorro de recursos naturales, sino también una disminución de emisiones de CO_2 inherentes al propio proceso.

Por otro lado, combustibles alternativos son todos aquellos residuos susceptibles de ser valorizados energéticamente, con un poder calorífico relativamente alto, y que no pueden ser reutilizados o reciclados, por lo que, de no aprovecharse por esta vía, su destino sería el vertedero o la incineración. En la Figura 2 se recogen los materiales y combustibles alternativos más comúnmente empleados en la producción de cemento, indicando los sectores de procedencia o los agentes involucrados en su gestión y valorización.

En 2019, el consumo total de materias primas alternativas para clínker y cemento respecto del total de materia prima requerida para el proceso productivo, alcanzó en Andalucía un 5,8 %, con un valor neto de 315.000 t de materias primas recicladas totales, de acuerdo con los datos publicados por el Observatorio para la Economía Circular de la Industria Cementera (Figura 3).

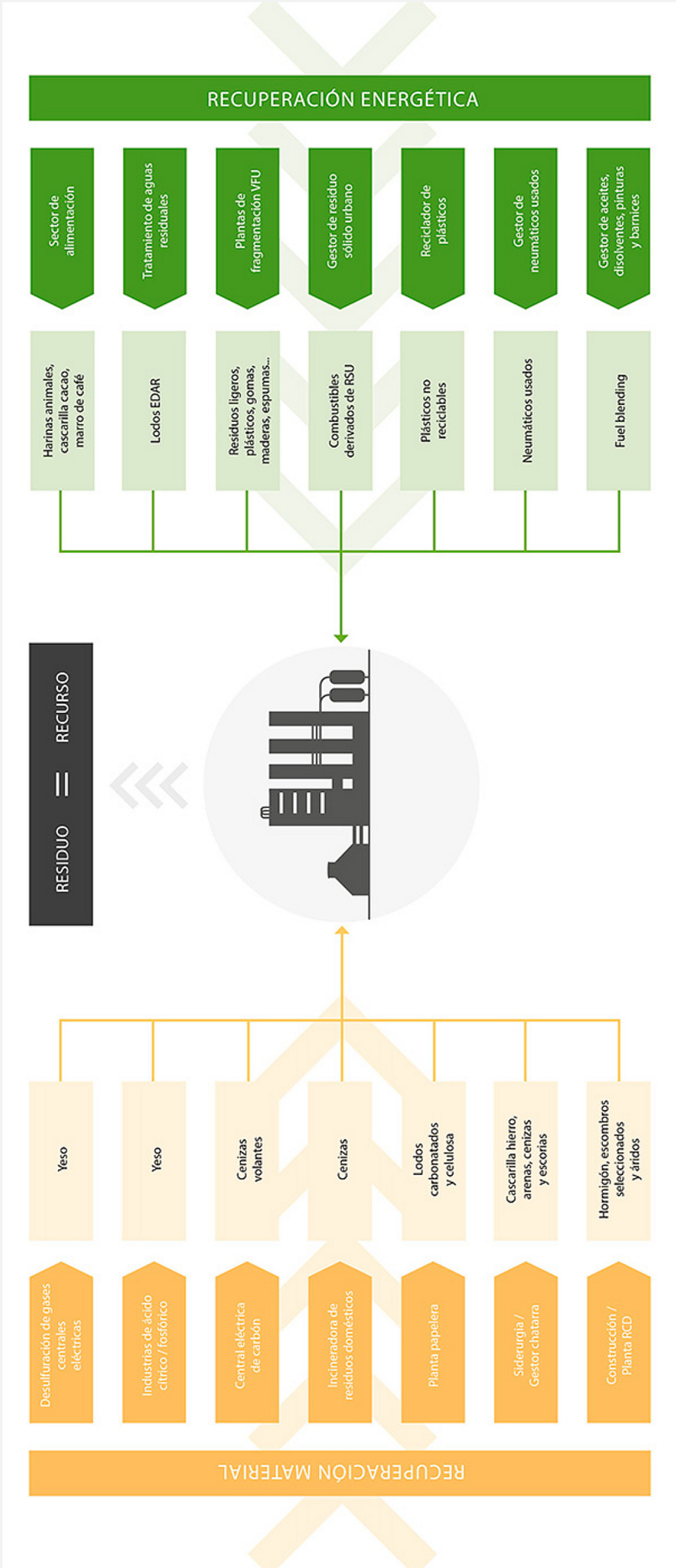
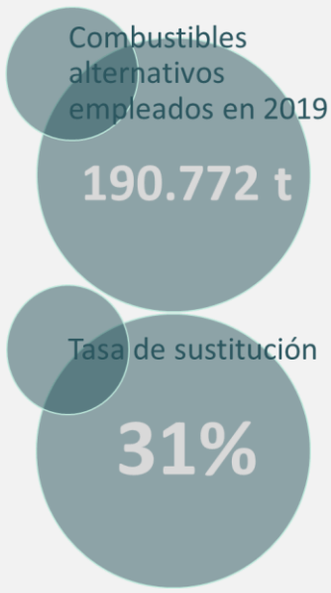


Figura 2. Materiales y combustibles alternativos más comúnmente empleados en la fabricación del cemento.
Fuente: Observatorio de la economía circular en la industria cementera

Figura 3. Materias primas alternativas utilizadas por la industria del cemento en Andalucía en 2019
Fuente: Observatorio para la Economía Circular de la Industria Cementera



Las materias primas alternativas más utilizada en España son, cenizas procedentes de grandes instalaciones de combustión, escorias siderúrgicas, y alúmina residual. En la Figura 4 se recoge el consumo de materias primas alternativas en España en 2019, desglosado por comunidades autónomas, donde destaca el papel de Andalucía dentro del ámbito de la valorización. La distribución de los diferentes tipos de residuos valorizados como materias primas en esta comunidad, se recoge en la Figura 5. En ella se observa cómo predomina de igual manera que en el ámbito nacional, el uso de cenizas y **aportadores de alúmina** como materia valorizable sobre el **resto de** residuos empleados.

Figura 4. Consumo de materias primas alternativas en el sector del cemento por comunidades autónomas en 2019.
Fuente: Observatorio de la Economía Circular en la Industria cementera

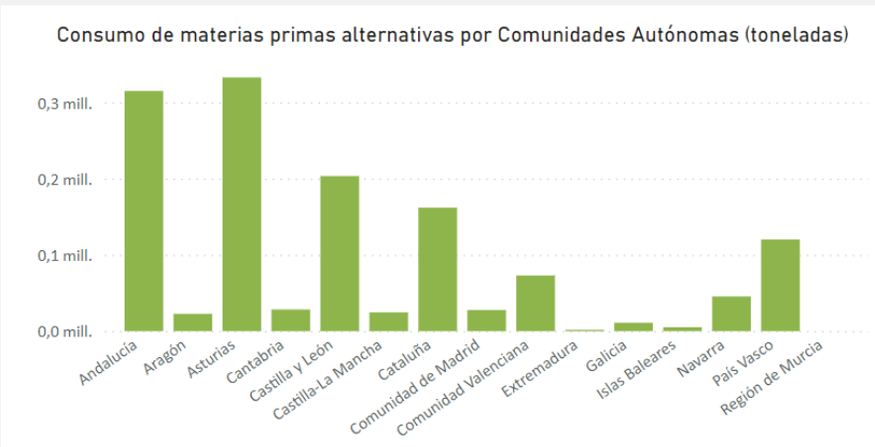
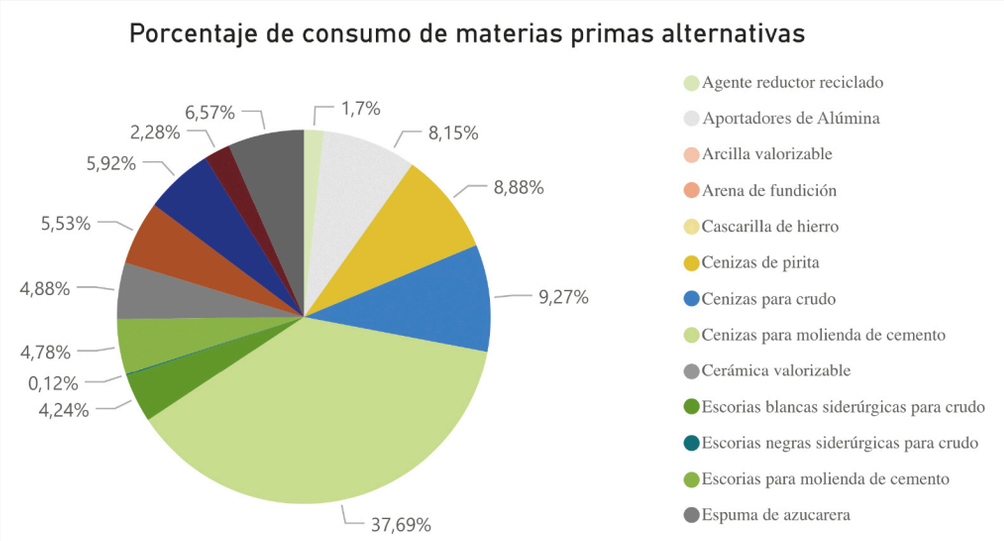
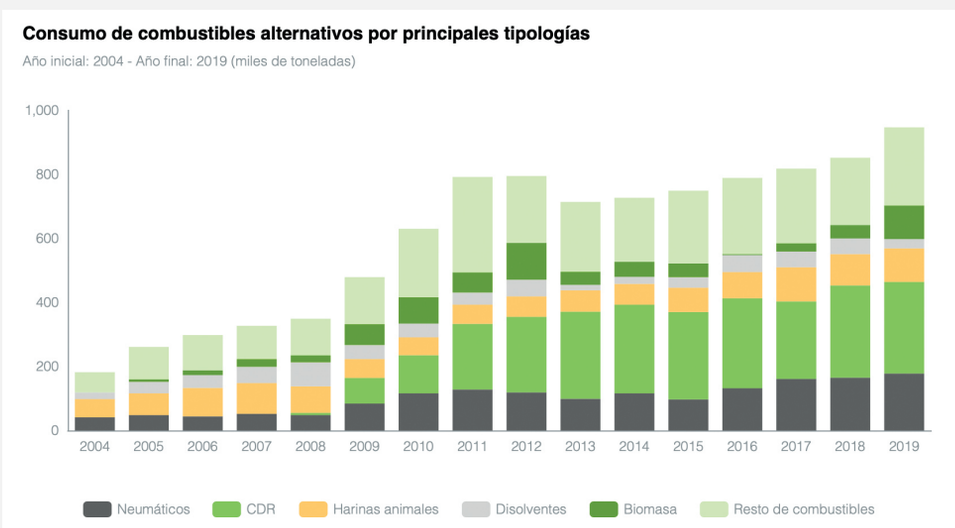


Figura 5. Distribución de las diferentes materias primas alternativas consumidas en la fabricación del cemento en la Comunidad Autónoma Andaluza en 2019.
Fuente: Adaptado del Observatorio de la Economía Circular en la Industria cementera.



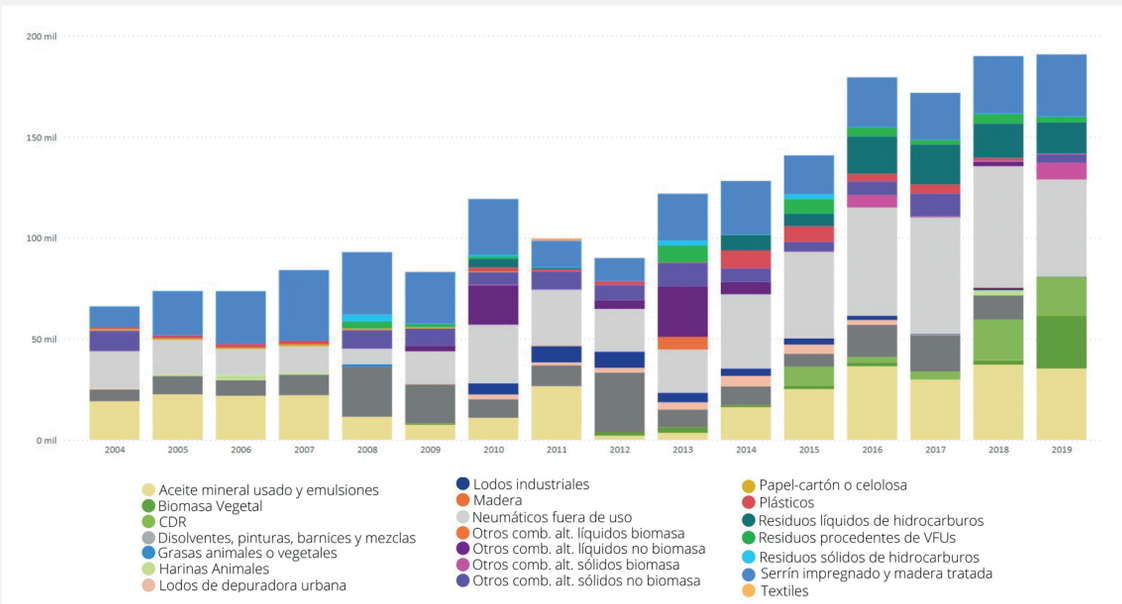
La naturaleza de los residuos combustibles es variada. En la Figura 6 se representa la evolución del empleo de combustibles alternativos en España desde 2004 a 2019, clasificados según su naturaleza. Los combustibles alternativos predominantes son los combustibles derivados de residuos (CDR), neumáticos, harinas animales y biomasa. En el año 2019 se consumieron en España un total de 947.836 t, incrementándose su consumo en un 10% respecto al año anterior. Esta cantidad supone una tasa de sustitución térmica (TSR) de un 31,4% sobre los combustibles fósiles tradicionales. Los combustibles alternativos empleados en España procedieron en 2019 de 77 tipos distintos de residuos.

Figura 6. Evolución del consumo de combustibles alternativos en España, 2019, por tipologías.
Fuente: Observatorio de la Economía Circular en la Industria cementera.



Andalucía fue en 2019 la segunda Comunidad Autónoma en el empleo de este tipo de combustibles. La presencia de combustibles con una menor fracción de emisión neta de CO_2 por unidad de energía generada (kg CO_2/GJ) respecto a los combustibles tradicionales o el empleo de residuos procedentes de biomasa o parcialmente biomásicos, con fracción de emisión nula o muy baja respectivamente, hace que su empleo conlleve una reducción importante de emisiones de CO_2 frente a lo que se hubiese emitido si todo el combustible hubiese tenido naturaleza fósil convencional. Por ello, un mayor empleo de combustibles alternativos conlleva la reducción de emisiones de CO_2 que se muestra en la Figura 7. En 2019, el sector cementero andaluz empleó 190.772 toneladas de combustibles alternativos para cubrir su demanda térmica, lo que supuso una tasa de sustitución del 31%, cercana a la que se dio en ámbito nacional (Figura 8). En la Tabla 2 se muestran los factores de emisión de los combustibles tipo más empleados en la industria cementera.

Figura 7. (Superior) Evolución de los consumos de tipos de combustibles alternativos en Andalucía. (Inferior) Emisiones de CO_2 evitadas en 2019 por el empleo de combustibles alternativos de naturaleza no fósil por comunidades autónomas. Fuente: Observatorio de la Economía Circular en la Industria cementera.



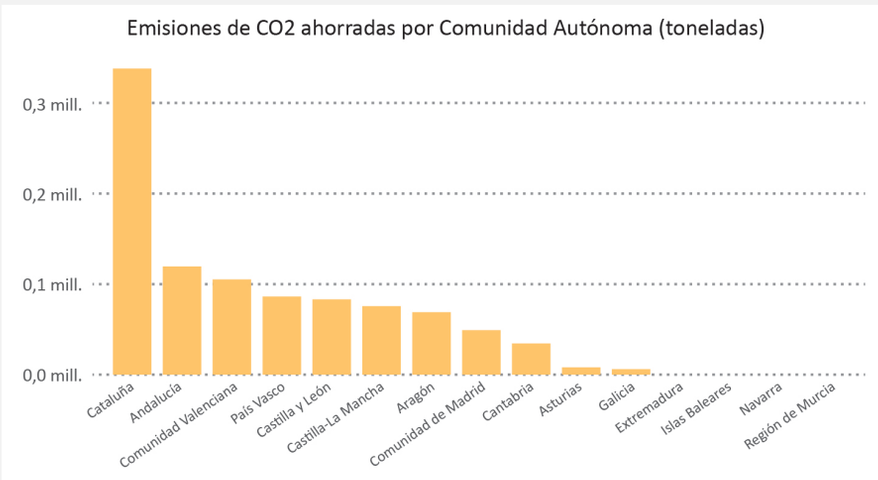


Tabla 2. Factores de emisión de CO_2 y poder calorífico de diferentes tipos de combustibles convencionales y alternativos de la industria del cemento.
Fuente: Adaptado del documento Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Informe Inventario GEI España 2020.

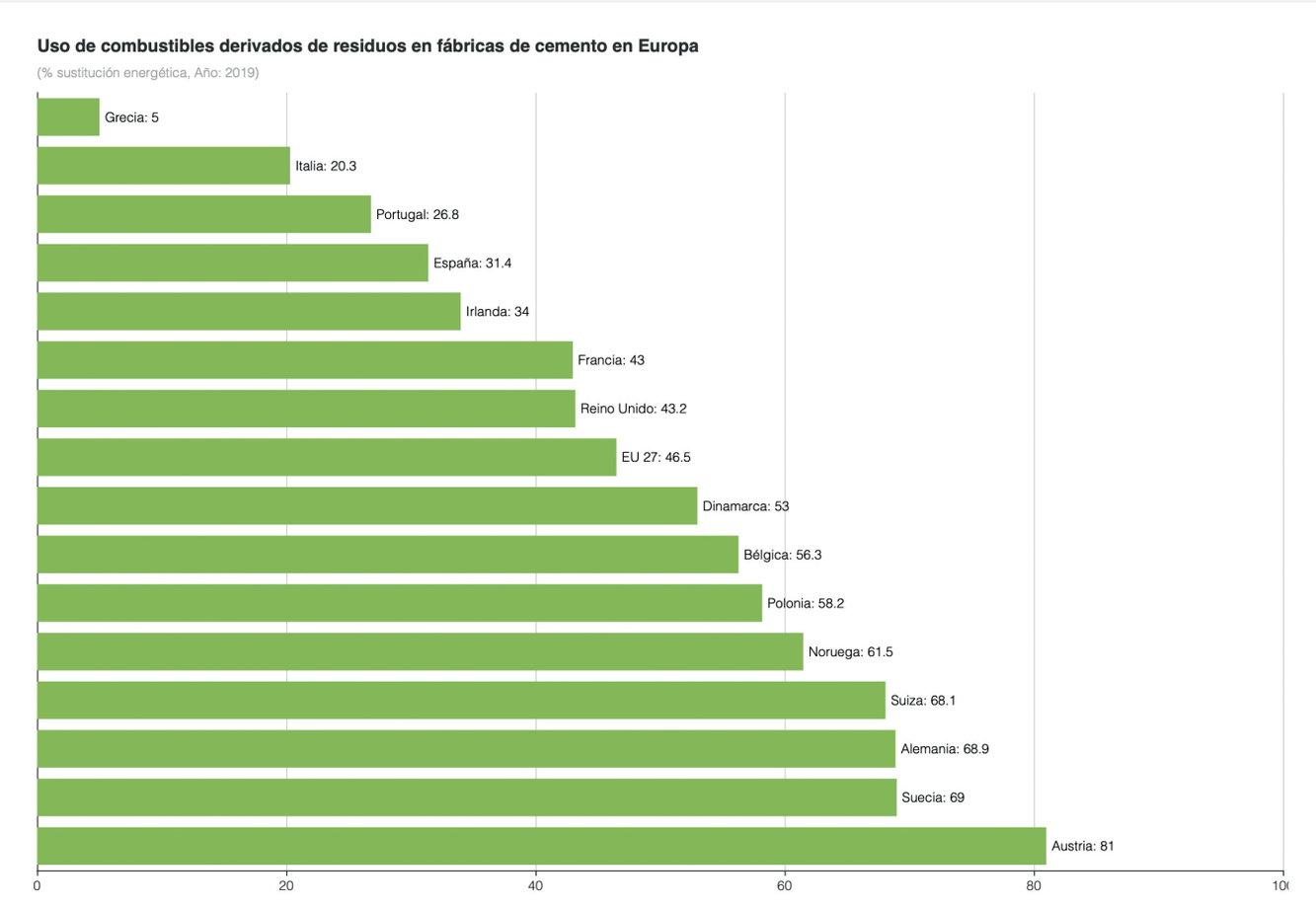
Combustible	Factor de emisión (FE) Kg CO_2/ GJ PCI (4)	PCI (GJ/t)
Hulla y antracita	98,30	26,70
Carbón coquizable	94,60	28,20
Carbón de importación	101,00	24,05
Carbón nacional	99,42	19,25
Coque	107,00	28,20
Coque de petróleo	97,50	32,50
Coque metalúrgico	107,00	28,20
Fuelóleo	77,40	40,40
Gasóleo	74,10	43,00
Gas natural (1)(2)	55,98	48,20
GLP genérico	63,10	47,30
Gas de refinería	57,60	49,50
Neumáticos (3)	60,44	31,57
Serrín impregnado (3)	53,95	13,13
Aceites usados	73,30	40,20
Disolventes	85,08	18,36
Biomasa	0,00	16,90 – 24,50

(1) El PCI también se puede expresar en relación al volumen, siendo su valor de 38,22 GJ/miles de m^3N.
(2) Para el paso de PCS a PCI, en el gas natural se utiliza el factor de conversión de 0,901
(3) Los factores de emisión que se muestran están referidos a la fracción fósil de carbono contenida en el combustible.
(4) Los factores de oxidación por defecto recogidos en la Guía IPCC 2006 asumen un factor de oxidación de 1 para todos los combustibles.

Figura 8. Combustibles alternativos empleados en el sector cementero andaluz en 2019.
Fuente: Observatorio de la Economía Circular en la Industria cementera

No obstante, la tasa de sustitución térmica varía significativamente dentro la UE, yendo desde el 5% en Grecia, hasta el 81% en Austria, de acuerdo con los datos mostrados en la Figura 9, procedentes del Observatorio de la Economía Circular en la Industria Cementera. La tasa del 31,4% en España, se sitúa significativamente por debajo del promedio de la UE (46,5%), a pesar de ser uno de los principales países europeos productores de cemento. No existen razones técnicas ni escasez de combustibles alternativos derivados de residuos ,que impidan superar el promedio europeo y situarse, de este modo, dentro del rango de valorización energética más elevado, por lo que resulta muy necesario promover políticas que incentiven la consolidación de los mecanismos técnicos, administrativos y de mercado que faciliten su uso.

Figura 9. Uso de combustibles alternativos (% sustitución térmica) en fábricas de cemento en Europa en 2019.
Fuente: Observatorio de la Economía Circular en la Industria cementera.



En relación a las características que deben cumplir los residuos para ser valorizados tanto en materias primas como energéticamente, la pauta viene determinada por la legislación europea, nacional y autonómica en materia de residuos. Ésta queda reflejada en las Autorizaciones Ambientales Integradas, emitidas por el organismo competente en materia de medio ambiente en cada comunidad autónoma para cada instalación.

Del análisis de las diferentes AAI de las fábricas de cemento que operan es España se observan variaciones entre los requisitos establecidos en cada una de ellas, tanto en relación a los parámetros evaluados como a los límites establecidos. No obstante, cabe considerar que las

características varían en buena medida dependiendo del tipo de residuo utilizado, siendo clave la capacidad del horno para retener o neutralizar los contaminantes derivados de la combustión. Así, por ejemplo, para neumáticos fuera de uso no es necesario limitar el contenido de metales porque aportan una cantidad estable y los metales quedan retenidos pasando a formar parte del clínker. Asimismo, las características a cumplir también se ven influenciadas por la configuración específica de cada instalación, y por las cantidades de metales u otros elementos presentes en las materias primas naturales. Se limita el poder calorífico inferior de los combustibles alternativos en buena parte de las instalaciones autorizadas a valorizar residuos energéticamente, con valores mínimos de 1.500 kcal/kg, con objeto de optimizar los procesos de combustión en las plantas, aunque en algunas ocasiones se dan cifras puramente indicativas que no responden a una limitación de proceso.

El contenido en cloro se limita entre un 1% y 3%, ya que puede generar problemas en los hornos (dependiendo de la configuración del horno, la composición de las materias primas y el punto de alimentación), al favorecer la generación de pegaduras en éstos y problemas de bloqueo en los equipos del proceso.

Los límites máximos de azufre, en las instalaciones en que se impone un límite, varían entre un 1% y 6%, dependiendo de la planta y el tipo de residuo. En general, en hornos de vía seca, las condiciones de retención de SO_2 en la torre de ciclones hacen que esta limitación no sea necesaria.

En prácticamente la mitad de las instalaciones autorizadas a valorizar residuos energéticamente se limita el contenido en metales pesados. Dependiendo de la instalación se limita el mercurio (10 ppm), el talio (50 o 100 ppm), el conjunto de cadmio y talio (12-100 ppm) y/o el conjunto de cadmio, talio y mercurio (100 ppm). En varios casos no hay establecidos valores límite, debido a que entre los residuos autorizados no se encuentran los que pueden tener contenidos de estos metales.

En 13 instalaciones se fijan valores máximos de policlorobifenilos y policloroterfenilos (PCBs y PCTs), entre 10 y 50 ppm. Asimismo, en 6 instalaciones se limita el contenido de compuestos organohalogenados totales, con valores habituales entre 1% y 2%, expresados en cloro. En varios casos no hay establecidos valores límite, debido a que entre los residuos autorizados no se encuentran los que pueden tener contenidos de estos compuestos.

En relación a las cantidades de residuos que se pueden tratar, en casi la mitad de las instalaciones autorizadas a valorizar energéticamente se establecen porcentajes máximos de sustitución. En otras instalaciones se establecen cantidades anuales.

Respecto a las temperaturas, en todas las instalaciones se superan con creces los límites recogidos en las Autorizaciones, razón por la que los hornos de cemento se cuentan entre las instalaciones industriales más seguras para el empleo de residuos como combustibles.

Por último, en relación a las emisiones de gases contaminantes y partículas, es el Real Decreto 815/2013, el que establece en su anexo II los valores límite nacionales de emisión a la atmósfera para las cementeras que realicen valorización energética de residuos en sus hornos, salvo en los casos donde más del 40% del calor generado proceda de la combustión de residuos peligrosos,

donde aplican los valores límite de emisión establecidos en el Anexo V del Real Decreto para incineradoras.

Las comunidades autónomas (autoridades competentes en materia medioambiental), en caso de que las condiciones locales del medio ambiente lo requieran, pueden proponer, si hay justificación técnica, el establecimiento de límites de emisión más bajos que los que fija la normativa y que se recogen en las Autorizaciones Ambientales Integradas de cada instalación en concreto, aunque lo habitual, en la mayor parte de las Autorizaciones, es que se mantengan los límites establecidos por la Comunidad Europea.

2.3. Impacto medioambiental del empleo de residuos en el proceso de fabricación del cemento.

El uso de residuos autorizados, tanto en la valorización material como en la valorización energética de combustibles, no tiene ningún impacto negativo en la calidad medioambiental de las emisiones y en la calidad y composición del producto, presentando un gran potencial de reciclabilidad. Las elevadas temperaturas a las que estos materiales se ven sometidos en el horno de clínker, los altos tiempos de residencia en zonas de muy alta temperatura, que propician la oxidación completa de todos los compuestos orgánicos, y la naturaleza del proceso que pone en contacto los gases calientes con el material crudo frio donde condensan los compuestos y metales volátiles, reintroduciéndolos de nuevo en el ciclo de fabricación e incorporándolos finalmente al producto, hacen que el proceso sea muy seguro desde el punto de vista medioambiental. En muchos casos incluso, el empleo de combustibles alternativos puede significar una mejora medioambiental, como ocurre con el uso de biomasa como combustible, que reduce de forma importante las emisiones de CO_2 del proceso.

Debido a estas características diferenciadoras, no se puede generalizar sobre los impactos que puede llegar a tener la combustión de residuos en una cementera, equiparándolos a los de otras instalaciones de combustión que no gocen de las ventajas anteriormente expuestas, pues las emisiones de una cementera son diferentes, están mejor controladas por la propia naturaleza del proceso y no van a verse afectadas negativamente por el uso de residuos, como han demostrado múltiples estudios realizados hasta la fecha.

La recuperación de residuos en cementeras es una actividad avalada por la Unión Europea tras más de 40 años de experiencia y se incluye dentro de las recomendaciones de distintas directivas para favorecer la valorización energética de residuos, la circularidad de los procesos industriales y la sostenibilidad del sector. Sirvan como ejemplo:

- La Comunicación sobre el papel de la transformación de los residuos en energía dentro de la economía circular: "The role of waste-to-energy in the circular economy", de enero 2017, insta a los Estados miembros a que, cuando revisen sus planes de gestión de residuos y evalúen la necesidad de capacidad adicional de procesos de recuperación de energía de los residuos no reciclables (por ej. de incineración), aquellos Estados miembros con una capacidad de incineración baja o inexistente y una alta dependencia de los vertederos (es

decir la situación actual de España), adopten una perspectiva a largo plazo y evalúen, entre otros factores, la disponibilidad de hornos de cemento para coprocesar residuos.

- La Comunicación de la Comisión Europea: "Cerrar el círculo": un plan de acción de la UE para la economía circular de Diciembre 2015, que recomienda que *"cuando no se pueden evitar o reciclar los residuos, en la mayoría de los casos y tanto desde el punto de vista medioambiental como económico, es preferible recuperar su contenido energético en vez de depositarlos en vertederos".*
- El Documento de referencia sobre las Mejores Técnicas Disponibles para la fabricación de cemento (BREF), de marzo 2013, recoge que el uso de residuos como combustible es una mejor técnica disponible. Este documento cita que las características especiales de los hornos de cemento les permiten reciclar y valorizar residuos, sin generar un riesgo para el medio ambiente o la salud de las personas, ni un detrimento en la calidad del cemento.
- La Comunicación sobre la "Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos" de septiembre 2011, destaca entre las mejores prácticas de eficiencia el uso de residuos como combustible en las cementeras, pues reduce las emisiones de CO_2, los costes energéticos y da una solución ambientalmente correcta a los residuos.

Adicionalmente, como prueba de la seguridad en el empleo de residuos en la industria cementera, existe un gran número de estudios científicos que han tenido como objetivo comparar el efecto que tiene sobre las emisiones contaminantes de una planta de cemento la incorporación de residuos de diversa naturaleza, incluidos aquellos que tienen un carácter tóxico o peligroso, como materias primas o como combustibles.

Como ejemplos recientes de estos estudios cabe destacar los siguientes:

- El estudio epidemiológico llevado a cabo por la Agencia de Salud Pública de Gales en las inmediaciones de la cementera Hanson en Gales. Este estudio es uno de los más recientes y extensos, y ha sido respaldado por informes técnicos elaborados por miembros expertos, en los que participaron más de ochenta personas pertenecientes a diversas organizaciones públicas (Betsi Cadwaladr University Health Board, Environment Agency Wales, Flintshire County Council, Food Standards Agency, Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards at the Health Protection Agency, Health and Safety Executive, Public Health Wales including the Public Health Wales Observatory, Welsh Cancer Intelligence Surveillance Unit, and Health Protection Teams). Para la elaboración del estudio se invirtieron más de 13.000 horas de trabajo y como conclusiones más relevantes tras dos años de trabajo cabe destacar:
    - "No se han encontrado evidencias científicas que determinen que las emisiones de Hanson Cement produzcan daños sobre la salud".
    - "No se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre la incidencia de problemas de salud en las personas que habitan en los alrededores de la fábrica y el resto de población general".
    - La mayoría de los análisis realizados muestran que la incidencia de desarrollar un cáncer en las siete áreas estudiadas (áreas seleccionadas con un número de 7.500 personas) cercanas a las proximidades de Hanson Cement, son similares a otras áreas de Gales y Flintshire, en las que no se ubican plantas cementeras. Por tanto, "no existen evidencias que determinen una mayor incidencia de cáncer entre los vecinos de la fábrica y la incidencia de la población general".

- La investigación realizada muestra que una vez finalizado el estudio y tras recopilar la percepción de las partes interesadas, algunos miembros de las comunidades locales se han encontrado más tranquilos, pero otra parte de ellos han declarado que a pesar del exhaustivo estudio y de las conclusiones obtenidas, sus preocupaciones no han sido resueltas.

- El Comité Consultivo sobre Efectos Médicos de Contaminantes para la Salud de Reino Unido (COMEAP) que asesora a organismos gubernamentales en cuestiones relativas a los efectos de los contaminantes atmosféricos sobre la salud, después de analizar varios estudios sobre emisiones de contaminantes de plantas cementeras en las que se emplean combustibles preparados con residuos líquidos y neumáticos fuera de uso, concluye que "no presentan una probabilidad de causar un incremento de riesgo para la salud". Posteriormente, y a la vista de los resultados de pruebas similares e informes emitidos por la Agencia Ambiental de Inglaterra y Gales (EA), el COMEAP amplía las conclusiones obtenidas al uso de lodos de depuradora, harinas cárnicas y CDR (combustibles derivados de la fracción resto de residuos municipales e industriales), concluyendo que "En todos los casos el permiso definitivo para usar estos combustibles se ha dado sólo tras unas extensas pruebas en la planta, probando que no había un efecto neto negativo sobre el medio ambiente."

- La Universidad Rovira i Virgili de Tarragona ha realizado distintos estudios de monitorización ambiental, analizando muestras de vegetación, suelo y aire, y ha llevado a cabo la evaluación de los potenciales riesgos para la salud de la población cercana a fábricas de cemento ubicadas en Cataluña. Como conclusiones principales cabe citar:
  - La valorización energética "no implica riesgos adicionales para la población del entorno"
  - En el estudio realizado en la fábrica de cemento de Vallcarca para evaluar ambientalmente la utilización de lodos de depuradora como combustible alternativo, se determina que "no supone un riesgo adicional para la salud de la población residente en las cercanías de la planta".
  - En la fábrica de Sant Feliú de Llobregat se evaluó la incidencia del horno y el riesgo para la salud humana, "no observándose diferencias significativas en los riesgos para la salud humana por la exposición a metales y dioxinas y furanos, antes y después de que la instalación cesara su actividad".
  - En el entorno de la fábrica de cemento de Alcanar, el uso de combustibles derivados de residuos no produce impactos añadidos, pues "no se ha detectado un incremento significativo en los niveles de dioxinas y furanos y metales en el entorno".
  - El estudio realizado indica que "el uso de CDR en lugar de combustibles fósiles puede ser una buena elección, de acuerdo con las nuevas políticas ambientales de la Unión Europea".
  - La exposición a dioxinas y furanos por el uso de lodos de depuradora en la cementera de Montcada i Reixac "no implica riesgos adicionales para la población de los alrededores".
  - Tras estudiar los niveles ambientales de PCDD/Fs y metales alrededor de una planta de cemento en Cataluña antes y después de la implantación de combustible alternativo, se concluye que "los riesgos para la salud humana están por debajo de los umbrales de seguridad", independientemente del combustible utilizado.

- La Universidad de Dalhousie de Canadá ha realizado un estudio para la "Evaluación del uso de Neumáticos Fuera de Uso como combustible alternativo". La evaluación de riesgo para la salud se ha realizado mediante una exhaustiva revisión de estudios que analizaban el impacto de las emisiones en las plantas de cemento a partir de mediciones en chimenea y mediante un estudio de dispersión de contaminantes. Como conclusión destaca que "el uso de neumáticos como combustible alternativo en sustitución de combustibles tradicionales no implica ningún riesgo ambiental ni de salud añadido", ya que "los valores de los contaminantes emitidos estarían muy por debajo de los estándares para la protección de la salud". En 2015, se llevó a cabo otro estudio específico para una fábrica de LafargeHolcim sobre uso de combustibles alternativos obteniéndose como conclusión que "es altamente probable que la sustitución de hasta el 30% de las necesidades de calor en el horno de Brookfield con Neumáticos Fuera de Uso disminuya de modo global el impacto ambiental de la planta y mejore significativamente el programa de reciclaje de neumáticos provincial".

- Debido a la preocupación expresada por las partes interesadas locales, por las posibles emisiones contaminantes derivadas del uso de residuos peligrosos como combustible, en la fábrica de cemento Secil-Outão, se llevó a cabo una evaluación de riesgos por múltiples vías. Para ello, se utilizaron modelos de dispersión del aire que permitían predecir las concentraciones resultantes y su distribución. Como conclusiones hay que resaltar que tras el estudio realizado se determinó que "la probabilidad de que los productos químicos emitidos por la fábrica puedan causar una mayor incidencia de cáncer es relativamente baja y no se espera que tenga un impacto sobre la salud de la población y el medio ambiente local". Además, investigadores de la Universidad de Lisboa han recogido en el artículo "The cement plant environmental handbook", que tras todos los estudios realizados en la planta de Secil: Los riesgos sanitarios y ecológicos son mínimos, el uso de diferentes combustibles alternativos no tiene impacto en los niveles de emisión y que los niveles de concentración de contaminantes de las instalaciones de Secil en el medio ambiente, se encuentran actualmente por debajo de los niveles de fondo en entornos urbanos.

Se trata tan solo de una muestra de los estudios que garantizan la seguridad del empleo o coprocesado de residuos en las plantas de producción de cemento en todo el mundo, por lo que se puede concluir que esta práctica ofrece una solución sólida y segura para la sociedad, el medio ambiente y la industria cementera, sustituyendo los recursos no renovables por residuos bajo estrictas medidas de control.

Capítulo 3. RESIDUOS VALORIZABLES EN ANDALUCÍA.

3.1 Generación de residuos valorizables en Andalucía.

Se plantea a continuación, un análisis de la producción de residuos en Andalucía, a partir del cual se realizará una evaluación de las capacidades de valorización energética en las plantas cementeras andaluzas.

La Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía hace un inventario anual de la producción de residuos en Andalucía del que provienen los datos facilitados por la propia Consejería para la elaboración de este informe. El inventario recoge una información muy detallada de la producción declarada de residuos peligrosos (RP) y no peligrosos (RnoP) susceptibles de ser valorizados energéticamente caracterizados como residuos R1 según el catálogo de residuos de Andalucía que establece el Decreto 73/2012.

Según las últimas cifras de producción registradas en 2019 la producción declarada de RP que podrían ser objeto de valorización energética no resultó demasiado elevada (132.320 t residuos) en comparación con la producción de RnoP (3,8 Mt residuos), entre los que se incluyen los de origen municipal, sector primario y sector industrial.

Tabla 3. Producción de residuos peligrosos (RP) y no peligrosos (RnoP) valorizables energéticamente (R1) registrada en Andalucía en 2019.
Fuente: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía

TIPO DE RESIDUO	Producción total (t/año)	Producción susceptible de valorización energética (R1) (t/año)	Proporción R1 sobre el total de residuos (%)
RESIDUOS PELIGROSOS (RP)	305.937	132.320	43,25
RESIDUOS NO PELIGROSOS (RnoP)	18.758.708	3.789.045	20,20

Estos datos totales muestran que el volumen potencial de residuos que podrían ser valorizados por no resultar posible su reciclaje material u otras formas de gestión preferentes, es muy elevado si se compara con la cifra real de residuos valorizados energéticamente en las cementeras andaluzas en 2019: 190.771,53 t. Esto representa todavía una proporción muy reducida del total de residuos valorizables: el 4,8 % del total de la producción.

La producción de los distintos tipos de residuos RP y RnoP catalogados en Andalucía se muestra en las tablas 4 y 5 respectivamente.

Las tablas 6 y 7 destacan los valores de producción de los residuos peligrosos y no peligrosos más abundantes en la comunidad autónoma andaluza. Como se puede observar, el 87% de los RP producidos en Andalucía presentan un carácter fósil, mientras que más del 78% de los RnoP valorizables presentan carácter biomásico (residuos vegetales, maderas, papel y cartón) o parcialmente biomásicos (NFU, lodos de papelera, o fracción no compostada de RSU).

Tabla 4. Clasificación por composición de Residuos Peligrosos susceptibles a ser valorizados (R1) en Andalucía (2019).

LER	DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO	toneladas
ACEITES, CERAS Y GRASAS		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
100609	Residuos del tratamiento del agua de refrigeración que contienen aceites	15,3
120107	Aceites minerales de mecanizado sin halógenos (excepto las emulsiones o disoluciones)	2,324
120110	Aceites sintéticos de mecanizado	7,538
130506	Aceites procedentes de separadores de agua/sustancias aceitosas	0,858
120112	Ceras y grasas usadas	185,597
190810	Mezclas de grasas y aceites procedentes de la separación de agua/sustancias aceitosas distintas de las especificadas en el código 19 08 09	160,826
200126	Aceites y grasas distintos de los especificados en el código 20 01 25	33,828
DISOLVENTES		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
200113	Disolventes	141,801
70104	Otros disolventes, líquidos de limpieza y licores madre orgánicos	191,009
70204	Otros disolventes, líquidos de limpieza y licores madre orgánicos	0,81
70304	Otros disolventes, líquidos de limpieza y licores madre orgánicos	25,052
70704	Otros disolventes, líquidos de limpieza y licores madre orgánicos	1,6
80119	Suspensiones acuosas que contienen pintura o barniz con disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	317,68
90103	Soluciones de revelado con disolventes	74,929
140603	Otros disolventes y mezclas de disolventes	1.657,96
PINTURAS, ADHESIVOS Y EMULSIONES		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
200127	Pinturas, tintas, adhesivos y resinas que contienen sustancias peligrosas	79,862
120108	Emulsiones y disoluciones de mecanizado que contienen halógenos	32,16
120109	Emulsiones y disoluciones de mecanizado sin halógenos	445,281
130802	Otras emulsiones	1,026
80111	Residuos de pintura y barniz que contienen disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	1.609,38
80117	Residuos del decapado o eliminación de pintura y barniz que contienen disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	350,909
80409	Residuos de adhesivos y sellantes que contienen disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	435,001
80415	Residuos líquidos acuosos que contienen adhesivos o sellantes con disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	17,483
HIDROCARBUROS, ALQUITRANES, CARBÓN Y FUELÓLEO		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
50105	Derrames de hidrocarburos	0,369
61302	Carbón activo usado (excepto la categoría 06 07 02)	451,303
160708	Residuos que contienen hidrocarburos	8.774,55
190110	Carbón activo usado procedente del tratamiento de gases	6,308
130701	Fuel oil y gasóleo	1.565,58
50108	Otros alquitranes	254,96
170303	Alquitrán de hulla y productos alquitranados	5,84
191102	Alquitranes ácidos	139,92
LODOS Y AGUAS		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
40219	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	8,124
50103	Lodos de fondos de tanques	985,322
50106	Lodos oleosos procedentes de operaciones de mantenimiento de plantas o equipos	578,335
70111	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	154,96
70211	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	0,355
70311	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	119,16
70611	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	8,267
70711	Lodos del tratamiento in situ de efluentes que contienen sustancias peligrosas	24,36
80115	Lodos acuosos que contienen pintura o barniz con disolventes orgánicos u otras sustancias peligrosas	129,503
80314	Lodos de tinta que contienen sustancias peligrosas	256,422
130502	Lodos de separadores de agua/sustancias aceitosas	5.950,57
140605	Lodos o residuos sólidos que contienen otros disolventes	43,693
190811	Lodos que contienen sustancias peligrosas procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales industriales	182,711
OTROS		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
20108	Residuos agroquímicos que contienen sustancias peligrosas	40,235
30104	Serrín, virutas, recortes, madera, tableros de partículas y chapas que contienen sustancias peligrosas	0
50111	Residuos procedentes de la limpieza de combustibles con bases	60,48
50115	Arcillas de filtración usadas	612,057
70108	Otros residuos de reacción y de destilación	7.425,00
70110	Otras tortas de filtración y absorbentes usados	32,613
70201	Líquidos de limpieza y licores madre acuosos	11,302
70208	Otros residuos de reacción y de destilación	43,279
70301	Líquidos de limpieza y licores madre acuosos	361,378
70310	Otras tortas de filtración y absorbentes usados	79,56
70513	Residuos sólidos que contienen sustancias peligrosas	26,254
70601	Líquidos de limpieza y licores madre acuosos	3.025,84
70608	Otros residuos de reacción y de destilación	1.025,58
70701	Líquidos de limpieza y licores madre acuosos	20,697
70708	Otros residuos de reacción y de destilación	954,58
70710	Otras tortas de filtración y absorbentes usados	0,948
80121	Residuos de decapantes o desbarnizadores	32,445
80312	Residuos de tintas que contienen sustancias peligrosas	381,522
80317	Residuos de tóner de impresión que contienen sustancias peligrosas	37,633
90101	Soluciones de revelado y soluciones activadoras al agua	109,634
90104	Soluciones de fijado	6,105
110113	Residuos de desengrasado que contienen sustancias peligrosas	138,707
130501	Sólidos procedentes de desarenadores y de separadores de agua/sustancias aceitosas	18,44
130507	Agua aceitosa procedente de separadores de agua/sustancias aceitosas	5.410,90
130508	Mezcla de residuos procedentes de desarenadores y de separadores de agua/sustancias aceitosas	125,64
130702	Gasolina	0,208
130703	Otros combustibles (incluidas mezclas)	15.320,54
150110	Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	8.633,41
150202	Absorbentes, materiales de filtración (incluidos los filtros de aceite no especificados en otra categoría), trapos de limpieza y ropas protectoras contaminados por sustancias peligrosas	10.588,54
160107	Filtros de aceite	1.555,92
160114	Anticongelantes que contienen sustancias peligrosas	696,219
160305	Residuos orgánicos que contienen sustancias peligrosas	656,219
160508	Productos químicos orgánicos desechados que consisten en, o contienen, sustancias peligrosas	9,013
170301	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla	0,324
190208	Residuos combustibles líquidos que contienen sustancias peligrosas	13.657,81
190209	Residuos combustibles sólidos que contienen sustancias peligrosas	35.751,17
200117	Productos fotoquímicos	0,225
200127	Pinturas, tintas, adhesivos y resinas que contienen sustancias peligrosas	79,862
200129	Detergentes que contienen sustancias peligrosas	7,742
200137	Madera que contiene sustancias peligrosas	32,521
170204	Vidrio, plástico y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	0,61

Tabla5. Clasificación por composición de Residuos no Peligrosos susceptibles a ser valorizados (R1) en Andalucía (2019)

FRACCIÓN NO COMPOSTADA		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
190501	Fracción no compostada de residuos municipales y asimilados	616.292,72
190502	Fracción no compostada de residuos de procedencia animal o vegetal	278,38
PAPEL Y CARTÓN		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
30307	Desechos, separados mecánicamente, de pasta elaborada a partir de residuos de papel y cartón	22.521,00
150101	Envases de papel y cartón	78.394,08
191201	Papel y cartón	211.211,67
200101	Papel y cartón	355.767,01
RESIDUOS DE TEJIDOS DE VEGETALES Y ANIMALES		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
20102	Residuos de tejidos de animales	15
20103	Residuos de tejidos de vegetales	632.556,40
20202	Residuos de tejidos de animales	53.943,56
PLÁSTICOS		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
20104	Residuos de plásticos (excepto embalajes)	49.340,66
200139	Plásticos	61.095,64
ENVASES		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
150101	Envases de papel y cartón	78.394,08
150102	Envases de plástico	50.339,96
150103	Envases de madera	39.920,30
150104	Envases metálicos	20.715,61
150106	Envases mixtos	104.803,11
150107	Envases de vidrio	96.750,91
150109	Envases textiles	35,25
MADERA Y SERRÍN		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
191207	Madera distinta de la especificada en el código 19 12 06	98.233,30
200138	Madera distinta de la especificada en el código 20 01 37	41.624,71
30105	Serrín, virutas, recortes, madera, tableros de partículas y chapas distintos de los mencionados en el código 03 01 04	19.129,67
ROPA Y TEXTIL		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
150203	Absorbentes, materiales de filtración, trapos de limpieza y ropas protectoras distintos de los especificados en el código 15 02 02	12.054,34
200110	Ropa	18.607,79
40209	Residuos de materiales compuestos (textiles impregnados, elastómeros, plastómeros)	1,9
40221	Residuos de fibras textiles no procesadas	35,74
40222	Residuos de fibras textiles procesadas	161,93
191208	Textiles	3.110,09
LODOS		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
20201	Lodos de lavado y limpieza	192,247
20705	Lodos del tratamiento in situ de efluentes	1.966,84
30305	Lodos de destintado procedentes del reciclado de papel	873,395
30311	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 03 03 10	10.181,36
50110	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los mencionados en el código 05 01 09	2.973,85
70112	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 07 01 11	11.327,04
70212	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 07 02 11	212,44
70512	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 07 05 11	138,3
70612	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 07 06 11	296,32
70712	Lodos del tratamiento in situ de efluentes, distintos de los especificados en el código 07 07 11	613,62
80116	Lodos acuosos que contienen pintura o barniz, distintos de los especificados en el código 08 01 15	49,18
80307	Lodos acuosos que contienen tinta	1.346,64
190805	Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas	504.968,01
190812	Lodos procedentes del tratamiento biológico de aguas residuales industriales distintos de los especificados en el código 19 08 11	37.076,28
190902	Lodos de la clarificación del agua	31.892,58
OTROS		
LER	**DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO**	**toneladas**
20107	Residuos de la silvicultura	13.751,12
20109	Residuos agroquímicos distintos de los mencionados en el código 02 01 08	578,48
20203	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración	18.167,64
20304	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración	60.701,98
20704	Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración	5.396,93
30101	Residuos de corteza y corcho	36
40209	Residuos de materiales compuestos (textiles impregnados, elastómeros, plastómeros)	1,9
50117	Betunes	4,182
80112	Residuos de pintura y barniz, distintos de los especificados en el código 08 01 11	19,91
80308	Residuos líquidos acuosos que contienen tinta	8,857
80313	Residuos de tintas distintos de los especificados en el código 08 03 12	0,272
80318	Residuos de tóner de impresión, distintos de los especificados en el código 08 03 17	189,108
80410	Residuos de adhesivos y sellantes, distintos de los especificados en el código 08 04 09	791,193
120105	Virutas y rebabas de plástico	8.007,68
150203	Absorbentes, materiales de filtración, trapos de limpieza y ropas protectoras distintos de los especificados en el código 15 02 02	12.054,34
160103	Neumáticos fuera de uso	73.099,82
160306	Residuos orgánicos distintos de los especificados en el código 16 03 05	3.315,72
170302	Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 17 03 01	55.677,45
190809	Mezclas de grasas y aceites procedentes de la separación de agua/sustancias aceitosas que sólo contienen aceites y grasas comestibles	3.895,99
190901	Residuos sólidos de la filtración primaria y cribado	512,98
190904	Carbón activo usado	247,124
191004	Fracciones ligeras de fragmentación (fluff-light) y polvo distintas de las especificadas en el código 19 10 03	15.460,20
191210	Residuos combustibles (combustible derivado de residuos)	23.337,83
200125	Aceites y grasas comestibles	43.035,31
200128	Pinturas, tintas, adhesivos y resinas distintos de los especificados en el código 20 01 27	174

Tabla 6. Los diez tipos de RP de mayor producción en Andalucía 2019.

LER	DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO	tonelada
19020	Residuos combustibles sólidos que contienen sustancias peligrosas	35.751
13070	Otros combustibles (incluidas mezclas)	15.321
19020	Residuos combustibles líquidos que contienen sustancias peligrosas	13.658
15020	Absorbentes, materiales de filtración (incluidos los filtros de aceite no especificados en otra	10.589
16070	Residuos que contienen hidrocarburos	8.775
15011	Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	8.633
07010	Otros residuos de reacción y de destilación	7.425
13050	Lodos de separadores de agua/sustancias aceitosas	5.951
13050	Agua aceitosa procedente de separadores de agua/sustancias aceitosas	5.411
07060	Líquidos de limpieza y licores madre acuosos	3.026
	TOTAL (t/año)	**114.538**
	% Total RP 2019:	**87%**

. **Tabla 7.** Los diez tipos de RnoP de mayor producción en Andalucía 2019.

LER	DESCRIPCIÓN DEL RESIDUO	toneladas
20103	Residuos de tejidos de vegetales	632.556
190501	Fracción no compostada de residuos municipales y asimilados	616.293
190805	Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas	504.968
200101	Papel y cartón	355.767
191204	Plástico y Caucho	242.600
191201	Papel y cartón	211.212
150106	Envases mixtos	104.803
191207	Madera distinta de la especificada en el código 19 12 06	98.233
150107	Envases de vidrio	96.751
150101	Envases de papel y cartón	78.394
	TOTAL (t/año)	**2.941.577**
	% Total RnoP 2019:	**78%**

Resulta por tanto muy destacable el papel que pueden llegar a jugar los residuos en la valorización energética del sector cementero andaluz. El hecho de que el porcentaje de residuos valorizados actualmente no llegue a alcanzar ni el 5% en la comunidad autónoma, como se ha puesto anteriormente de manifiesto, arroja un enorme potencial de crecimiento de la fracción combustible aprovechable a partir de residuos en las plantas cementeras, en beneficio de la economía circular en el proceso y de la reducción de las emisiones de CO_2.

La capacidad de uso más importante, de acuerdo con las cifras de producción, se deriva de los residuos no peligrosos, pero hay que seguir teniendo en cuenta el potencial de crecimiento igualmente en los residuos peligrosos, dado el beneficio medioambiental que supone su eliminación a través de su empleo como combustibles en plantas cementeras, al evitar el impacto ambiental que podrían acarrear las alternativas de incineración o depósito en vertederos.

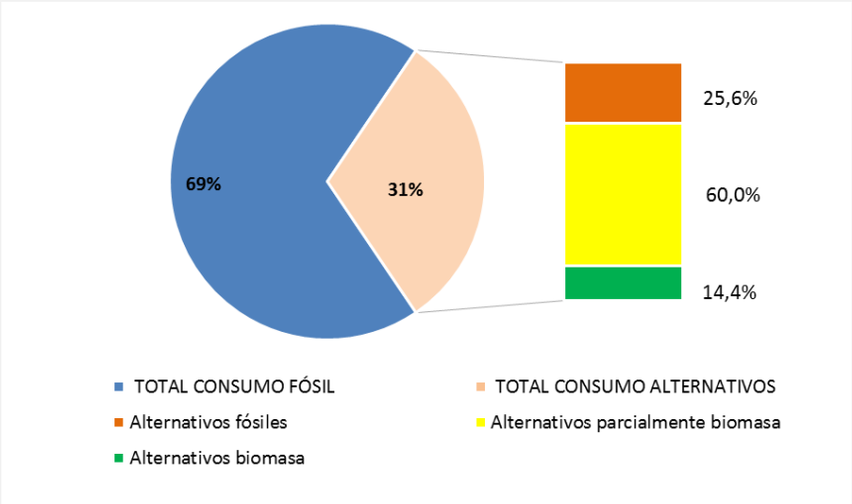
Para plantear el análisis del potencial de valorización que pueden alcanzar las plantas cementeras andaluzas y su incidencia en la reducción de emisiones de CO_2, resulta particularmente

interesante, a su vez, clasificar los combustibles alternativos procedentes de residuos en tres categorías, según se acostumbra en las publicaciones del sector:

- Combustible alternativo fósil: procedente directamente de los combustibles fósiles y de derivados de la actividad del refino de petróleo, la petroquímica y la industria química orgánica y del tratamiento de otros combustibles fósiles, lodos y aceites industriales.
- Combustible alternativo parcialmente biomásico: contiene una fracción medible de residuo biomásico en su composición.
- Combustible alternativo biomásico: todo el residuo procede de biomasa.

La Figura 10 muestra la distribución del consumo de combustibles fósiles y alternativos de las plantas de cementos andaluzas en 2019.

Figura 10. Distribución del consumo de combustibles en las fábricas de cemento de Andalucía en 2019. Segregación de alternativos sobre el consumo total de energía térmica. Fuente: Elaboración propia.



Como se puede observar, el 69% de la energía térmica consumida en las plantas de cemento procede del consumo de combustibles fósiles tradicionales (principalmente coque de petróleo), mientras que poco más del 31% se deriva del uso de combustibles alternativos. De esta fracción a su vez, el 26% se categoriza como alternativo de tipo fósil (aceite mineral usado, plásticos, etc.), el 60% correspondería a alternativos parcialmente biomásicos (CDR, neumáticos, serrín, etc.), y el 14% restante como alternativo puramente biomásico (biomasa vegetal, otros combustibles biomásicos, etc.).

Para abordar el estudio de valorización de residuos se ha caracterizado el poder calorífico medio de cada grupo de residuos como factor de energía promedio a partir del análisis del poder calorífico asociado a cada tipo de residuo empleado como combustible alternativo en las plantas de cemento andaluzas en 2019, teniendo en cuenta a su vez la clasificación de cada uno de ellos entre las distintas categorías de combustibles definidas anteriormente. De esta manera se obtiene un factor de energía representativo de cada categoría de combustible empleado en este sector (Tabla 8).

De manera semejante, se ha procedido para el cálculo del factor de emisión de CO_2 promedio para cada categoría. En este caso, se identifican los residuos más empleados dentro cada categoría de combustible y, a partir de su valor de emisión y del grado de contribución del mismo en cada categoría, se ha obtenido un factor ponderado de emisión que caracteriza a cada grupo de residuos (Tabla 8).

Tabla 8. Factores de conversión de energía (GJ/t combustible) y emisión (kg CO_2/GJ). Estimación en base a consumo de combustibles en las plantas cementeras de Andalucía en 2019. Fuente: Elaboración propia.

TIPO DE COMBUSTIBLE		Factor energía (PCI) GJ/t	Factor emisión (FE) kg CO_2/GJ
TRADICIONAL	Coque de petróleo	32,5	99,3
ALTERNATIVOS	Alternativo fósil	17,7	74,97
	Alternativo parcialmente biomásico	24,5	54,17
	Alternativo biomásico	16,9	0

Sin ninguna duda, es posible que las políticas que se fomentan en materia de residuos en el PIRec 2030 supondrán un avance significativo de la recogida selectiva, una mayor eficacia en la selección en las plantas de tratamiento de residuos, el progreso en el mercado de productos reciclados, nuevos establecimientos dedicados a esta actividad, la maduración de algunas tecnologías todavía no extendidas y, desde luego, el cumplimiento de los objetivos de preparación de los materiales para la reutilización y el reciclaje, así como la estabilización o reducción en la generación de residuos, conduzcan a que el destino de una parte de los materiales examinados sean recuperados y no finalicen su vida en un vertedero.

Sin embargo, como se ha visto, la cantidad de residuos valorizables es muy elevada, de modo que no sería razonable confiar en que los factores mencionados puedan producir una reducción sustantiva del flujo de residuos valorizables energéticamente que actualmente es enviado a vertedero.

La mayor parte de estos residuos, tanto no peligrosos como peligrosos pueden llegar a ser susceptibles de valorización, en función principalmente a su poder calorífico. Algunos de los que podrían tener dificultades para su procesado en hornos de clínker por su bajo poder calorífico, podrían ser acondicionados con pretratamientos que le darían un mayor valor como combustible potencial. Un caso especialmente interesante, por ejemplo, es el de los residuos procedentes de biomasa, sobre todo residuos agrícolas con altos niveles de humedad, que tras una molienda y secado proporcionarían un combustible de alta calidad que aseguraría emisiones nulas de CO_2.

Capítulo 4. ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS EN LAS PLANTAS CEMENTERAS DE ANDALUCÍA.

4.1 Planteamiento de los escenarios de estudio

Para el análisis del potencial de valorización energética de residuos en Andalucía se han establecido una serie de escenarios a futuro, que parten de la situación actual del sector cementero andaluz como referencia. Las cementeras andaluzas procesaron 190.772 t de combustibles alternativos procedentes de residuos en 2019. Este valor representa todavía una proporción muy reducida del total de residuos valorizables (4,8%), equivalente a una tasa de sustitución térmica del 31%, por debajo aún de la media española y de la europea.

En Andalucía existen siete factorías situadas en Niebla (Huelva), Alcalá de Guadaíra (Sevilla), Jerez de la Frontera (Cádiz), Málaga, Córdoba, Carboneras y Gádor (Almería). Estas plantas son propiedad de las principales empresas del sector: Cementos Cosmos (Votorantim Cimentos); Grupo Cementos Portland Valderrivas; FYM-HeidelbergCement Group; Cemex España y LafargeHolcim España. Según un estudio previo elaborado por la Fundación Laboral Andaluza del Cemento y el Medio Ambiente (Flacema) la capacidad de uso de combustibles derivados de residuos podría alcanzar hasta las 800.000 toneladas.

En 2019 el nivel de producción del sector cementero andaluz alcanzó una tasa del 58%, sobre la capacidad máxima de producción de clínker integrada de todas las fábricas ubicadas en la comunidad.

En base a estas premisas se han planteado tres escenarios diferentes, referenciados cada uno de ellos a un supuesto de capacidad de producción (CP) de clínker, partiendo del nivel de producción actual del 58% de la producción máxima de clínker teórica del conjunto de las plantas cementeras andaluzas, seguido de un segundo y tercer escenario en los que se prevé un crecimiento de esa capacidad de producción hasta el 80% y el 90%, respectivamente.

Cada uno de estos escenarios contempla 9 casos en los que se plantea el incremento, de la tasa de sustitución térmica de residuos (TSR) en tres niveles, partiendo de la situación actual de Andalucía, con una tasa de sustitución del 31%, seguido de la situación media europea, con una tasa del 46%, y finalizando con la opción más optimista, que recoge la posibilidad de alcanzar la tasa del país europeo que es capaz de valorizar una mayor cantidad de residuos: el 81%, correspondiente al caso de Austria. Por otra parte, este aumento en el nivel de la TSR se ha combinado, a su vez, con una variación en las fracciones de reparto de las tres categorías de combustibles alternativos utilizados como combustibles valorizables (fósil, parcialmente biomásico y biomásico). Este reparto se ha establecido en tres niveles que recogen una tendencia creciente en el porcentaje de sustitución de residuos de carácter biomásico, que se verá impulsada por la necesidad de reducir las emisiones computables de CO_2 en las fábricas de cemento. En concreto, se han elegido los siguientes niveles para la evaluación:

- El reparto que actualmente se registra en las cementeras andaluzas: 25,6% de alternativo fósil, 60,0% de parcialmente biomasa y 14,4% de biomasa.
- El reparto que actualmente se registra como media en las cementeras españolas, donde se observa un crecimiento en el uso de la fracción biomásica, con un 15,7% de alternativo fósil, 57,8% de parcialmente biomasa y 26,5% de biomasa.
- Un reparto con una alta tasa de sustitución de combustible alternativo biomásico, que tendría un reparto de 10,0% de alternativo fósil, 30,0% de parcialmente biomasa y 60,0% de biomasa.

Cada escenario parte de un caso base que recoge la situación de menor tasa de sustitución y de menor proporción de biomasa, representativa del estado del sector cementero andaluz en 2019, frente al que se compararán el resto de casos.

En las Figuras 11, 12 y 13 se representa un esquema de los diferentes casos planteados, atendiendo a los distintos niveles de la capacidad de producción de clínker (CP=58%; CP=80% y CP=90%), a los diferentes porcentajes del grado de sustitución térmica de residuos en el horno (TSR=31%; TSR=46,5%; TSR=81%) y a la variación de la distribución de los tipos de combustibles alternativos establecidos (alternativo fósil, parcialmente biomásico y biomásico, según reparto de uso de alternativos en Andalucía y España en 2019, y un escenario hipotético de aumento de fracción de alternativo biomásico con reducción del alternativo fósil).

4.2 Resultados del análisis del potencial de valorización

Para cada uno de los casos especificados en los diferentes escenarios, se ha realizado una estimación de los consumos de combustibles convencionales y alternativos en base a los niveles de capacidad de producción, tasas de sustitución y reparto de los distintos tipos de combustibles alternativos, teniendo en cuenta los factores de energía y los factores de emisión de CO_2 que se muestran en la Tabla 8.

Se ha supuesto para el cálculo que estos factores permanecerán inalterados en todos los casos para cada una de las tres agrupaciones de tipos de combustible alternativo, y que no se van a ver apreciablemente afectados por el crecimiento de las tasas de sustitución y el uso de mayores proporciones de biomasa. Esta suposición se ve amparada en el hecho de que, como se puso de manifiesto en las tablas 6 y 7, los 10 tipos de combustibles alternativos de cada agrupación concentran un porcentaje de uso muy mayoritario sobre el resto (87% fósiles y 78% biomásicos o parcialmente biomásicos), aunque resulta evidente que la entrada de nuevos tipos de residuos podrá alterar ligeramente esos factores.

Figura 11. Planteamiento de escenarios de valorización en base a la distribución de combustibles alternativos (R1) empleados en Andalucía en 2019.

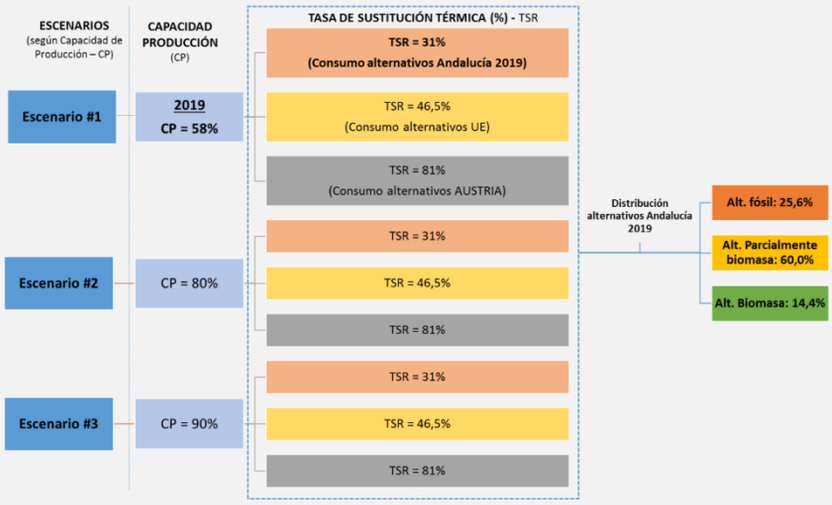


Figura 12. Planteamiento de escenarios de valorización en base a la distribución de combustibles alternativos (R1) empleados en España en 2019.

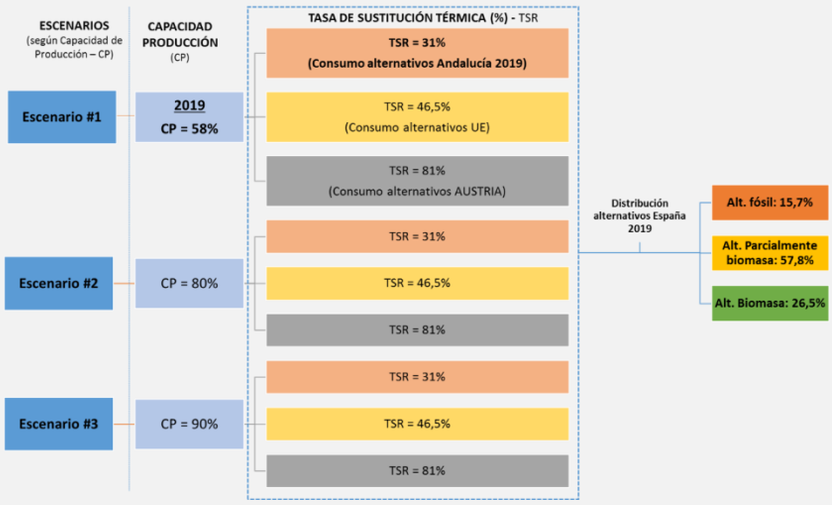
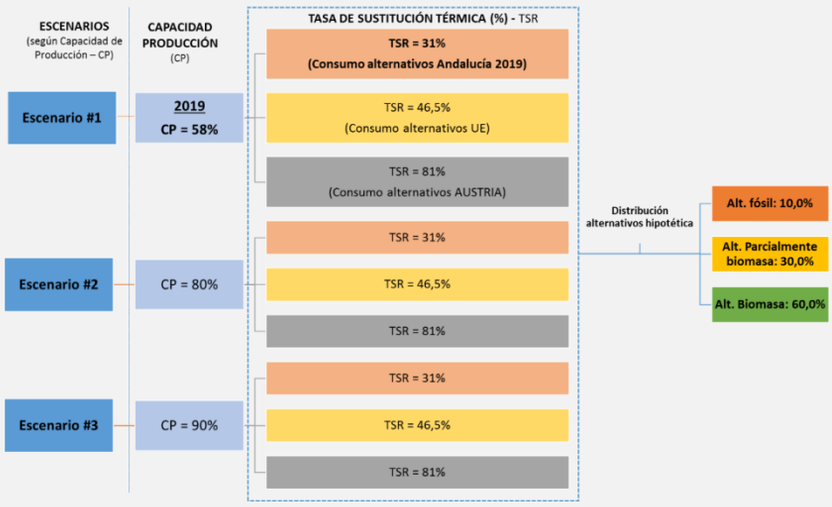


Figura 13. Planteamiento de escenarios de valorización en base a una distribución hipotética de combustibles alternativos (R1). Incremento en el uso de alternativos biomasa.



Los resultados de la estimación de consumos de combustibles convencionales y alternativos, así como las emisiones de CO_2 que se generan en cada uno de los casos evaluados se recogen en las tablas 9, 10 y 11, cada una referida a uno de los tres escenarios de capacidad de producción mencionados, y para los valores de TSR y distribución de combustibles alternativos definidos con anterioridad. En las tablas se recoge igualmente, el de CO_2 producido en la combustión y el evitado por empleo de combustibles alternativos (t/año) respecto al caso base de cada uno de los escenarios planteados. Este caso base se corresponde con la tasa de sustitución del 31% registrada en 2019 y con una distribución de combustibles alternativos representativa de la utilizada en las plantas cementeras andaluzas en 2019.

En el escenario 1, que contempla un mantenimiento de la producción de clínker de 2019 en las cementeras andaluzas, cifrado en el 58%, se observa que el potencial de crecimiento en el uso de los combustibles alternativos podría llegar a alcanzar hasta 560.444 t/año, si se logra la tasa de sustitución más alta del 81%, y el reparto en la tipología de combustibles alternativos más enriquecido en biomasa. Esto supondría un aumento en el uso de combustibles alternativos del 194% sobre las cifras actuales.

Para el escenario 2, con un aumento de la producción de clínker hasta alcanzar el 80% de la capacidad máxima, se podrían llegar a consumir hasta 774.086 t/año de residuos en los mismos supuestos de máximo nivel en la tasa de sustitución y máxima proporción de biomasa, lo que supondría un aumento en el uso de residuos valorizables del 306% sobre la situación de referencia de 2019.

Por último, en el escenario de máxima capacidad de producción de clínker, encontramos un potencial de crecimiento en el uso de los combustibles alternativos que puede llegar a alcanzar las 870.847 t/año y un porcentaje de crecimiento del 356% sobre la situación de referencia de 2019.

En consecuencia, en este escenario se podría multiplicar por 4,56 el consumo de combustibles alternativos en las plantas cementeras andaluzas, frente a las cifras de 2019, aunque sobre el total de residuos valorizables energéticamente disponibles esto sólo representaría una fracción del 22,2% de los residuos totales producidos como suma de RP y RnoP. Si se compara con el total de residuos destinados a vertedero en Andalucía en 2019, 3.004.446 t, según la "Memoria anual de generación y gestión de residuos. Residuos de competencia municipal", publicada por el Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico en 2018, esto supondría, a su vez, una reducción del 29% sobre el total de los residuos destinados a vertedero. Este hecho despeja cualquier posibilidad de generar riesgos especulativos y alza de precios en la gestión de residuos, dado que ese porcentaje queda alejado aún de los valores que podrían disparar tensiones debidas a previsiones de escasez y deja un margen de uso amplio para que pueda ser aprovechado en valorización energética por otros sectores industriales.

Tabla 9. Resultados de la evaluación del potencial de sustitución en el Escenario 1. Consumo de combustibles y emisiones de CO_2 en las fábricas de cemento con una capacidad de producción del 58%.

		ESCENARIO # 1								
		CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE CLÍNKER DEL 58% (ANDALUCÍA 2019)								
Referencia para el cálculo de las emisiones de CO2 evitadas		*Distribución combustibles alternativos Andalucía 2019*			*Distribución combustibles alternativos España 2019*			*Distribución combustibles alternativos hipotética - Aumento de biomasa*		
Caso más favorable		TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS			TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS			TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS		
		Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa	Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa	Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa
	Distribución combustibles alternativos (%)	**25,6**	**60,0**	**14,4**	**15,7**	**57,8**	**26,5**	**10,0**	**30,0**	**60,0**
TSR = 31%	**Consumo combustibles alternativos (t/año)**	58.206	98.197	34.369	35.729	94.612	63.103	22.757	49.107	142.875
	Consumo total combustibles alternativos (t/año)	190.772			193.444			214.739		
	Consumo combustible tradicional (t/año)	274.632			274.632			274.632		
	CO2 combustión (t/año)	1.058.188			1.023.674			946.006		
	CO2 evitado por alternativos (t/año)	**118.397**			**152.911**			**230.579**		
TSR = 46,5%	**Consumo combustibles alternativos (t/año)**	87.207	147.125	51.493	53.531	141.754	94.545	34.096	73.575	214.065
	Consumo total combustibles alternativos (t/año)	285.826			289.831			321.736		
	Consumo combustible tradicional (t/año)	213.050			213.050			213.050		
	CO2 combustión (t/año)	998.703			946.992			830.626		
	CO2 evitado por alternativos (t/año)	**177.882**			**229.593**			**345.959**		
TSR = 81%	**Consumo combustibles alternativos (t/año)**	151.910	256.283	89.698	93.248	246.926	164.692	59.393	128.163	372.888
	Consumo total combustibles alternativos (t/año)	497.891			504.866			560.444		
	Consumo combustible tradicional (t/año)	75.663			75.663			75.663		
	CO2 combustión (t/año)	786.003			695.924			493.222		
	CO2 evitado por alternativos (t/año)	**390.582**			**480.661**			**683.363**		

Tabla 10. Resultados de la evaluación del potencial de sustitución en el Escenario 2. Consumo de combustibles y emisiones de CO_2 en las fábricas de cemento con una capacidad de producción del 80%.

		ESCENARIO # 2								
		CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE CLÍNKER DEL 80 %								
Referencia para el cálculo de las emisiones de CO2 evitadas		*Distribución combustibles alternativos Andalucía 2019*			*Distribución combustibles alternativos España 2019*			*Distribución combustibles alternativos hipotética - Aumento de biomasa*		
Caso más favorable		TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS			TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS			TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS		
		Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa	Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa	Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa
	Distribución combustibles alternativos (%)	**25,6**	**60,0**	**14,4**	**15,7**	**57,8**	**26,5**	**10,0**	**30,0**	**60,0**
TSR = 31%	**Consumo combustibles alternativos (t/año)**	80.394	135.630	47.470	49.349	130.679	87.158	31.432	67.826	197.340
	Consumo total combustibles alternativos (t/año)	263.494			267.186			296.598		
	Consumo combustible tradicional (t/año)	379.322			379.322			379.322		
	CO2 combustión (t/año)	1.459.570			1.411.898			1.304.624		
	CO2 evitado por alternativos (t/año)	**163.306**			**210.977**			**318.252**		
TSR = 46,5%	**Consumo combustibles alternativos (t/año)**	120.451	203.210	71.122	73.937	195.791	130.586	47.094	101.622	295.667
	Consumo total combustibles alternativos (t/año)	394.784			400.315			444.383		
	Consumo combustible tradicional (t/año)	294.265			294.265			294.265		
	CO2 combustión (t/año)	1.379.412			1.307.988			1.147.262		
	CO2 evitado por alternativos (t/año)	**243.464**			**314.888**			**475.613**		
TSR = 81%	**Consumo combustibles alternativos (t/año)**	209.818	353.979	123.891	128.794	341.055	227.473	82.034	177.018	515.033
	Consumo total combustibles alternativos (t/año)	687.688			697.322			774.086		
	Consumo combustible tradicional (t/año)	104.505			104.505			104.505		
	CO2 combustión (t/año)	1.085.629			961.213			681.240		
	CO2 evitado por alternativos (t/año)	**537.247**			**661.663**			**941.636**		

Tabla 11. Resultados de la evaluación del potencial de sustitución en el Escenario 3. Consumo de combustibles y emisiones de CO_2 en las fábricas de cemento con una capacidad de producción del 90%.

		ESCENARIO # 3								
		CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE CLÍNKER DEL 90 %								
Referencia para el cálculo de las emisiones de CO2 evitadas		*Distribución combustibles alternativos Andalucía 2019*			*Distribución combustibles alternativos España 2019*			*Distribución combustibles alternativos hipotética - Aumento de biomasa*		
Caso más favorable		TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS			TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS			TIPO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS		
		Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa	Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa	Fósil	Parcialmente Biomasa	Biomasa
	Distribución combustibles alternativos (%)	**25,6**	**60,0**	**14,4**	**15,7**	**57,8**	**26,5**	**10,0**	**30,0**	**60,0**
TSR = 31%	**Consumo combustibles alternativos (t/año)**	90.443	152.584	53.404	55.517	147.013	98.053	35.361	76.305	222.007
	Consumo total combustibles alternativos (t/año)	296.431			300.584			333.673		
	Consumo combustible tradicional (t/año)	426.737			426.737			426.737		
	CO2 combustión (t/año)	1.642.016			1.588.386			1.467.702		
	CO2 evitado por alternativos (t/año)	**183.719**			**237.350**			**358.033**		
TSR = 46,5%	**Consumo combustibles alternativos (t/año)**	135.508	228.611	80.013	83.179	220.265	146.910	52.980	114.324	332.626
	Consumo total combustibles alternativos (t/año)	444.132			450.354			499.931		
	Consumo combustible tradicional (t/año)	331.048			331.048			331.048		
	CO2 combustión (t/año)	1.551.838			1.471.486			1.290.670		
	CO2 evitado por alternativos (t/año)	**273.897**			**354.249**			**535.065**		
TSR = 81%	**Consumo combustibles alternativos (t/año)**	236.046	398.226	139.377	144.893	383.687	255.907	92.289	199.146	579.413
	Consumo total combustibles alternativos (t/año)	773.649			784.488			870.847		
	Consumo combustible tradicional (t/año)	117.569			117.569			117.569		
	CO2 combustión (t/año)	1.221.333			1.081.364			766.395		
	CO2 evitado por alternativos (t/año)	**604.403**			**744.371**			**1.059.341**		

La evolución que siguen las emisiones de CO_2 en cada uno de los casos de cada escenario se recogen igualmente en las tablas 9, 10 y 11 y se representan gráficamente en las Figuras 14, 15 y 16. En ellas se muestra el aumento del CO_2 evitado por el creciente uso de combustibles alternativos (aumento del TSR para una misma capacidad de producción), junto con el aumento del consumo de alternativos de carácter parcialmente biomásico y biomásico respecto del alternativo de carácter fósil. En el escenario 1 se puede llegar a un ahorro neto de emisiones (CO_2 evitado por empleo de combustibles alternativos) con respecto al caso de referencia de 2019 de hasta 683.363 t/año. En el escenario 2 el ahorro podría alcanzar 941.636 t/año sobre el caso de referencia de ese escenario y en el escenario 3 hasta 1.059.341 t/año sobre su caso de referencia.

El sector cementero andaluz, como el total de la industria europea en general, está sometido al Sistema de Comercio de Emisiones de CO_2 (EU-ETS), el cual implica soportar un coste importante por las emisiones de CO_2 que necesite adquirir cada fábrica. El paquete legislativo "Fit for 55" prevé la reducción de un 10% anual de las asignaciones gratuitas a partir de 2026, hasta su desaparición en 2035.

La reducción de emisiones de CO_2 mediante el empleo de combustibles alternativos con biomasa supondrá una medida paliativa que podría aportar competitividad a las plantas, gracias al ahorro económico que podría conseguirse en materia de costes de los derechos de emisión de CO_2.

En definitiva, los casos evaluados en cada uno de estos escenarios ilustran numéricamente el potencial de crecimiento que podría experimentar el uso de combustibles alternativos a partir de residuos en el sector cementero andaluz ante diferentes supuestos.

Figura 14. Evolución del consumo de combustibles alternativos y CO_2 evitado por el aumento del empleo alternativos de carácter biomásico en plantas de cemento con capacidad de producción del 58% (Escenario 1).

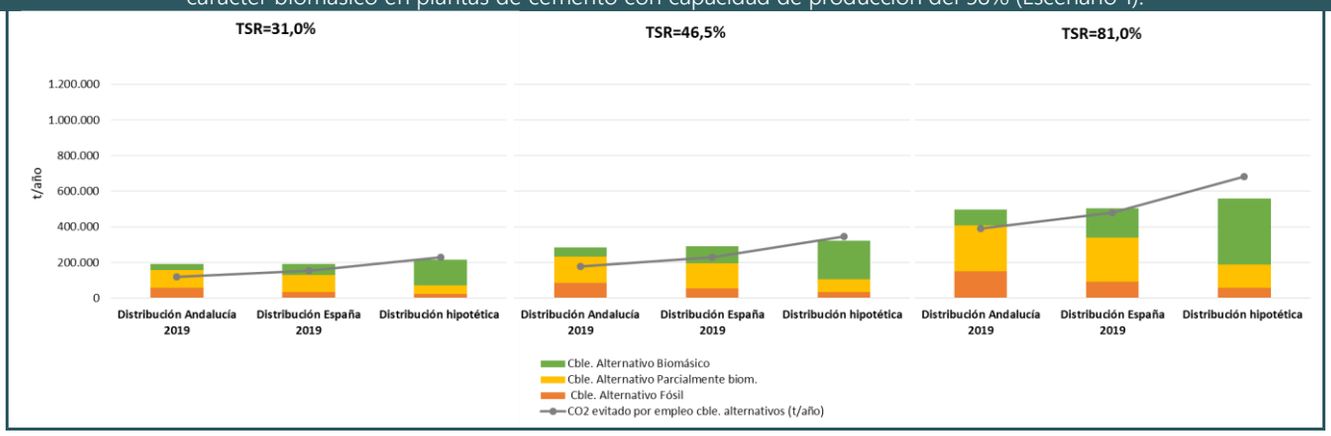


Figura 15. Evolución del consumo de combustibles alternativos y CO_2 evitado por el aumento del empleo alternativos de carácter biomásico en plantas de cemento con capacidad de producción del 80% (Escenario 2).

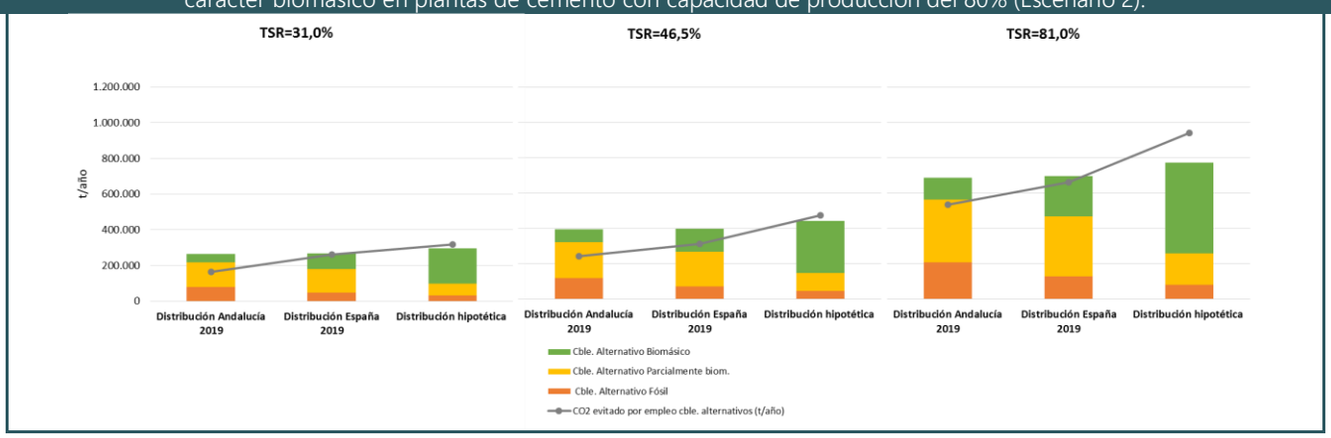
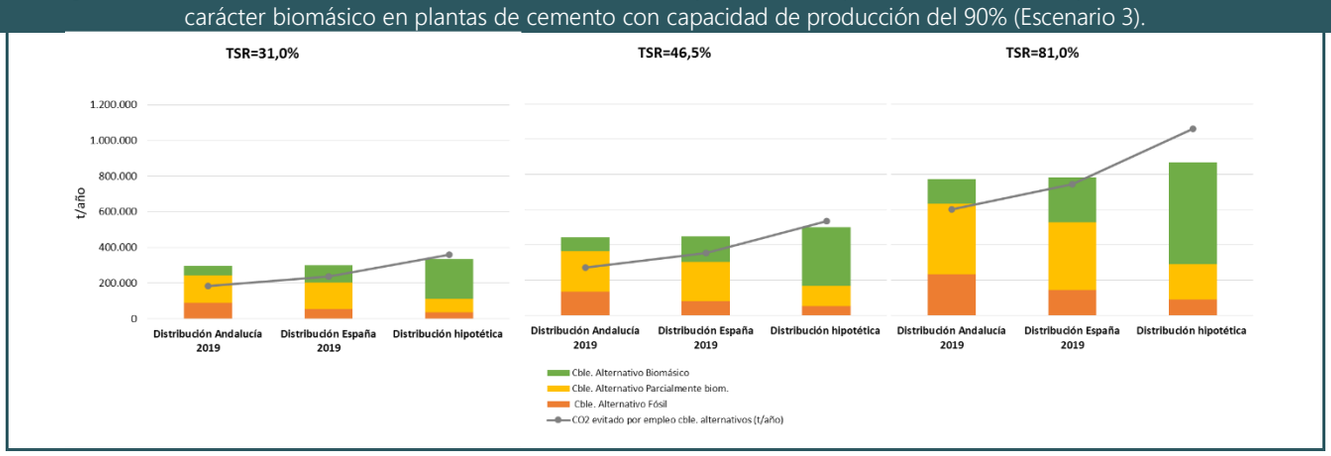


Figura 16. Evolución del consumo de combustibles alternativos y CO_2 evitado por el aumento del empleo alternativos de carácter biomásico en plantas de cemento con capacidad de producción del 90% (Escenario 3).



Capítulo 5. CONCLUSIONES

- Tanto la legislación europea como la nacional y autonómica en materia de residuos apuesta por la circularidad, impulsa la innovación y la simbiosis industrial como instrumentos para un uso eficaz de los recursos y apoya su valorización material y energética, con el objetivo de reducir la generación de residuos y la cantidad final que se elimina en vertederos.

- El uso de residuos autorizados en las plantas cementeras, tanto en la valorización material como en la valorización energética de combustibles, no tiene ningún impacto negativo en la calidad medioambiental de las emisiones y en la calidad y composición del producto, manteniéndose su capacidad de reciclar.

- Andalucía registró en 2019 una producción declarada de residuos que podrían ser objeto de valorización energética (R1) de 132.320 toneladas de residuos peligrosos y 3,8 millones de toneladas de residuos no peligrosos.

- Andalucía es la comunidad autónoma que valoriza una mayor cantidad de residuos como materias primas alternativas y la segunda en el uso de combustibles alternativos.

- Las plantas cementeras andaluzas utilizaron en 2019 un total de 190.772 toneladas de residuos valorizables energéticamente. Esta cifra supone un 4,8% del total de residuos valorizables producidos en Andalucía y representa un 31% de sustitución térmica frente a los combustibles convencionales en las plantas cementeras. Este porcentaje de sustitución es prácticamente equivalente a la media del sector en España (31,4%), pero se sitúa significativamente por debajo de la media que registran las plantas cementeras europeas (46,5%).

Se ha realizado un análisis del potencial de crecimiento que podría experimentar el uso de residuos valorizables energéticamente en Andalucía ante distintos supuestos seleccionados para el nivel de capacidad de producción de las plantas cementeras, de tasas de sustitución térmica y de porcentaje de biomasa en el mix de residuos utilizados.

- La evaluación del aumento en el consumo de residuos y de la reducción de emisiones computables para el pago de derechos de emisión en cada uno de los casos de estudio arroja unos resultados muy positivos desde el punto de vista de los objetivos europeos de dirigir la industria hasta la circularidad y la descarbonización.

- En el caso más favorable, se podría llegar a alcanzar un consumo total de residuos valorizables energéticamente de hasta 870.847 toneladas/año, lo que supondría multiplicar por 4,56 el consumo de referencia de 2019, utilizando un 22,2% de la producción total de residuos valorizables (R1) de la comunidad autónoma. Ello supondría, a su vez, una reducción de hasta el 29% de los residuos que actualmente se destinan a vertedero.

- Desde el punto de vista de las emisiones de gases de efecto invernadero, el caso más favorable supone una reducción de 1.059.341 toneladas de CO_2/año sobre el caso de referencia del escenario de capacidad de producción de clínker del 90%.

BIBLIOGRAFÍA E INFORMACIÓN CONSULTADA

[1] Junta de Andalucía, 2021. Plan Integral de Residuos de Andalucía. Hacia una Economía Circular en el Horizonte 2030.

[2] Oficemen, 2018. Hoja de ruta de la industria cementera española para alcanzar la neutralidad climática en 2050.

[3] Oficemen y Consulnima, 2019. Guía de métodos de medición y factores de emisión para el sector del cemento en España.

[4] Sistema español de inventario de emisiones, 2016. Metodología de estimación de emisión. Sistema español de inventario de emisiones.

[5] Fundación CEMA. Combustibles derivados de residuos. Observatorio de la Economía Circular en la Industria Cementera: https://www.recuperaresiduosencementeras.org/observatorio-de-economia-circular/combustibles-derivados-de-residuos/

[6] Fundación CEMA. Materias primas alternativas. Observatorio de la Economía Circular en la Industria Cementera: https://www.recuperaresiduosencementeras.org/observatorio-de-economia-circular/materias-primas-alternativas/

[7] Fundación CEMA. Cementeras y economía circular. Observatorio de la Economía Circular en la Industria Cementera: https://www.recuperaresiduosencementeras.org/observatorio-de-economia-circular/cementeras-y-economia-circular/

[8] Fundación CEMA. Fábricas con autorización para el uso de combustibles alternativos. Observatorio de la Economía Circular en la Industria Cementera: https://www.recuperaresiduosencementeras.org/fabricas-que-valorizan/instalaciones-autorizadas-para-el-uso-residuos-como-combustibles-alternativos/

[9] Fundación CEMA. Ahorros de emisiones de CO2. Observatorio de la Economía Circular en la Industria Cementera: https://www.recuperaresiduosencementeras.org/ahorro-de-emisiones-de-co2/

[10] Fundación CEMA, 2014. Recuperación de residuos en fábricas de cemento y protección del clima.

[11] Fundación CEMA, 2018. Diez preguntas sobre la recuperación energética de residuos en la industria cementera.

[12] FLACEMA, 2016. Informe sobre el potencial de valorización de residuos en plantas cementeras en Andalucía.

[13] IDAE, 2012. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos.

[14] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020. Guía Técnica para la clasificación de residuos.

[15] World Business Council for Sustainable Development, 2014. Waste management solutions by the cement industry.

[16] World Bank Group, 2017. Increasing the use of alternative fuels at cement plants: international best practice. International Finance Corporation.

[17] Nickolaos Chatziaras, Constantinos S. Psomopoulos, Nickolas J. Themelis, 2016. Use of waste derived fuels in cement industry. A review. Management of Environmental Quality an International Journal 27(2). DOI: 10.1108/MEQ-01-2015-0012.

[18] Katrin Rübner, Hans-Carsten Kühne, Andreas Rogge, Frank Dehn.2016. From waste materials to products for use in the cement industry. Advances in Cement Research 28 (7). DOI: https://doi.org/10.1680/jadcr.15.00149.

[19] Puertas, F., Blanco-Varela, M. T, 2004. Empleo de combustibles alternativos en la fabricación del cemento. Efecto en las características y propiedades de los clínkeres y cementos. Materiales de Construcción 274 (54). DOI: 10.3989/mc.2004.v54.i274.232

[20] Rovira, J. et al., 2011. Monitoring environmental pollutants in the vicinity of a cement plant: A temporal study. Environmental Contamination & Toxicology, 60. DOI: 10.1007/s00244-010-9628-9

[21] Ruiz Lorenzo, M.L., 2008. Determinación y evaluación de las emisiones de dioxinas y furanos en la producción de cemento en España. Tesis Doctoral, Universidad Complutense. CIEMAT.

[22] Ruiz Lorenzo, M.L., 2008.Emisiones de dioxinas y furanos a la atmósfera. La experiencia nacional en el sector cementero. Jornadas sobre "Desarrollo sostenible y valorización en el sector cementero". Oviedo. CIEMAT.

[23] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2018. Memoria anual de generación y gestión de residuos. Residuos de competencia municipal.

[24] IDAE, 2012. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos.

INFORME
sobre el
POTENCIAL DE VALORIZACIÓN
de residuos en plantas cementeras
de ANDALUCÍA
2019

Elaborado por el Grupo de Ingeniería Ambiental y de Procesos del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Escuela de Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla

Fundación Laboral Andaluza del Cemento y el Medio Ambiente
FLACEMA
C/ Muñoz Olivé, 1-1. 2ª planta. Mod. 6-7
41001 – Sevilla
Tlf. 954 467 003
flacema@flacema.org
www.flacema.org

Síguenos

@FLACEMA @FundaciónFlacema