

Universidad de Huelva

Departamento de Economía Financiera, Contabilidad y
Dirección de Operaciones



Universidad
de Huelva

**Nuevo enfoque de la planificación de la producción sostenible
del cemento : propuesta de un modelo de optimización para
reducir las emisiones de CO₂**

**Memoria para optar al grado de doctora
presentada por:**

M^a del Pilar Sancha Dionisio

Fecha de lectura: 30 de enero de 2013

Bajo la dirección de la doctora:

Ana Gessa Perera

Huelva, 2013

ISBN: 978-84-15633-70-9

D.L.: H 68-2013



**Departamento de Economía Financiera, Contabilidad y
Dirección de Operaciones**

**NUEVO ENFOQUE DE LA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
SOSTENIBLE DEL CEMENTO. PROPUESTA DE UN MODELO DE
OPTIMIZACIÓN PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE CO₂**

Tesis Doctoral presentada por

M^a del Pilar Sancha Dionisio

Directora: Dra. Dña. Ana Gessa Perera

Huelva, 2012

*Lo esencial es invisible para los ojos,
sólo se ve con el corazón.
Antoine de Saint-Exupéry
(El principito)*

A mi familia

Agradecimientos

Es difícil entender la importancia de los agradecimientos de una tesis doctoral hasta que no se ha terminado. En ese momento te das cuenta de cuánto tienes que agradecer a tantas personas. Intentaré resumir en unas líneas la gratitud que siento a todas aquellas que han estado presentes durante esa etapa, haciendo posible que hoy deje de ser un sueño para pasar a ser una realidad.

De forma muy especial, quiero dejar constancia de mi agradecimiento a la persona sin la cual esta Tesis no estaría sobre sus manos, mi directora Ana Gessa, por su total dedicación, entusiasmo, apoyo, paciencia, generosidad, sabiduría; muchos son los halagos que debo dedicarle. Mucho más que una directora, una gran amiga *¡Mil gracias, Ana!*

A mis compañeros del Departamento por sus palabras de ánimo, y disposición para ayudar siempre en todo lo posible *¡Todos son estupendos!*

También quiero dar las gracias a las agrupaciones de fabricantes de cementos y a las compañías con las que contactamos, en especial al responsable de optimización de una de ellas que, muy amablemente, nos ofreció toda la información posible y con la cual corroboramos que nuestro proyecto iba por buen camino *¡Por fin!*

Todo esto nunca hubiera sido posible sin el amparo incondicional de mi familia, que me ha ofrecido en todo momento su apoyo, paciencia, cariño y ánimo *¡Ha valido la pena!*

Y, en especial, a mis hijas, Pilar y Laura *¡Os quiero!*

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	9
Abstract	12

CAPÍTULO 1. OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y COTENIDO

1.1. Antecedentes y justificación del trabajo.....	15
1.2. Propósito general y objetivos de la investigación.....	23
1.3. Metodología de la investigación	25
1.4. Contenido del trabajo	27
Referencias bibliográficas	30

CAPÍTULO 2. EL SECTOR DEL CEMENTO EN ESPAÑA: CARACTERÍSTICAS Y EVOLUCIÓN

2.1. La industria del cemento en España: principales características.....	41
2.1.1. Estructura empresarial: pasado y presente	42
2.1.2. Proceso de producción y productos: características y tipologías .	48
2.2. Evolución de las principales magnitudes económicas del sector (2000-2010).....	56
2.2.1. Producción.....	56
2.2.2. Consumo	59
2.2.3. Ventas.....	62
2.2.4. Comercio exterior	64
2.2.5. El sector del cemento en Europa.....	67
Referencias bibliográficas	73

CAPÍTULO 3. LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DEL CEMENTO: AVANCES Y RETOS

3.1. Producción del cemento y el medio ambiente. Impactos y aspectos clave	77
--	----

3.2. Gestión medioambiental. Prácticas y resultados en el sector cementero español	85
3.2.1. Valorización material de los residuos	86
3.2.2. Alternativas para reducir el consumo energético: especial referencia a la valorización energética de residuos	91
3.2.3. Medidas para mejorar y controlar la calidad del aire	100
3.2.4. Otras actuaciones medioambientales.....	104
3.2.5. Valoración económica de la gestión medioambiental.....	105
3.2.6. Otros aspectos de interés relacionados.....	108
3.3. La producción del cemento y el Protocolo de Kyoto: balance e implicaciones futuras.....	115
3.4. Mirando al futuro: nuevos retos y oportunidades	125
Referencias bibliográficas	132

CAPÍTULO 4. LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DEL CEMENTO Y LAS EMISIONES DE CO₂: UN ENFOQUE INTEGRADO DE LA PLANIFICACIÓN. PROPUESTA DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN

4.1. Planificación de la producción de cemento y las emisiones de CO ₂ : análisis y evaluación de alternativas.....	142
4.1.1. Medidas de ajuste de las emisiones de CO ₂ . Limitaciones y posibilidades.....	142
4.1.2. Plan óptimo de producción: aplicación de un modelo de programación lineal.....	148
4.1.2.1 Definición del problema y formulación: parámetros y variables de decisión del modelo	152
4.1.2.2. Planteamiento del modelo de programación lineal.....	160
Referencias bibliográficas	168

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN. ANÁLISIS DE UN CASO

5.1. Presentación del caso	175
5.2. Propuesta de reducción de emisiones de CO ₂ : valorización de residuos.	180
5.3. Planteamiento del modelo de producción	189

5.4. Resultados. Análisis y discusión	195
5.4.1. Plan óptimo de producción	196
5.4.2. Análisis de sensibilidad de los resultados	204
Referencias bibliográficas	214

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES E IMPLICACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

6.1. Conclusiones	219
6.2. Principales aportaciones de la tesis	230
6.3. Limitaciones de la investigación	232
6.4. Futuras líneas de investigación	232

ANEXO I. Anexo Normativo	237
---------------------------------------	------------

ANEXO II. Resultados del modelo	247
--	------------

BIBLIOGRAFÍA.....	285
--------------------------	------------

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS, GRÁFICOS Y TABLAS

CUADROS

Cuadro 1.1. Trabajos publicados sobre la industria del cemento y el PK (2000-2012)	21
Cuadro 2.1. Historia de la industria del cemento: etapas e hitos	43
Cuadro 2.2. Localización y capacidad de producción de las plantas de cemento en España (tn/año)	44
Cuadro 2.3. Proceso de producción del cemento.....	49
Cuadro 2.4. Tipología de cementos	52
Cuadro 2.5. Componentes empleados como adición al cemento.....	54
Cuadro 3.1. Gestión medioambiental de la industria de cemento. Prácticas e impactos	86
Cuadro 3.2. Materias primas alternativas para la producción del cemento	88
Cuadro 3.3. Combustibles alternativos para la producción del cemento.....	94
Cuadro 3.4. Gestión de combustibles alternativos en una fábrica de cemento	95
Cuadro 3.5. Resultados de colaboración y apoyo institucional y científico en el sector cementero	114
Cuadro 3.6. Objetivos y asignación de emisiones del Protocolo de Kyoto	116
Cuadro 4.1. Estrategias de reducción de las emisiones de CO ₂ en la producción del cemento	145
Cuadro 4.2. Variables de decisión y parámetros del modelo de producción sostenible del cemento	152
Cuadro 4.3. Modelo de optimización del mix óptimo de combustibles y materias primas para la producción de una tonelada de clínker.....	159
Cuadro 4.4. Planteamiento del modelo de PL para la producción del cemento	166
Cuadro 5.1. Proceso de producción del cemento: etapas y equipamiento.....	176
Cuadro 5.2. Tipos de cementos fabricados.....	176
Cuadro 5.3. Datos de la actividad productiva de la planta analizada (2010)..	178
Cuadro 5.4. Modelo de PL con valorización de residuos	193

FIGURAS

Figura 1.1. Estructura y contenido de la investigación	29
Figura 2.1. Tipología de hornos en el sector cementero español.....	51
Figura 2.2. Aportación de las adiciones a las propiedades del cemento y a las características físicas y mecánicas.....	54
Figura 3.1. El proceso de producción del cemento y el medio ambiente: consumos e impactos	78
Figura 3.2. Diagrama esquemático de los posibles sistemas de CAC	128
Figura 3.3. Nuevo modelo de producción del cemento	131
Figura 4.1. Emisiones autorizadas vs. emisiones reales de CO ₂	143
Figura 4.2. Situación de partida vs. situación objetivo	150
Figura 4.3. Emisiones de CO ₂ en la producción de cementos.....	153
Figura 4.4. Estructura de costes del sector cementero	154
Figura 4.5. Balance de masa para la producción de una tonelada de cemento	156
Figura 4.6. Modelo de programación lineal de la producción del cemento	161
Figura 5.1. Balance de masa sin valorización de residuos	179
Figura 5.2. Balance de masa sin/con valorización de residuos	189
Figura 5.3. Sensibilidad de los resultados a variaciones de los rendimientos directos (escenario 1)	208
Figura 5.4. Sensibilidad de los resultados a variaciones de los rendimientos directos (escenario 2)	211

GRÁFICOS

Gráfico 2.1. Plantilla de las empresas asociadas a Oficemen (nº empleados) (2009-2010)	47
Gráfico 2.2. Evolución de los resultados económicos de las empresas asociadas en Oficemen (2002-2009)	48

Gráfico 2.3. Evolución del PIB, VAB construcción y producción del cemento (1995-2009)	56
Gráfico 2.4. Evolución de la producción de clínker y cemento (2000-2010).....	57
Gráfico 2.5. Evolución de la producción por tipos de cemento y clases de resistencia	58
Gráfico 2.6. Evolución del consumo de cemento (miles tn)	59
Gráfico 2.7. Evolución trimestral del consumo nacional de cemento por tipos (miles tn)	60
Gráfico 2.8. Cuota de ventas por canales de distribución del cemento (%)....	63
Gráfico 2.9. Evolución anual de distintos índices de precios	64
Gráfico 2.10. Evolución del comercio exterior del sector español del cemento (miles tn)	65
Gráfico 2.11. Destino de las exportaciones españolas de cemento y clínker (miles tn)	66
Gráfico 2.12. Producción de cemento en la UE	68
Gráfico 2.13. Distribución de la producción europea por principales países productores (%)	69
Gráfico 2.14. Tipo de plantas de cemento en Europa (nº plantas)	70
Gráfico 2.15. Cuota de producción europea por tipos de cemento (%)	70
Gráfico 2.16. Evolución del comercio exterior del sector cementero en la UE (millones tn)	72
Gráfico 3.1. Emisiones de CO ₂ en el sector del cemento (tn) (2005-2010).....	83
Gráfico 3.2. Consumo medio de materias primas en la producción del cemento (%) (2005-2010)	91
Gráfico 3.3. Consumo de combustibles alternativos vs. tradicionales en la industria del cemento (% total de combustibles).....	96
Gráfico 3.4. Consumo de combustibles tradicionales en la industria cementera española (miles tn).....	97
Gráfico 3.5. Consumo de combustibles alternativos en la industria cementera española	97
Gráfico 3.6. Consumo de combustibles alternativos en la industria cementera Europa (2009)	99
Gráfico 3.7. Consumo de energía eléctrica vs. producción de cemento (2003-2010)	100
Gráfico 3.8. Intensidad de emisiones de CO ₂ (2005-2010)	104

Gráfico 3.9. Inversión anual media por fábrica de cemento.....	106
Gráfico 3.10. Cotización del derecho de emisión (2005-2012) (euros/tn CO ₂)	118
Gráfico 3.11. Emisiones autorizadas vs. emisiones verificadas de la industria del cemento (2008-2011).....	124
Gráfico 5.1. Evolución del consumo de combustibles alternativos en España (2004-2009).....	180
Gráfico 5.2. Relación entre el contenido de clínker de cada tipo de producto y las emisiones de CO ₂	187
Gráfico 5.3. Emisiones directas de CO ₂ de las fábricas de cemento (kg/tn clínker).....	187
Gráfico 5.4. Emisiones de CO ₂ por tn de producto fabricado sin-con valorización (Kg CO ₂ /tn producto).....	188
Gráfico 5.5. Cotización del derecho de emisión (2008-2012).....	207

TABLAS

Tabla 2.1. Distribución geográfica de la producción nacional de cemento (%) 59	
Tabla 2.2. Consumo de cemento según el destino final por CC.AA. (%).....	61
Tabla 2.3. Ventas de cemento gris por zonas geográficas (miles tn).....	62
Tabla 2.4. Distribución de ventas por tipos de cemento (tn).....	64
Tabla 2.5. Origen de las importaciones mundiales de cemento y clínker (millones tn).....	67
Tabla 2.6. Consumo de cemento en Europa.....	71
Tabla 3.1. Demanda específica de energía en la producción del clínker.....	79
Tabla 3.2. Consumo de materias primas en la producción del cemento (miles tn).....	89
Tabla 3.3. Consumo de materias primas alternativas en la producción del cemento (miles tn).....	90
Tabla 3.4. Emisiones de contaminantes a la atmósfera (miles tn/año).....	102
Tabla 3.5. Datos nacionales de emisiones CO ₂ del sector cementero.....	103
Tabla 3.6. Inversiones medioambientales del sector cementero español 2002- 2005 (euros).....	108

Tabla 3.7. Instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE	119
Tabla 3.8. Balance del PNA I en el sector del cemento (2005-2007) (miles derechos o miles tn equivalentes de CO ₂)	120
Tabla 3.9. Emisiones de CO ₂ y producción de las industrias afectadas por el comercio de emisiones (2005-2007)	121
Tabla 3.10. Emisiones autorizadas vs. emisiones verificadas de las instalaciones afectadas por el comercio de emisiones (2008-2011)	122
Tabla 3.11. Aplicación de otros mecanismos de flexibilidad (AC y MDL) en el sector cementero (2008-2011)	123
Tabla 5.1. Consumo de combustibles por tn de producto fabricado (tn)	182
Tabla 5.2. Consumo de materias primas por tn de producto fabricado (tn) ..	182
Tabla 5.3. Emisiones de CO ₂ por combustión por tn de producto fabricado (para una proporción media clínker/cemento de 85,4)	184
Tabla 5.4. Emisiones de CO ₂ por procesos por tipo de producto fabricado (tn)	185
Tabla 5.5. Emisiones de CO ₂ por tipo de producto fabricado (con valorización) (tn CO ₂ /tn clínker)	186
Tabla 5.6. Ahorro de emisiones de CO ₂ por tipo de producto fabricado (tn CO ₂ /tn producto)	188
Tabla 5.7. Solución óptima del modelo de PL (escenarios 1 y 2)	197
Tabla 5.8. Mix óptimo de producción (% sobre el total de la producción)	198
Tabla 5.9. Beneficio del programa óptimo de producción (€)	199
Tabla 5.10. Solución óptima del modelo de PL (escenario 3)	202
Tabla 5.11. Mix óptimo de producción (% sobre el total de producción)	203
Tabla 5.12. Resultados del análisis de sensibilidad (escenarios 1 y 2)	205
Tabla 5.13. Resultados del análisis de sensibilidad (escenario 3 vs. escenario 2)	212

Resumen

La incorporación de criterios de sostenibilidad en la producción industrial implica nuevos escenarios con nuevos retos a alcanzar para la industria, entre los que se incluye el compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del Protocolo de Kyoto. Este compromiso constituye un verdadero desafío para las empresas incluidas en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE, entre las que se incluye la industria de cemento, que por las características propias de sus procesos de producción, las medidas adoptadas para reducir su impacto medioambiental en la última década (principalmente las destinadas a mejorar la eficiencia energética y la reducción de las emisiones a la atmósfera) y la exposición a la competencia internacional de países no sujetos a las directrices del Protocolo de Kyoto, consideramos centrar este trabajo en su estudio.

La entrada en vigor del Protocolo de Kyoto obliga a las instalaciones españolas de cemento incluidas en la citada Directiva a controlar sus emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (procedentes de fuentes directas e indirectas), de manera que aquellas no superen a las emisiones autorizadas, en función estas últimas de las asignaciones iniciales de los Planes Nacionales de Asignación correspondientes y del nivel de utilización de los instrumentos disponibles para cumplir con el compromiso de reducción adquirido (participando en el mercado de derechos, comprando o vendiendo permisos y/o a través de los otros mecanismos de flexibilidad regulados en el Protocolo de Kyoto - Aplicación Conjunta y Mecanismo Desarrollo Limpio-).

La búsqueda de la combinación óptima de las medidas disponibles de ajuste de emisiones (reales vs. autorizadas), para compatibilizar los objetivos de producción con las nuevas exigencias medioambientales, requiere de nueva información que oriente las decisiones a nivel operativo, que a su vez, implica un nuevo enfoque de la planificación de la producción de cemento que requiere de nuevos planteamientos, que incluyan los parámetros relacionados con las mismas.

Por todo lo expuesto, una vez definido el entorno legal, tecnológico, económico y medioambiental, en el cual desarrolla actualmente su actividad productiva la industria española del cemento, el propósito general de este trabajo es abordar las decisiones de optimización a través de un enfoque integrado, que contemple conjuntamente las posibles alternativas para reducir las emisiones de CO₂, introduciendo cambios en los

modelos tradicionales de optimización que apoyen la toma de decisiones en diferentes escenarios. Para ello, mediante la aplicación de un modelo de programación lineal, determinamos el plan de producción de cemento que permita optimizar el uso de los recursos productivos limitados (incluidas las emisiones de CO₂), presentando los posibles escenarios en los cuales puede desarrollar su producción las plantas cementeras, en función de las limitaciones y posibilidades que plantean cada una de las medidas de ajuste analizadas en este trabajo y propuestas para la consecución de los objetivos de reducción de las emisiones de CO₂, en el ámbito de aplicación del Protocolo de Kyoto.

La aplicación del modelo propuesto a un caso real, nos ha permitido analizar y evaluar las consecuencias que sobre la producción del cemento tienen las limitaciones de las emisiones de CO₂ bajo diferentes escenarios, según los supuestos planteados para la resolución, diferenciando la información que puede otorgar el programa óptimo, en función de que éste implique el consumo total o parcial de los derechos de emisión disponibles y de que se contemple, en su caso, la venta del excedente de derechos como alternativa equiparable a la producción de los diferentes tipos de productos. El análisis de sensibilidad realizado posteriormente nos ha permitido evaluar cambios en el plan óptimo de producción para cada caso planteado, en función de los diferentes parámetros considerados (beneficio unitario de cada producto, materia prima empleada, etc.).

Cabe resaltar, entre los resultados obtenidos, el papel que juega el mercado de derechos de emisión, en relación a las decisiones de las empresas, respecto a la compra y/o venta de derechos, y la compatibilidad de las posibles vías de ajuste para reducir las emisiones de CO₂, procedentes tanto de fuentes directas como indirectas, entre las que destacan, y que han sido consideradas en este trabajo, la valorización (energética y material) de los residuos y la fabricación de productos cuyos procesos de obtención emiten menos CO₂ a la atmósfera.

El trabajo desarrollado nos ha permitido, además de constatar el avance en materia medioambiental experimentado por el sector cementero en la última década, plantear un nuevo enfoque de la producción que integre las nuevas exigencias medioambientales, que proporcione información relevante que oriente las decisiones de la industria para compatibilizar sus procesos productivos con las limitaciones de CO₂.

Abstract

The incorporation of sustainability criteria in industrial production involves new scenarios with new challenges for the industry in order to achieve, among which includes a commitment to reduce emissions of greenhouse gases under the Kyoto Protocol. This commitment o establishes a real challenge for the companies included in the scope of Directive 2003/87/EC, among which includes the cement industry. Due to the own characteristics of their production processes, the measures which have been taken to reduce its environmental impact during the last decade (mainly, those that were intended for improving the energy efficiency and reducing of the emissions to the atmosphere) and the exposure to international competition from countries which aren't subject to the guidelines of the Kyoto Protocol, we consider this paper in focus on its study.

The entry into force of the Kyoto Protocol obliges coerces Spanish cement facilities which are included in the directive to control their emissions of carbon dioxide (CO₂) (from direct and indirect sources), so those emissions that don't exceed the authorized ones, the latter depending on the initial allocations of national allocation plans for and the level of use of the tools available to accomplish the reduction commitment acquired (participate in the allowance market, buying or selling permits and/or through other regulated flexibility mechanisms in the Kyoto Protocol, Joint Implementation and Clean Development Mechanism).

The search for the optimal combination of available measures of setting emissions (actual vs. Authorized) to reconcile the objectives of production with the new environmental requirements, requires new information to guide the decisions at the operational level, which in turn, involves a new approach to production planning cement which requires new approaches, including parameters related to them.

For these reasons, having defined the legal, technological, economic and environmental field, where the Spanish cement industry is developing its productive activity, the general purpose of this work is to address the optimization decisions through an integrated approach that considers jointly the possible alternatives to reduce CO₂ emissions, introducing changes in traditional optimization models to support decision making in different scenarios. For this, by applying a linear programming model, we determined the cement production plan for optimizing the use of limited productive

resources (including CO₂), presenting possible scenarios where cement plants can develop its production, depending on the constraints and opportunities posed by each of the adjustment measures analyzed in this paper and proposals for achieving the goals of reducing CO₂ emissions in the scope of the Kyoto Protocol.

The application of the proposed model to a real case, has allowed us to analyze and evaluate the impact which is induced by limitations of CO₂ emissions over cement production under different scenarios, depending on the assumptions made for the resolution, differentiating the information that the optimum program can provide on the basis that it involves the partial or total consumption of available emission allowances that is contemplated and, where appropriate, the rights selling surplus as alternative comparable to the production of the different product types. The sensitivity analysis, which has been performed later, has allowed us to evaluate changes in the optimal production plan for each case in question, according to the different parameters considered (unit profit of each product, raw material used, etc...).

Significantly, among the results, the role of the allowance market, in relation to business decisions, regarding the purchase and/or sale of rights, and the compatibility of the possible ways to reduce adjustment CO₂ emissions from both direct and indirect sources, where the recovery (energy and material) waste and manufacturing processes to obtain products which emit less CO₂ atmosphere, stand out and have been considered in this study.

The work has allowed us, in addition to finding environmental progress in the cement sector experienced in the last decade, presenting a new approach that integrates the production of new environmental requirements, to provide relevant information to guide industry decisions to harmonize its production processes with CO₂ constraints.

Capítulo 1

Objetivos, metodología y contenido

- 1.1. Antecedentes y justificación del trabajo
- 1.2. Propósito general y objetivos de la investigación
- 1.3. Metodología de la investigación
- 1.4. Contenido del trabajo

Capítulo 1

Objetivos, metodología y contenido

1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La incorporación de criterios de sostenibilidad en la producción industrial es un hecho constatado y reconocido mundialmente como una estrategia clave para la consecución del desarrollo sostenible [SME, 1996]. Ello implica nuevos escenarios con nuevos retos a alcanzar para la industria, entre los que se incluye el compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del Protocolo de Kyoto¹ (PK), cuya aplicación constituye un verdadero desafío para las empresas incluidas en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE, ya que el procedimiento vincula la producción industrial a unas cuotas de emisión de GEI.

Así pues, en los últimos años, la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de los procesos industriales se ha convertido en actuación prioritaria de los gobiernos y de las empresas en materia medioambiental y, por tanto, objeto de estudio de la comunidad científica, que bajo diferentes perspectivas, identifican, analizan y evalúan las consecuencias de la limitación de las emisiones de CO₂, en general y en el ámbito del PK, en particular.

En líneas generales, la revisión bibliográfica realizada revela el interés por la comunidad científica por evaluar el impacto económico y estratégico de las políticas medioambientales ([Helm y Hepburn, 2009], [Oppenheim y Beinhooker, 2009], [Neuhoff, 2008] y [Nordhaus, 2008]), y, en particular, de las medidas puestas en marcha para reducir las emisiones de CO₂ ([Baena y Pueyo, 2007], [Egenhofer, 2007], [Lund, 2007], [Pinkse, 2007], [Bode, 2006], [Demailly y Quirion, 2006], [Smale et al., 2006], [Brewer, 2005], [Hidalgo et al., 2005], [Khanna, 2001]), así como la idoneidad de las mismas para la consecución de los objetivos marcados. En este último caso, algunos trabajos se centran en el estudio de la relación entre el mercado de derechos de emisión

¹ [ONU, 1998].

y los incentivos para las inversiones en tecnología ([Oberndorfer y Rennings, 2007], [Gagelmann y Frondel, 2005], [Schleich y Betz, 2005]) y otros estudios analizan los criterios de asignación de los permisos de emisión [Tanaka, 2012] y la eficiencia de los mercados de derechos de emisión ([Krishnamurti y Hoque, 2011], [Perdan y Azapagic, 2011], [Fankhauser y Hepburn, 2009], [Subramanian y Talbot, 2007], [Grubb y Neuhoff, 2006]).

Asimismo, dada la proximidad de la etapa post-Kyoto y la incertidumbre asociada a su regulación normativa (en cuanto a criterios de asignación, sectores implicados, objetivos de emisión de CO₂, etc.), influenciada también por las consecuencias imprevistas de la crisis económica actual, el análisis de los futuros posibles escenarios ha centrado el objeto de otro grupo de publicaciones en el ámbito del cumplimiento del PK para dicha etapa ([Engau y Hoffmann, 2011], [Carvajal y Bascones, 2010], [Oberheitmann, 2010], [Baeza et al., 2009], [Gessa et al., 2009a; 2009b; 2007], [Meckling y Chung, 2009], [Riestra et al., 2009], [Zaragoza, 2009], [Del Río et al., 2008], [Lee et al., 2008], [Rovira, 2008], [Schmidt et al., 2008], [Egenhofer, 2007], [Ramos, 2005]).

De otro lado, la pérdida de competitividad de las empresas que se encuentren en países que han decidido limitar sus emisiones de CO₂ acogiéndose al PK, ha constituido también en estos últimos años objeto de estudio en este campo de investigación, como son los trabajos de [Baena y Pueyo, 2007], [Oberndorfer y Rennings, 2007], [Demailly y Quirion, 2006], [Smale et al., 2006], entre otros.

A nivel sectorial, y por razones obvias (por su contribución a las emisiones de CO₂, y por las implicaciones que para el propio sector y para el resto de actividad industrial tiene), el sector eléctrico ha acaparado la atención de las publicaciones en la última década en este campo de investigación, cuyo estudio ha sido abordado desde diferentes perspectivas ([Bonenti et al., 2012], [Moreno-Fuentes y Dana, 2011], [Fell, 2010], [Lewis, 2010], [Traber y Kemfert, 2009], [Hoffmann, 2007], [Rathmann, 2007], [Bode, 2006], [Neuhoff et al., 2006]).

No por ello, el resto de los sectores industriales ha dejado ser objeto de estudio, aunque con diferente intensidad y desde distintos enfoques, según factores tales como sector, legislación, localización, tipo de limitaciones y oportunidades de reducción de emisiones de CO₂. Prueba de ello son los trabajos de [Pardo et al., 2011], [Moya et al., 2010],

[Price et al., 2010], [Riestra et al., 2009], [Oberndorfer y Rennings, 2007], [Demailly y Quirón, 2006], [Grubb y Neuhoff, 2006] y [Brewer, 2005].

Entre los demás sectores industriales, el sector cementero², incluido en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE y, por tanto, sujeto a las limitaciones de emisiones de CO₂, constituye una gran oportunidad de análisis, en tanto que las características propias de los procesos de producción del cemento, las medidas adoptadas para reducir su impacto medioambiental en la última década (principalmente las destinadas a mejorar la eficiencia energética y la reducción de las emisiones a la atmósfera) y la exposición a la competencia internacional de países no sujetos a las directrices del PK, condicionan el escenario donde tendrá que desarrollar su actividad las instalaciones de fabricación de cemento en los próximos años.

Prueba de ello, es la atención que en los últimos años la comunidad científica ha dedicado al sector del cemento, materializada en numerosas publicaciones de carácter multidisciplinar, que abordan diferentes aspectos relacionados con el impacto medioambiental de sus procesos de producción y analizan, por tanto, desde diferentes perspectivas.

Al margen de los trabajos de carácter básicamente técnico, y centrándonos en los relacionados con las emisiones de CO₂ derivadas de sus procesos productivos, destacamos por un lado, aquellos que se centran en el estudio de la relevancia y del cálculo de la huella de carbono³ y del análisis del ciclo de vida (ACV)⁴ para definir y optimizar el impacto medioambiental del proceso de producción o de los productos fabricados en la industria del cemento ([Valderrama et al., 2012], [Ammenberg et al., 2011], [McLellan et al., 2011], [Boesch y Hellweg, 2010], [Cagiao et al., 2010], [Avetisyan, 2009], [Boesch et al., 2009], [Habert y Rousell, 2009], [Huntzinger y Eatmon, 2009], [Lu et al., 2009], [O'Brien et al., 2009], [Marceau et al., 2006], [Navia et al., 2006], [Gäbel et al., 2004], [Josa et al., 2004]) y por otro lado, los que analizan,

² Sector responsable aproximadamente del 40% de las emisiones registradas, y uno de los que menos potencial de reducción tiene para ajustarse a las emisiones de CO₂ asignadas en el Plan Nacional de Asignación de Emisiones. Esto último se debe, por un lado, al gran esfuerzo realizado en ahorro energético en los últimos años (han reducido en un 40% el consumo de sus instalaciones en las últimas décadas) y de otro, al origen de esas emisiones (el 60% son de proceso).

³ Herramienta para determinar las emisiones de GEI asociadas a la cadena de suministro de un producto o servicio [Caro et al., 2011].

⁴ Técnica para evaluar los aspectos ambientales y los potenciales impactos asociados a un producto [Norma ISO 14040:2006]. La huella de carbono se puede considerar como una parte del ACV limitada a una sola categoría de impacto.

de manera independiente o conjuntamente, la viabilidad (técnica y/o económica) de las medidas desarrolladas para reducir las emisiones de dicho contaminante.

Entre estos últimos se encuentran los relativos a medidas ya implantadas, en mayor o menor medida, en las plantas cementeras para reducir las emisiones de CO₂. Se trata de estudios que abordan diferentes aspectos relacionados con la valorización energética y material de los residuos como alternativa para minimizar el impacto medioambiental ([Kawai y Osako, 2012], [Irassar et al., 2011], [Borralleras, 2010], [Lam et al., 2010], [Bauer y Hoenig, 2009], [Nadal et al., 2009], [Murray y Price, 2008], [Zabaniotou y Theofilou, 2008], [Navia et al., 2006], etc.), así como los dedicados a profundizar en las medidas destinadas a mejorar la eficiencia energética de los procesos de producción de cemento bajo diferentes enfoques ([Conesa et al., 2011], [Hasanbeigi et al., 2011], [Moya et al., 2011; 2010], [Bauer y Hoenig, 2009], [Worrell et al., 2008], [Szabó et al., 2003], etc.). También se incluyen, entre los mismos, otra línea de investigación que incluye el estudio de las alternativas, aún en fase experimental, en algunos grupos cementeros, como las relativas a la fabricación de cementos menos contaminantes (también denominados ecocementos, cementos de carbono negativo, cementos ecológicos, cementos adicionados, etc.) ([Gartner y Quillin, 2007], [Gartner, 2004], [Menéndez et al., 2003]) y la técnica de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC) ([Naranjo et al., 2011], [Romeo et al., 2011], [Barker et al., 2009], [Bosoaga et al., 2009], [Frank, 2009], [Zeman, 2009], [Rodríguez et al., 2008], [Hegerland et al., 2006], [Grönkvist et al., 2006], [Metz et al., 2005], etc.).

Asimismo, algunos de los ya referidos trabajos, también se pueden incluir entre los estudios, que al igual que en otros sectores industriales, analizan la viabilidad de desarrollar estrategias de simbiosis industrial⁵ (interna o externa) para reducir las emisiones de CO₂. Nos referimos al trabajo de [Ammenberg et al., 2011]: "*Industrial symbiosis for improving the CO₂-performance of cement production*", donde se hace un estudio pormenorizado, con un caso incluido, de un proceso de simbiosis industrial en la industria alemana. Otro estudio dentro de este mismo ámbito de investigación es el de [Hashimoto et al., 2010]: "*Realizing CO₂ emission reduction through industrial symbiosis: A cement production case study for Kawasaki*", donde se examinan las actuaciones actuales y potenciales de reducción de emisiones de CO₂ en el proyecto eco-ciudad de

⁵ No existe una definición estándar para la simbiosis industrial, sin embargo puede expresarse como "el intercambio de materiales entre varios sistemas productivos, de forma que el residuo de uno es materia prima para otros, y su implantación promueve una red de empresas" [Cervantes et al., 2009].

Kawasaki, concebido como un plan en el cual las empresas industriales que estén ubicadas en la zona costera industrial de Kawasaki minimicen el impacto de sus operaciones en el medio ambiente, a través de la sinergia industrial.

Asimismo, por otro lado, y como ya adelantamos, por las implicaciones que el cumplimiento del Protocolo de Kyoto, ha tenido y puede tener en un futuro para este sector, han sido numerosos los estudios que lo abordan, a iniciativa del mismo sector (informes, estudios, congresos, jornadas, etc.) o de la propia comunidad científica, en colaboración con el sector o de manera independiente. Entre los primeros, resaltamos los informes elaborados por diferentes consultorías, a petición de las asociaciones que agrupan a los fabricantes de cemento a nivel nacional y europeo ([Carvajal y Bascones, 2010] y [Baeza et al., 2008], entre otros). En ellos se analiza, entre otras cosas, el impacto que tendrá sobre la industria cementera europea el esquema de reparto de derechos de emisión en Europa para el periodo 2013-2020.

En el otro bloque de trabajos, se encuentran los que analizan, de manera directa o indirecta⁶, las implicaciones que para la industria del cemento tiene el compromiso de Kyoto. Sin ánimo de ser exhaustivos, el Cuadro 1.1 recoge una muestra de algunos de ellos para el periodo 2000-2012, de los cuales un alto porcentaje corresponde a estudios comparativos de carácter multisectorial.

⁶ De manera directa, si el objetivo principal es el estudio de cualquier aspecto relacionado con el cumplimiento del PK en el sector cementero (comercio de emisiones, estrategias de reducción de emisiones de CO₂, etc.), y de forma indirecta, si el propósito es el análisis de medidas destinadas a reducir las emisiones de CO₂ (eficiencia energética, valorización de residuos, etc.), que de forma expresa se contempla en el texto como alternativas para cumplir el PK.

Autores	Trabajo	Análisis		
		Directo	Indirecto	Multisectorial
[Fernández et al., 2012]	El protocolo de Kyoto y su implementación: los casos de España, Alemania, Francia e Italia	✓		X
[Mikulcic et al., 2012]	Reducing the CO ₂ emissions in Croatian cement industry		✓	
[Monjon y Quirion, 2011a]	A border adjustment for the EU ETS: Reconciling WTO rules and capacity to tackle carbon leakage.	✓		X
[Monjon y Quirion, 2011b]	Addressing leakage in the EU ETS: Border adjustment or output-based allocation?	✓		X
[Santamaría y Linares, 2011]	Costes de reducción de CO ₂ en la industria española		✓	X
[Deja et al., 2010]	CO ₂ emissions from Polish cement industry		✓	
[Fairbairn et al., 2010]	Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO ₂ emissions reduction and potential for carbon credits		✓	
[Moya et al., 2010]	Energy Efficiency and CO ₂ Emissions: Prospective Scenarios for the Cement Industry		✓	
[Gessa et al., 2009a]	La planificación de la producción industrial y las emisiones de CO ₂ . Implicaciones del Protocolo de Kyoto	✓		X
[Nadal et al., 2009]	Cost–benefit analysis of using sewage sludge as alternative fuel in a cement plant: a case study		✓	
[Riestra et al., 2009]	El CO ₂ y la industria en España. De la primera asignación de derechos a la etapa post-Kyoto	✓		X
[Sandoff y Schaad, 2009]	Does EU ETS lead to emission reductions through trade? The case of the Swedish emissions trading sector participants		✓	X
[Alberola et al., 2008]	The EU Emissions Trading Scheme: the Effects of Industrial Production and CO ₂ Emissions on Carbon Prices		✓	X
[Ponssard y Walker, 2008]	EU emissions trading and the cement sector: a spatial competition analysis	✓		

Autores	Trabajo	Análisis		
		Directo	Indirecto	Multisectorial
[Baena y Pueyo, 2007]	Competitividad y cambio climático. Nuevos retos para la industria española		✓	X
[Gessa et al., 2007]	Actitud y comportamiento medioambiental de la industria andaluza del cemento: estrategias para cumplir el Protocolo de Kyoto	✓		
[Lund, 2007]	Impacts of EU carbon emission trade directive on energy-intensive industries – Indicative micro-economic analyses	✓		X
[Sato et al., 2007]	Differentiation and dynamics of EU ETS industrial competitiveness impacts	✓		X
[Anand et al., 2006]	Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation		✓	X
[Demailly y Quirion, 2006]	CO ₂ abatement, competitiveness and leakage in the European cement industry under the EU ETS: Grandfathering vs. output-based allocation		✓	
[Szabó et al., 2006]	CO ₂ emission trading within the European Union and Annex B countries: the cement industry case	✓		
[Borrego et al., 2005]	Portuguese industry and the EU trade emissions directive: development and analysis of CO ₂ emission scenarios		✓	X
[Rehan y Henfídí, 2005]	Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry	✓		
[Zetterberg et al., 2004]	Analysis of national allocation plans for the EU ETS	✓		X
[Kim y Worrell, 2002]	CO ₂ emission trends in the cement industry: an international comparison	✓		

Cuadro 1.1. Trabajos publicados sobre la industria del cemento y el PK (2000-2012)
Fuente: elaboración propia

Por último, por las propias características de los estudios revisados, la aplicación a un caso (real o hipotético) de la metodología propuesta en los mismos (técnicas, modelos matemáticos, etc.) para valorar diferentes aspectos relacionados con los impactos medioambientales del proceso de producción del cemento es una práctica habitual en este campo de investigación. Trabajos como los de [Valderrama et al., 2012], [Ammenberg et al., 2011], [Feiz, 2011], [Chen et al., 2010a], [Nadal et al., 2009], [Rodríguez et al., 2009], [Wu y Chang, 2004] son sólo una muestra de ellos.

Por todo lo expuesto anteriormente, concluimos destacando, que la actualidad de la temática relacionada con diferentes aspectos de la gestión sostenible de la industria del cemento (incluida las emisiones de CO₂), está avalada por las numerosas publicaciones y eventos que a lo largo de los últimos años se han sucedido. Ello nos confirma el potencial de desarrollo de este campo de investigación, impulsado por diferentes acontecimientos y por la proliferación de normativas reguladoras de los diferentes aspectos e impactos medioambientales de la industria analizada.

No obstante, a pesar de la relevancia que la limitación de las emisiones de CO₂ impuestas por el PK puede tener para la industria del cemento, así como las derivadas del marco regulador vinculado al mismo (fuente de ingreso, pérdida de competitividad, riesgo de deslocalización, etc.), la revisión de la literatura realizada nos confirma la necesidad de profundizar en el análisis de la producción de cemento a nivel operativo, bajo un enfoque integrado que contemple la compatibilidad de los objetivos económicos con los de carácter medioambiental, incorporando las emisiones de CO₂ como un input más en la planificación de la producción del cemento. En este sentido, los modelos de optimización se pueden presentar como alternativa a los modelos tradicionales que apoyen las decisiones a dicho nivel, que a su vez contemplen conjuntamente las alternativas posibles de ajuste de las emisiones (tanto las indirectas, a través del uso de los diferentes mecanismos regulados en el PK, como las directas, introduciendo mejoras en productos y/o procesos de fabricación). Así también lo han manifestado con anterioridad autores como [Zhou et al., 2012], [Benjaafar et al., 2010], [Avetisyan, 2009] y [Schultz, 2002].

Por todo lo expuesto, consideramos justificado el propósito general de nuestra investigación que detallamos en el siguiente apartado, así como los objetivos que pretendemos alcanzar con el desarrollo de la misma.

1.2. PROPÓSITO GENERAL Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo con todo lo anterior, y sin olvidar, por supuesto, la relevancia y las oportunidades que el cálculo de la huella de carbono de la industria potencialmente contaminante tiene para las decisiones a nivel operativo, es nuestro propósito en este trabajo contribuir, en la medida de lo posible, a cubrir parcialmente esa laguna existente en la literatura, considerando el impacto potencial de las decisiones operativas sobre las emisiones de carbono en los procesos de planificación y control de la producción industrial. Para ello, y para el sector industrial que nos ocupa, **el sector del cemento**, es nuestro propósito **abordar las decisiones de optimización a través de un enfoque integrado, que contemple conjuntamente las posibles alternativas para reducir las emisiones de CO₂, introduciendo cambios en los modelos tradicionales de optimización que apoyen la toma de decisiones en diferentes escenarios, teniendo en cuenta tanto el coste como la huella de carbono.**

La consecución de tal propósito, requiere el establecimiento de diferentes objetivos y subobjetivos que marcan el plan de trabajo desarrollado en el estudio que presentamos. Se trata de:

Objetivo 1

Contextualizar, en el ámbito económico y medioambiental (fundamentalmente la contaminación atmosférica), la actividad productiva del sector del cemento en los últimos años en España, mediante el análisis de sus principales variables económicas e indicadores medioambientales.

En definitiva, se trata de realizar una caracterización del sector cementero español, destacando aquellos aspectos que han marcado su evolución en los últimos tiempos, resaltando el esfuerzo realizado por este sector por compatibilizar su actividad con la protección y conservación del entorno natural, apostando por la gestión sostenible de los recursos consumidos (valorización de los residuos y la utilización de materiales reciclados en la producción del cemento), que ha constituido para este sector en los últimos años línea prioritaria de actuación en este ámbito por las consecuencias que conlleva (búsqueda de la eficiencia energética y reducción de las emisiones) .

Objetivo 2

Determinar todos aquellos aspectos que nos permitan identificar las limitaciones y posibilidades que tiene el sector del cemento para compatibilizar los objetivos de producción con las nuevas exigencias medioambientales en cuanto a emisiones de CO₂ se refiere y asociados con las Mejores Técnicas Disponibles⁷ (MTDs) para la producción del cemento.

Ello implica, a su vez, la consecución de los siguientes subobjetivos:

Subobjetivo 2.1.

Realizar un estudio detallado del proceso de producción de cemento y su impacto sobre el medio atmosférico, para delimitar todas aquellas variables a considerar en la planificación de la producción, y por tanto en la modelización de la producción que proponemos.

Subobjetivo 2.2.

Determinar las alternativas disponibles para reducir las emisiones de CO₂ (y así cumplir el PK) y su viabilidad, en función de los diferentes escenarios planteados.

Objetivo 3

Proponer y aplicar al caso que nos ocupa, un proceso que nos permita obtener el programa óptimo de producción para cada uno de los posibles escenarios identificados, teniendo en cuenta todas las variables consideradas como relevantes, que permita compatibilizar la actividad productiva con las exigencias medioambientales.

⁷ "Fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas, para constituir en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea posible, reducir las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente y de la salud de las personas" (artículo 3, apartado 3 de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (Ley IPPC)) [Ley 16/2002].

Ello requiere, la consecución de los siguientes subobjetivos:

Subobjetivo 3.1.

Identificar las variables de decisión y parámetros que nos permitan modelizar la planificación de la producción mediante programación lineal, bajo un enfoque integrado.

Subobjetivo 3.2.

Analizar y evaluar, mediante la aplicación de un caso, las consecuencias que sobre la producción del cemento tienen las limitaciones de emisiones CO₂, bajo diferentes escenarios, determinando además, como afectan o interfieren entre sí las diferentes variables y parámetros del modelo identificadas previamente, mediante el correspondiente análisis de sensibilidad, buscando, en cualquier caso, la combinación óptima que resulte más rentable, compatibilizando los objetivos de producción con la reducción de las emisiones de CO₂ impuestas por el PK.

1.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La consecución de los objetivos fijados implica el uso de una metodología que lógicamente, ha de comenzar con una aproximación normativa al problema que nos ocupa, destinada a coordinar y sistematizar el cuerpo de conocimientos relativo al ámbito de nuestro trabajo. Para ello, fue necesario un proceso riguroso y sistemático de búsqueda y revisión de literatura, con el cual hemos intentado abarcar la bibliografía relativa a nuestro estudio con la máxima precisión posible, incluyendo diferentes fuentes documentales: bases de datos, libros, revistas científicas, actas de congresos, tesis doctorales, documentos electrónicos disponibles en Internet y otros documentos de interés. Todo ello con el objeto de llegar a:

- Establecer el estado de la cuestión.
- Justificar el tema seleccionado para nuestro estudio.

- Identificar y analizar la información requerida para la consecución de los diferentes objetivos.

Una vez finalizada la fase inicial de documentación, procedemos a la exposición y desarrollo de los diferentes apartados que configuran el marco teórico de nuestra investigación, incorporando progresivamente, en función de las necesidades, toda aquella información considerada relevante para el desarrollo del trabajo de investigación, procedentes tanto de fuentes directas como indirectas.

A continuación, abordamos la fase empírica de este trabajo, con el propósito de obtener el plan de producción que proporcione un resultado óptimo compatible con la restricción de las emisiones de CO₂ en la industria del cemento. Para ello, seleccionamos un modelo de programación lineal, cuya aplicación requiere, como cualquier modelo matemático de las mismas características, en primer lugar, formular el problema, que implica a su vez la identificación de las variables de decisión y parámetros del modelo, que permita la formulación de la función objetivo y las restricciones, y después la resolución del mismo, a través de un software específico.

Una vez planteado, en términos generales, el modelo de planificación de la producción, para su validación, procedimos al análisis de un caso, aplicando la propuesta realizada a una planta cementera para un posterior análisis y discusión de los resultados obtenidos.

Para el desarrollo de la parte empírica de este trabajo de investigación, se procedió a la recopilación, organización, análisis y síntesis de la información relativa al sector del cemento. Ésta se obtuvo a través de diferentes fuentes secundarias de información (web corporativas, memorias, informes, bases de datos, estudios técnicos, normativas, etc.), que se completó con la información facilitada directamente por la propia empresa⁸ y por diferentes asociaciones (nacionales y autonómicas) del sector.

El análisis del caso, bajo el marco teórico diseñado, nos ha permitido obtener unos resultados, cuyo análisis y discusión comprende la última fase de la metodología seguida en esta investigación, que se completa con las conclusiones e implicaciones de la misma.

⁸ Se contactó con el grupo empresarial (vía e-mail, teléfono y entrevista personal) a diferentes niveles de la organización: dirección general nacional y regional, dirección comercial regional y a nivel de planta, gracias a la colaboración, en este último caso, del jefe de optimización de aquella.

1.4. CONTENIDO DEL TRABAJO

Para la consecución del propósito general y de los objetivos descritos en el Apartado 1.2, siguiendo la metodología propuesta en el Apartado 1.3, hemos estructurado el contenido del presente trabajo en 4 partes, que agrupan un total de 6 capítulos.

En la **Parte I** donde se incluye el **Capítulo 1**, exponemos los motivos que nos han llevado a su realización, así como el propósito general y los objetivos que perseguimos, la metodología empleada y el contenido del mismo.

En la **Parte II**, que incluye los **Capítulos 2 y 3**, presentamos el marco teórico de nuestro trabajo. Dedicamos el **Capítulo 2** a abordar la caracterización del sector cementero español, mediante el análisis de diferentes variables, que nos permita conocer la evolución del sector en la última década. Por su parte, en el **Capítulo 3**, nos centramos en la gestión medioambiental de los productores de cemento, imprescindible para sentar las bases que justifiquen la inclusión de la restricción de las emisiones de CO₂ en la planificación de la producción. Comenzaremos identificando los principales impactos y aspectos medioambientales de la industria del cemento, para a continuación identificar las principales alternativas para rentabilizar, tanto medioambiental como económicamente, los procesos de producción. Asimismo, delimitaremos también todos aquellos aspectos de interés, que puedan tener una repercusión en la propuesta y aplicación de la planificación de la producción del cemento que abordamos en el capítulo siguiente. Cabe destacar por su alcance las implicaciones del cumplimiento obligatorio del compromiso de Kyoto por parte del sector cementero, en relación a las emisiones de CO₂.

La **Parte III** corresponde a la parte empírica del estudio, que ocupa los **Capítulos 4 y 5**. Así pues, una vez definido el entorno legal, económico y medioambiental, en el cual desarrolla su actividad productiva la industria del cemento y tras haber justificado la inclusión de la limitación de las emisiones de CO₂ en la planificación de la producción, dedicamos **el Capítulo 4** a describir todo el proceso seguido para determinar el programa óptimo de producción del cemento. En primer lugar, y según el análisis desarrollado en el Capítulo 3, presentamos los posibles escenarios en los cuales puede desarrollar su producción las plantas cementeras, en función de las limitaciones y posibilidades que plantean cada una de las medidas de ajuste propuestas para la

consecución de los objetivos de reducción de las emisiones de CO₂, en el ámbito de aplicación del PK.

A continuación, en este mismo capítulo, nuestro trabajo se centra en la determinación del plan de producción de cemento que permita optimizar el uso de los recursos productivos (incluidas las emisiones de CO₂), mediante la aplicación de un modelo de programación lineal, cuya formulación requiere la determinación de la función objetivo y las restricciones a las que está sujeta, teniendo en cuenta las variables de decisión y los parámetros del modelo, que han sido seleccionados y definidos previamente.

Finalizamos esta parte del trabajo de investigación, con el **Capítulo 5**, con la aplicación del modelo propuesto anteriormente a un caso, que nos permita contrastar empíricamente la propuesta realizada. Para ello, comenzamos con la presentación y descripción del caso de estudio, cuyo análisis presentamos posteriormente, considerando los diferentes escenarios identificados.

Por último, en **la Parte IV** se incluye el **Capítulo 6**, que recoge las principales conclusiones que se han obtenido en el estudio realizado, tratando de dar respuesta a las razones y objetivos que justifican la realización de la presente Tesis Doctoral, así como a establecer las principales aportaciones y limitaciones de la misma y las futuras líneas de investigación, que podrían darle continuidad al trabajo desarrollado.

Además, en la última parte del trabajo añadimos dos Anexos, cuya información complementan el contenido de este trabajo y que puede ser de interés para la consulta del lector. El Anexo I recopila la normativa consultada en el trabajo de investigación, clasificada en función de la materia tratada y, en el Anexo II se recoge, de manera detallada, los resultados obtenidos en el caso sujeto de estudio, que complementan la información incluida en el Capítulo 5.

Para finalizar esta Parte I, en la Figura 1.1 sintetizamos la estructura y contenido referidos con cada uno de los capítulos, objetivos y fases en las que se aborda.

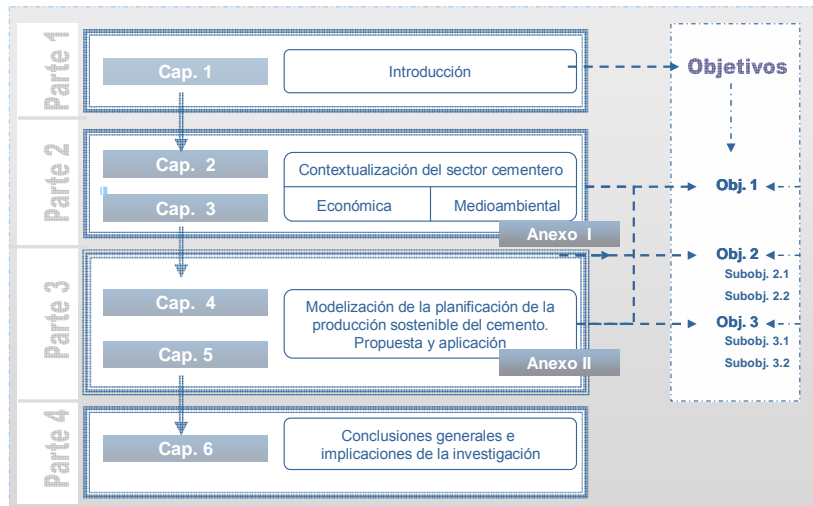


Figura 1.1. Estructura y contenido de la investigación
Fuente: elaboración propia

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Alberola et al., 2008]** Alberola, E.; Chevallier, J. y Cheze, B. (2008): "The EU Emissions Trading Scheme: the Effects of Industrial Production and CO₂ Emissions on Carbon Prices," *Economie Internationale*, N° 116, pp. 93-126.
- [Ammenberg et al., 2011]** Ammenberg, J.; Feiz, R.; Helgstrand, A.; Eklund, M. y Baas, L. (2011): "Industrial symbiosis for improving the CO₂ - performance of cement", Final report of the CEMEX-Linköping University industrial ecology project.
- [Anand et al., 2006]** Anand, S.; Vrat, P. y Dahiya, R. (2006): "Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation", *Journal of Environmental Management*, Vol. 79, N° 4, pp. 383-398.
- [Avetisyan, 2009]** Avetisyan, H. (2009): "Life Cycle Cost Minimization for Cement Production under Various Constraints", *World of Coal Ash Conference* (May 4-7, 2009 in Lexington, KY, USA). Disponible en web: <http://www.flyash.info/2009/084-avetisyan2009.pdf> [última consulta: 21 de enero de 2012]
- [Baena y Pueyo, 2007]** Baena, A. y Pueyo, A. (2007): "Competitividad y cambio climático. Nuevos retos para la industria española", *Colección EOI (Escuela de organización Industrial) Medio Ambiente*, Fundación EOI.
- [Baeza et al., 2008]** Baeza, R.; Martín, I.; Rilo, R.; Yáñez, M. y Wittum, L. (2008): *Assessment of the impact of the 2013-2020 ETS proposal on the European cement industry*, Boston Consulting Group.
- [Baeza et al., 2009]** Baeza, R.; Martín, I.; Rilo, R.; Yáñez, M. y Wittum, L. (2009): "Evaluación del impacto de la subasta de derechos de emisión de CO₂ en el periodo 2013-2020 en el sector cementero europeo", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, N° 926, pp. 42-49.
- [Barker et al., 2009]** Barker, D.J.; Turner, S.A.; Napier-Moore, P.A.; Clarck, M. y Davison, J.E. (2009): "CO₂ capture in the cement industry", *Energy Procedia*, N° 1, pp. 87-94.
- [Bauer y Hoenig, 2009]** Bauer, K. y Hoenig, V. (2009): "Energy efficiency of cement plants". *Proceedings of the 6th International VDZ Congress, Process Technology of Cement Manufacturing*, Düsseldorf.
- [Benjaafar et al., 2010]** Benjaafar, S.; Li, Y. y Daskin, M. (2010): "Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights from Simple Models", Working paper, University of Minnesota, USA.
- [Bode, 2006]** Bode, S. (2006): "Multi-period emissions trading in the electricity sector-winners and losers", *Energy Policy*, Vol. 34, N° 6, pp. 680-691.
- [Boesch et al., 2009]** Boesch, M.E.; Koehler, A. y Hellweg, S. (2009): "Model for cradle-to-gate life cycle assessment of clínker production", *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, N° 19, pp. 7578-7583.
- [Boesch y Hellweg, 2010]** Boesch, M.E. y Hellweg, S. (2010): "Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment", *Environmental Science Technology*, Vol. 44, N° 23, p.p. 9143-9149.
- [Bonenti et al., 2012]** Bonenti, F.; Oggioni, G.; Allevi, E. y Marangoni, G. (2012): "Evaluating the impacts of the EU-ETS on prices, investments and profits of the Italian electricity market", *SSRN Working Paper Series*, Rochester. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/919473227?accountid=14549/>.
- [Borralleras, 2010]** Borralleras, P. (2010): "Reutilización y recuperación de residuos en Europa en el sector del cemento y del hormigón", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, N° 938, pp. 4-7.
- [Borrego et al., 2005]** Borrego, C.; Martins, H. y Lopes, M. (2005): "Portuguese industry and the EU trade emissions directive: development and analysis of CO₂ emission scenarios", *Environmental Science & Policy*, Vol. 8, N° 1, pp. 75-84. Disponible en web:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2004.08.008>.

[Bosoaga et al., 2009] Bosoaga, A.; Masek, O. y Oakey, J.E. (2009): "CO₂ Capture Technologies for Cement Industry", *Energy Procedia*, Nº 1, pp. 133-140.

[Brewer, 2005] Brewer, T.L. (2005): "Business perspectives on the EU emissions trading scheme", *Climate Policy*, Vol. 5, Nº 1, pp. 137-144.

[Cagiao et al., 2010] Cagiao, J.; Gómez, B.; Doménech, J.L.; Gutiérrez, S.; Gutiérrez, H.; Martínez, F. y González, M.B. (2010): *Huella Ecológica del Cemento. Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción*, Laboratorio de Ingeniería Sostenible.

[Caro et al., 2011] Caro, F.; Corbett, C.; Tan, T. y Zuidwijk, R.A. (2011): "Carbon-Optimal and Carbon-Neutral Supply Chains", *Beta Working Paper series 358*, Eindhoven, Holland, Octubre 2011. Disponible en web: http://cms.ieis.tue.nl/Beta/Files/WorkingPapers/wp_358.pdf.

[Carvajal y Bascones, 2010] Carvajal, A. y Bascones, P. (Garrigues Medio Ambiente) (2009): *Estudio del Impacto de la Propuesta de Modificación de la Directiva de Comercio de Emisiones en el Sector Cementero Español*, Flacema (Fundación laboral andaluz del cemento y medio ambiente). Disponible en web: <http://www.oficemen.com/Uploads/docs/Resumen%20Ejecutivo%20Impacto%20EU%20ETS%20GARRIGUES.pdf>

[Cervantes et al., 2009] Cervantes, G.; Sosa, R.; Rodríguez, G. y Robles, F. (2009): "Ecología industrial y desarrollo sustentable", *Ingeniería*, Vol. 13, Nº 1, pp. 63-70.

[Chen et al., 2010a] Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi, Y. y Julien, A. (2010): "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation", *Journal of Cleaner Production*, Vol.18, Nº 5, pp. 478-485.

[Conesa et al., 2011] Conesa, J.A.; Rey, L.; Egea, S. y Rey M.D. (2011): "Pollutant Formation and Emissions from Cement Kiln Stack Using a Solid Recovered Fuel from Municipal Solid Waste", *Environmental*

Science & Technology, Nº 45, pp. 5.878-5.884. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1021/es200448u>.

[Deja et al., 2010] Deja, J.; Uliasz-Bochenczyk, A. y Mokrzycki, E. (2010): "CO₂ emissions from Polish cement industry", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Nº 4, pp. 583-588.

[Del Río et al., 2008] Del Río, P.; Carrillo-Hermosilla, J.; Könnölä, T. y García-Suárez, C. (2008): "Challenges and opportunities of a post-Kyoto mitigation regime: a survey of the European electricity sector", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 13, Nº 8, pp. 863-885. DOI 10.1007/s11027-008-9146-5

[Demailly y Quirion, 2006] Demailly, D. y Quirion, P. (2006): "CO₂ abatement, competitiveness and leakage in the European cement industry under the EU ETS: Grandfathering vs. output-based allocation", *Climate Policy*, Vol. 6, Nº 1, pp. 93-113.

[Directiva 2003/87/CE] Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de Octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo.

[Egenhofer, 2007] Egenhofer, C. (2007): "The Making of the EU Emissions Trading Scheme: Status, Prospects and Implications for Business", *European Management Journal*, Vol. 25, Nº 6, pp. 453-463.

[Engau y Hoffmann, 2011] Engau, C. y Hoffmann, V.H. (2011): "Corporate response strategies to regulatory uncertainty: evidence from uncertainty about post-Kyoto regulation", *Policy Sciences*, Vol. 44, Nº 1, pp. 53-80. DOI 10.1007/s11077-010-9116-0.

[Fairbairn et al., 2010] Fairbairn, E.M.; Americano, B.B.; Cordeiro, G.C.; Paula, T.P.; Toledo-Filho, R.D. y Silvano, M.M. (2010): "Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits", *Journal of Environmental Management*, Vol. 91, Nº 9, pp. 1864-1871.

[Fankhauser y Hepburn, 2009] Fankhauser, S. y Hepburn, C. (2009): "Carbon markets in space and time",

Working paper, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London, UK.

[Feiz, 2011] Feiz, R. (2011): *Improving climate performance of cement production. Developing an assessment framework and applying it to a CEMEX cement production cluster in Germany*, Thesis Report, Linköping University, Suecia.

[Fell, 2010] Fell, H. (2010): "EU-ETS and Nordic Electricity: A CVAR Analysis", *The Energy Journal*, Vol. 31, Nº 2, pp. 1-25. Disponible en web: <http://0-search.proquest.com.columbus.uhu.es/docview/222030896?accountid=14549>.

[Fernández et al., 2012] Fernández, Y.; Olmedillas, B.; Fernández, M.A. y González, D. (2012): "El protocolo de Kyoto y su implementación: los casos de España, Alemania, Francia e Italia", *XIV Reunión Economía Mundial. Internacionalización en tiempos de crisis*, Jaén.

[Frank, 2009] Frank, Z. (2009): "Oxygen combustion in cement production", *Energy Procedia*, Nº 1, pp. 187-194.

[Gäbel et al., 2004] Gäbel, K.; Forsberg, P. y Tillman, A.M. (2004): "The design and building of a life cycle-based process model for simulating environmental performance, product performance and cost in cement manufacturing", *Journal of Cleaner Production*, Nº 12, pp. 77-93.

[Gagelmann y Frondel, 2005] Gagelmann, F. y Frondel, M. (2005): "The impact of emission trading on innovation – science fiction or reality?", *European Environment*, Vol. 15, Nº 4, pp. 203-211. DOI: 10.1002/eet.387.

[Gartner y Quillin, 2007] Gartner, E. y Quillin, K. (2007): "Low-CO₂ cements based on calcium sulfoaluminates", *Sustainability in the Cement and Concrete Industry*, Norwegian Cement Association, Nº 16, pp. 95-105.

[Gartner, 2004] Gartner, E. (2004): "Industrially interesting approaches to 'low CO₂' cements", *Cement and Concrete Research*, Nº 34, pp. 1489-1498.

[Gessa et al., 2007] Gessa-Perera, A.; Sancha-Dionisio, M.P. y García-González, S. (2007): "Actitud y comportamiento

medioambiental de la industria andaluza del cemento: estrategias para cumplir el Protocolo de Kyoto", *Empresa Global y mercados Locales, XXI Congreso Anual AEDEM*. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos, 2007.

[Gessa et al., 2009a] Gessa-Perera, A.; Rabadán-Martín, I. y Jurado-Martín, J.A. (2009): "La Planificación de la Producción Industrial y las Emisiones de CO₂. Implicaciones del Protocolo de Kyoto", *DYNA Ingeniería e Industria*, Vol. 84, Nº 2, pp. 119-127.

[Gessa et al., 2009b] Gessa-Perera A., Jurado-Martín J. A. y Rabadán-Martín, I. (2009): "El Cumplimiento del Protocolo de Kyoto en tiempos de crisis: ¿una oportunidad o una amenaza?", *Boletín Económico de Información Comercial Española (ICE)*, Nº 2979, pp. 23 -32.

[Grönkvist et al., 2006] Grönkvist, S.; Bryngelsson, M. y Westermark, M. (2006): "Oxygen efficiency with regard to carbon capture", *Energy*, Nº 31, pp. 3220-3226.

[Grubb y Neuhoff, 2006] Grubb, M.; Neuhoff, K. (2006): "Allocation and Competitiveness in the EU Emission Trading Scheme: Policy Overview", *Climate Policy*, Vol. 6, Nº 1, pp. 5-28.

[Habert y Rousell, 2009] Habert, G. y Rousell, N. (2009): "Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, Nº 6, pp. 397-402.

[Hasanbeigi et al., 2011] Hasanbeigi, A.; Menke, C. y Therdyothin, A. (2011): "Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry", *Energy Efficiency*, Vol. 4, Nº 1, pp. 93-113. DOI 10.1007/s12053-010-9079-1.

[Hashimoto et al., 2010] Hashimoto, S., Fujita, T.; Geng, Y. y Nagasawa, E. (2010): "Realizing CO₂ emission reduction through industrial symbiosis: A cement production case study for Kawasaki", *Conservation and Recycling*, Vo. 54, Nº 10, pp. 704-71. DOI:10.1016/j.resconrec.2009.11.013

[Hegerland et al., 2006] Hegerland, G.; Pande, J.O.; Haugen, H.A.; Eldrup, N.; Tokheim, L.A. y Hatlevik, L.M. (2006): "Capture of CO₂ from a cement plant.

Technical possibilities and economic estimates", 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, pp. 19-22, June 2006, Trondheim, Norway.

[Helm y Hepburn, 2009] Helm, D. y Hepburn, C. (2009): *The Economics and Politics of Climate Change*, Oxford University Press.

[Hidalgo et al., 2005] Hidalgo I.; Szabó L.; Ciscar C. y Soria, A. (2005): "Technological prospects and CO₂ emission trading analyses in the iron and steel industry: A global model", *Energy*, Vol. 30, Nº 5, pp. 583-610.

[Hoffmann, 2007] Hoffmann, V.H. (2007): "EU ETS and Investment Decisions: The Case of the German Electricity Industry", *European Management Journal*, Vol.25, Nº 6, pp. 464-474.

[Huntzinger y Eatmon, 2009] Huntzinger, D.N. y Eatmon, T.D. (2009): "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies", *Journal of Cleaner Production*, Nº 17, pp. 668-675.

[Irassar et al., 2011] Irassar, E.F.; Violini, D.; Rahhal, V.F.; Milanesi, C.; Trezza, M.A.; Milanesi, C.; Trezza, M.A. y Bonavetti, V.L. (2011): "Influence of limestone content, gypsum content and fineness on early age properties of Portland limestone cement produced by inter-grinding", *Cement and Concrete Composites*, Nº 33, pp. 192-200.

[Josa et al., 2004] Josa, A.; Aguado, A.; Heino, A.; Byers, E. y Cardim, A. (2004): "Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU", *Cement and Concrete Research*, Nº 34, pp. 1.313-1.320.

[Kawai y Osako, 2012] Kawai, K. y Osako, M. (2012): "Reduction of natural resource consumption in cement production in Japan by waste utilization", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 14, Nº 2, pp. 94-101. DOI 10.1007/s10163-012-0042-4.

[Khanna, 2001] Khanna, N. (2001): "Analyzing the economic cost of the Kyoto Protocol", *Ecological Economics*, Nº 38, pp. 59-69.

[Kim y Worrell, 2002] Kim, Y. y Worrell, E. (2002): "CO₂ emission trends in the cement industry: an international comparison", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 2, Nº 2, pp. 115-133. DOI: 10.1023/A:1022857829028.

[Krishnamurti y Hoque, 2011] Krishnamurti, C. y Hoque, A. (2011): "Efficiency of European Emissions Markets: Lessons and Implications", *Energy Policy*, Nº 39, pp. 6575-6582.

[Lam et al., 2010] Lam, C.H.; Barford, J.P. y McKay, G. (2010): "Utilization of Incineration Waste Ash Residues in Portland Cement Clínter", *Chemical Engineering*, Nº 21, pp. 757-762.

[Lee et al., 2008] Lee, C.F.; Lin, S.J. y Lewis, C. (2008): "Analysis of the impacts of combining carbon taxation and emission trading on different industry sectors", *Energy Policy*, Nº 36, pp. 722-729.

[Ley 16/2002] Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (Ley IPPC), modificada por la Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de accesos a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE); y por la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

[Lewis, 2010] Lewis, M. C. (2010): "How will the EU ETS shape the European power generation mix?", *Power Engineering International*, Nº 18, pp. 24-27. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/750367044?accountid=14549/>.

[Lu et al., 2009] Lu, H.; Masanet, E. y Price, L. (2009): "Evaluation of Life-Cycle Assessment Studies of Chinese Cement Production: Challenges and Opportunities", *Proceedings of the 2009 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*. Disponible en web: http://minotaur.lbl.gov/china.lbl.gov/sites/china.lbl.gov/files/LBNL-2335E.Evaluation_of_LCA_Studies_of_Chinese_Cement_Production.ACEEE_.pdf.

[Lund, 2007] Lund, P. (2007): "Impacts of EU carbon emission trade directive on energy-intensive industries – Indicative micro-economic analyses", *Ecological Economics*, Vol. 63, Nº 4, pp. 799-806.

[Marceau et al., 2006] Marceau, M.; Nisbet, M. y VanGeem, M. (2006): *Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture*, Portland Cement Association, R&D Serial Nº. 2095b. Disponible en web: http://www.nrmca.org/taskforce/item_2_talkingpoints/sustainability/sustainability/sn2095b%20-%20cement%20ci%202006.pdf.

[McLellan et al., 2011] McLellan, B.C.; Williams, R.P.; Lay J.; Van Riessen, A. y Corder, G.D. (2011): "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, Nº 9-10, pp. 1080-1090. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>.

[Meckling y Chung, 2009] Meckling, J.O. y Chung, G.Y. (2009): "Sectorial approaches for a post-2012 climate regime: a taxonomy", *Climate Policy*, Vol. 9, Nº 6, pp. 652-666.

[Menéndez et al., 2003] Menéndez, G.; Bonavetti, V. y Irassar, E.F. (2003): "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, Nº 25, pp. 61-67.

[Metz et al., 2005] Metz, B.; Davidson, O.; De Coninck, H.; Loos, M. y Meyer, L. (2005): *Carbon dioxide capture and storage*, IPCC, Cambridge University Press, England (Versión en español: *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono*).

[Mikulcic et al., 2012] Mikulcic, H.; Vujanovic, M. y Duic, N. (2012): "Reducing the CO₂ emissions in Croatian cement industry", *Applied Energy*, article in press (available on line 27 March 2012). Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.083>.

[Monjon y Quirion, 2011a] Monjon, S. y Quirion, P. (2011): "A border adjustment for the EU ETS: Reconciling WTO rules and capacity to tackle carbon leakage", *Climate Policy*, Vol. 11, Nº 5, pp. 1212-1225.

Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/900888551?accountid=14549>.

[Monjon y Quirion, 2011b] Monjon, S. y Quirion, P. (2011): "Addressing leakage in the EU ETS: Border adjustment or output-based allocation?", *Ecological Economics*, Vol. 70, Nº 11, pp. 1957-1971.

[Moreno-Fuentes y Dana, 2011] Moreno-Fuentes, M. y Dana, S. (2011): "ETS markets and electricity futures prices", *SSRN Working Paper Series*, Rochester. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/864221771?accountid=14549>.

[Moya et al., 2010] Moya, J.A.; Pardo, N. y Mercier (2010): *Energy efficiency and CO₂ Emissions: Prospective Scenarios for the cement Industry*, JRC Scientific and Technical Reports. European Commission Joint Research Centre Institute for Energy, Publications Office of the European Union.

[Moya et al., 2011] Moya, J.A.; Pardo, N. y Mercier, A. (2011): "The potential for improvements in energy efficiency and CO₂ emissions in the EU27 cement industry and the relationship with the capital budgeting decision criteria", *Journal of Cleaner Production*, Nº 19, pp. 1207-1215.

[Murray y Price, 2008] Murray, A. y Price, L. (2008): "Use of alternative fuels in cement manufacture: analysis of fuel characteristics and feasibility for use in the Chinese cement sector", Lawrence Berkeley National Laboratory, Nº 525, Berkeley, California. Disponible en web: <http://china.lbl.gov/publications/use-alternative-fuels-cement-manufacture-analysis-fuel-characteristics-and-feasibility/>.

[Nadal et al., 2009] Nadal, M.; Schuhmacher, M. y Domingo, J.L. (2009): "Cost-benefit analysis of using sewage sludge as alternative fuel in a cement plant: a case study", *Environmental Science and Pollution Research*, Nº 16, pp. 322-328.

[Naranjo et al., 2011] Naranjo, M.; Brownlow, D.T. y Garza, A. (2011): "CO₂ capture and sequestration in the cement industry", *Energy Procedia*, Nº 4, pp. 2716-2723.

[Navia et al., 2006] Navia, R.; Rivelab, B.; Sorber, K.E. y Menéndez, C.R. (2006):

Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: Life cycle assessment", *Resources, Conservation and Recycling*, Nº 48, pp. 339-356, doi:10.1016/j.resconrec.2006.01.007.

[Neuhoff et al., 2006] Neuhoff, K.; Martinez, K. y Sato, M. (2006): "Allocation, incentives and distortions: the impact of EU ETS emissions allowance allocations to the electricity sector", *Climate Policy*, Vol. 6, Nº 1, pp. 73-91.

[Neuhoff, 2008] Neuhoff, K. (2008): *Tackling carbon. How to price carbon for Climate Policy*, University of Cambridge, Faculty of Economics. Disponible en web: <http://www.climatestrategies.org/component/reports/category/6/72.html/>.

[Nordhaus, 2008] Nordhaus, W. D. (2008): *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*, New Haven and London, Yale University Press. Disponible en web: http://nordhaus.econ.yale.edu/Balance_2nd_proofs.pdf/.

[Norma ISO 14040:2006] Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

[O'Brien et al., 2009] O'Brien K.R.; Menache, J. y O'Moore, L.M. (2009): "Impact of fly ash content and fly ash transportation distance on embodied greenhouse gas emissions and water consumption in concrete", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 14, Nº 7, pp. 621-629. DOI: 10.1007/s11367-009-0105-5 2009.

[Oberheitmann, 2010] Oberheitmann, A. (2010): "A new post-Kyoto climate regime based on per-capita cumulative CO₂ - emission rights - rationale, architecture and quantitative assessment of the implication for the CO₂ - emissions from China, India and the Annex-I countries by 2050", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 15, Nº 2, pp. 137-168. DOI 10.1007/s11027-009-9207-4.

[Oberndorfer y Rennings, 2007] Oberndorfer, U. y Rennings, K. (2007): "Costs and competitiveness effects of the European Union emissions trading scheme", *European Environment*, Vol. 17, Nº 1, pp.1-17.

[Oppenheim y Beinhooker, 2009] Oppenheim, J. y Beinhooker, E.D. (2009): *Climate change and the economy - myths versus realities*, Davos, Switzerland, McKinsey & Company, Inc.

[ONU, 1998] Organización de las Naciones Unidas (1998): *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, Documento FCCC/INFORMAL/83 GE.05-61702 (S) 130605 130605.

[Pardo et al., 2011] Pardo, N.; Moya, J.A. y Mercier, A. (2011): "Prospective on the energy efficiency and CO₂ emissions in the EU cement industry", *Energy*, Vol. 36, Nº 5, pp. 3244-3254.

[Perdan y Azapagic, 2011] Perdan, S. y Azapagic, A. (2011): *Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists*, 2ª ed., Azapagic, A. and S. Perdan, eds., John Wiley & Sons, Chichester.

[Pinkse, 2007] Pinkse, J. (2007): "Corporate intentions to participate in emission trading", *Business Strategy and the Environment*, Vol. 16, Nº 1, pp. 12-25.

[Ponsard y Walker, 2008] Ponsard, J.P. y Walker, N. (2008): "EU Emissions Trading and the Cement Sector: A Spatial Competition Analysis", *Climate Policy*, Vol. 8, Nº 5, pp. 467-493.

[Price et al., 2010] Price, L.; Hasanbeigi, A. y Lu, H. (2010): "Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants", *Energy*, Nº 35, pp. 3461-3473.

[Price y Worrell, 2006] Price, L. y Worrell, E. (2006): "Global Energy Use, CO₂ Emissions and the Potential for Reduction in the Cement Industry", *Cement Energy Efficiency Workshop*, organised by the IEA in cooperation with WBCSD, Paris, 4-5 September 2006.

[Ramos, 2005] Ramos (2005): "El papel de los Fondos de Carbono en la estrategia española de utilización de los mecanismos flexibles del Protocolo de Kyoto: oportunidades de proyección internacional para la empresa española", *ICE*, Nº 822, pp. 131-141.

- [Rathmann, 2007]** Rathmann, M. (2007): "Do support systems for RES-E reduce EU-ETS-driven electricity prices?", *Energy Policy*, Vol. 35, Nº 1, pp. 342-352. Disponible en web: <http://0-search.proquest.com.columbus.uhu.es/docview/205322818?accountid=14549/>.
- [Rehan y Henfídí, 2005]** Rehan, R. y Hendí, M. (2005): "Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry", *Environmental Science & Policy*, Vol. 8, Nº 2, pp. 105-114. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2004.12.006>.
- [Riestra et al., 2009]** Riestra, C.; López, A. y González, E. (2009): "El CO₂ y la industria en España. De la primera asignación de derechos a la etapa post-Kyoto", *Economía Industrial*, Nº 371, pp. 59-77.
- [Rodríguez et al., 2008]** Rodríguez, N.; Alonso, M.; Grasa, G. y Abanades, J.C. (2008): "Process for Capturing CO₂ Arising from the Calcination of the CaCO₃ used in Cement Manufacture", *Environmental Science & Technology*, Nº 42, pp. 6980-6984.
- [Rodríguez et al., 2009]** Rodríguez, N.; Alonso, M.; Abanades, J.C.; Grasa, G. y Murillo, R. (2009): "Analysis of a process to capture the CO₂ resulting from the pre-calcination of the limestone feed to a cement plant", *Energy Procedia*, Vol. 1, Nº 1, pp. 141-148.
- [Romeo et al., 2011]** Romeo, L.M.; Catalina, D.; Lisbona, P.; Lara, Y. y Martínez, A. (2011): "Reduction of greenhouse gas emissions by integration of cement plants, power plants, and CO₂ capture systems", *Greenhouse Gases: Science and Technology*, Vol. 1, Nº 1, pp. 72-82. DOI: 10.1002/ghg3.5.
- [Rovira, 2008]** Rovira, M.J. (2008): "Futuro esquema europeo de comercio de derechos de emisiones (EU ETS): propuesta de Directiva", *Análisis del funcionamiento del comercio de Gases de Efecto Invernadero (GEI)-Congreso Nacional del Medio Ambiente-Cumbre del Desarrollo Sostenible, CONAMA 9*.
- [Sandoff y Schaad, 2009]** Sandoff, A. y Schaad, G. (2009): "Does EU ETS lead to emission reductions through trade? The case of the Swedish emissions trading sector participants", *Energy Policy*, Vol. 37, Nº 10, pp. 3967-3977.
- [Santamaría y Linares, 2011]** Santamaría, A.; Linares, P. (2011): *Costes de reducción de CO₂ en la industria española*, Instituto de Investigación Tecnológica, U. Pontificia Comillas. Disponible en web: <http://www.eforenergy.org>.
- [Sato et al., 2007]** Sato, M.; Grubb, M.; Matthes, F. y Graichen, V. (2007): *Differentiation and dynamics of EU ETS industrial competitiveness impacts*, Climate Strategies, London.
- [Schleich y Betz, 2005]** Schleich, J. y Betz, R. (2005): "Incentives for energy efficiency and innovation in the European Emission Trading System", Proceedings of the 2005 European Council for an Energy-Efficient Economy Summer Study, Energy Savings: What Works & Who Delivers?, pp. 1495-1506. Disponible en Web: http://www.eceee.org/conference_proceedings/eceee/2005c/Panel_7/7124schleich/Paper/.
- [Schmidt et al., 2008]** Schmidt, J.; Helme, N.; Lee, J. y Houdashelt, M. (2008): "Sector-based approach to the post-2012 climate change policy architecture", *Climate Policy*, Vol. 8, Nº 5, pp. 494-515.
- [Schultz, 2002]** Schultz A. (2002): "Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien" [*Method for integrated economic and ecological assessment of production processes and technologies*], Doctoral Dissertation Magdeburg.
- [Smale et al., 2006]** Smale R.; Hartley M.; Hepburn C.; Ward, J. y Grubb, M. (2006): "The impact of CO₂ emissions trading on firm profits and market prices", *Climate Policy*, Vol. 6, Nº 1, pp. 29-46.
- [SME, 1996]** Society of Manufacturing Engineers (1996): *Green Manufacturing SME*, Product ID: BB96WBD1. J.
- [Subramanian y Talbot, 2007]** Subramanian, R.; Gupta, S. y Talbot, B.

(2007): "Compliance Strategies under Permits for Emissions", *Production and Operations Management*, Vol. 16, Nº 6, pp. 763-779. DOI 10.3401/poms.

[Szabó et al., 2003] Szabó, L.; Hidalgo, I.; Ciscar, J.C.; Soria, A. y Russ, P. (2003): "Energy Consumptions and CO₂ Emissions from the World Cement Industry", JRC-IPTS, EUR20769 European Commission.

[Szabó et al., 2006] Szabó, L.; Hidalgo, I.; Ciscar, J.C. y Soria, A. (2006): "CO₂ emission trading within the European Union and Annex B countries: the cement industry case", *Energy Policy*, Nº 34, pp. 72- 87.

[Tanaka, 2012] Tanaka, M. (2012): "Multi-Sector Model of Tradable Emission Permits," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 51, Nº 1, pp. 61-77.

[Traber y Kemfert, 2009] Traber, T. y Kemfert, C. (2009): "Refunding ETS-proceeds to spur the diffusion of renewable energies: an analysis based on the dynamic oligopolistic electricity market model Emelie", *SSRN Working Paper Series*, Rochester. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/189859148?accountid=14549/>.

[Valderrama et al., 2012] Valderrama, C.; Granados, R.; Cortina, J.L.; Gasol, C.M.; Guillem, M.; Josa, A. (2012): "Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 25, pp. 60-67.

[Worrell et al., 2008] Worrell, E.; Galitsky, C. y Price, L. (2008): *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making. An energy star*, Guide for Energy and Plant Managers. Disponible en web: <http://www.energystar.gov/ia/business/industry/LBNL-54036.pdf>.

[Wu y Chang, 2004] Wu, C.C. y Chang, N. B. (2004): "Corporate optimal production planning with varying environmental costs: A grey compromise programming approach", *European Journal of Operational Research*, Vol. 155, Nº 1, pp. 68-95.

[Zabaniotou y Theofilou, 2008] Zabaniotou, A. y Theofilou, C. (2008): "Green energy at cement kiln in Cyprus. Use of sewage sludge as a conventional fuel

substitute", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Nº 12, pp. 531-541.

[Zaragoza, 2009] Zaragoza, A. (2009): "Retos y oportunidades ante el nuevo escenario mundial global o cómo hacer de la necesidad una virtud", *Combustibles alternativos en hornos de cemento: una contribución a la Sostenibilidad y al Protocolo de Kyoto*, Barcelona, 5 de Noviembre de 2009.

[Zeman, 2009] Zeman, F. (2009): "Oxygen combustion in cement production", *Energy Procedia*, Nº 1, pp. 187-194.

[Zetterberg et al., 2004] Zetterberg, L.; Nilsson, K.; Åhman, M.; Kumlin, A.S. y Birgersdotter, L. (2004): *Analysis of national allocation plans for the EU ETS*, IVL Report-IVL Swedish Environmental Research Institute.

[Zhou et al., 2012] Zhou, M.; Pan, C.; Chen, Z.; Yang, W. y Li, B. (2012): "Selection and evaluation of green production strategies: analytic and simulation models", *Journal of Cleaner Production*, Nº 26, pp. 9-17.

Capítulo 2

El sector del cemento en España: características y evolución

2.1. La industria del cemento en España: principales características

2.1.1. Estructura empresarial: pasado y presente

2.1.2. Proceso de producción y productos: características y tipologías

2.2. Evolución de las principales magnitudes económicas del sector (2000-2010)

2.2.1. Producción

2.2.2. Consumo

2.2.3. Ventas

2.2.4. Comercio exterior

2.2.5. El sector del cemento en Europa

Capítulo 2

El sector del cemento en España: características y evolución

Como hemos puesto de manifiesto en el Capítulo 1, para alcanzar el propósito general de este trabajo, es preciso contextualizar la actividad productiva del sector objeto de nuestro estudio, la industria del cemento. Por tanto, en este capítulo, abordamos el estudio del mismo, analizando, en primer lugar, todos aquellos aspectos que nos permitan caracterizar la actividad productiva del sector, así como su estructura empresarial, finalizando con el análisis de la evolución del sector en la última década, a través del comportamiento de sus principales magnitudes económicas.

2.1. LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN ESPAÑA: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

La industria del cemento, incluida en la división 23.51 de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE-2009⁹), comprende la fabricación de clínker y cementos hidráulicos, incluidos el pòrtland, el cemento aluminoso, el cemento de escorias y los superfosfatos. Tanto su estructura empresarial como actividad productiva ha experimentado importantes cambios a lo largo de su historia. Sus principales características y variaciones son abordadas en los siguientes subapartados.

2.1.1. Estructura empresarial: pasado y presente

Los inicios de la industria del cemento, se remontan a finales del siglo XIX, con la puesta en funcionamiento en 1898 de la primera fábrica de cemento artificial en Tudela Veguín (Asturias), con una capacidad de producción de 15.000 toneladas anuales.

⁹ La Clasificación Nacional de Actividades Económicas actualizada (CNAE-2009), aprobada por Real Decreto 475/2007, de 13 de abril, refleja los cambios estructurales de la economía, y en especial el desarrollo tecnológico habido desde la última revisión de la clasificación.

Desde sus orígenes, la industria del cemento, adaptándose a las circunstancias de cada momento y afrontando, por tanto, nuevos retos, ha experimentado importantes cambios, que han marcado su evolución a lo largo de su historia, alternando etapas de crecimiento con otras de recesión.

Sin ánimo de ser exhaustivos, al quedar fuera de las expectativas del presente proyecto realizar un análisis pormenorizado de la evolución del sector cementero, el Cuadro 2.1 recoge cronológicamente algunos de los acontecimientos más significativos de las diferentes etapas por las que ha atravesado este sector. Ello nos permitirá contextualizar, de manera sintetizada, la actividad productiva del sector en cada momento, y así comprender mejor los diferentes aspectos que abordamos en cada parte de este trabajo.

Etapas	Acontecimientos relevantes
Inicio (Hasta 1923)	<ul style="list-style-type: none"> ● Instalación de las primeras fábricas de cemento artificial en las que se aplican las nuevas tecnologías importadas¹⁰. ● Incremento significativo de la producción impulsado por la demanda del sector eléctrico y la construcción de viviendas (al final de la etapa, cuatro veces más que en 1909).
Consolidación (1923-1929)	<ul style="list-style-type: none"> ● Mejoras en instalaciones (ampliación y sustitución de equipos). ● Creación de la Unión de Fabricantes de Cemento de España (1931). ● Máximo de producción de 1,55 millones de toneladas.
Crisis (1929-1939)	<ul style="list-style-type: none"> ● Caída de la producción industrial que no se recuperó hasta 1935.
Autarquía e intervencionismo (1939-1950)	<ul style="list-style-type: none"> ● Aumento de la demanda de cemento debido a las labores de reconstrucción tras la Guerra Civil. ● Creación del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento (Instituto Eduardo Torroja) (1949).
Transición económica. Despegue de la producción de de cemento (1950-1959)	<ul style="list-style-type: none"> ● Incremento de la producción del cemento, debido al crecimiento industrial. ● Sustitución del transporte de cemento por ferrocarril por el de carretera. ● Distribución de las fábricas por todo el territorio nacional, a excepción de las zonas donde no existía materia prima.

¹⁰ La primera planta de cemento artificial del siglo XX pertenecía a la Sociedad Comanditaria Hijos de J. M. Rezola y se constituyó en 1900 en Guipúzcoa. Un año después se fundó en Cataluña la Compañía General de Asfaltos y Portland Asland, S.A., que instaló su primera planta en Barcelona. Posteriormente, en 1903, la Sociedad de Cementos Portland S.A. (El Cangrejo) se instaló en Olazagutía, Navarra [OFICEMEN].

Etapas	Acontecimientos relevantes
Crecimiento económico y boom cementero (1959-1970)	<ul style="list-style-type: none"> ● Instalación de nuevas fábricas y ampliación de las ya existentes para hacer frente al boom inmobiliario. ● Incremento de las importaciones. ● Inclusión del sector en la Comisión de Industrias de Materiales de la Construcción y Refractario, que fue creada para evaluar las necesidades de la producción, consumo, etc. ● Generalización de venta de cemento a granel.
Crisis económica y sobreproducción cementera (1973-1980)	<ul style="list-style-type: none"> ● Instalación de nuevas fábricas y modernización de algunas de las instalaciones, aumentándose la capacidad de producción hasta 33,4 millones de toneladas.
La década de los 80 (1980-1990)	<ul style="list-style-type: none"> ● Aumento de las exportaciones debido a la disminución del consumo interno (crisis energética), colocándose España a principio de los 80 a la cabeza de los países europeos exportadores de cemento y segundo del mundo detrás de Japón. ● Comienzo de un proceso de integración vertical, tanto hacia actividades de extracción y comercialización de áridos como hacia la elaboración de hormigones y prefabricados de hormigón, y un proceso de diversificación en otros sectores industriales. ● Inversiones para aumentar la capacidad de producción, la calidad y la productividad, así como la mejora del impacto medioambiental.
La década de los 90 (1990-2000)	<ul style="list-style-type: none"> ● Recuperación del sector con importantes tasas de crecimiento. ● Modernización progresiva de la industria la adaptación de costes de estructura a la situación del mercado, con incrementos notables de productividad. ● Internacionalización de la industria por la apertura de fronteras a los productos y los capitales (en julio de 1995 dos tercios de la capacidad instalada pertenecía a grupos internacionales).
Liderazgo del sector (2000-2007)	<ul style="list-style-type: none"> ● Incremento del consumo de cemento (de los 25 millones de toneladas en 1996 a 56 millones de toneladas en 2007). ● Líder en Europa y quinto a nivel mundial. ● Incremento de las importaciones (segundo del mundo después de EE.UU. y a la cabeza a nivel europeo) y disminución de las exportaciones. ● Inversiones en mejoras medioambientales.
Recesión (2007-2012)	<ul style="list-style-type: none"> ● Descenso progresivo de la producción (se prevé para 2012 una caída del 73% respecto al máximo histórico alcanzado en 2007 de 56 millones de toneladas). ● Infratilización de la capacidad de las instalaciones (aproximadamente un 60%).

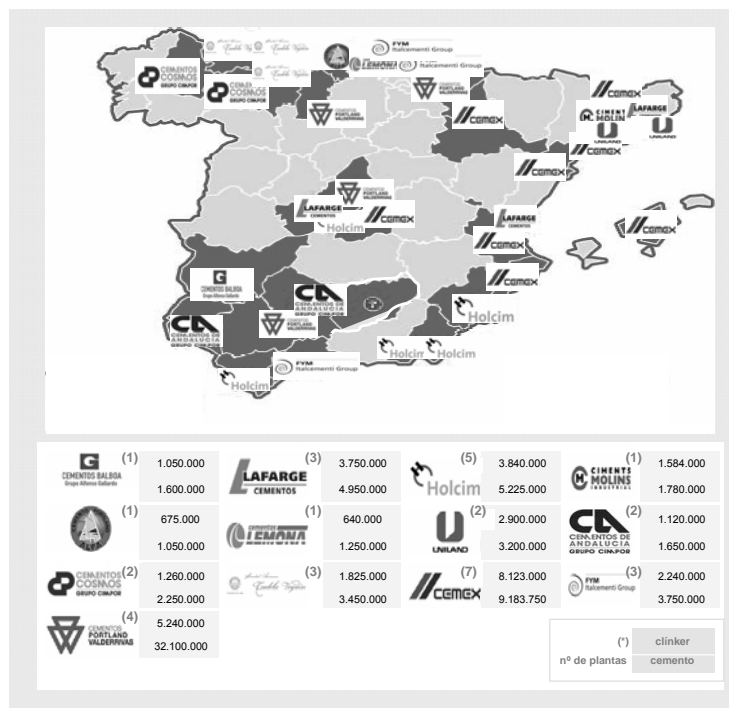
Cuadro 2.1. Historia de la industria del cemento: etapas e hitos

Fuente: elaboración propia a partir de [OFICEMEN]

La evolución del sector descrita en el Cuadro 2.1, refleja el cambio significativo que ha experimentado su estructura empresarial, dejando atrás la estructura de mercado

heredada del pasado, que respondía a un modelo de oligopolio tipo cartel con liderazgo de precios¹¹. La introducción progresiva de capital extranjero en la industria del cemento que se inició en la década de los 90, así como la construcción de plantas y hornos de gran capacidad, han favorecido la participación mayoritaria de grandes grupos internacionales en la producción nacional del cemento.

De esta manera, considerando solamente las empresas asociadas en Oficemen¹², la producción de cemento se reparte entre 13 fabricantes, con un total de 35 plantas productivas, distribuidas por todo el territorio español, cuya localización y capacidad de producción se recogen en el Cuadro 2.2.



Cuadro 2.2. Localización y capacidad de producción de las plantas de cemento en España (tn/año)
Fuente: elaboración propia a partir de [OFICEMEN, 2011c]

¹¹ Sector que se ajusta al perfil de mercado más propenso para cartelizarse: producto homogéneo, alta concentración de empresas en el mercado y existencia de asociaciones que procuran a sus interesados la oportunidad de actuar conjuntamente, mediante firma de acuerdos. De ahí que constituyó un caso paradigmático de los carteles supranacionales, investigado y sancionado por la Comisión Europea en 1994 [Rosado, 2004].

¹² Agrupación de Fabricantes de Cemento de España, que asocia a todas las empresas dedicadas a la producción integral de cemento que tienen fábricas en España (<http://www.oficemen.com>).

Cementos Portland Valderrivas¹³, con un total de 8 instalaciones, lidera el ranking, tanto en número de plantas como en capacidad de producción, posicionándose como primer grupo de capital español del sector cementero. Dispone, directa o indirectamente¹⁴, de centros de producción estratégicamente situados en Cantabria, País Vasco, Navarra, La Rioja, Castilla y León, Castilla-la Mancha, Madrid, Aragón, Extremadura, Andalucía y Cataluña.

El grupo Cemex¹⁵ (México), presente en España desde 1992, cubre con sus productos el 60% de la geografía española a través de cinco zonas comerciales: Cataluña, Aragón, Centro, Levante y Baleares. Se convierte así en el segundo productor de cemento a nivel nacional con 7 instalaciones, concentradas mayoritariamente en la franja mediterránea.

Holcim España¹⁶, filial del grupo suizo Holcim, concentra el mayor volumen de producción en el sur de la península, con tres instalaciones en Andalucía (dos en la provincia de Almería y una en Cádiz) y una en la localidad murciana de Lorca. En total, absorbe el 7,31% de la producción nacional, lo que la posiciona en los primeros puestos del ranking entre los grupos con capital mayoritario internacional.

Otro de los grandes grupos internacionales que opera en nuestro país desde 1989 es Lafarge, multinacional francesa, líder en la fabricación de materiales para el sector de la construcción, presente en 64 países y en todos los continentes. La división filial Lafarge Cementos¹⁷ (España) dispone de tres instalaciones con una capacidad media anual de aproximadamente 1,5 millones de toneladas.

¹³ Para completar la información del grupo empresarial puede consultar su página web corporativa: <http://www.cportland.es/es/>.

¹⁴ En 2006 comienza un nuevo proceso de expansión con la integración en el grupo de la planta que Lemona Industrial posee en España y la participación mayoritaria del grupo Uniland Cementera. Un año después, amplía su actividad con la incorporación de la planta de Mataporquera (Santander), propiedad de Cementos Alfa.

¹⁵ Para completar la información del grupo empresarial puede ver su página web corporativa: <http://www.cemex.com/>.

¹⁶ Para completar la información del grupo empresarial puede ver su página web corporativa: <http://www.holcim.es/>.

¹⁷ Para completar la información del grupo empresarial puede ver su página web corporativa: <http://www.lafarge.com.es/>.

Cementos Cosmos y Sociedad de Cementos y Construcción de Andalucía, con dos instalaciones cada una de ellas, y bajo la dirección del Grupo Cimpor¹⁸, con sede central en Portugal, absorben el 5,5 % de la capacidad instalada en el territorio nacional.

El listado de empresas pertenecientes a grupos internacionales que están operativas en la actualidad en nuestro país, se cierra con las tres instalaciones de Sociedad Financiera y Minera¹⁹ (FYM), filial española de Italcementi Group (Italia), quinto productor de cemento en el mundo. La capacidad máxima de producción de sus plantas corresponde a la de Málaga, con 1,575 millones de toneladas anuales.

El resto de la producción se reparte entre diferentes instalaciones, propiedad de grupos con capital mayoritario nacional. Se trata de la centenaria Cementos Tudela Veguín²⁰ (Asturias), Cementos Molins Industrial²¹ (Barcelona) y Cementos Balboa²² (Badajoz), perteneciente esta última al Grupo Alfonso Gallardo²³, que inició su actividad productiva en el sector en mayo de 2005.

Las características propias del proceso de fabricación del cemento, convierten a la localización de las plantas cementeras en un aspecto relevante de aquél. Por tratarse el cemento un producto pesado y de escaso valor en relación a su peso, la proximidad geográfica de las fuentes de materia prima y de los mercados de sus productos es fundamental para conseguir economías de escala. Así pues, las instalaciones cuya producción se destina una parte a la exportación, se encuentran ubicadas en zonas próximas a las costas, destacando, en nuestro caso, principalmente la franja atlántico-mediterránea de la península.

Todas las empresas del sector operan actualmente bajo la forma jurídica de sociedad anónima, como una división más del negocio de grandes grupos empresariales, que tras

¹⁸ Para completar la información del grupo empresarial puede ver su página web corporativa: <http://www.cimpor.es/>.

¹⁹ Para completar la información del grupo empresarial puede ver su página web corporativa: <http://www.fym.es/>.

²⁰ Para completar la información del grupo empresarial puede ver su página web corporativa: <http://www.cementostudelaveguin.com/>.

²¹ Para completar la información del grupo empresarial puede ver su página web corporativa: <http://www.cemolins.es/>.

²² Para completar la información del grupo empresarial puede ver su página web corporativa: <http://www.grupoag.es/>.

²³ El Grupo Alfonso Gallardo centra su actividad en el sector siderúrgico y es, en la actualidad, el mayor productor nacional de acero corrugado. Sus factorías se encuentran en Extremadura, Madrid, Asturias y País Vasco. Su sede social está en Jerez de los Caballeros (Badajoz), y es el grupo industrial con mayor plantilla y volumen de facturación de Extremadura (<http://www.grupoag.es/>).

el proceso de integración vertical iniciado a finales de los 80, han visto incrementada su cartera de productos, a través de la diversificación de su actividad productiva, tanto hacia actividades de extracción y comercialización de áridos como hacia la elaboración de hormigones y prefabricados de hormigón, así como en otros sectores industriales.

En relación al empleo generado por el sector²⁴, a pesar de la reducción progresiva que ha experimentado el consumo del cemento en los últimos años, el sector ha hecho un gran esfuerzo para mantener la plantilla, reduciéndola en tan sólo en un 25% desde que comenzará a vislumbrarse los primeros síntomas de la crisis en la que actualmente está inmersa nuestra economía. El empleo directo que genera la producción del cemento de las fábricas asociadas a Oficemen superó los 6.000 puestos de trabajo en 2010 (ver Gráfico 2.1). Cemex, con siete instalaciones ocupa al mayor porcentaje de la población activa del sector, con 1.656 trabajadores, y Balboa, con una sola instalación, el menor porcentaje, con 122 empleados.

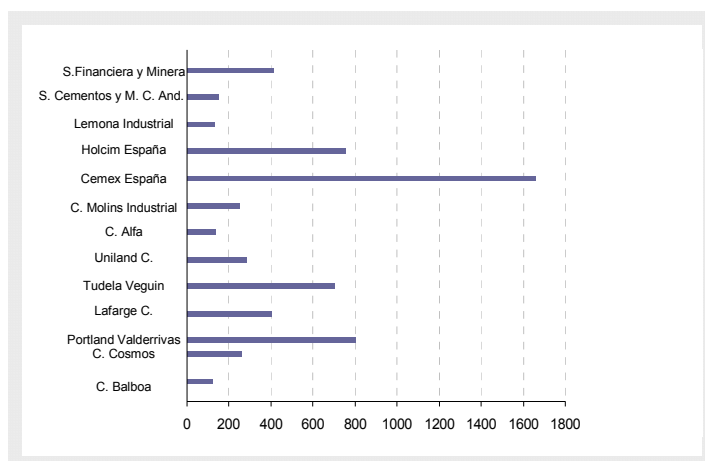


Gráfico 2.1. Plantilla de las empresas asociadas a Oficemen (nº empleados) (2009-2010)

Fuente: elaboración propia a partir de información obtenida en la base de datos Sabi²⁵

En el contexto de crisis actual, desde la asociación que agrupa a las empresas del sector, se teme, que *"a la vista de la demanda agregada esperable en la construcción pública y*

²⁴ La plantilla media de una planta moderna de cemento no supera, generalmente, los 150 empleados, aunque el empleo total dependiente, contando los indirectos, puede elevarse hasta entre 300 y 400 trabajadores [OFICEMEN].

²⁵ Sistema de Análisis de Balances Ibéricos: base de datos económica-financiera que incluye más de 1.000.000 de empresas españolas y más de 320.000 portuguesas.

*privada, es difícil que las paradas parciales y las regulaciones temporales de empleo, acometidas hasta ahora, sean medidas suficientes para mantener la capacidad instalada de la industria en nuestro país y por tanto el empleo que genera*²⁶.

Por todo lo anterior, es un hecho incuestionable el impacto negativo que la crisis ha tenido en los resultados económicos del sector, que se han visto mermados considerablemente en los últimos años. Así lo confirman los datos publicados por el mismo, que recogemos en el Gráfico 2.2 para el periodo 2002-2009.

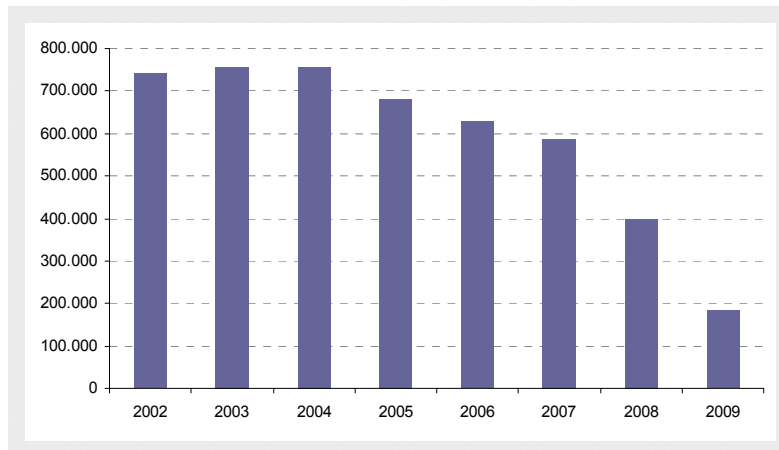


Gráfico 2.2. Evolución de los resultados económicos de las empresas asociadas en Oficemen (2002-2009) (miles euros)
Fuente: elaboración propia a partir de información obtenida en la base de datos Sabi y [OFICEMEN]

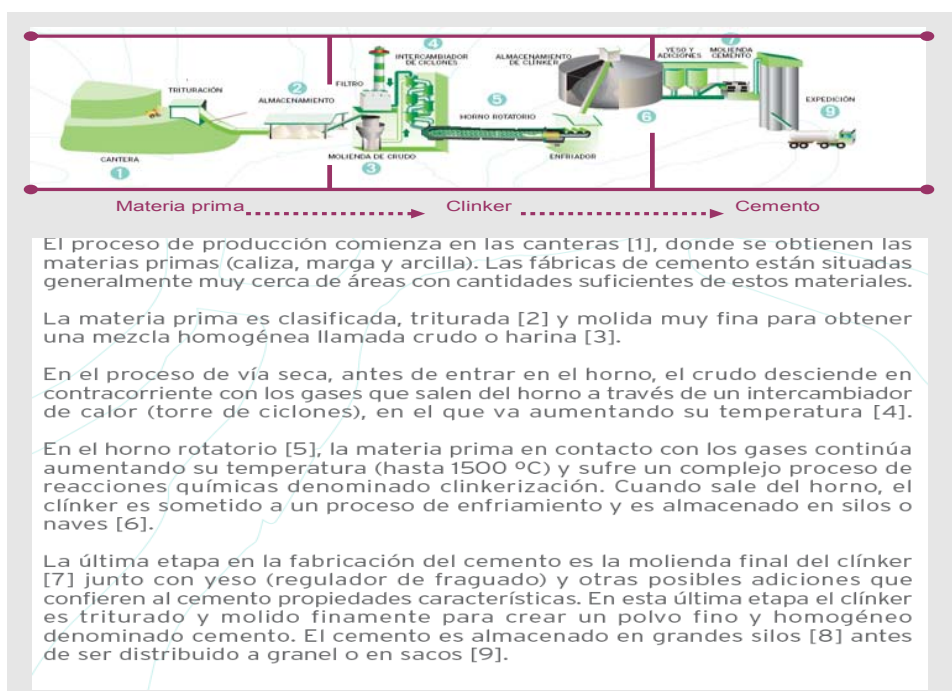
Por último, resaltar, que todas las plantas cementeras de las empresas asociadas a Oficemen cuentan con hornos de clínker y molinos de cemento en sus procesos de producción, cuyas características y tipologías pasamos a analizar de manera detallada en el siguiente apartado.

2.1.2. Proceso de producción y productos: características y tipologías

El proceso de producción de las fábricas de cemento instaladas en España, en su mayoría, comienza con la extracción de la materia prima y finaliza con la expedición del

²⁶ Nota de prensa Oficemen (12/07/2012) (http://www.oficemen.com/noticia.asp?id_rep=1536).

cemento. Se trata de plantas integrales²⁷, con hornos de clínker y molinos de cemento, cuyo proceso de producción se ilustra en el Cuadro 2.3, donde se diferencian y describen brevemente las distintas etapas, incluyendo la obtención del clínker, producto intermedio que mezclado con diferentes aditivos se obtiene el cemento.



Cuadro 2.3. Proceso de producción del cemento
Fuente: elaboración propia a partir de [FLACEMA, 2009]

En función de cómo se procese el material antes de su entrada en el horno de clínker, se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación: vía seca, vía semiseca, vía semihúmeda y vía húmeda²⁸. La tecnología aplicada en cada uno de ellos depende fundamentalmente de la materia prima empleada y de su contenido en agua, que puede oscilar desde un 3% para calizas duras hasta el 20% para algunas margas.

²⁷ En 2008 en la U.E. había 268 instalaciones productoras de clínker y cemento elaborado con un total de 377 hornos, además había otras 90 plantas de molienda y 2 plantas de clínker sin molinos. En España, 37 instalaciones disponían de horno y 13 sólo de molienda [EIPPCB, 2010].

²⁸ Para un análisis más detallado puede consultarse [OFICEMEN, 2008a], [Shackelford y Doremus, 2008], [Alsop et al., 2007], [Saxena, 2003], entre otros.

En el proceso de vía seca, la materia prima se introduce en el horno en forma seca y pulverulenta. El sistema del horno comprende una torre de ciclones para el intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases procedentes del horno.

El de vía húmeda es utilizado normalmente para materias primas de alto contenido en humedad. El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta con agua, resultando una pasta con contenido de agua de un 30-40%. En algunos casos los materiales pasan previamente por un desecador. Este proceso utiliza aproximadamente un 40% más de energía que el seco.

En los demás procesos -vía semiseca y semihúmeda- el material de alimentación se consigue añadiendo o eliminando agua al material obtenido en la molienda de crudo, respectivamente. Se obtienen "pellets" o gránulos con un 15-20% de humedad, que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular gases calientes provenientes del horno.

A pesar de que la vía húmeda permite un manejo y una homogeneización más fácil de las materias primas, los avances tecnológicos incorporados en la producción facilitan la preparación de una mezcla homogénea de las materias primas usando la vía seca, con menor consumo de agua y con un menor impacto medioambiental (ver Apartado 3.1). Esto ha favorecido la reconversión que ha experimentado el sector en los últimos años, generalizándose la producción por vía seca, no sólo a nivel nacional, sino también a nivel europeo [WBSCD/IEA, 2009].

Así pues, en 2008, alrededor del 90% de la producción europea de cemento procedía de hornos de proceso seco, algo más del 7,5% correspondía a hornos de proceso semiseco y semihúmedo y el resto, en torno al 2,5%, de hornos de proceso húmedo. En general, se espera, una sustitución progresiva de los hornos de proceso húmedo por los de vía seca, en la medida que vayan a renovarse, al igual que los sistemas de hornos de proceso semiseco y semihúmedo [EIPPCB, 2010].

España no constituye una excepción en el panorama descrito a nivel europeo, con un total de 60 hornos²⁹, de los cuales 53 (88,3% del total) son de vía seca. Solamente tres son de vía húmeda y cuatro de vía semiseca (Ver Figura 2.1).

²⁹ En 2009 se cerró una de las plantas que Holcim tenía en Torredonjimeno (Jaén).

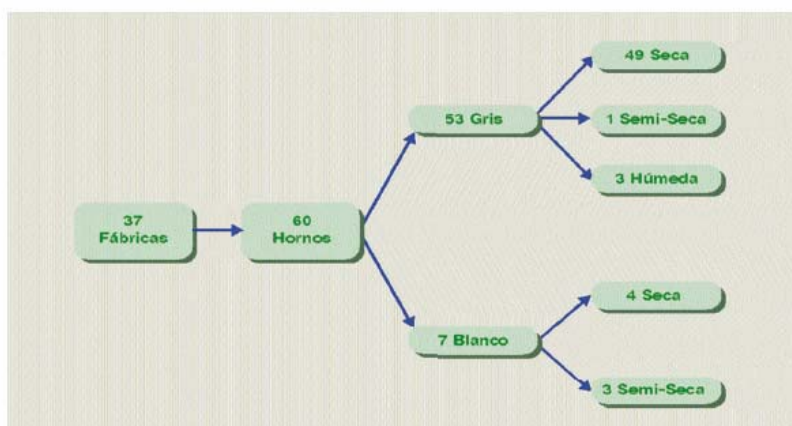


Figura 2.1. Tipología de hornos en el sector cementero español
Fuente: [OFICEMEN, 2008a]

El producto obtenido en el proceso de producción descrito anteriormente, el cemento, constituye uno de los conglomerados hidráulicos más importantes, que amasados con el agua, fraguan y endurecen, tanto expuestos al aire como sumergidos en agua [Locher, 2006].

Según la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)³⁰, los cementos comercializados en España (un total de 27 tipos de cemento) se pueden agrupar en algunas de las cinco categorías de los denominados cementos comunes (CEM): cementos Pórtland sin adiciones (CEM I), pórtland con adiciones (CEM II), cementos con escorias de horno alto (CEM III), cementos puzolánicos (CEM IV) y cementos compuestos (CEM V) (ver Cuadro 2.4).

³⁰ Los cementos en España están regulados por la Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08 y las Normas UNE, concordantes con la Norma europea EN 197. La RC-08, aprobada por Real Decreto 956/2008 de 6 de junio, establece los requisitos técnicos exigibles a los cementos comercializados en España [Ministerio de Fomento, 2009].

Principales tipos	Designación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)	Composición (proporción en masa 1)											Constit. Minorit.	
		Componentes principales												
		Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de Sílice D (%)	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos Calcinados T	Caliza				
Natural P	Natural calcinada Q				Silíceas V	Cálcicas W	L	LL						
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con esquistos calcinados	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland mixto	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cemento con escorias de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM IV	Cemento puzolánico	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cemento compuesto		CEM IV/A	65-89	-	-	-	11-35	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM IV/B	45-64	-	-	-	36-55	-	-	-	-	-	0-5		
CEM V	Cemento	CEM V/A	40-64	18-30	-	-	18-30	-	-	-	-	-	0-5	
	CEM V/B	20-38	31-50	-	-	31-50	-	-	-	-	-	0-5		

Cuadro 2.4. Tipología de cementos

Fuente: Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08) [Ministerio de Fomento, 2009]

La diferencia entre los distintos tipos de cemento está marcada por el porcentaje y clase de aditivos que contiene cada uno de ellos. En función de la proporción de adiciones, se clasifican en los subtipos A, B y C, correspondiendo los de la clase A a los de menor porcentaje de adición y los de mayor porcentaje a la clase C. Asimismo, conforme a la norma UNE-EN-197-1:2000³¹, según que la proporción en masa respecto a la suma del total de los componentes sea mayor o menor al 5%, los componentes empleados como

³¹ Con anterioridad, según la UNE 80301:1996, sólo estaba autorizada 5 adiciones (V, P, L, D y S).

adición del cemento en el proceso de producción, se clasifican en principales y minoritarios, respectivamente (ver Cuadro 2.5).

Componentes principales ³²	
Clinker Pórtland (K)	Clinker aluminoso (K)
Producto obtenido al calcinar hasta fusión parcial mezclas muy íntimas, preparadas artificialmente, de calizas y arcillas, hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes.	Producto obtenido por fusión de una mezcla de calizas y bauxitas de composición y granulometría adecuadas para conseguir un contenido mínimo de alúmina del 36 %.
Escoria granulada de horno alto (S)	Humo de sílice (D)
Material obtenido por enfriamiento rápido de una escoria fundida, obtenida por la fusión del mineral de hierro en un horno alto y están constituidas en más de dos tercios de su masa por escoria vítrea. Son conocidas sus propiedades hidráulicas.	Subproducto de la obtención del silicio y del ferrosilicio. Se reduce en horno eléctrico cuarzo muy puro y carbón, recogiendo del humo generado, mediante filtro electrostático, partículas de muy pequeño diámetro formadas, principalmente, por sílice muy reactiva.
Puzolana natural (P)	Puzolana natural calcinada (Q)
Material de origen volcánico o rocas sedimentarias. Finamente divididas no poseen ninguna propiedad hidráulica, pero contienen constituyentes (sílice y alúmina) capaces de fijar cal a la temperatura ambiente en presencia de agua, formando compuestos de propiedades hidráulicas.	Material de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico.
Cenizas volantes (V, W)	Esquisto calcinado (T)
Residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica de partículas de hornos alimentados con carbón pulverizados/ Subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía.	Producto que se produce en horno a temperaturas de aproximadamente 800 °C, particularmente el bituminoso. Debido a la composición del material natural y al proceso de producción, contiene fases del clinker, principalmente silicato bicálcico y aluminato monocálcico. También contiene pequeñas cantidades de óxido de calcio libre y de sulfato de calcio y mayores proporciones de óxidos puzolánicamente reactivos, especialmente dióxido de silicio. En consecuencia, el esquisto calcinado presenta propiedades hidráulicas y puzolánicas.
Caliza (L, LL)	
Compuesto principalmente de carbonatos cálcicos en forma de calcita (superior al 75 %), que molidos conjuntamente con el clinker Pórtland, en proporciones determinadas, afectan favorablemente a las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto frescos como endurecidos. Su acción principal es de carácter físico: dispersión, hidratación, trabajabilidad, retención de agua, capilaridad, permeabilidad, retracción, fisuración. La diferencia entre caliza L y LL está en el contenido de carbono orgánico total (TOC), que no excederá del 0,5% ó 0,2%, respectivamente.	

³² Materiales inorgánicos empleados en proporción superior al 5% en masa respecto de la suma de todos los componentes principales y adicionales minoritarios.

Componentes minoritarios ³³	
Sulfato de calcio	Aditivos de los cementos
Materiales naturales o productos artificiales que añadidos al clínker Pórtland y a otros constituyentes del cemento, en pequeñas proporciones, y molidos conjuntamente, proporcionan cementos con un fraguado adecuado, por tanto es el regulador de fraguado más usual (ej: yeso).	Productos que pueden emplearse en la fabricación del cemento, para facilitar el proceso de molienda o bien para aportar al cemento o a sus derivados algún comportamiento específico (inclusores de aire). La dosificación de los aditivos debe ser inferior al 1% en masa.

Cuadro 2.5. Componentes empleados como adición al cemento

Fuente: elaboración propia a partir de [Sanjuán, 2010]

Las propiedades de los diferentes componentes³⁴ proporcionan a cada tipo de cemento fabricado determinadas cualidades físicas y mecánicas (fraguado, expansión, finura de molido y resistencia a compresión) que lo hacen apto para diferentes usos y aplicaciones³⁵ (ver Figura 2.2). Se trata de propiedades hidráulicas, para fraguar y endurecer en presencia de agua y formar compuestos estables; propiedades puzolánicas, para reaccionar químicamente en presencia de agua con hidróxido de calcio a temperatura ambiente, formando compuestos que poseen propiedades hidráulicas, y propiedades reológicas, para mantener una determinada consistencia y resistencia³⁶.

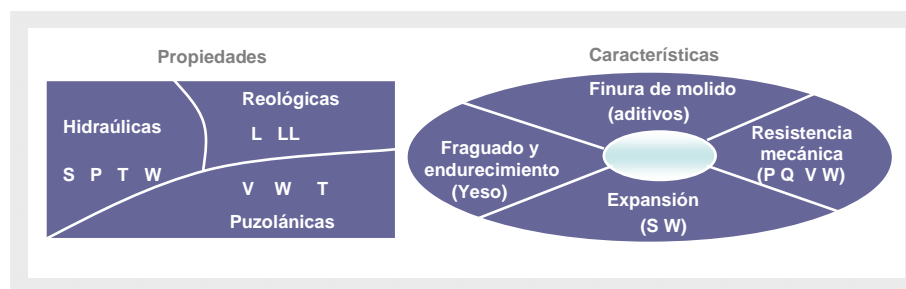


Figura 2.2. Aportación de las adiciones a las propiedades del cemento y a las características físicas y mecánicas

Fuente: elaboración propia

³³ Materiales inorgánicos empleados en proporción no superior al 5% en masa respecto de la suma de todos los componentes principales y minoritarios. Los componentes minoritarios son materiales minerales naturales o derivados del proceso de fabricación del clínker, que mediante adecuada preparación y teniendo en cuenta su distribución de partículas por tamaños, mejoran las propiedades físicas de los cementos (tales como la docilidad o la retención de agua). Su consumo no aumenta la demanda de agua del cemento, ni disminuye la resistencia del hormigón, ni tampoco la protección de las armaduras frente a la corrosión.

³⁴ La nomenclatura utilizada en la Figura 2.2, al igual que la de los Cuadros 2.4 y 2.5, es la recogida en la Instrucción RC-08 [Ministerio de Fomento, 2009].

³⁵ Las recomendaciones proporcionadas por la Instrucción RC-08, dirigidas fundamentalmente a los directores de proyectos, facilitan la selección del tipo de cemento a utilizar.

³⁶ <http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/369201/glosario.htm/>.

Asimismo, todos los tipos de cemento pueden presentar otras características especiales, como el color (blanco) y la resistencia a determinadas sustancias (sulfatos y agua de mar). Así, en los cementos blancos, el tipo y proporción de adición está limitada a componentes que no contengan fundentes que puedan aportar coloración³⁷ y los que tienen un mayor aporte de agua, lo que limitará aún más las alternativas para reducir el impacto medioambiental del proceso de producción³⁸. Además, por su mayor coste de producción estos tipos de cementos constituyen sólo para muy pocas empresas³⁹ una cuota de producción muy reducida, que se complementa con la fabricación de cementos comunes grises.

Además de los cementos comunes recogidos en el Cuadro 2.4, existen los denominados no comunes, regulados por la normativa de marcado CE⁴⁰. Entre ellos se incluyen los de albañilería (MC), el cemento de muy bajo calor de hidratación (VLH) y el cemento de aluminato de calcio (CAC).

Para garantizar la máxima calidad y homogeneización de la producción, así como el compromiso asumido por este sector en materia social y medioambiental, todas las empresas asociadas a Oficemen desarrollan su actividad en el marco normativo desarrollado y aplicable al sector, optando mayoritariamente y voluntariamente por la implantación de sistemas de gestión en los distintos ámbitos referidos, cuya certificación es una práctica que tiende a generalizarse en el mismo.

En este sentido, la acreditación a través de la marca N de AENOR para cementos, es un objetivo permanente en las estrategias de las empresas. Dicha marca garantiza que los cementos por ella certificados mantienen, durante su periodo de utilización, un contenido de cromo soluble en agua admisible, de acuerdo con el límite reglamentario (Norma UNE 80601). Por tanto, el usuario dispone de un medio eficaz para conocer aquellos cementos cuyo uso, de acuerdo con las medidas de seguridad y salud recomendadas, es inocuo para las personas [OFICEMEN, 2006].

³⁷ Además, no es posible consumir una gran proporción de combustibles alternativos en su producción porque aportan coloración.

³⁸ Ver Apartado 3.2.2.

³⁹ Sólo 7 de las plantas, asociadas a Oficemen, fabrican cemento blanco, además de los grises, que son obtenidos en la totalidad de las fábricas. Aquellos requieren un tipo especial de caliza que incrementa el coste de su fabricación y por consiguiente su precio de venta [OFICEMEN, 2008a].

⁴⁰ Certifica que el producto cumple con los requisitos esenciales en virtud de las directivas comunitarias que le son aplicables.

2.2. EVOLUCIÓN DE LAS PRINCIPALES MAGNITUDES ECONÓMICAS DEL SECTOR (2000-2010)

Una vez expuestas las características y generalidades de la actividad de la industria del cemento en los apartados anteriores, llegados a este punto del trabajo, y sin olvidar el objetivo que nos marcamos al iniciarlo, nos centramos en este apartado en el análisis de la evolución del sector en la última década. Para ello, teniendo en cuenta la evolución del sector descrita en el Cuadro 2.1, dedicamos los siguientes subapartados al análisis de aquellas variables que consideramos relevantes para nuestro estudio, que nos permita contextualizar la actividad de la industria cementera de nuestro país en los últimos años.

2.2.1. Producción

La evolución de la economía en general y del sector de la construcción, en particular, han marcado los cambios de tendencia de la producción nacional del cemento en la última década (2000-2010) (ver Gráfico 2.3).

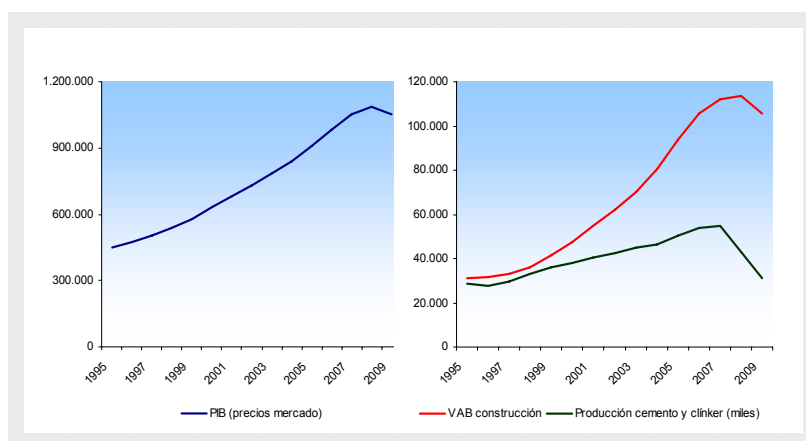


Gráfico 2.3. Evolución del PIB, VAB construcción y producción del cemento (1995-2009)

Fuente: elaboración propia a partir de información del INE y Memorias de Oficemen (2005-2010)

La tendencia al alza de la producción del cemento de la primera parte del periodo analizado se interrumpe en 2007, en el que se mantienen los niveles de producción del

año anterior, comenzando a partir de ese año a disminuir hasta el final del periodo, en el que el volumen de fabricación no supera el 50% del nivel máximo alcanzado en dicho periodo (54,7 millones de toneladas) (ver Gráfico 2.4). En 2010, la producción de cemento alcanzó los 26,2 millones de toneladas, lo que supone un descenso del 11,1% respecto al ejercicio anterior y del 52% respecto a 2007. De ellas, 639.000 toneladas correspondieron al cemento blanco, que disminuyó un 15,5%; los otros 25,6 millones de toneladas fueron de cemento gris, que ha visto reducida su producción en un 11%.



Gráfico 2.4. Evolución de la producción de clínker y cemento (2000-2010)

Fuente: [OFICEMEN, 2011c]

A nivel agregado⁴¹ y de acuerdo con los datos correspondientes a las empresas asociadas a Oficemen, la evolución de la producción por tipos de producto (ver Gráfico 2.5) refleja la concentración mayoritaria de la producción en dos tipos, el tipo I y el tipo II, representando un 25,3 y un 66,5 % de la producción, respectivamente, no observándose cambios significativos en el tiempo (el tipo I ha disminuido su peso en 3,3 puntos porcentuales mientras que el tipo II lo ha aumentado en 0,7 p.p.). Los otros cuatro tipos restantes suponen tan solo un 8,3% del total de la producción.

Si atendemos a la clase de resistencia⁴² de los tipos de cemento, la producción está más distribuida (ver Gráfico 2.5). El 65,7% de la producción de 2010 corresponde a

⁴¹ Cementos gris y blanco, y para el conjunto de empresas.

⁴² Las diferentes clases de resistencia definen las prescripciones relativas a las características mecánicas y físicas que debe cumplir cada tipo de cemento. Así pues, se distinguen cementos de resistencia muy alta (52,5), alta (42,5) o media (32,5), según su uso y aplicación [Ministerio de Fomento, 2009].

cementos de resistencia 42,5, cuya producción se ha visto incrementada considerablemente, en detrimento, principalmente, de los de resistencia mayor (52,5). Este último, junto con los de 32,5, representa un 33% del total de la producción.

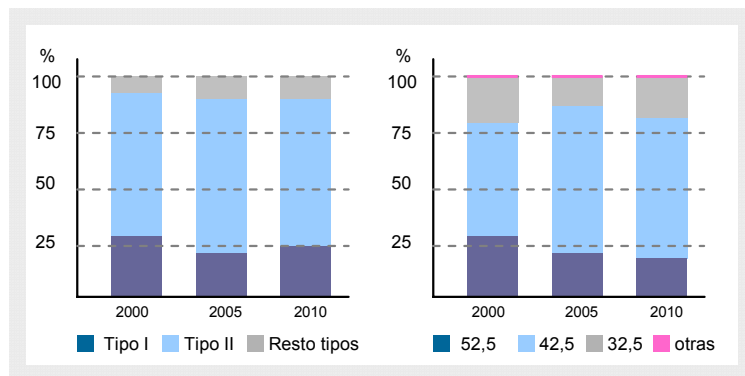


Gráfico 2.5. Evolución de la producción por tipos de cemento y clases de resistencia
Fuente: elaboración propia a partir de [OFICEMEN, 2011c]

Por otra parte, la producción global de las empresas asociadas a Oficemen por zonas y subzonas productoras, entendida como producción de cemento más exportación de clínker, ha experimentado ligeras variaciones en el periodo analizado. Se ha incrementando su participación en tres de ellas (Cataluña, zona Norte y zona Cantábrico) y se ha reducido en las otras dos (Andalucía y zona Central). En 2010, sigue liderando la producción la zona central con un 25,44% de la producción total, distribuida entre las cinco plantas cementeras instaladas en su ámbito geográfico (ver Tabla 2.1).

Año	Andalucía	Cataluña	Z. central	Z. norte	Z. cantábrica
2002	20,59	20,13	33,86	10,03	15,39
2003	21,43	19,37	33,52	10,06	15,62
2004	22,72	21,03	29,87	10,47	15,91
2005	21,8	21,29	31,24	10,4	15,27
2006	21,39	21,49	30,32	11,35	15,45
2007	18,13	21,05	31,24	11,49	18,09
2008	19,53	20,2	29,03	12,14	19,1
2009	17,82	20,23	28,11	12,4	21,44
2010	18,62	22,73	25,44	11,5	21,72

Z. central: Castilla la Mancha, Valencia, Extremadura, Madrid y Murcia

Z. norte: Aragón, La Rioja, Navarra y País Vasco

Z. cantábrica: Castilla y León, Galicia, Asturias y Cantabria

Tabla 2.1. Distribución geográfica de la producción nacional de cemento (%)

Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2004-2010)

2.2.2. Consumo

Al igual que la variable analizada en el apartado anterior, los datos del consumo de cemento en España muestran dos etapas claramente diferenciadas en el periodo objeto de estudio (ver Gráfico 2.6). Una primera, hasta 2007, donde se consolida el incremento de su valor, con 55,9 millones de toneladas, debido al boom inmobiliario residencial, así como a la recuperación prolongada de la obra civil (tanto la rehabilitación como la nueva construcción); ambos sectores, principales destinatarios de la producción cementera en nuestro país.

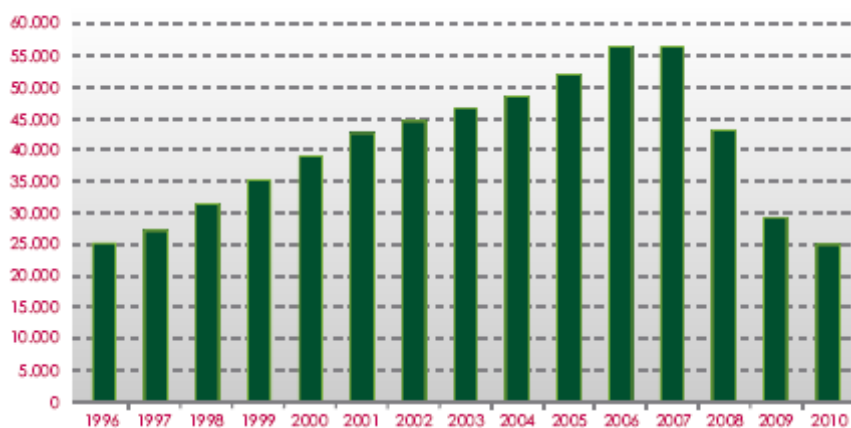


Gráfico 2.6. Evolución del consumo de cemento (miles tn)

Fuente: [OFICEMEN, 2011c]

En la segunda etapa, que comienza en 2008, el consumo aparente de cemento experimenta una caída sostenida en los cuatro últimos años, alcanzando en 2010 una cifra de 24,5 millones de toneladas, con una tasa de variación interanual del -15,2% (ver Gráfico 2.6).

Esto ha supuesto que España pierda posiciones en términos de consumo a nivel europeo, ya que ha pasado a ser el tercer país después de Italia y Alemania. En términos per cápita (p.c.), durante 2010 en España se consumieron unos 532 kg de cemento, lo que sitúa a nuestro país por encima de la media europea (419 kg p.c.), pero detrás de países como Italia y Portugal (con 565 y 546 kg p. c., respectivamente). Otros países de su entorno, como Francia o Alemania, han presentado una ratio menor (313 y 301 kg p.c., respectivamente).

Las dos etapas diferenciadas anteriormente, también marcan cambios en el destino final del consumo de cemento en España. Hasta mediado de 2008, los consumidores mayoritarios son el sector de la vivienda y edificación no residencial que han absorbido, por término medio, más del 50% de la producción de cemento. Esta distribución cambia a partir de 2009, manteniéndose hasta la actualidad, siendo la obra civil el principal consumidor de cemento (ver Gráfico 2.7). Prueba de ello es que el 65% del consumo se ha destinado a obra civil (principalmente para carreteras y obras viales) frente al 35% destinado a edificación (vivienda y edificación residencial conjuntamente).

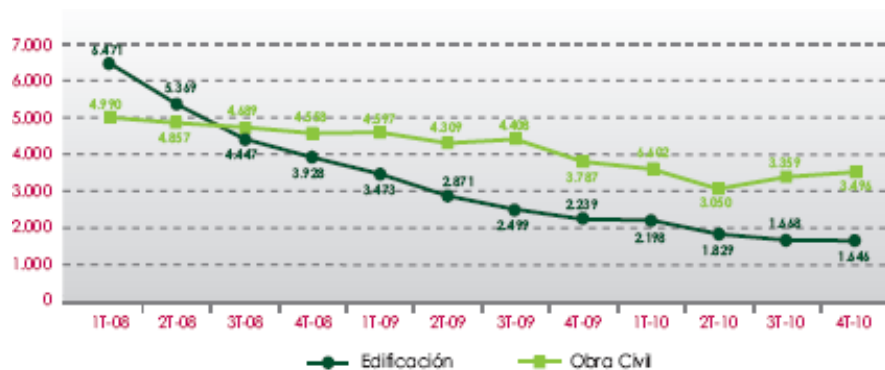


Gráfico 2.7. Evolución trimestral del consumo nacional de cemento por tipos (miles tn)
Fuente: [OFICEMEN, 2011c]

Aunque este cambio de tendencia contribuyó a que ni la actividad constructora ni el consumo de cemento derivado de ella se resintiera en exceso, las perspectivas de

mejora del sector no son nada alentadoras, en tanto en cuanto las medidas puestas en marcha para paliar los síntomas de la crisis llevan implícitas recortes considerables en la inversión, incluidas las destinadas a proyectos de rehabilitación y construcción de edificios públicos.

A nivel regional, cabe destacar que en 2010, en la mayoría de las comunidades autónomas se ha destinado más del 50% del consumo de cemento a obra civil. Muy por encima de la media se encuentran Extremadura con el 82% del consumo, Galicia y Baleares (ambas con un 79%) o Castilla y León (77,2%) (ver Tabla 2.2).

Zonas	Comunidad	Edificación		Obra civil
		Residencial	No residencial	
	C. Baleares	12,6	8,4	79
	C. Canaria	20,4	9,3	70,3
Total Z. Insular		16,8	8,9	74,3
	C. Asturias	14,4	11,2	74,4
	C. Cantabria	17,4	11,4	71,2
	C. Galicia	13,5	7,5	79
Total Z. Cantábrica		14,2	9	76,9
	C. Extremadura	10,7	7,3	82
	C. Madrid	28,9	24,9	46,2
	Castilla-La Mancha	22,8	18,2	59
	Castilla y León	10,3	12,4	77,2
Total Z. Centro		18,9	16,7	64,4
	C. Murcia	20,8	16,5	62,7
	C. Valenciana	20,2	17,2	62,5
	Cataluña	15,8	22,2	62
Total Z. Mediterránea		17,6	20,2	62,2
	C. Aragón	19,2	20,9	59,9
	C. Navarra	22,7	36	41,3
	C. País Vasco	20,3	15,2	64,5
	C. Rioja	17,8	16,4	65,8
Total Z. Norte		20	19,7	60,3
	C. Andalucía	22,9	16,6	60,6
Total Z. Sur		22,9	16,6	60,6
TOTAL		18,7	16,5	64,8

Tabla 2.2. Consumo de cemento según el destino final por CC.AA. (%)
Fuente: [OFICEMEN, 2011c]

2.2.3. Ventas

Otro de los indicadores económicos de la evolución del sector corresponde al total de ventas, que lógicamente ha seguido la misma tendencia que las variables anteriormente analizadas.

Si analizamos las ventas por zonas geográficas, basándonos en la información correspondiente a las empresas asociadas a Oficemen (ver Tabla 2.3), todas han experimentado un decremento. La zona Central es la que absorbe el mayor volumen del sector en 2010, con casi 5,3 millones de toneladas vendidas, destacando la región de Madrid con el 34% del total de la zona, lo que supuso una caída del 19,4% respecto al año 2009.

En segundo lugar se encuentra la zona Oeste con unas ventas de 5,1 millones de toneladas en este año, seguidas de Andalucía y Cataluña con unos volúmenes de ventas de 3,5 y 3,2 millones de toneladas, respectivamente. Finalmente la zona con menor venta de cemento es la zona norte, con aproximadamente 2,5 millones de toneladas.

Zonas	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Variación 2010/2009 %
Andalucía	8.657,5	8.407,0	8.047,6	5.963,2	4.082,9	3.480,6	-14,8
Cataluña	6.830,6	7.785,5	7.695,3	5.844,6	4.104,6	3.204,3	-21,9
Extremadura	1.317,6	1.624,0	1.586,9	1.169,4	869,9	684,9	-21,3
Madrid	4.838,1	4.873,5	3.419,1	2.321,0	1.942,6	1.804,9	-7,1
Castilla la Mancha	2.510,1	2.705,2	2.930,5	2.437,8	1.713,3	1.285,1	-25
Levante	6.329,7	6.425,0	5.676,7	3.781,3	2.033,9	1.514,2	-21,3
Total z. central	14.995,5	15.627,8	13.613,2	9.709,5	6.559,7	5.289,2	-19,4
Z. norte (1)	3.945,0	4.531,2	4.712,5	3.859,0	2.935,5	2.483,2	-15,4
Cantábrico	4.127,3	4.469,7	4.895,1	3.993,7	3.462,5	3.182,4	-8,1
Castilla y León	2.912,1	3.245,7	4.335,7	3.316,7	2.211,0	1.933,4	-12,6
Total z. oeste	7.039,4	7.715,4	9.230,8	7.310,4	5.673,5	5.115,8	-9,8
Total	41.468,1	44.066,8	43.299,4	32.686,8	23.356,3	19.573,1	-16,2

(1) Aragón, Navarra, País Vasco y Rioja

Tabla 2.3. Ventas de cemento gris por zonas geográficas (miles tn)
Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2007-2010)

Atendiendo al tipo de clientes, el sector cementero español realiza sus ventas a través de cuatro canales de distribución: empresas hormigoneras, empresas de prefabricados de hormigón, constructoras como cliente directo y almacenistas intermedios.

En función del volumen, las hormigoneras⁴³ y los almacenistas son sus principales destinatarios, con el 58,3 y 21,7%, por término medio, del total de las ventas, respectivamente. Una proporción inferior es distribuida a las empresas de prefabricado, y un porcentaje muy reducido se vende a la empresas constructoras directamente (ver Gráfico 2.8).

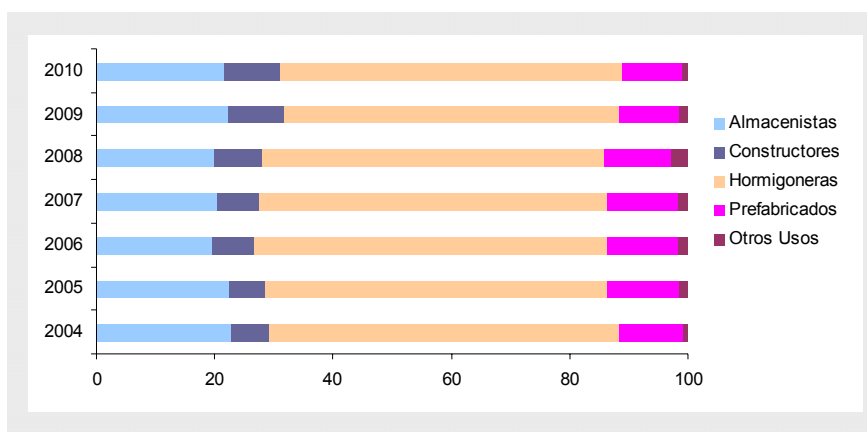


Gráfico 2.8. Cuota de ventas por canales de distribución del cemento (%)
 Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2004-2010)

Por tipo de cementos (ver Tabla 2.4), aunque las ventas del cemento gris y blanco han experimentado en el periodo 2008-2010 un descenso acusado (35,99% y 40% respectivamente), la proporción de cada categoría se mantiene prácticamente sin variaciones, correspondiendo para ambos cementos, aproximadamente el 97 y 3% respectivamente del total de las ventas.

⁴³ Conviene resaltar que, actualmente, las operaciones con las hormigoneras se realizan prácticamente en su totalidad a granel (un 99,6% de la venta), esta modalidad representa el 69,4% de las ventas a granel del sector.

Tipo cemento	2.008	%	2009	%	2010	%	2010/2008
C. blanco	1.092.598	2,95	752.939	2,81	655.424	2,77	-40,01
C. gris	35.983.280	97,05	26.010.324	97,19	23.032.207	97,23	-35,99
Total	37.075.878	100	26.763.263	100	23.687.631	100	-36,11

Tabla 2.4. Distribución de ventas por tipos de cemento (tn)
Fuente: elaboración propia a partir de [OFICEMEN, 2011c]

Por otra parte, la escasa influencia del precio del cemento en el precio final de la construcción y la existencia de pocos productos sustitutivos en el mercado, explican la dependencia (casi exclusiva) del precio del cemento de su oferta. Según el índice oficial de precios, que se utiliza a efectos de la revisión de contratos con la Administración Pública y que se refiere a precios a pie de obra, el incremento sostenido del periodo analizado (1990-2010) se consolida en 2008 con un valor de 155,3, año a partir del cual cambia la tendencia, disminuyendo hasta 144,7 en 2010, reducción que también se ha visto reflejada en el índice de precios industriales [OFICEMEN, 2011c] (ver Gráfico 2.9).

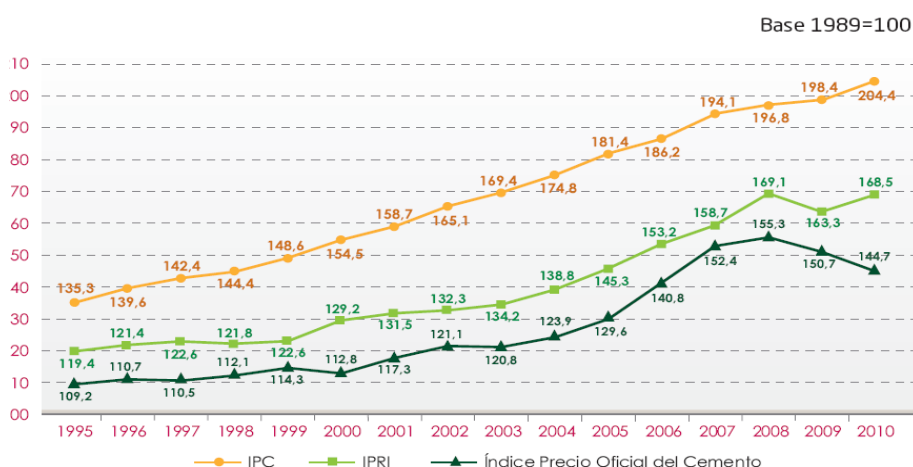


Gráfico 2.9. Evolución anual de distintos índices de precios
Fuente: [OFICEMEN, 2011c]

2.2.4. Comercio exterior

El cambio de tendencia en el consumo nacional del cemento en el periodo 2000-2010 (ver Gráfico 2.6) marcado por los acontecimientos apuntados anteriormente, explica el

repunte que experimentaron las importaciones del producto a principio de la década y por ende la disminución de las exportaciones, representando actualmente ambas magnitudes un porcentaje reducido del total de la producción y un comportamiento inverso (ver Gráfico 2.10), lo que confirma la escasa relevancia que el comercio internacional sigue teniendo para este sector, teniendo en cuenta las características propias de sus procesos productivos y de sus productos (producto pesado y de escaso valor en relación a su peso).

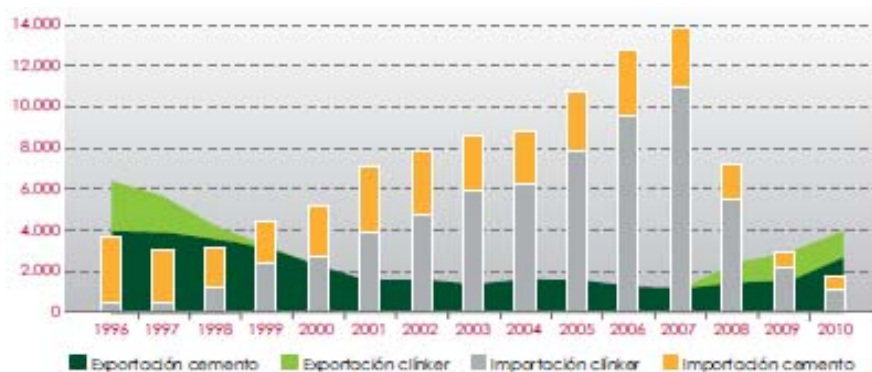


Gráfico 2.10. Evolución del comercio exterior del sector español del cemento (miles tn)
Fuente: [OFICEMEN, 2011c]

Al igual que en etapas anteriores al periodo analizado (2000-2010), el destino de las exportaciones sigue concentrándose principalmente en el continente europeo (ver Gráfico 2.11), salvo en los últimos años (2008-2010), en los que ha incrementado considerablemente las exportaciones a los países africanos (aproximadamente un 800% respecto a 2002), representando en 2010 el 55,11% del total de las exportaciones de cemento. Igualmente, las exportaciones al continente americano, aunque siguen representando un porcentaje mínimo de las totales (aproximadamente el 9% en 2010), han experimentado un considerable incremento en los dos últimos años.

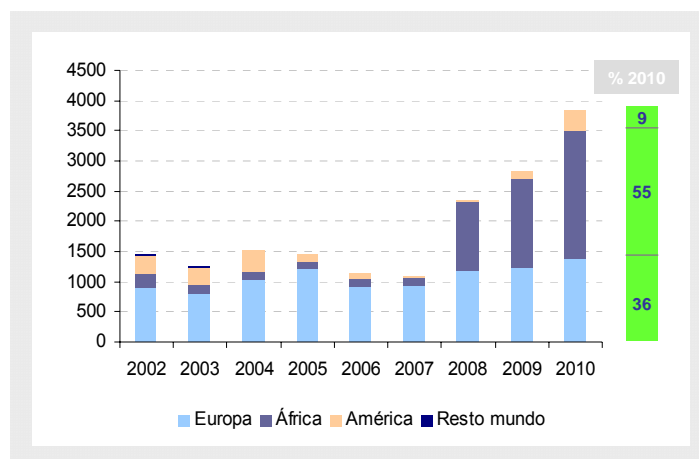


Gráfico 2.11. Destino de las exportaciones españolas de cemento y clínker (miles tn)

Fuente: elaboración propia a partir de Memorias Oficemen (2004-2010)

Por otro lado, el origen de las importaciones de cemento sigue concentrándose principalmente fuera de Europa, siendo actualmente China y Turquía sus principales proveedores (representan el 35,25 y el 21,8%, respectivamente) y los países que continúan liderando la producción a nivel mundial (ver Tabla 2.5).

País	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Portugal	0,004	0,671	1,402	1,143	1,162	1,518	0,958	0,375	0,413
Italia	0,246	0,416	0,349	0,702	0,894	0,886	0,746	0,230	0,262
Grecia	0,222	0,133	0,264	0,563	0,615	0,462	0,181	0	0,015
Países Bajos	0	0	0	0	0	0,077	0,113	0,083	0,083
Francia	0,111	0,139	0,195	0,186	0,175	0,046	0,080	0,019	0,015
Alemania	0,100	0,037	0,176	0,137	0,051	0,001	0,001	0,001	0,011
Otros Países UE	0,473	0,305	0,072	0,065	0,183	0,002	0,001	0,001	0,001
Total UE	1,156	1,700	2,459	2,796	3,080	2,990	2,080	0,709	0,800
China	0	0	0,000	2,452	5,256	7,360	3,390	1,004	0,365
Turquía	2,601	2,244	1,267	1,415	0,607	0,743	0,417	0,621	0,374
Filipinas	0	0	0	0,051	0,715	0,838	0,450	0,160	0,099
Tailandia	0	0	0	0	0,406	0,614	0,378	0,217	0,077
Egipto	0,080	1,589	3,472	2,321	1,345	0,751	0,282	0,072	0,003
Israel	0	0	0,099	0,062	0,179	0,039	0,103	0,060	0,015
Argelia	0	0	0	0	0	0,084	0,022	0,004	0
Túnez	0	0	0,076	0,128	0,058	0,025	0,003	0,000	0,009
Otros países	3,643	2,621	1,464	2,513	1,098	0,509	0,082	0,006	0,000
Resto del mundo	6,323	6,454	6,378	7,923	9,664	10,879	5,104	2,140	0,941
Total	7,479	8,154	8,837	10,719	12,745	13,869	7,184	2,848	1,741

Tabla 2.5. Origen de las importaciones mundiales de cemento y clínker (millones tn)
Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2004-2010)

2.2.5. El sector del cemento en Europa

Para completar el estudio del sector del cemento en España, dedicamos este apartado a analizar su comportamiento en el marco de la Unión Europea, a través de las variables estudiadas para aquel en los apartados anteriores.

Así pues, los datos del Gráfico 2.12 reflejan una caída generalizada de la producción en Europa, en los últimos años, tanto a nivel general como por países, que a su vez ha visto reducida su participación en la producción mundial⁴⁴, pasando de una tasa del 15,5% en 2000 a una tasa del 7,39% en 2010 [OFICEMEN, 2011c].

⁴⁴ La producción mundial se ha incrementado debido, principalmente, al incremento sostenido de la producción china. En 2010, aproximadamente 3,3 billones de toneladas de cemento fueron producidas en el mundo, siendo China la mayor productora con un 55% de la producción mundial, seguida de la U.E. con un 7,39%, India 6,7%, U.S. 1,9% y Japón con un 1,7% [Ammenberg et al., 2011].

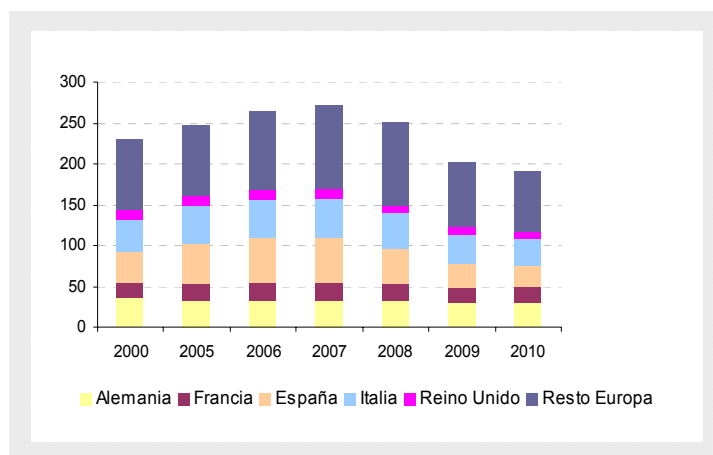


Gráfico 2.12. Producción de cemento en la UE
Fuente: [OFICEMEN], [CEMBUREAU]

Por países, España, junto con Italia y Reino Unido ha experimentado una reducción superior a la media europea (23,22%) en el periodo 2005-2010, mientras que en Alemania y Francia ha sido inferior a la media (3,8 y 7,6%, respectivamente).

Asimismo, tal y como se recoge en el Gráfico 2.13, para el mismo periodo analizado (2005-2010), la distribución de la producción europea por países también ha experimentado algunos cambios. Países, como España, Italia y Reino Unido han visto reducida su cuota de producción en el ámbito europeo en un 47,39, 8,6 y 14,17%, respectivamente, mientras que el resto de los principales países productores europeos, han mantenido o incrementado ligeramente su cuota.

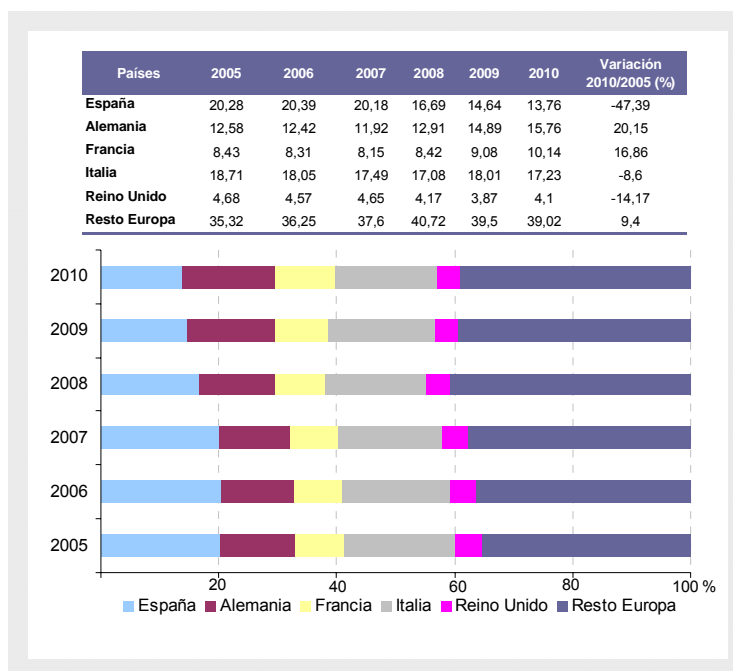


Gráfico 2.13. Distribución de la producción europea por principales países productores (%)
 Fuente: [OFICEMEN], [CEMBUREAU]

Como se aprecia en el Gráfico 2.14, el volumen de producción de cemento de los principales países productores europeos se obtiene en un total de 256 plantas industriales, en su mayoría (70%), plantas integrales, que como expusimos en el Apartado 2.1.2, son las que desarrollan el proceso de producción del cemento íntegramente, desde la extracción de la materia prima, hasta la obtención del cemento, incluyendo la fase intermedia de clinkerización. En cuanto a la proporción de plantas integrales sobre el total, España, junto con Francia y Reino Unido, superan la media europea, a diferencia de Alemania e Italia que no superan el 65% del total de sus instalaciones.

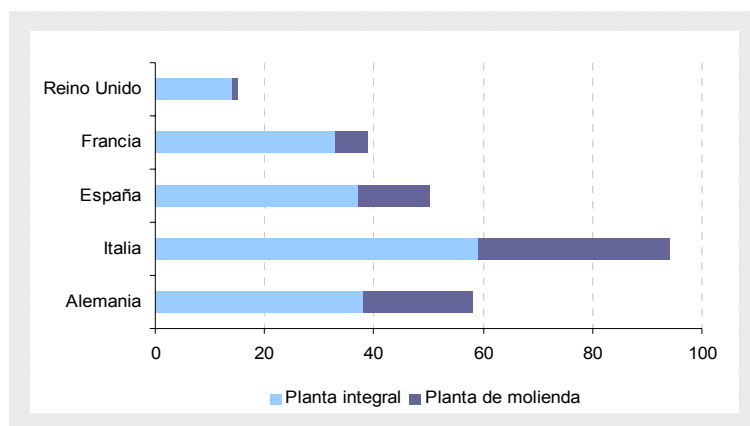


Gráfico 2.14. Tipo de plantas de cemento en Europa (nº plantas)
Fuente: elaboración propia a partir de [EIPPCB, 2010]

Por tipos de cementos, comprobamos en el Gráfico 2.15, que igual que sucede en España, el cemento tipo I Pórtland con adiciones es el que tiene mayor cuota de producción a nivel europeo.

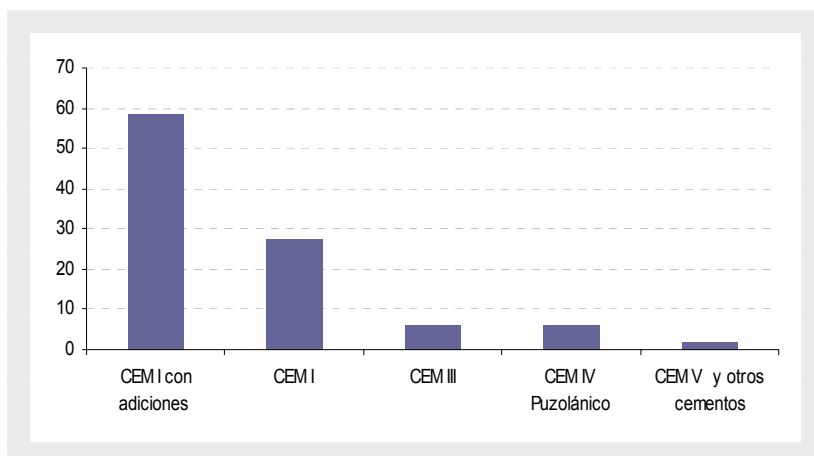


Gráfico 2.15. Cuota de producción europea por tipos de cemento (%)
Fuente: elaboración propia a partir de [Ammenberg et al., 2011]

En relación a otra de las variables analizadas, el consumo de cemento, y centrándonos en los cuatro últimos años del periodo analizado, comprobamos como, a nivel europeo, también ha experimentado un descenso generalizado, cuyas variaciones recogemos en la Tabla 2.6.

País	2007	2008	2009	2010	% total 2010
Italia	46,36	41,81	36,08	33,926	18,23
Alemania	27,35	27,59	25,25	24,6	13,22
España	55,997	42,696	28,91	24,5	13,17
Francia	24,8	24,228	20,38	19,78	10,63
Polonia	16,76	17,12	15,32	15,63	8,40
Reino Unido	14,48	12,428	9,45	9,8	5,27
Resto Europa (1)	80,193	79,918	61,63	57,823	31,08
Total UE 27	265,94	245,79	197,02	186,059	100,00

(1) Ninguno de los países supera el 4% del consumo total

Tabla 2.6. Consumo de cemento en Europa
Fuente: [CEMBUREAU] y [OFICEMEN]

A pesar de que España ha visto reducido su consumo en un 56%, sigue en 2010 a la cabeza de los consumidores, después de Italia y Alemania, con el 13% del total del consumo europeo.

Desde el punto de vista del consumo de cemento per cápita, en 2010, España registra la cifra de 532 kilogramos por habitante y año, lo que supone un descenso del 15,5% respecto a 2009. Italia alcanza la cifra de 565 kg p.c., mientras que Francia se sitúa con 313 kg p.c., Alemania en 301 kg p.c. y el Reino Unido cifra esta ratio en un valor sobre los 159 kg p.c. Chipre continúa siendo el país de la eurozona con mayor consumo per cápita (1.642 kg p.c.).

En este contexto de reducción de consumo y producción interna, aunque la tendencia generalizada ha sido un incremento de las exportaciones y una disminución de las importaciones, estas últimas han experimentado unas variaciones más significativas que las primeras, con comportamientos diferentes según países. En este sentido, como ya vimos, España destaca con una tasa de variación negativa de las importaciones del 87,44%, desde que comenzará a sentirse los primeros efectos de la crisis, perdiendo el liderazgo de las importaciones en la zona europea, pasando a ocupar el tercer puesto del ranking, después de Francia e Italia. La evolución de dichas variables para los principales países europeos se recoge en el Gráfico 2.16.



Gráfico 2.16. Evolución del comercio exterior del sector cementero en la UE (millones tn)
Fuente: elaboración propia a partir de Memorias Oficemen (2007-2010)

PARA FINALIZAR este capítulo, destacamos, del análisis desarrollado, que a pesar de que existen dos etapas claramente diferenciadas en la evolución del sector en la primera década del siglo actual (reflejo, como en etapas anteriores, de la evolución de los ciclos económicos), el compromiso medioambiental de esta industria ha estado siempre presente en la gestión de las empresas, incluso en etapas difíciles, impulsado por la importante reconversión tecnológica que ha sufrido este sector en los últimos años, bajo un actualizado marco normativo en relación a diferentes aspectos e impactos medioambientales (emisiones atmosféricas, recursos energéticos, residuos, etc.). Ese compromiso se materializa en diferentes actuaciones, que condicionadas por las características propias del proceso de producción y de las circunstancias económicas de cada momento, integran la gestión medioambiental, a cuyo análisis dedicamos el siguiente capítulo, para continuar con el plan de trabajo fijado al iniciar este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Alsop et al., 2007] Alsop, P.A.; Chen, H. y Tseng, H. (2007): *Cement Plant Operations Handbook: For Dry Process Plants*, International Cement Review, U.K.

[Ammenberg et al., 2011] Ammenberg, J.; Feiz, R.; Helgstrand, A.; Eklund, M. y Baas, L. (2011): "Industrial symbiosis for improving the CO₂ - performance of cement", Final report of the CEMEX-Linköping University industrial ecology project.

[CEMBUREAU]

<http://www.cembureau.be/>.

[EIPPCB, 2010] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (2010): *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide manufacturing Industries*. Disponible en web: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf. (Traducido al español con el título: *Prevención y Control Integrados de la Contaminación Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio RC-08. Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08*. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento (Aprobada por Real Decreto 956/2008 de 6 de junio)).

[FLACEMA, 2009] Fundación laboral andaluza del cemento y el medio ambiente (2009): *Memoria de sostenibilidad del sector cementero andaluz*.

[Locher, 2006] Locher, F.W. (2006): *Cement: principles of production and use*, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf.

[Ministerio de Fomento, 2009] Ministerio de Fomento (2009): *RC-08. Instrucción para la recepción de cementos*, Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.

[Norma UNE 80301:1996] Norma UNE 80301:1996: Cementos. Cementos comunes. Composición, especificaciones y criterios de conformidad.

[Norma UNE 80601:2005] Norma UNE 80601:2005. Cemento. Evaluación del

cumplimiento del cemento con el límite reglamentario del contenido de cromo hexavalente soluble en agua, de la Orden Ministerial PRE/1954/2004 de 22 de junio de 2004, transposición de la Directiva 2003/53/CE.

[Norma UNE-EN 197-1:2000] Norma UNE-EN 197-1:2000. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

[OFICEMEN, 2005] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2005): *Memoria Oficemen 2004*.

[OFICEMEN, 2006] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2006): *Memoria Oficemen 2005*.

[OFICEMEN, 2007] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2007): *Memoria Oficemen 2006*.

[OFICEMEN, 2008a] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2008): *Guía de Buenas Prácticas para la Prevención de Riesgos Laborales en el Sector Cementero Español*.

[OFICEMEN, 2009d] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2009): *Memoria Oficemen 2008*.

[OFICEMEN, 2010b] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2010): *Memoria Oficemen 2009*.

[OFICEMEN, 2011c] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2011): *Memoria Oficemen 2010*.

[OFICEMEN] <http://www.oficemen.com>.

[RD 457/2007] Real Decreto 475/2007, de 13 de abril, por el que se aprueba la Clasificación Nacional de Actividades Económicas 2009 (CNAE-2009).

[Rosado, 2004] Rosado-Cubero, A. (2004): "La Industria del Cemento en España. Magnitudes y evolución entre 1994 y 2003", *Economía Industrial*, Nº 355 y 366, pp. 239-249.

[SABI] Sistema de Análisis de Balances Ibéricos: base de datos económica-financiera.

[Sanjuán, 2010] Sanjuán, M.A. (2010): "Determinación de los componentes del cemento", *Revista Técnica Cemento Hormigón*, N° 937, pp. 4-34.

[Saxena, 2003] Saxena, J.P. (2003): *Refractory Engineering and Kiln Maintenance in Cement Plants*, Tech Books International, New Delhi, India.

[Shackelford y Doremus, 2008] Shackelford, J.F. y Doremus, R.H. (2008):

Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing, Springer+Business Media, New York, USA.

[WBCSD/IEA, 2009] World Business Council for Sustainable Development/ International Energy Agency (2009): *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050*, OECD/IEA and WBCSD.

Capítulo 3

La producción sostenible del cemento

3.1. Producción del cemento y el medio ambiente. Impactos y aspectos clave

3.2. Gestión medioambiental. Prácticas y resultados en el sector cementero español

3.2.1. Valorización material de los residuos

3.2.2. Alternativas para reducir el consumo energético: especial referencia a la valorización energética de residuos

3.2.3. Medidas para mejorar y controlar la calidad del aire

3.2.4. Otras actuaciones medioambientales

3.2.5. Valoración económica de la gestión medioambiental

3.2.6. Otros aspectos de interés relacionados

3.3. La producción del cemento y el Protocolo de Kyoto: balance e implicaciones futuras

3.4. Mirando al futuro: nuevos retos y oportunidades

Capítulo 3

La producción sostenible del cemento

Como hemos puesto de manifiesto en el Capítulo 2, la competitividad del sector del cemento en los últimos años, ha venido marcada, a parte de las circunstancias económicas de cada momento, por el gran esfuerzo realizado por compatibilizar su actividad productiva con la protección y conservación de su entorno local y global. La búsqueda de un modelo de producción sostenible y rentable, tanto desde el punto de vista económico como social y medioambiental, se ha convertido en línea prioritaria de actuación de las empresas del sector en los últimos tiempos.

Las características propias de sus procesos de producción (extracción de la materia prima, consumo intensivo de energía, homogeneidad de la producción, tecnología empleada, etc.) condicionan las actuaciones encaminadas a proteger y conservar el entorno natural, que integran la gestión medioambiental de las plantas de cemento, cuyos avances y resultados pasamos a comentar en los siguientes apartados, tras dedicar el que sigue a esta introducción, a conocer los principales aspectos e impactos medioambientales del proceso de producción del cemento.

3.1. PRODUCCIÓN DEL CEMENTO Y EL MEDIO AMBIENTE. IMPACTOS Y ASPECTOS CLAVE

El sector del cemento es uno de los sectores industriales considerados potencialmente más contaminantes. Las características propias del proceso de producción y del producto a fabricar condicionan el impacto sobre el medio ambiente, dependiendo de la materia prima empleada (características y composición), del tipo de producto fabricado (cemento y/o clínker), de la fase del proceso productivo del cemento que se esté desarrollando y del equipamiento y diseño de las instalaciones (ver Figura 3.1).

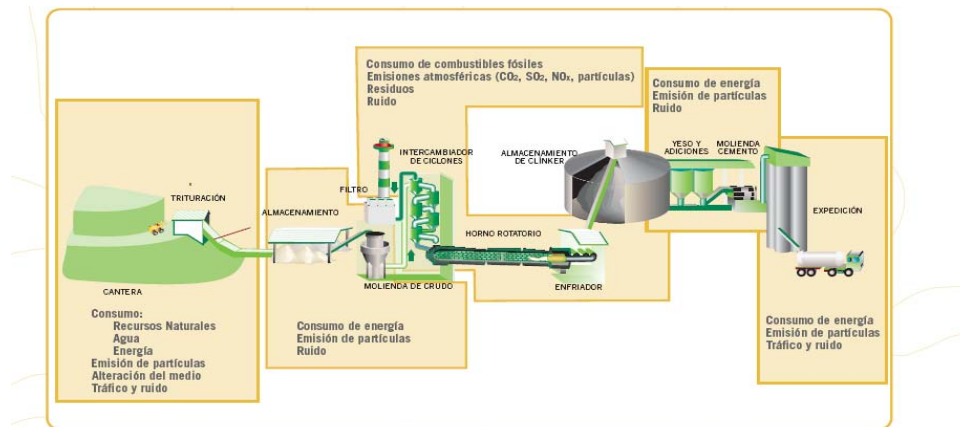


Figura 3.1. El proceso de producción del cemento y el medio ambiente: consumos e impactos
Fuente: [FLACEMA, 2009]

Así pues, como se desprende de esta figura los aspectos e impactos medioambientales más importantes asociados a la fabricación del cemento son los siguientes ([Chen et al., 2010a], [OFICEMEN, 2009b], [WBCSD/IEA, 2009], [MMA, 2004], [Águila, 2002]):

a) Consumo de materias primas naturales

La caliza y la arcilla, principales materias primas de la producción de cemento, son materiales naturales que, afortunadamente, se encuentran en abundancia en casi todo el planeta, sin embargo, como todo recurso natural, no son inagotables, además que sacarlos de su estado natural provoca afectaciones de la zona donde se encontraban originalmente. Esta situación se agrava por el hecho de que los volúmenes de materiales que se requieren para la producción de cemento son muy grandes. La producción mundial actual se estima en alrededor de tres billones de toneladas anuales, de manera que para producir una tonelada de cemento se consumen 1,6 toneladas de materias primas naturales, las cuales nunca serán renovadas [Jonson, 2011].

b) Consumo de recursos energéticos

La fabricación de cemento es una actividad industrial intensiva en energía, con un componente térmico procedente de la cocción de la materia prima empleada para la obtención del clínker, y otro eléctrico, principalmente, derivado de las operaciones de

molienda del cemento y en menor medida, de la manipulación de materiales e impulsión de gases.

El proceso de calcinación en los hornos para la formación del clínker, consume la mayor parte del combustible que necesita la producción de cemento, representando aproximadamente el 90% de la energía total consumida en la fábrica. Dicho proceso requiere de un aporte energético teórico (reacciones químicas endotérmicas) de 1.700 a 1.800 MJ/tn de clínker.

Además, la energía térmica consumida en el proceso de producción depende de la vía de fabricación, del grado de humedad y de otras propiedades de las materias primas empleadas⁴⁵. Su consumo puede variar de un rango de 2.900-3.000 MJ/tn de clínker para hornos de vía seca hasta 5.000-6.000 MJ/tn para hornos de vía húmeda. El rango actual de consumo de energía térmica para los diferentes tipos de procesos se muestra en la Tabla 3.1.

Tecnología	MJ/tn clínker (1)	Promedio MJ/tn clínker (2)
Horno rotatorio con precalentador de ciclones multietapa y precalcinador, proceso vía seca	3.000 - 4.000	3.382
Horno rotatorio con precalentador de ciclón, proceso vía seca	3.100 - 4.200	3.699 (3)
Proceso vía semiseca y semihúmeda (horno Lepol)	3.300 - 5.400	3.844
Horno largo vía seca	<5.000	4.489
Horno largo vía húmeda	5.000 - 6.400	6.343
Horno de eje vertical	3.100 - 6.500	-
La demanda de electricidad varía de 90 a 150 KWh/tn de cemento		
(1) [EIPPCB, 2010]		
(2) [WBCCSD/CSI, 2009b]		
(3) No está incluida la energía necesaria para el secado		

Tabla 3.1. Demanda específica de energía en la producción del clínker
Fuente: [Moya et al., 2010]

⁴⁵ Como la cristalografía/mineralogía de los compuestos que lo conforman y de la presencia de minerales fundentes (hierro, aluminio). En el caso del cemento blanco, en la que las materias primas son muy pobres en fundentes (para no oscurecer el clínker) requieren temperaturas más altas de clínkerización (en torno a 150° C más), lo que implica necesariamente un mayor consumo energético, que puede oscilar entre los 5.500 y 6.500 MJ/tn de clínker [MMA, 2004].

De esta manera, para un proceso de vía seca el consumo medio de energía térmica es de 3,38⁴⁶ GJ/tn de clínker, de los cuales 1,76 GJ/tn procede de la termodinámica del proceso, 0,2-1 GJ/tn del secado de la materia prima (para un contenido de humedad de 3-15%) y el resto se corresponde con pérdidas térmicas del proceso [Hoenig y Twigg, 2009].

Por su parte, el consumo de energía eléctrica, que representa alrededor del 20% de las necesidades energéticas de cemento [Capros et al., 2008] varía en un rango de 90-150 KWh/tn de cemento, dependiendo de la facilidad de molturación de los materiales, de la eficiencia energética de los equipos de molienda y de la finura del material molido. En 2009 la media europea de consumo de energía eléctrica es de 111 KWh/tn de cemento [WBCSD/CSI, 2009b].

La principal partida del consumo de energía eléctrica se deriva del uso de los molinos (molienda de las materias primas, los combustibles sólidos y la molienda del cemento), que representa más del 60% del consumo de electricidad [Hoenig y Twigg, 2009] y del tubo de escape de los ventiladores (horno/rawmills y molinos de cemento), que consume alrededor de un 20% del total la energía eléctrica [EIPPCB, 2010].

c) Emisiones de contaminantes a la atmósfera

Las principales emisiones a la atmósfera de la industria del cemento se producen durante el proceso de calcinación de las materias primas para la obtención del clínker. Aquellas proceden principalmente de dos fuentes, de la combustión de los materiales usados como combustibles y de las reacciones físicas y químicas de las materias primas procesadas, que se producen durante la formación de los componentes del clínker.

Los principales contaminantes que se emiten en la fabricación del cemento son:

- **Partículas**, procedentes de un lado, de las operaciones de almacenamiento, transporte y manipulación de los materiales pulverulentos presentes en las fábricas (fuentes dispersas o difusas), y de otro lado, de los hornos, los molinos

⁴⁶ Está dentro del intervalo (2,9-3,3 GJ/tn de clínker) reconocido para las MTDs en condiciones óptimas de producción del clínker ([EIPPCB, 2010] y [Worrell et al., 2008]), que ha sido revisado respecto a la versión anterior del Documento de Referencia sobre MTD, basado en un proceso seco con multi-etapa de precalentamiento y pre-calcinación (3 GJ/tn de clínker) [EIPPCB, 2001].

de crudo, los enfriadores de clínker y los molinos de cemento (fuentes localizadas o puntuales⁴⁷).

El rango de emisiones de partículas de los hornos de cemento españoles está entre 15-150 mg/m³, dentro de la media europea (5-200 mg/m³) [MMA, 2004].

- Gases de combustión en la fase de preparación del crudo: **óxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre.**

Los óxidos de nitrógeno son los principales componentes de los gases emitidos y se forman como consecuencia inevitable de las altas temperaturas de combustión (alrededor de 1.500°C de temperatura de la llama). El origen se debe a la oxidación del nitrógeno del aire (se produce principalmente en la zona de clínkerización del horno, dependiendo de la temperatura alcanzada y del contenido de oxígeno) y del presente en el combustible. El valor que alcanzan las emisiones de dichos contaminantes dependerá fundamentalmente de las características de la cocción de la materia prima y del tipo de horno que se emplee.

El rango de emisiones de óxidos de nitrógeno en los hornos de cemento españoles está entre 400-2.800 mg/m³, dentro de la media europea (200-3.000 mg/m³) [MMA, 2004].

Las emisiones del otro gas de combustión de la industria del cemento, dióxido de azufre (SO₂), están directamente relacionadas con el contenido en compuestos volátiles de azufre (sulfuros y azufre orgánico), principalmente en las materias primas y en menor medida, en los combustibles utilizados en el proceso de fabricación. Los compuestos de azufre presentes en las materias primas se evaporan en cuanto la temperatura del crudo empieza a aumentarse, emitiéndose el 30% ó más desde las primeras etapas del proceso, incorporándose el resto del sulfuro al clínker en el final del proceso, parte del

⁴⁷ Las emisiones desde fuentes puntuales se generan durante todo el proceso productivo (combustión, molienda y secado) y se caracterizan por estar canalizadas a través de conductos y chimeneas. Por su parte, las emisiones desde fuentes difusas están asociadas, generalmente, a operaciones y actividades auxiliares al proceso productivo propiamente dicho y se caracterizan por no estar canalizadas y por emitir, básicamente, partículas. Las emisiones de estas actividades pueden reducirse con sencillas medidas como la instalación de barreras contra el viento en los almacenamientos de materiales a la intemperie o la pavimentación, limpieza y riego de viales [OFICEMEN, 2009b] (ver Cuadro 3.1).

cual (entre el 20 y el 70% del SO₂) será capturado por las materias primas finamente molidas. Sin embargo, el azufre presente en los combustibles que alimentan los hornos no genera emisiones significativas de SO₂, debido a la naturaleza fuertemente alcalina en las zonas de sinterización y calcinación del proceso.

Las emisiones de SO₂ en los hornos españoles de cemento, al igual que en los europeos, están en el rango, oscilando desde valores inferiores de los límites de detección hasta valores de 3.500 mg/Nm³.

- Otros contaminantes emitidos desde fuentes puntuales, en función del tipo de proceso empleado (vía seca, húmeda, semiseca y semihúmeda), como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, dioxinas y furanos y metales pesados.

El dióxido de carbono (CO₂), que proviene una parte de la calcinación de la roca caliza⁴⁸ y la otra de la combustión de los combustibles, aunque comúnmente no se considera de por sí un elemento contaminante, debido a que no es tóxico, constituye otra de las emisiones dañinas de la producción de cemento, debido a los grandes volúmenes en que se presenta⁴⁹ y a su condición de GEI que, como es sabido, contribuye al exceso de calentamiento del globo terrestre. Aspecto este último de máxima relevancia en los últimos años para la industria analizada, desde que entrara en vigor el PK, cuyo cumplimiento requiere limitaciones de las emisiones de dicho contaminante procedentes de sus instalaciones, convirtiéndose dicho contaminante en un input más del proceso productivo del cemento (ver Apartado 3.3).

Aproximadamente entre el 50 y el 60% de las emisiones de CO₂ en la producción de cemento se genera durante la descomposición de la piedra caliza y otros materiales calcáreos para producir el clínker, y entre el 30 y el 40% son generadas por la quema de combustibles⁵⁰ fósiles, realizada principalmente

⁴⁸ También denominado descarbonatación de la caliza, consiste en la disociación del carbonato cálcico en óxido de calcio y CO₂ [MMA, 2004].

⁴⁹ Por cada tonelada de clínker que se produce se emiten a la atmósfera entre 600 y 700 kg de CO₂ [EIPPCB, 2010].

⁵⁰ Las emisiones resultantes de la combustión son directamente proporcionales al consumo específico, y a la relación entre el contenido de carbono y el poder calorífico del combustible empleado [MMA, 2004].

para que se alcancen las altas temperaturas necesarias en el horno y equipos asociados, como los secadores. El resto de las emisiones de dicho contaminante procede del transporte y del consumo de energía eléctrica en otros procesos de la fábrica (principalmente en los molinos y en los extractores de gases).

La evolución de las emisiones de CO₂ procedentes de la industria de cemento en España se recoge en el Gráfico 3.1, donde se puede apreciar un descenso del 35% en el periodo 2005-2010, representando un 6%, aproximadamente, del total de emisiones de este gas en España⁵¹ y, a nivel mundial, el 5% de todas las emisiones de CO₂ generadas por la actividad humana [CEMEX, 2010b].

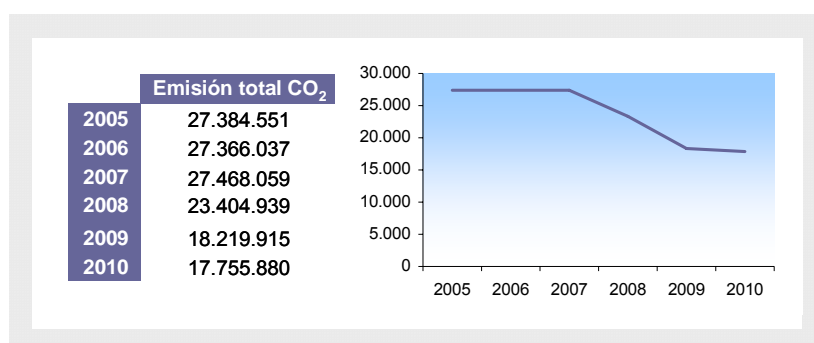


Gráfico 3.1. Emisiones de CO₂ en el sector del cemento (tn) (2005-2010)
Fuente: [RENADE]

Además de las sustancias contaminantes referidas anteriormente también se incorporan a la atmósfera otras emisiones de **compuestos orgánicos volátiles, metales y sus compuestos, dioxinas y furanos**, los cuales, en condiciones normales de producción, no tienen un impacto significativo. En el periodo de tiempo analizado, ninguno de ellos supera los valores de referencia del sector.

El desarrollo en la última década del marco legal de las emisiones de contaminantes atmosféricos de la actividad industrial, ha permitido un importante avance en lo relativo al control y a la evaluación de este impacto medioambiental en el sector industrial, incluido el de cemento (ver Apartado 3.2.6).

⁵¹ La media anual de las emisiones de CO₂ equivalentes en España en el periodo 2005-2009 ha sido de 24.768 Kg [MMAMRM, 2011b].

d) Otros impactos medioambientales

Además de los impactos medioambientales detallados en los apartados anteriores, la producción del cemento también tiene impacto sobre el agua y el suelo, aunque menos significativo que el que tiene sobre el recurso atmosférico.

En este tipo de industrias, no se producen vertidos de agua de proceso. Esto es debido a que la única incorporación de agua se produce junto con las materias primas, en los procesos de algunas industrias (vía semiseca, semihúmeda y húmeda), donde el agua incorporada al crudo, es eliminada por evaporación a su paso por el precalcinador o por el horno de clínker.

Pese a que no se generan efluentes residuales líquidos asociados a la producción, dentro de las instalaciones se generan otros efluentes residuales, como son las aguas sanitarias asociadas a vestuarios y servicios de las instalaciones, aguas pluviales contaminadas⁵² y aguas de riego de almacenamientos de combustible. Las aguas utilizadas en este último proceso contienen una carga contaminante, por lo que deben ser enviadas a un drenaje, independiente del de las aguas pluviales, para su posterior tratamiento.

En cuanto al suelo, la industria cementera, produce como único residuo de su proceso, una baja cantidad de materiales que son desechados de las materias primas durante su preparación y las partículas provenientes del by-pass o del filtro, que no pueden ser recirculadas al proceso. Este hecho, unido a la escasa utilización de agua en la instalación, hace que las posibles afecciones, derivadas del proceso industrial, al suelo no sean un riesgo significativo. Sin embargo, pueden existir riesgos asociados a la gestión inadecuada de residuos peligrosos⁵³ y a situaciones de fuga accidental de lubricante utilizado en las instalaciones, entre los que se distinguen: riesgo de contaminación del suelo asociado a grasas, residuos y aceites usados, líquidos procedentes de los transformadores eléctricos, material impregnado en hidrocarburos (filtros, chatarra, etc.), baterías y riesgos asociados a un mal almacenamiento del combustible.

⁵² El almacenamiento de combustible en acopios ubicados a la intemperie, suponen un riesgo de contaminación de las aguas pluviales, debido a la posibilidad de arrastre de materiales hasta la red de drenaje pública o a zonas sin pavimentar que favorezcan su infiltración al suelo [Foro pro-clima Madrid, 2012].

⁵³ Los residuos peligrosos deben ser correctamente gestionados en las empresas (recogidos, almacenados y etiquetados) para su posterior envío a los gestores autorizados de dichos residuos.

Además, como cualquier actividad industrial, el ruido originado en los procesos de producción proviene del funcionamiento de la maquinaria empleada (molinos, ventiladores, compresores, etc.), y a diferencia de otros sectores, salvo una producción bajo determinadas condiciones desfavorables de producción y/o meteorológicas, rara vez ocasionan episodios de emisiones de olores en su entorno⁵⁴.

3.2. GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL. PRÁCTICAS Y RESULTADOS EN EL SECTOR CEMENTERO ESPAÑOL

Las características del impacto del proceso de fabricación del cemento sobre el medio ambiente descrito en el apartado anterior y la normativa vigente reguladora de diferentes aspectos relacionados con el mismo (Directiva de Prevención y Control Integrado de la Contaminación, Protocolo de Kyoto, Directiva Marco de Residuos, etc.), condicionan las medidas adoptadas por los grupos cementeros para reducirlo y así compatibilizar la actividad productiva con la protección del entorno, optimizando el comportamiento de las instalaciones de fabricación a través de una mejora continua, la modernización de equipos y la inversión en medios de reducción de los distintos impactos ambientales.

De esta manera, en función del impacto medioambiental (ver Apartado 3.1) y en el ámbito de las MTDs, las acciones de mejoras realizadas en los últimos años por el sector, podrían agruparse fundamentalmente en las destinadas a reducir el consumo de materias primas naturales, el consumo energético, las emisiones a la atmósfera y a otras de menor relevancia, por su menor impacto. Cada una de ellas será analizada en los siguientes apartados (ver Cuadro 3.1).

⁵⁴ Cuando el contenido en azufre de los gases de emisión del horno es anormalmente alto, por captación reducida del azufre del combustible o presencia de sulfuros volátiles en las materias primas, y el contenido en humedad de los mismos es a su vez elevado, pueden formarse sulfuros de hidrógeno que, en condiciones meteorológicas desfavorables, podrían generar olores en los alrededores de la fábrica [MMA, 2004].

Impacto medioambiental	Prácticas medioambientales	
Consumo de recursos naturales	Valorización material de residuos/subproductos	MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES [MMA, 2004] [EIPPCB, 2010]
Consumo energético	Valorización energética de residuos Otras actuaciones (energías alternativas, tecnologías limpias, etc.)	
Emisiones de contaminantes a la atmósfera	Valorización (material y energética) de los residuos Otras actuaciones	
Otros impactos (visual, olor, residuos, etc.)	Recuperación paisajes, cerramientos insonorizados, barreras acústicas, reciclaje y reutilización de residuos, etc.	

Cuadro 3.1. Gestión medioambiental de la industria de cemento. Prácticas e impactos
Fuente: elaboración propia

3.2.1. Valorización material de los residuos

Con el principal objetivo de minimizar el impacto sobre los sistemas naturales explotados, las empresas cementeras apuestan cada vez más por el uso racional de los recursos naturales. La industria cementera, para minimizar el impacto sobre las canteras y también en aras a contribuir a una gestión global de residuos más responsable, sustituye materias primas de origen mineral (piedra de la cantera) por materias primas alternativas, aprovechando las propiedades minerales de algunos subproductos procedentes de otros procesos industriales y contribuyendo a la gestión de estos residuos mediante su reciclaje.

Con el fin de preservar los recursos naturales, el sector del cemento pretende cumplir con la "jerarquía de gestión de los residuos" establecida en la nueva Directiva Marco de Residuos⁵⁵ 2008/98/CE que promueve la recuperación de residuos, a través de las siguientes medidas y por dicho orden:

1. La prevención de la generación de residuos
2. La preparación de la reutilización
3. El reciclado
4. Otros tipos de valorización, como la energética
5. Y por último, la eliminación en condiciones adecuadas.

⁵⁵ Transpuesta al ordenamiento jurídico español a través de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados, que deroga la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos y parte de la Ley 11/97, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases.

El objetivo final de la valorización de los residuos, es que éstos *“sirvan a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, dentro de la instalación o en la economía en general”* (Art. 3.15, Directiva 2008/98/CE). Incluye, tanto la recuperación material o reciclado, como la recuperación energética, denominada también esta última, tanto desde un punto de vista técnico como legal, como *“valorización energética”* o *“coincineración”*.

Las características propias del proceso de producción del cemento y la normativa reguladora del uso y consumo de residuos en el sector analizado condicionan, en gran medida, el tipo y la cantidad que de los mismos se emplean en las diferentes fases del proceso de producción, garantizando en todo momento el cumplimiento de la normativa reguladora de las especificaciones y exigencias para su fabricación. Por tanto, las materias primas alternativas susceptibles de utilizarse en el proceso son aquellas que tienen en su composición los óxidos necesarios para la fabricación del clínker (óxidos de cal, sílice, aluminio o hierro) o bien que mejoran las prestaciones de los cementos. Estos últimos vienen especificados en la norma europea de composición, especificaciones y criterios de conformidad con los cementos comunes.

En el Cuadro 3.2 se describen brevemente los más utilizados, distinguiendo entre los empleados para la producción del clínker y los utilizados como adiciones al mismo para la obtención del cemento.

Fases del proceso de producción	
Clínkerización	
Lodos de carbonatos	Lodos de distintos procesos industriales que contienen carbonato cálcico, principal componente necesario para la fabricación del clínker.
Cascarilla de hierro	Óxidos de hierro procedentes de las fundiciones.
Cenizas de pirita	Residuo producido en el tueste de la pirita en la obtención de ácido sulfúrico.
Cenizas para crudo	Subproductos compuestos de óxidos de sílice y aluminio procedentes, principalmente, de los procesos de combustión de lodos de papelera.
Escorias negras siderúrgicas	Residuo procedente de la fabricación del acero en hornos eléctricos.
Otros	Alumina residual, arcilla y cerámica valorizable, espuma azucarera, otras escorias crudo, residuos de construcción, escombros, estériles de mina, borra y arenas de fundición, etc.
Molienda del cemento	
Cenizas Volantes	Subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía.
Escorias de alto horno	Material no metálico formado por silicatos y otras bases, producto de la fusión del hierro en un alto horno.
Sulfato ferroso	Compuesto químico habitualmente en estado de sal, obtenido en distintos procesos de fabricación, como del acero o del dióxido de titanio. Comercialmente se prepara por oxidación de la pirita, o tratando hierro con ácido sulfúrico. Se utiliza como agente reductor ⁵⁶ .
Yeso artificial	Subproducto procedente de la desulfuración de gases en grandes instalaciones de combustión de varios procesos industriales, como la fabricación de ácido fosfórico, de ácidos hidrofúorhídrico y cítricos.
Otros	Marmolina y otros minoritarios alternativos.

Cuadro 3.2. Materias primas alternativas para la producción del cemento

Fuente: elaboración propia a partir de [OFICEMEN, 2010b], [CEMA, 2007] y [Lizarraga, 2006]

Para fabricar el clínker se utiliza fundamentalmente los residuos procedentes de otros procesos industriales (fundición, papelera, acero, etc.) con importantes propiedades minerales. Las escorias, las cenizas de procesos térmicos, las cascarillas de hierro y los estériles de minería son los principales sustitutos de las materias primas naturales, que son extraídas de las canteras (arcillas, calizas y esquistos, entre otras). Estos residuos

⁵⁶ Aditivo que se emplea para reducir la cantidad de agua para el amasado y obtener la docilidad y resistencia deseada de una mezcla de hormigón o mortero. La entrada en vigor de la Orden Ministerial PRE/1954/2004 de 22 de junio de 2004, transposición de la Directiva 2003/53/CE, ha obligado a utilizar desde enero de 2005 un agente reductor del cromo hexavalente en los cementos.

aportan calcio, hierro, silicio o aluminio, minerales necesarios para fabricar el clínker, a partir del cual se obtiene el cemento.

La otra alternativa que existe en el sector para valorizar subproductos industriales y residuos es adicionarlos al clínker para la obtención del cemento, respetando en todo momento la normativa que regula las especificaciones y exigencias para su fabricación, y por ende, garantizando la calidad del cemento. Destacan entre ellos las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón en las centrales térmicas y las escorias de alto horno de la fabricación del hierro.

Para el periodo 2000-2010, como se recoge en la Tabla 3.2, el consumo de materia prima procedente de residuos o subproductos industriales sobre el total de los recursos empleados en la fabricación del cemento (incluyendo las fases de clínkerización y molienda del cemento) representa aproximadamente, para una proporción media clínker/cemento del 0,67, un valor medio del 8%, tasa que posiciona a este sector industrial entre los primeros recicladores de España, aunque a nivel global nuestro país está por debajo de la media europea.

Año	M.P. natural (1)	M. P. alternativa (2)	Total M.P. (3)	(2)/(3)	Proporción clínker/cemento
2000	46.517	3.104	49.621	6,255	0,71
2001	48.215	3.306	51.521	6,417	0,7
2002	49.224	3.630	52.854	6,867	0,69
2003	49.468	4.351	53.819	8,084	0,67
2004	52.445	4.869	57.314	8,496	0,66
2005	52.996	5.889	58.885	10,001	0,63
2006	53.433	5.772	59.204	9,749	0,59
2007	53.421	5.854	59.275	9,875	0,58
2008	46.420	4.191	50.612	8,282	0,64
2009	36.767	3.159	39.925	7,912	0,73
2010	35.507	2.587	38.094	6,790	0,8

Tabla 3.2. Consumo de materias primas en la producción del cemento (miles tn)
Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2005-2010)

En función del uso de los residuos en el proceso de producción (clínkerización o molienda), recogemos en la Tabla 3.3 la proporción que representan los mismos sobre el total de los recursos empleados y la evolución que ha experimentado en la última década. La sustitución progresiva de materias primas alternativas por las naturales en la

producción del cemento es más significativa en la fase de molienda del mismo, representando para el periodo de estudio más del 50% de la materia prima utilizada en dicha fase, mientras que la sustitución en la fase de preparación del crudo, aunque ha experimentado un ligero incremento en los últimos años, en ningún caso supera el 2% de los recursos empleados en dicha fase.

Años	Preparación crudo		Molienda cemento	
	Alternativa	% Total m.p.	Alternativa	% Total m.p.
2000	268	0,61	2.836	51,75
2001	230	0,50	3.076	52,17
2002	274	0,59	3.355	54,26
2003	359	0,76	3.992	62,48
2004	276	0,55	4.593	64,46
2005	714	1,46	5.175	51,73
2006	681	1,39	5.091	48,98
2007	585	1,20	5.269	50,73
2008	554	1,30	3.638	45,98
2009	445	1,30	2.714	48,76
2010	518	1,55	2.069	43,96

Tabla 3.3. Consumo de materias primas alternativas en la producción del cemento (miles tn)

Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2005-2010)

Por término medio, en los últimos 5 años, en la producción del cemento en España (ver Gráfico 3.2) la caliza sigue representando el mayor porcentaje de las materias primas naturales utilizadas, tanto en la preparación del crudo (70%) como en la molienda del cemento (46%); y los diferentes tipos de cenizas y escorias agrupan el mayor porcentaje de recursos alternativos en ambas fases.

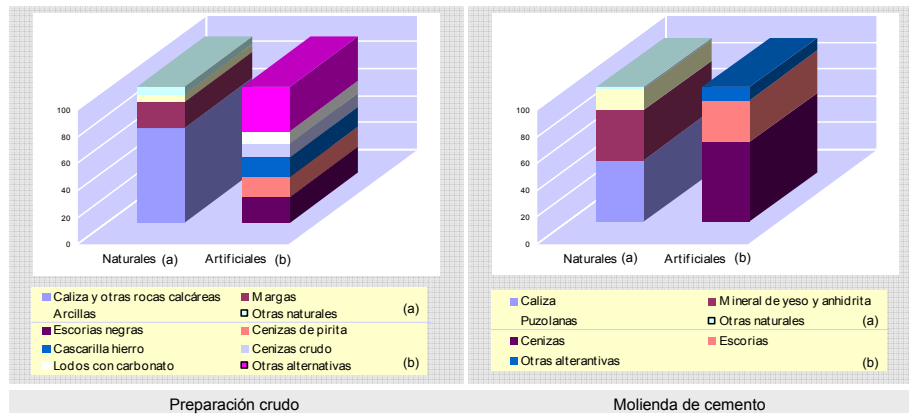


Gráfico 3.2. Consumo medio de materias primas en la producción del cemento (%) (2005-2010)
 Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2005-2010)

Esta sustitución progresiva de residuos por materia prima natural, técnicamente viable y regulada por la normativa europea, permite fabricar cemento con menor proporción de clínker, sin disminuir la calidad ni las prestaciones del producto final y a la vez reducir su impacto sobre la atmósfera. De esta manera, los 2,56 Mtn de residuos usados en 2010 como adiciones normalizadas (Norma UNE-EN 197-1:2000) en el proceso de producción del cemento, ha evitado por una parte, el consumo de aproximadamente unas 250.000 toneladas equivalentes de petróleo para su fabricación (con la consiguiente reducción de emisiones de CO₂) y por otra, la explotación de recursos naturales equivalentes a más de 3 años de explotación de una cantera tipo [OFICEMEN, 2011c].

No obstante, la valorización material de los residuos en la producción del cemento no está exenta de limitaciones, no sólo por lo requerimientos técnicos, medioambientales y económicos de la misma, sino también por las implicaciones que sobre el consumo energético puede tener, al requerir un aumento del mismo, debido a la propiedades físicas y químicas de los residuos, tales como la dureza, la humedad o el peso.

3.2.2. Alternativas para reducir el consumo energético: especial referencia a la valorización energética de residuos

La fabricación de cemento, y más específicamente la producción de clínker, es una actividad que requiere un consumo intensivo de energía, tanto térmica como eléctrica. Por ello, la gestión responsable de las fuentes de energía empleadas en las fábricas de

cemento constituye el objetivo de la otra línea prioritaria de actuación del sector en materia medioambiental.

Una de las alternativas viables para la consecución de dicho objetivo la constituye otra de las aplicaciones posibles de los residuos en la industria del cemento, la denominada valorización energética, que permite su utilización como recurso energético alternativo (aprovechando su poder calorífico⁵⁷) a los combustibles fósiles tradicionales no renovables (coque de petróleo, carbón, fuel, etc.), sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente (Art. 3 Ley 10/1998, de 21 de abril de residuos).

De esta manera, la aportación energética al proceso de producción puede ser realizada a partir de diferentes fuentes [Palomino, 2010]:

- Por el uso de combustibles tradicionales, fundamentalmente por combustibles sólidos como el carbón y coque de petróleo, y en menor proporción por combustibles líquidos como el fuel oil o el gasoil, o gaseosos como el gas natural. El empleo de este tipo de recursos se caracteriza por los niveles de contaminación atmosférica asociados (entre ellas de CO₂), así como por el alto coste originado por la dependencia de un recurso agotable.
- Por el uso de combustibles alternativos constituidos por diferentes tipos de residuos recuperados, que tratados tienen, como características comunes, un poder calorífico suficientemente elevado para realizar una aportación energética neta al proceso de producción y la ausencia de contaminantes clave que puedan ser perjudiciales para la salud de los trabajadores y el medio ambiente, para el funcionamiento de las instalaciones o para la calidad del producto final. El empleo de combustibles alternativos, además de permitir recuperar la energía que contienen, evita otros tipos de gestión menos recomendables, como la incineración o el depósito en vertedero y las emisiones de CO₂ y metano asociadas a estos tipos de gestión. Asimismo, reduce el consumo de combustibles fósiles no renovables y las emisiones de CO₂ asociadas a la fabricación de cemento, ya que muchos residuos están compuestos en su totalidad (harinas animales) o contienen fracciones (serrín, neumáticos, lodos,

⁵⁷ El calor que suministra por unidad de combustible, determinado calorimétricamente en laboratorio [Gómez, 2007].

celulosa, etc.) de biomasa⁵⁸, por lo que las emisiones de CO₂ asociadas se consideran neutras, ya que este CO₂ ha sido absorbido de la atmósfera previamente para crear la biomasa.

Teniendo en cuenta las limitaciones del uso de los residuos en la producción del cemento⁵⁹, entre los combustibles alternativos más utilizados en las plantas de cemento⁶⁰, se encuentran los residuos totalmente (madera, lodos de depuradora, harinas cárnicas) o parcialmente biomasa (neumáticos usados, residuos urbanos, etc.) y los residuos alternativos fósiles (aceites usados, disolventes, barnices, plásticos, etc.), cuya utilización permite reducir las emisiones atmosféricas procedentes de sus instalaciones y evitar las derivadas de las incineradoras y vertederos, si se quemasen y no se utilizasen como combustibles alternativos (ver Cuadro 3.3).

⁵⁸ Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía [RAE, 2012]. En el año 2010, según datos del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDEA), la contribución de la biomasa supuso un 3,8% del consumo energético nacional, en energía primaria.

⁵⁹ Tanto las derivadas de sus propiedades físicas y químicas (como el bajo valor calórico, alto contenido en humedad, alta concentración de trazas con contenido de cloro), como de las condiciones económicas, legales, sociales y comerciales requeridas para su uso ([WBCSD/IEA, 2009], [Hoenig y Twigg, 2009], [CEMBUREAU, 2009a], [Van Oss y Padovani, 2003]).

⁶⁰ La lista de posibles residuos valorizables energéticamente en plantas de clínker es muy amplia, ya que podría cubrir la casi totalidad de los residuos combustibles. Nos centraremos en aquellos para los que existen ya infraestructuras específicas para su gestión y que presenten ventajas evidentes, actuales o a corto plazo, frente a otras posibles vías de eliminación [Palomino, 2010].

Combustibles alternativos	
Biomasa	
Madera	Residuo sólido procedente de la industria maderera (biomasa forestal).
Harinas y grasas animales	Residuos de la industria cárnica.
Lodos de depuradora urbana	Lodos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. Son residuos líquidos, que mediante el oportuno tratamiento (deshidratación), puede llegar a considerarse residuo sólido.
Otros	Papel, cartón, celulosa y otros líquidos alternativos biomasa.
Parcialmente biomasa	
Neumáticos fuera de uso (NFU)⁶¹	Residuo no peligroso no degradable con una alta capacidad calorífica (6.500 a 9.000 Kcal/Kg).
Combustible derivado de residuos-residuos sólidos urbanos (CDR-RSU)	Combustible preparado a partir del rechazo de plantas de tratamiento de residuos municipales y residuos sólidos urbanos.
Serrín Impregnado	Preparación de un combustible sólido a través de una mezcla con serrín vegetal y su afino posterior ⁶² .
Textil	Residuo ligero procedente de la industria textil.
Origen fósil	
Disolventes y barnices	Residuos líquidos procedentes de diversos procesos industriales.
Otros	Aceites usados, plásticos, residuos de hidrocarburos y otros.

Cuadro 3.3. Combustibles alternativos para la producción del cemento
Fuente: elaboración propia a partir de [CEMA, 2007] y [CEMBUREAU et al., 2009]

El uso adecuado de los mismos está garantizado, en la medida que los combustibles alternativos provienen de gestores autorizados, que controlan su composición y verifican su aptitud para el uso en las plantas cementeras, conforme a la normativa reguladora vigente sobre tratamiento y uso de los residuos en plantas industriales (Directiva 2000/76/CE y Real Decreto 256/2003). Una vez autorizada el uso de los combustibles alternativos por la autoridad medioambiental competente, la gestión interna de los

⁶¹ El proceso de fabricación del clínker ofrece la posibilidad simultánea de la recuperación material y energética de los componentes individuales de los neumáticos. El alto poder calorífico del caucho se utiliza como sustituto de combustibles y los componentes inertes (principalmente hierro y aluminio) como sustitutos de materias primas [CEMBUREAU et al., 2009].

⁶² Por ejemplo, en 2009, en las dos fábricas que Holcim posee en Almería (Gádor y Carboneras), la valorización energética de residuos ha aportado el 24 % de las necesidades de energía térmica, con lo que se ha conseguido una reducción importante en el consumo de combustibles fósiles no renovables. El combustible alternativo más utilizado ha sido el serrín impregnado que prepara su filial Geocycle, localizada en Albox, con un consumo acumulado hasta esa fecha de 20.000 toneladas [Fenoy, 2009].

mismos está sujeta a varias etapas, cuyo desarrollo depende del tipo de residuo empleado (ver Cuadro 3.4).

ETAPAS		RESIDUOS		
		Líquidos	Sólidos gruesos	Sólidos finos
Recepción	Inspección	√	√	√
	Toma de muestras	√	√(si procede)	√(si procede)
	Análisis	√	√	√(si procede)
Almacenamiento		Tanques Depósitos	Acopios Naves	Naves Silos Tolvas
Alimentación	Transporte hidráulico	√		
	Transporte mecánico		√	√(y/o neumático)
	Inyección al horno	√		
	Alimentación gravimétrica		√	√ (o inyección aire)
Control		Caudal de residuo Condiciones de combustión (temperatura, O ₂) Emisiones (SO ₂ , NO _x , HCl, HF, metales pesados, compuestos orgánicos)		

Cuadro 3.4. Gestión de combustibles alternativos en una fábrica de cemento
Fuente: elaboración propia a partir de [MMA, 2004]

La sustitución de combustibles fósiles no renovables por los procedentes de residuos es una práctica aún poco consolidada en nuestro país en la industria en general y en la de cemento en particular. No obstante, en esta última industria, el uso de combustibles alternativos ha experimentado en los últimos años un ligero incremento, representando en 2010 el 23,22%⁶³ del total de los combustibles empleados en la producción del cemento (diez años atrás sólo alcanzaba el 1,2%) (ver Gráfico 3.3).

⁶³ Por debajo de la media europea en 2009 (28,1%) y a gran distancia de países como Holanda, Alemania y Bélgica, donde los sistemas de gestión de los residuos llevan décadas orientadas a prevenir el vertido y aprovechar la capacidad de tratamiento de las fábricas de cemento [OFICEMEN, 2011c].

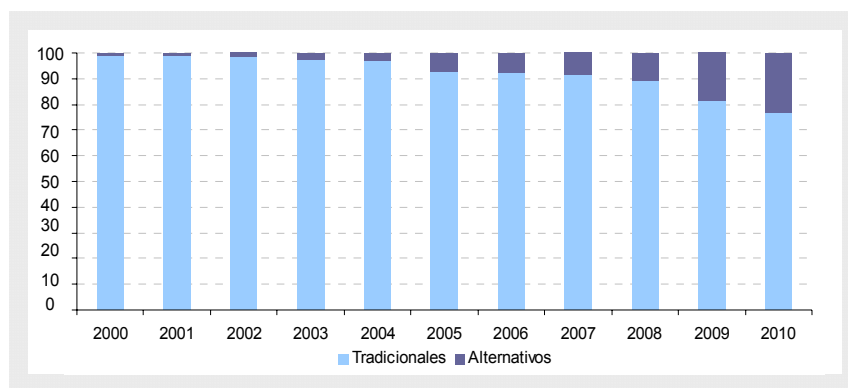


Gráfico 3.3. Consumo de combustibles alternativos vs. tradicionales en la industria del cemento (% total de combustibles)

Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2008-2010)

En relación a los combustibles tradicionales, aunque el coque de petróleo⁶⁴ sigue siendo el principal combustible empleado en la producción del cemento (en 2010 representa el 95,7% del total de los combustibles tradicionales empleados⁶⁵ y el 73,4% del total de los combustibles utilizados), aquel va cediendo terreno a otros combustibles, muchos de origen renovable, los cuales han experimentado un considerable incremento en la última década, tal y como se ilustra en los Gráficos 3.4 y 3.5.

⁶⁴ El coque de petróleo es un subproducto de refinería, cuyo mercado principal son cementeras y siderurgias. Debido a la creciente necesidad de las refinерías de procesar crudos cada vez más pesados, tiene una producción creciente a nivel mundial, destacando Estados Unidos, México y Venezuela como principales países productores. El coque de petróleo tiene precios inferiores a los del carbón, siendo ésta una de las razones por las que se ha generalizado su empleo en las plantas cementeras [Gómez, 2007].

⁶⁵ No se incluye el gas natural, por tener otra unidad de medida.

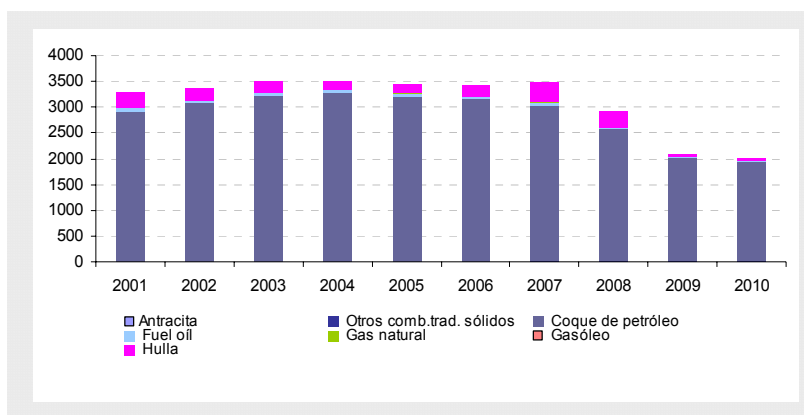


Gráfico 3.4. Consumo de combustibles tradicionales en la industria cementera española (miles tn)
Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2008-2010)

Entre los combustibles alternativos, el porcentaje de utilización más elevado corresponde a los alternativos parcialmente biomasa (principalmente CDR-RSU y NFU), seguido de los totalmente biomasa (principalmente madera, lodos de depuradora urbana y harinas y grasas animales) y en menor proporción los derivados fósiles (disolventes y barnices y otros no biomasa principalmente) (ver Gráfico 3.5).

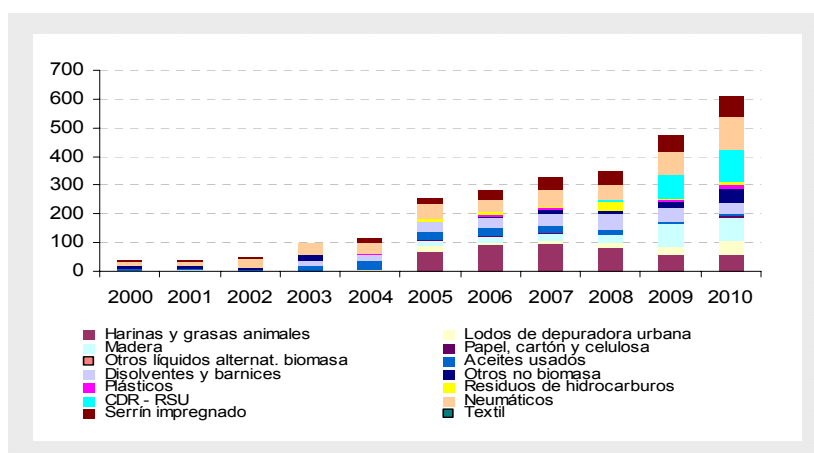


Gráfico 3.5. Consumo de combustibles alternativos en la industria cementera española (tn)
Fuente: elaboración propia a partir de Memorias de Oficemen (2008-2010)

En relación con la producción anual del clínker, la sustitución progresiva de los combustibles tradicionales por los alternativos menos contaminantes se refleja en el factor combustible alternativos/producción de clínker, que ha pasado de 0,14 a principio de la década a 2,86 al final de la misma.

Esta sustitución parcial de los combustibles no sólo contribuye a la reducción de la emisión de determinados contaminantes a la atmósfera, sino que es una de las prioridades del sector cementero, ya que supone uno de los costes principales de fabricación (hasta un 40% aproximadamente). Es por ello que el empleo de otras fuentes de energía alternativas a los combustibles utilizados convencionalmente, resulta fundamental a la hora de aumentar la competitividad de las compañías cementeras.

No obstante, al igual que en la valorización material de los recursos, el uso de los residuos como combustibles en la fabricación del cemento también está sujeto a limitaciones, tanto derivadas de las propiedades físicas y químicas de los combustibles, como de las condiciones económicas⁶⁶, legales y sociales que requiere ([CEMBUREAU et al., 2009], [Hoenig y Twigg, 2009], [WBCSD/IEA, 2009], [Van Oss y Padovani, 2003]). De esta manera, la elección de uno u otro combustible alternativo depende de varios factores: poder calorífico, disponibilidad, coste y efectos sobre la calidad del clínker.

Pese a que la tendencia en el uso de combustibles alternativos en los últimos años resulta claramente ascendente, todavía presenta un margen de mejora muy alta para alcanzar valores similares a los países europeos más avanzados en materia de gestión de residuos, que alcanzan niveles de sustitución térmica próximos o superior al 50% (Austria, Suiza, Holanda y Alemania, entre otros) (ver Gráfico 3.6).

⁶⁶ Dependiendo de los combustibles utilizados (su uso y manipulación), la inversión requerida puede oscilar entre 1 y 5 millones de euros (sin incluir costes operacionales y otras adaptaciones para ello) [MMA, 2004].

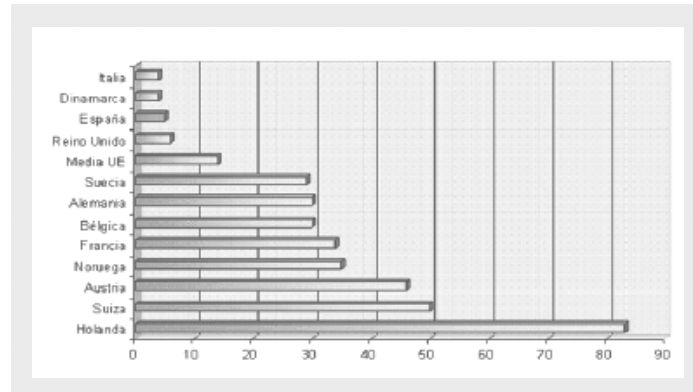


Gráfico 3.6. Consumo de combustibles alternativos en la industria cementera de Europa (2009)
Fuente: [IDAE, 2010]

A pesar de la relevancia que en los últimos años ha adquirido la valorización energética de los residuos en la industria del cemento como medida principal para mitigar el impacto medioambiental derivado del consumo energético de sus instalaciones, aquella también ha puesto en marcha acciones para reducir el consumo derivado de la otra fuente generadora de energía de sus procesos, la energía eléctrica, procedente de manera directa de la molienda del cemento y de manera indirecta de otros procesos intermedios de menor impacto. Entre las mismas, destacamos la implantación de sistemas de gestión de la energía y de equipos de molienda y otros equipos de accionamiento eléctrico de alta eficiencia energética.

La eficacia de tales medidas se puede apreciar en el Gráfico 3.7, donde se recoge la evolución del consumo de energía eléctrica en la última década, que se ha visto reducido en valores absolutos en los últimos cuatro años en un 35 %. Sin embargo, en relación a la producción de cemento en ese mismo periodo, se produce un incremento del consumo debido a la infrutilización de la capacidad de producción, consecuencia de la recesión económica.

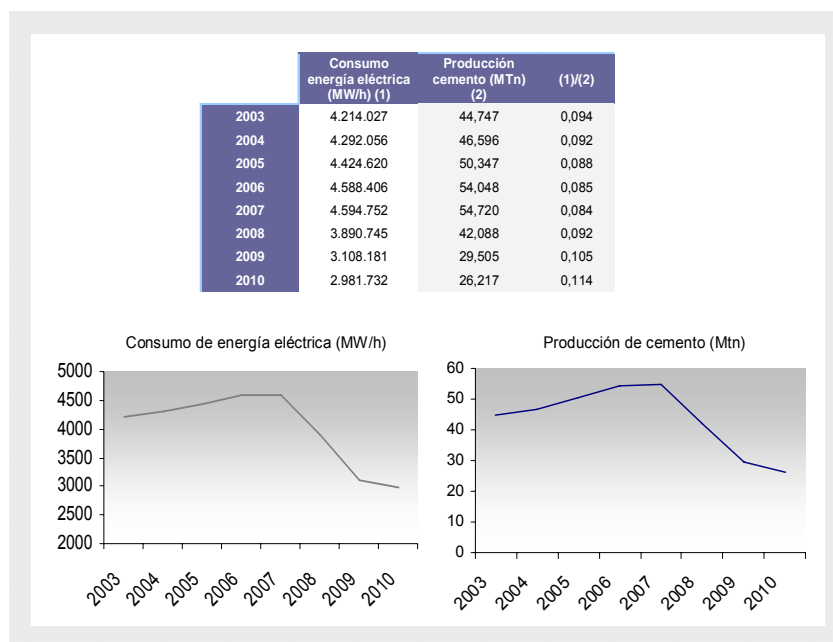


Gráfico 3.7. Consumo de energía eléctrica vs. producción de cemento (2003-2010)

Fuente: elaboración propia a partir de [OFICEMEN, 2011c]

Además, una gestión eficiente de los recursos energéticos, junto con otras acciones, contribuye a reducir el impacto sobre la atmósfera, a cuyo análisis dedicamos el siguiente apartado.

3.2.3. Medidas para mejorar y controlar la calidad del aire

La valorización material y energética de los residuos analizadas en los apartados anteriores, además de disminuir el impacto sobre los recursos naturales y la dependencia energética de los combustibles tradicionales del proceso de producción del cemento, contribuye a la consecución de la reducción de otro de sus principales impactos sobre el medio ambiente: la contaminación atmosférica, a la que dedicamos este apartado.

En función del tipo de contaminante y las alternativas viables para reducir las emisiones de cada uno de ellos, la industria del cemento ha realizado muchas y variadas acciones en la última década. Conforme al "Acuerdo de Prevención y Control Integrados de la

Contaminación” adoptado en 2001, entre Oficemen y el Ministerio de Medio Ambiente, el sector del cemento español adquirió los compromisos de [OFICEMEN, 2006]:

- Aplicar progresivamente las MTDs para el control y prevención de la contaminación. En este sentido, los principales objetivos fueron:
 - ✓ Reducción y control de emisiones procedentes de fuentes dispersas, mediante inversiones en cerramientos de instalaciones y sistemas de aspiración y limpieza de gases, para reducir las emisiones de partículas procedentes de la manipulación (transporte, carga y descarga) y almacenamiento de materias primas, clínker y cemento.
 - ✓ Reducción y control de emisiones de partículas, NO_x y SO₂ procedentes de fuentes puntuales (chimeneas) por debajo de ciertos valores, mediante la optimización de los procesos de fabricación y la mejora de los equipos de limpieza de gases, así como la instalación de sistemas de medida en continuo, para los principales contaminantes.
- Prestar su colaboración en la realización de estudios técnicos y económicos que aborden temas como: las MTDs para la fabricación del cemento, la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, las técnicas de control y medición de emisiones y la implantación de Sistemas de Gestión Medioambiental. Fruto de dicha colaboración han surgido diferentes acuerdos a los que nos referimos en el apartado de otros aspectos de interés (Apartado 3.2.6).

Las actuaciones descritas y otras fuera de dicho ámbito de aplicación se reflejan en la evolución de los indicadores medioambientales, relativos a las emisiones de contaminantes a la atmósfera de la industria del cemento, tal y como se recoge en la Tabla 3.4. Todas las sustancias contaminantes consideradas han experimentado una disminución significativa en el periodo 2007-2010, destacando, en términos absolutos, la de las partículas, con una reducción del 83%.

Contaminantes	2007	2008	2009	2010	Variación 2010/2007 (%)
Dióxido de carbono	25.048,0	23.575,3	18.040,5	18.450,8	-25
Monóxido de carbono	166,7	66,4	39,5	37,0	-78
Óxidos de azufre	21,7	11,5	8,5	5,1	-76,4
Óxidos de nitrógeno	116,7	60,4	40,7	35,9	-69,2
Partículas	2,1	1,1	0,4	0,3	-83,4
Otros contaminantes	1,0	0,7	0,4	0,4	-63,8
Total Emisiones	25.356,2	23.715,5	18.130,1	18.529,5	-27

Tabla 3.4. Emisiones de contaminantes a la atmósfera (miles tn/año)
Fuente: [Registro PRTR-España]⁶⁷

El dióxido de carbono, como ya adelantábamos, que proviene una parte de la calcinación de la roca caliza para obtener óxido de calcio y la otra de la combustión de los combustibles, representa el mayor porcentaje sobre el total de las sustancias contaminantes emitidas en el proceso de producción del cemento, el 99% sobre el total. Aunque comúnmente no se considera de por sí un elemento contaminante, debido a que no es tóxico, si tiene un importante impacto sobre el entorno natural, debido a los grandes volúmenes en que se presenta y a su condición de GEI que, como es sabido, contribuye al exceso de calentamiento del globo terrestre.

No obstante, el CO₂, a pesar de continuar siendo la sustancia contaminante más significativa del proceso de producción del cemento, en el periodo 2007-2010 se ha visto reducida sus emisiones en aproximadamente un 25%, debido no solo a la caída de la producción del cemento, sino al esfuerzo realizado y la eficacia de las medidas adoptadas en estos años, motivadas en parte por el compromiso asumido por este sector industrial para luchar contra el cambio climático e integrar su actividad en el entorno natural.

⁶⁷ El registro PRTR recoge la información de diversas sustancias contaminantes de los complejos industriales afectados por el Real Decreto 508/2007, los cuales están obligados a notificar anualmente sus emisiones y transferencias de residuos a la Comunidad Autónoma en la que se encuentren ubicados. Entre ellos se encuentran las fábricas de cemento y las canteras, siempre que superen una determinada capacidad de producción o superficie de la zona de explotación. No obstante, dicha información no es comparable directamente, ya que la industria tiene varias alternativas para medir las emisiones (mediante mediciones, cálculos y estimaciones).

La Tabla 3.5 recoge de manera detallada la evolución de las emisiones de CO₂ del sector según la fuente de emisión.

		1990	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Producción de clínker (miles tn)	Gris		30604,5	30928,2	30867,9	26418,3	20936,8	20601,9
	Blanco		1060,1	1074,5	1099,1	761,1	596,0	490,9
	Total	23211,7	31664,6	32002,7	31967,0	27179,5	21532,8	21092,8
Emisión total de CO ₂ (miles tn)	Gris		26233,2	26187,2	26288,4	22596,5	17616,3	17236,2
	Blanco		1151,4	1178,8	1179,7	808,4	603,6	519,7
	Total	20933	27384,6	27366,0	27468,1	23404,9	18219,9	17755,9
Emisión CO ₂ evitado por biomasa (miles tn)	Gris		220,4	273,7	283,6	281,6	361,5	475,4
	Blanco		0	0	0	0	6,1	13,3
	Total		220,4	273,7	283,6	281,6	367,7	488,7
Intensidad emisiones CO ₂ total	Gris		0,857	0,847	0,852	0,855	0,841	0,837
	Blanco		1,086	1,097	1,073	1,062	1,013	1,059
	Total	0,902	0,865	0,855	0,859	0,861	0,846	0,842
Emisión CO ₂ proceso (miles tn)	Gris		16169,3	16142,8	16188,5	13908,1	11043,1	10868,3
	Blanco		572,9	578,5	587,7	406,7	316,7	261,2
	Total	12534	16742,2	16721,3	16776,3	14314,8	11359,8	11129,4
Emisión CO ₂ combustión (miles tn)	Gris		10063,9	10044,4	10099,9	8688,4	6573,2	6367,9
	Blanco		578,5	600,3	591,9	401,7	286,9	258,6
	Total	8399	10642,4	10644,7	10691,8	9090,1	6860,1	6626,4
Intensidad emisiones proceso	Gris		0,528	0,522	0,524	0,526	0,527	0,528
	Blanco		0,540	0,538	0,535	0,534	0,531	0,532
	Total	0,54	0,529	0,522	0,525	0,527	0,528	0,528
Intensidad emisiones CO ₂ combustión	Gris		0,329	0,325	0,327	0,329	0,314	0,309
	Blanco		0,546	0,559	0,539	0,528	0,481	0,527
	Total	0,362	0,336	0,333	0,334	0,334	0,319	0,314
Ahorro específico por biomasa	Gris		0,007	0,009	0,009	0,011	0,017	0,023
	Blanco		0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,027
	Total	0	0,007	0,009	0,009	0,010	0,017	0,023

Tabla 3.5. Datos nacionales de emisiones CO₂ del sector cementero
Fuente: [OFICEMEN, 2011c]

Las emisiones de CO₂ del sector del cemento han experimentado, en el periodo 2005-2010, una reducción en valores absolutos aproximadamente del 35%, y en términos relativos (intensidad de las emisiones) del 2,6%, alcanzándose en 2010 un factor emisión del 0,842 kg CO₂/tn clínker, ligeramente inferior al del comienzo del periodo analizado (0,865 kg CO₂/tn clínker).

Si analizamos por fuentes de emisión (combustión y proceso), observamos en el Gráfico 3.8 como se mantiene prácticamente inalterable la proporción de cada una de las dos fuentes respecto al total de las emisiones de CO₂, un 40% aproximadamente de combustión y un 60% derivadas del proceso.

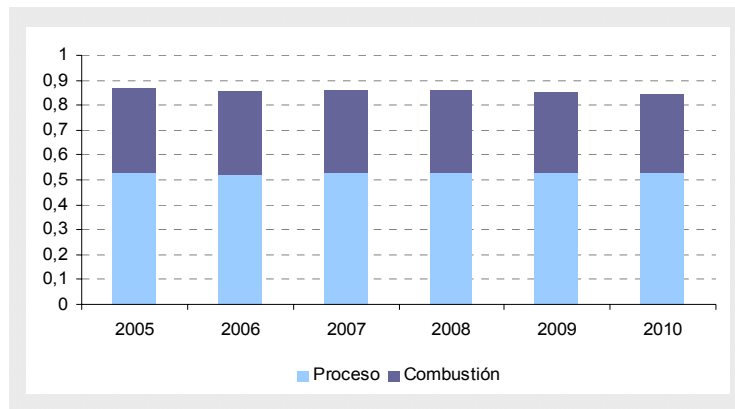


Gráfico 3.8. Intensidad de emisiones de CO₂ (2005-2010)
Fuente: elaboración propia a partir de [OFICEMEN, 2011c]

3.2.4. Otras actuaciones medioambientales

Además de las actuaciones referidas anteriormente, la industria del cemento ha emprendido otras acciones dirigidas a reducir otros impactos medioambientales de menor relevancia, por su alcance y coste asociado. Se trata del vertido de aguas residuales y del impacto visual y acústico.

En relación al vertido de aguas residuales, que normalmente proviene de las aguas sanitarias y pluviales, la mayoría de las fábricas españolas de cemento han tomado medidas para evitar su posible contaminación, tales como el almacenamiento a cubierto de materias primas y auxiliares, productos intermedios y finales y residuos.

Para paliar el principal impacto visual de la actividad productiva, derivado de la explotación de las canteras de donde se extrae la materia prima para la fabricación del cemento, la industria cementera está desarrollando estudios y proyectos de explotaciones sostenibles y restauración ambiental de las mismas. En muchos casos, estas actuaciones no se limitan exclusivamente a una integración paisajística con el

entorno, sino a crear espacio de alto valor ecológico para el disfrute de la población próxima a sus instalaciones⁶⁸.

De otro lado, para garantizar una gestión adecuada de los residuos generados en las fábricas de cemento, éstas han integrado distintas líneas básicas de actuación, tales como, caracterización y clasificación para determinar su peligrosidad, seleccionar y segregarse en origen los mismos, fomentar el reciclaje y la reutilización de los residuos no peligrosos, etc.

Para disminuir el impacto acústico de las cementeras, éstas pueden actuar sobre el foco de emisión del ruido, sobre el medio transmisor o sobre el receptor. Básicamente, las medidas que se adoptan son los cerramientos insonorizados, las barreras acústicas, la colocación de material absorbente y los silenciadores.

Y por último, otro de los indicadores del compromiso medioambiental adquirido por las empresas es el que integra todos los aspectos tratados en este apartado y en los anteriores en la propia gestión empresarial, mediante la implantación de Sistemas de Gestión Medioambiental y su posterior certificación (ISO 14001 y/o Registro EMAS⁶⁹) que garantiza, mediante el desarrollo de determinados procesos normalizados, una correcta integración de los aspectos medioambientales clave en la gestión de las empresas a nivel estratégico y operativo.

3.2.5. Valoración económica de la gestión medioambiental

El compromiso de la industria del cemento con el medio ambiente y el desarrollo sostenible, mediante la gestión racional de los recursos y la compatibilidad de la producción del cemento con la protección del entorno natural y la mejora de la calidad de las personas, bajo el marco legal vigente, se refleja en el volumen de inversiones que dicho sector ha realizado en los últimos años.

⁶⁸ Tales como, el proyecto de regeneración del paisaje mediante la plantación de 98.000 cepas de viñas para la producción de vino de la cantera de Yepes (Cemex España) o la restauración de cantera potenciando la biodiversidad, la educación ambiental y el uso público en la Cantera Yepes-Ciruelos (Lafarge-Asland), ambas en Toledo [OFICEMEN, 2006].

⁶⁹ El 100% de las fábricas pertenecientes a las empresas asociadas a Oficemen han implantado y certificado este tipo de sistemas, conforme a la norma ISO 14001 y/o el registro EMAS [OFICEMEN, 2011c].

Durante 1997-2007 las empresas cementeras españolas invirtieron más de 1.000 millones de euros en la adaptación de sus fábricas a la Directiva IPPC, cuyo objetivo es garantizar la protección del medio ambiente. Esta cifra refleja el compromiso que esta industria ha adquirido con la sociedad a través de la mejora de sus instalaciones, con el fin de reducir el impacto de las fábricas en su entorno y que se ha materializado con la obtención de las Autorizaciones Ambientales Integradas (AAI) que otorga la comunidad autónoma correspondiente. En concreto, la inversión media por fábrica en este periodo de tiempo ha sido de, aproximadamente, 3 millones de euros (ver Gráfico 3.9), y la inversión total por tonelada de cemento instalada ha sido de 25€/tn. Estas partidas han sido destinadas, entre otras mejoras, a reducir las emisiones, potenciar la valorización energética, instalar cambios tecnológicos en las industrias y mejorar la eficiencia energética de las plantas, representando las mejoras ambientales un 63% del total del montante invertido. En este sentido, podemos destacar el esfuerzo realizado por el sector para instalar sistemas de medición en continuo de partículas y medidores de NO_x y SO₂ en el 100% de los hornos. Además, un 99,5% de las instalaciones de transporte de clínker están cerradas y cuentan con sistemas de desempolvamiento. Así, el crecimiento del sector durante los últimos diez años ha permitido llevar a cabo importantes reformas en fábricas para adaptarlas a las MTDs, lo que sitúa a la industria española a la cabeza de Europa en eficiencia energética.

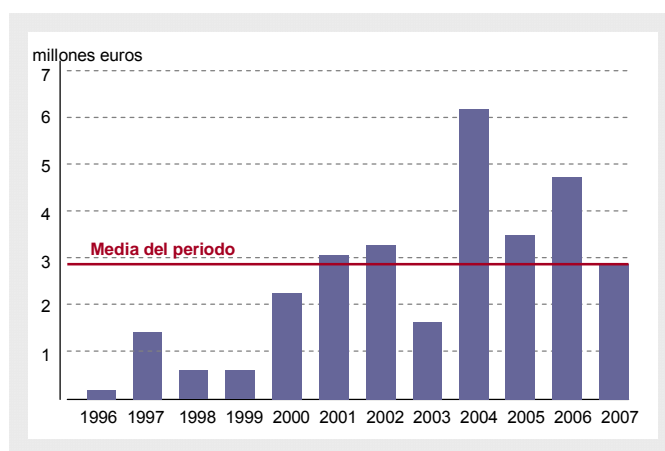


Gráfico 3.9. Inversión anual media por fábrica de cemento
Fuente: [OFICEMEN, 2009a]

Además de fuertes inversiones, las empresas cementeras han incrementado sus gastos para dar cumplimiento a esta nueva legislación, principalmente dotándose de personal especializado para atender a los nuevos requisitos técnicos y legales, y asumiendo mayores costes de operación de los equipos con menores emisiones de contaminantes.

Por otra parte, gracias al Acuerdo Voluntario para la Prevención y Control Integrado de la Contaminación en la Industria del Cemento, suscrito entre la industria y el Ministerio de Medio Ambiente en 2001, tanto el sector como las administraciones han llegado más preparados para afrontar con éxito la implantación de la IPPC y de esta manera, en 2008 todas las fábricas de cemento cuentan con la certificación ISO 14001.

Teniendo en cuenta la fecha de la entrada en vigor de la normativa reguladora de los diferentes aspectos relativos a la protección medioambiental y la situación general de crisis económica de la segunda mitad del periodo analizado, que ha afectado de manera muy directa a este sector, arrastrada por el parón de la construcción, el mayor esfuerzo inversor del sector del cemento se concentra en la primera mitad de la década.

En la Tabla 3.6 se recoge la valoración económica de las acciones desarrolladas por las instalaciones en el marco del Acuerdo de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (2001- 2005), en función de las medidas adoptadas por las mismas para reducir los principales impactos sobre el medio ambiente, recogidas en el Apartado 3.2.

ACTUACIONES	2002	2003	2004	2005	Total Vigencia Acuerdo
1. Prevención y reducción de las emisiones de partículas a la atmósfera provenientes de las operaciones de almacenamiento, manipulación y transporte de materiales	42.795.846	23.624.035	34.591.184	66.031.439	167.042.504
2. Reducción de las emisiones de partículas a la atmósfera provenientes de fuentes localizadas (emisión por chimeneas).	22.323.678	18.804.481	19.455.752	15.501.696	76.085.607
3. Reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y de azufre (SO ₂)	212.706	1.595.876	8.446.624	1.538.243	11.793.449
4. Reducción del ruido.	1.278.579	1.151.141	1.134.175	1.341.034	4.904.928
5. Calidad de los vertidos de agua.	1.528.205	914.442	1.457.927	3.094.476	6.995.050
6. Reducción, reciclaje y gestión de residuos generados en la fábrica de cemento.	1.300.045	890.988	569.199	230.207	2.990.439
7. Reciclado y valorización de residuos en la fabricación de cemento para su utilización como materias primas alternativas	16.095.715	3.650.884	24.648.393	5.739.145	50.134.137
8. Valorización de residuos en la fabricación de cemento para su utilización como combustibles alternativos.	5.211.881	6.610.706	1.887.416	8.307.208	22.017.211
9. Impacto visual	1.215.124	1.646.977	1.706.134	2.155.652	6.723.887
10. Control de efectos ambientales.	1.672.743	2.540.865	2.448.216	2.229.172	8.890.996
TOTAL	93.634.521	61.430.395	96.345.020	106.168.272	357.578.208

Tabla 3.6. Inversiones medioambientales del sector cementero español 2002-2005 (euros)
Fuente: [OFICEMEN, 2006]

El mayor porcentaje de la inversión medioambiental recae sobre el recurso atmosférico, con un 71,3% del total del montante invertido, seguido de las cantidades destinadas a la valorización (20,2%), tanto material como energética, de los residuos en el proceso productivo de las instalaciones. El resto de la inversión se destina a mitigar los otros impactos medioambientales menos significativos de la producción del cemento.

3.2.6. Otros aspectos de interés relacionados

Las acciones desarrolladas por la industria española del cemento en la última década para mitigar el impacto medioambiental de la actividad de sus instalaciones, cuyas implicaciones han sido descritas en los apartados anteriores, se ha desarrollado bajo el marco de la legislación de prevención y control integrados de la contaminación, que impulsa un nuevo enfoque de la actividad industrial comprometida con el medio ambiente.

La incorporación al ordenamiento jurídico español de la Directiva 96/61/CE⁷⁰, a través de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (Ley IPPC⁷¹) marca el inicio de un proceso de integración del medio ambiente en el desarrollo de la actividad industrial, con el objetivo de *“evitar o, cuando ello no sea posible, reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente en su conjunto”* (Art. 1).

Para la consecución de dicho objetivo, se establecen diferentes mecanismos, regulados por sus correspondientes normativas, que requiere de la colaboración de los diferentes agentes implicados, principalmente las autoridades competentes y las industrias afectadas, entre las que se incluyen las cementeras⁷².

Para hacer efectiva la prevención y el control integrado de la contaminación, la Ley IPPC regula una nueva figura de intervención administrativa, la Autorización Ambiental Integrada, que sustituye y aglutina al conjunto disperso de autorizaciones de carácter ambiental existentes hasta el momento, agilizando así pues los trámites y reduciendo las cargas administrativas de los particulares. Dicha autorización garantiza, sólo a efectos de la protección del medio ambiente y de la salud de las personas, el desarrollo de la actividad industrial bajo determinadas condiciones que aseguran el cumplimiento de los requisitos establecidos en dicha ley, entre los cuales se fijan, para las instalaciones incluidas en su ámbito de aplicación, los valores límite de emisión de determinadas sustancias contaminantes⁷³, teniendo en cuenta factores locales del emplazamiento (características técnicas de la instalación, localización geográfica y condiciones locales del medio ambiente) y las MTDs, las cuales define en su artículo 3, apartado ñ, como *“/a*

⁷⁰ Modificada en diversas ocasiones y de forma sustancial, ha sido derogada por la Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación.

⁷¹ La Ley IPPC ha sido modificada por la Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE); y por la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

⁷² Incluidas en su ámbito de aplicación, tal y como se recoge en su Apartado 3.1 del Anejo 1: *“instalaciones de fabricación de cemento y/o clínker en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 500 toneladas diarias, o de cal en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 50 toneladas por día, o en hornos de otro tipo con una capacidad de producción superior a 50 toneladas por día”*.

⁷³ Recogidas en los Anexos I y III de la Directiva 2008/1/CE, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación.

fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas, para constituir en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea posible, reducir las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente y de la salud de las personas".

Bajo ese enfoque y en cumplimiento de lo establecido en el artículo 16.2 de la Directiva IPPC, sobre la obligación de intercambio de información a nivel europeo de las MTDs en los sectores incluidos en su ámbito de aplicación, el Grupo de Trabajo Técnico encargado de elaborar el documento de referencia para el sector del cemento y de la cal, finalizó su trabajo con la publicación en 2002 del documento final "Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries"⁷⁴ (BREF), revisado recientemente para dar respuesta adecuada a los nuevos retos medioambientales, incorporando la información nueva disponible respecto a los avances técnicos y tecnológicos que han favorecido el desarrollo de nuevas experiencias en el sector, desde el comienzo de la aplicación de la Directiva de IPPC.

Con arreglo al artículo 17, apartado 2, de la Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, el nuevo documento revisado⁷⁵ contempla las medidas o técnicas que se considera que tienen potencial para lograr un alto nivel de protección medioambiental o que pueden contribuir a lograrlo, convirtiéndose aquel en documento de referencia obligatoria para el sector del cemento para el cumplimiento de determinados requisitos establecidos, tanto en la propia Directiva como en otros acuerdos o compromisos asumidos por el Estado español en materia medioambiental (como, por ejemplo, el Protocolo de Kyoto). En dichas medidas se recogen las alternativas cuyas aplicaciones y resultados se han mostrado en los apartados anteriores para el periodo 2000-2010, relativas principalmente a la valorización (tanto energética como material) de los residuos y a la reducción de las emisiones de sustancias contaminantes a la atmósfera.

Otro de los mecanismos contemplados para la prevención y control integrados de la contaminación en el ordenamiento jurídico español es el recogido en el Real Decreto

⁷⁴ A nivel nacional, la autoridad competente, el Ministerio de Medio Ambiente, en cumplimiento de su obligación de transmitir información sobre las MTDs para la concesión de las AAI, ha elaborado diferentes Guías sobre las MTDs en España por sectores industriales, siendo precisamente la de la industria del cemento la primera que se elaboró y se publicó [MMA, 2004].

⁷⁵ Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxidum Manufacturing Industries (DOUE, 25 de junio de 2010) [EIPPCB, 2010].

508/2007, de 20 de abril, que regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento⁷⁶ E-PRTR (Pollutant Release and Transfer Registers) y de las autorizaciones ambientales integradas, que ha sido modificado por la Disposición final primera del Real Decreto 812/2007.

El Registro EPER-España⁷⁷ constituye el primer avance en el desarrollo de sistemas de información cada vez más completos y transparentes, cuya continuidad se ha visto materializada con el nuevo Registro Estatal de Emisiones y Fuentes contaminantes PRTR-España. En éste, las industrias del cemento incluidas en el ámbito de aplicación del Real Decreto 508/2007 deben revertir la información necesaria para cumplir con los requerimientos establecidos en el mismo⁷⁸. De esta manera, tal y como se recoge en la Directiva IPPC, se garantiza el acceso a la información, la participación del público en la toma de decisiones y el acceso a la justicia en materia de medio ambiente.

A finales de 2011, el número de empresas cementeras incluidas en el Inventario de Instalaciones PRTR-España ascendía a 72 complejos industriales repartidos por toda la geografía española, 54 de los cuales fabrican cemento o clínker en hornos rotatorios con capacidad superior a 500 tn/día y 18 corresponden a instalaciones con hornos de otro tipo, pero con capacidad superior a 50 tn/día.

En relación con la notificación al Registro E-PRTR de la cantidad anual emitida de CO₂ por la industria afectada, es recomendable la utilización de la metodología establecida por la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen de comercio de derechos de emisión de GEI, que incluye en su ámbito de aplicación a las instalaciones de fabricación de cemento sin pulverizar (clínker). De esta manera, la cantidad notificada de dichas emisiones al Registro PRTR debe coincidir, con la notificada en el Registro Nacional de Asignación de Derechos de Emisión⁷⁹, salvo excepción de las instalaciones

⁷⁶ Reglamento 166/2006 del Parlamento Europeo del Consejo, de 18 de enero de 2006, relativo al establecimiento de un registro europeo de emisiones y transferencias de contaminantes, por el que se modifican las Directivas 91/689/CE y 96/61/CE del Consejo. Su origen está en el Convenio CEPE/ONU (Aarhus, 1998), donde se ratifica el Protocolo PRTR por la Comisión Europea.

⁷⁷ Diseñado para cumplir con la Ley 16/2002 de 1 de julio sobre Prevención y Control Integrados de la Contaminación, la Directiva IPPC y la Decisión EPER.

⁷⁸ La Guía PRTR del Sector del Cemento establece criterios para orientar a las instalaciones y a las autoridades competentes a la hora de notificar la información correspondiente a emisiones y transferencias de residuos [OFICEMEN, 2009b].

⁷⁹ El Registro Nacional de Derechos de Emisión en España (RENADE), regulado por el Real Decreto 1264/2005, de 21 de octubre, es el instrumento a través del cual se asegura la publicidad y permanente actualización de la titularidad y control de los derechos en España y permite llevar la cuenta exacta de la expedición, titularidad, transmisión y cancelación de los derechos de emisión

que utilicen residuos peligrosos y municipales, las cuales están excluidas del ámbito de aplicación del régimen de comercio de derechos de emisión. En este último caso, las emisiones notificadas a PRTR deben incrementarse con la parte correspondiente a la derivada de la combustión de dichos residuos.

Asimismo, conviene destacar, por sus implicaciones inmediatas, la promulgación del Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación⁸⁰. Con su promulgación se deroga toda la normativa anterior e incorpora en una única norma todas las Directivas europeas en dicha materia. Su objetivo es *“la actualización del catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera (CAPCA) contenido en el Anexo IV de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera, así como establecer determinadas disposiciones básicas para su aplicación y unos mínimos criterios comunes en relación con las medidas para el control de las emisiones que puedan adoptar las comunidades autónomas para las actividades incluidas en dicho catálogo”* (Art. 1.1).

Por otro lado, el desarrollo y aplicación de la normativa IPPC se ha visto impulsada en España por el apoyo científico e institucional recibido en los últimos años, donde la predisposición y colaboración del sector del cemento ha sido imprescindible para delimitar el marco (legal, tecnológico y económico) en el cual desarrollar su actividad productiva, para afrontar los nuevos retos del desarrollo sostenible. Fruto de esa colaboración han surgido acuerdos, convenios, planes, documentos (estudios técnicos,

asignados a cada instalación afectada. Se trata de un registro accesible al público de manera permanente a través de Internet. Está supervisado y conectado al Community Transaction Log (CITL) europeo. Está adscrito a la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente y su gestión operativa la realiza Iberclear (empresa responsable de la gestión de los sistemas de registro, compensación y liquidación de valores de la Bolsa de Madrid) (www.factorco2.com/).

⁸⁰ A nivel nacional, está también en marcha la tarea de incorporación de la Directiva 2010/75/UE, de 24 de Noviembre, sobre emisiones industriales, que se pretende aprovechar para integrar de una manera similar a lo realizado en el ámbito de calidad del aire toda la normativa existente en materia de emisiones a la atmósfera en un único Real Decreto, así como incorporar las medidas necesarias para las actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera (APCA) no cubiertas por normativa europea. Con esta futura normativa, se trataría de consolidar e integrar la normativa básica estatal sobre emisiones a la atmósfera, compuesta por la Ley IPPC (principales instalaciones abarcando el medio ambiente de manera general –aire, agua, suelo-), la Ley 34/2007 (Ley marco sobre atmósfera), Real Decreto 100/2011 (clasificación actividades contaminadoras de la atmósfera) y una futura normativa de regulación básica de los valores límite de emisión y requisitos técnicos de las mismas (Ministerio de Medio Ambiente, 2011, Guía CAPCA).

guías, etc.), normativas, proyectos, etc. con fines diferentes, algunos de los cuales, y sin ánimos de ser exhaustivos recogemos en el Cuadro 3.5.

En todo el proceso de adaptación descrito, no podemos dejar de resaltar el papel que el desarrollo de las Tecnologías de la Información (TICs) ha tenido también, aprovechando la oportunidad para crear nuevas herramientas de comunicación, que contribuyan a facilitar el flujo de información en el sector. Así, por ejemplo, con fines fundamentalmente divulgativos, la industria cementera lanzó en 2010 una nueva web (www.recuperaresiduosencementeras.org), a través de la cual pretende llegar a un público más amplio y ofrecer a los internautas una mayor accesibilidad a toda la información relacionada con la utilización de los residuos en el sector cementero y los beneficios sociales asociados a la misma. El Boletín electrónico "Infocemento" es una newsletter de carácter mensual que pretende ser un punto de encuentro entre las empresas y otras instituciones relacionadas con el sector, como son las administraciones, los agentes sociales y las industrias afines a su actividad⁸¹.

Guías, documentos, estudios técnicos.....

- Cuaderno Técnico "Valorización de residuos en la industria cementera europea: estudio comparado", Fundación CEMA (2007).
 - Cuaderno técnico "Reciclado y valorización de residuos en la Industria Cementera en España", Instituto Cerdá-Fundación CEMA Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2009).
 - Guía sobre los métodos de medición, cálculo y estimación más adecuados para la determinación de las emisiones de las sustancias PRTR en la industria del cemento en España, Oficemen y el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009).
 - Guía para la rehabilitación de canteras, Cement Sustainability Initiative (CSI), WBCSD (2010).
 - Guía de valorización energética de residuos, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2010).
 - Guía de la normativa estatal sobre emisiones a la atmósfera, Ministerio de de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2011).
-

Acuerdos, Proyectos, Convenios de colaboración.....

- Acuerdo de colaboración entre Oficemen y Unesid (Unión de empresas siderúrgicas) para el fomento de la valorización (2007).
- Proyecto @O₂, patrocinado por Oficemen y dirigido por el Instituto para la sostenibilidad de los Recursos (ISR), para reducir las emisiones de CO₂ en España (2008).

⁸¹ Puede consultarse en http://www.infocemento.com/lstBoletines.asp?id_cat=1/.

Acuerdos, Proyectos, Convenios de colaboración.....

- Acuerdo entre Oficemen y Ciclopast (representante de los productores y transformadores de plásticos en la promoción del reciclado de los plásticos en España), para fomentar el reciclado energético de los plásticos (junio 2009).
- Acuerdo entre Oficemen y las Federaciones de los sindicatos mayoritarios MCA-UGT y FECOMA-CCOO para promover el uso sostenible de los recursos, la protección del medio ambiente, la salud de las personas y la competitividad del sector cementero español (diciembre 2010).
- Acuerdo de colaboración entre Oficemen y la Fundación Ciudad de la Energía (Ciuden) con el fin de potenciar la investigación y desarrollo de tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ y demostrar la viabilidad de su aplicación en el sector cementero (febrero 2010).
- Convenio de colaboración entre Oficemen⁸² y la Asociación española del CO₂, para la reducción de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera (2010).
- Proyecto Cíclope, subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y participado por Oficemen, el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), varias Universidades y centros de investigación, para desarrollar una metodología de análisis y evaluación de impactos ambientales y económicos para los edificios que considere su ciclo de vida en términos cuantificables de consumo energético y emisiones de GEI asociadas (2010).
- Proyecto IMAGEN "Inventarios sobre Medio Ambiente y Gestión Estadística sectorial Nacional" con el que se pretende disponer de una visión de la información pública medioambiental actual y real del sector y desarrollar herramientas, con aceptación de las administraciones públicas, para armonizar criterios en cuanto a metodología de medición y de factores de emisión atmosféricos sectoriales (2011).
- Acuerdo de colaboración entre Oficemen y Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (Anefa) para la recuperación medioambiental y paisajística de los espacios afectados por las actividades mineras (2011).

Otras acciones...

- Publicaciones sectoriales y herramientas de comunicación: Informes anuales de actividad, Boletín Infocemento, Revista Cemento Hormigón, Documentos estadísticos, Páginas web, Foros, etc.
- Recomendaciones e informes especiales
- Grupos de trabajos
- Jornadas y Congresos

Cuadro 3.5. Resultados de colaboración y apoyo institucional y científico en el sector cementero
Fuente: elaboración propia a partir de Informes de Actividades de Oficemen (2007-2011)

Para finalizar, no podemos olvidar, en relación a las emisiones de CO₂, las implicaciones que el compromiso de Kyoto ha tenido y puede tener en un futuro, para el sector objeto de nuestro estudio. Por su relevancia y por el objetivo de nuestra investigación, dedicamos el siguiente apartado a hacer un balance y previsión para el sector en dicho ámbito.

⁸² Desde abril de 2010, Oficemen coordina la Secretaría Técnica de la Plataforma Tecnológica Española del CO₂ (PTECO2) y la Asociación Española del CO₂ (AECO2).

3.3. LA PRODUCCIÓN DEL CEMENTO Y EL PROTOCOLO DE KYOTO: BALANCE E IMPLICACIONES FUTURAS

Las limitaciones de las emisiones de GEI impuestas en el Protocolo de Kyoto⁸³ afectan al sector del cemento, el cual se incluye en el ámbito de aplicación⁸⁴ de la Directiva 2003/87/CE, que regula el comercio europeo de derechos de emisión de GEI, mercado en el que las empresas pueden intercambiar los derechos asignados en los Planes Nacionales de Asignación⁸⁵ (PNA), vendiendo los que le sobran o comprando los necesarios para cubrir el déficit, dependiendo de que las emisiones autorizadas sean superiores o inferiores a las emisiones reales, respectivamente. Esta última situación también puede ser compensada con la entrega de reducciones certificadas de emisiones (RCE) o unidades de reducción de emisiones⁸⁶ (URE), obtenidas a través del mecanismo

⁸³ La toma de conciencia mundial del problema del cambio climático se formalizó en 1997 en Kyoto, durante la III Conferencia sobre Cambio Climático, donde la comunidad internacional asumió su primer compromiso frente al problema, esto es, reducir las emisiones de GEI en un 5% respecto al nivel de 1990, en el periodo 2008/2012 [ONU, 1998]. No obstante, el PK no entró en vigor hasta 2005, año en que se cumplían las condiciones para su ratificación por 55 países, que representaban el 55% de las emisiones contaminantes. A partir de esa fecha se han sucedido diferentes cumbres, celebrándose la última en Durbán en diciembre de 2011, en la que, dada la necesidad de ampliar el periodo de compromisos adquirido en Kyoto, se logra un acuerdo para extenderlo después de 2012 y establecer una serie de reglas y pautas para un convenio global de reducción de gases de efecto invernadero. Concretamente los acuerdos establecidos giran en torno a tres grandes ejes: determinar un marco legal aplicable a partir de 2015, que comprometa a todos los países en materia climática; la puesta en marcha del Fondo Verde para el Clima acordado en Cancún (México, 2010), para ayudar a los países en desarrollo a hacer frente a los perjuicios causados por el cambio climático y la continuidad del PK a través de un segundo periodo de compromiso, que obliga a los países industrializadas, excepto EEUU. Este segundo periodo de compromiso comenzará el 1 de enero de 2013, con finalización a 31 de diciembre de 2020 [UNDP, 2011].

⁸⁴ Incluye inicialmente la generación de electricidad, refino, producción y transformación de metales féreos, cemento, cal, vidrio, cerámica, pasta de papel, papel y cartón y posteriormente, también los operadores aéreos (Directiva 2008/101/CE por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE). Además, también tiene limitada su emisión cualquier actividad de combustión con potencia térmica superior a 20MW, independientemente del sector en el que se encuentre.

⁸⁵ Constituyen la pieza central de este nuevo mercado, que cada Estado Miembro deberá elaborar y publicar, una vez aprobado por la Comisión Europea. En ellos se asignan los derechos de emisión entre los distintos sectores industriales e instalaciones incluidas en el mercado, de acuerdo con los objetivos de emisión que tiene fijados. En España, el primer PNA, aprobado por Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre regulaba, básicamente, los derechos de emisión de las empresas para el periodo 2005/07, estableciendo para dicho tiempo una estabilización de las emisiones globales (sólo bajarán un 0,2% respecto a 2002). El grueso de la reducción de los gases que contempla el PK se recoge en un segundo Plan, aprobado por el Real Decreto 1370/2006 de 24 de noviembre, que delimita las emisiones para el periodo 2008/12, fecha en la que las emisiones no deberían sobrepasar en un 15% las del año base.

⁸⁶ Todas ellas representativas de un permiso para liberar a la atmósfera una tonelada métrica de carbono equivalente.

de Desarrollo Limpio⁸⁷ (MDL) o de los proyectos de Aplicación Conjunta⁸⁸ (AC), respectivamente, en los que haya participado directamente con proyectos o bien a través de los fondos de carbono⁸⁹, que se constituyen para financiar un conjunto de proyectos. En ambos casos se persiguen un doble objetivo: facilitar a los países desarrollados y a las economías en transición el cumplimiento de sus compromisos de reducción de emisiones y apoyar el crecimiento sostenible en los países en desarrollo a través de la transferencia de tecnologías limpias.

Como se aprecia en el Cuadro 3.6, hasta ahora los derechos de emisión asignados en los dos PNA aprobados (PNA I para el periodo 2005/07 y PNA II para 2008/12) han sido a título gratuito⁹⁰, situación que cambiará a partir de 2013 según el sector de actividad de la empresa. Así pues, tal y como se recoge en la Directiva 2009/29/CE, a partir de 2013, la gratuidad (total o parcial) se limitará a algunas instalaciones, según sector, reservándose la subasta total para el sector eléctrico y la subasta parcial para otros sectores.

Etapas	Pre-Kyoto (PNA I)	Kyoto (PNA II)	Post-Kyoto
Periodo	2005/07	2008/12	2013/20
Reducción de emisiones	5% respecto a 1990		20 -30% respecto a 1990
Metodología de asignación	Grandfathering ⁹¹	Grandfathering y Benchmarking	Benchmarking
Asignación de derechos de emisión	Gratuita	Gratuita	- Gratuita total o parcialmente, según sector - Subasta total para sector eléctrico y parcial para otros sectores
Datos clave para la asignación	Emisiones	Emisiones y producciones	Intensidades de emisión 10% más eficiente
Ámbito	Nacional	Nacional	Europeo

Cuadro 3.6. Objetivos y asignación de emisiones del Protocolo de Kyoto
Fuente: [Riestra et al., 2009]

⁸⁷ Permite la obtención de Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE) invirtiendo en proyectos en países sin compromisos de reducción, típicamente en vías de desarrollo, como los latinoamericanos (Art. 12 del PK).

⁸⁸ Posibilita reducir las emisiones invirtiendo en proyectos de países con compromiso de reducción y economías de transición como son los de Europa del Este. Con este mecanismo las empresas pueden conseguir Unidades de Reducción de Emisiones (URE) (Art. 6 del PK).

⁸⁹ Instrumentos financieros que permiten suavizar los riesgos de la utilización de los mecanismos flexibles y asegurar créditos de buena calidad con alta eficiencia a través de una cartera diversificada de proyectos [Ramos, 2005].

⁹⁰ Las asignaciones gratuitas se hicieron aplicando una metodología ex-ante en función de previsiones de evolución de los sectores, parámetros técnicos y emisiones de referencia previas.

⁹¹ Metodología de asignación basada en datos históricos.

El precio a pagar por una tonelada de CO₂ no autorizada depende, entre otros factores, del valor que el derecho alcance en el mercado y del nivel de participación de las empresas en proyectos de reducción de emisiones, a través de los otros mecanismos de flexibilidad contemplados en el PK (MDL y/o AC).

Durante el primer PNA la evolución de los precios estuvo marcada por la incertidumbre sobre la existencia de derechos suficientes para hacer frente a las necesidades del mercado (Gráfico 3.10). Así, durante el primer año del mismo, los precios crecieron hasta alcanzar los treinta euros. Sin embargo, tras la publicación en abril de 2006 del primer informe sobre las emisiones registradas por las diferentes instalaciones⁹², se produce una caída considerable de los precios, tras constatarse un importante excedente de derechos, no sólo del sector cementero, sino a nivel general.

Sin embargo, la fluctuación de los precios durante el segundo PNA presenta una evolución diferente. La crisis económica en la que estamos inmersos ha provocado un recorte en la producción de las instalaciones con la consiguiente reducción de emisiones de CO₂, que se traduce en una sobreasignación de derechos. Esto ha provocado una caída en el precio durante el primer ejercicio económico del PNA (Gráfico 3.10), mientras que durante el primer trimestre del año 2009 se aprecia una ligera recuperación, relacionada posiblemente con un leve repunte de la situación económica. A este hecho se le une la subida del precio del barril del petróleo, que puede haber redundado en un incremento del uso del carbón como fuente energética. Ello se ha traducido en un incremento de las emisiones, reflejado en el mercado mediante un aumento significativo del precio de los derechos. El comportamiento durante 2010 se estabiliza y su valor oscila en torno a 14,32 euros, experimentado un leve repunte en la primera mitad de 2011, alcanzando su máximo el 31/05 con un precio de 16,77 euros. A partir de ese momento, consecuencia de la situación económica, comienza un importante descenso de su valor, hasta alcanzar el 04/06 un precio de 6,31 euros [SENDECO2].

⁹² Las instalaciones incluidas en el PNA son obligadas a presentar una notificación anual sobre sus emisiones de GEI a la Administración competente de su comunidad autónoma, de acuerdo con los principios del Anexo III de la Ley 1/2005 de 9 de marzo que regula el régimen de Comercio de Derechos de Emisión de Gases de Efecto Invernadero y en conformidad con la Decisión 2007/589/CE de la Comisión, de 18 de julio de 2007, por la que se establecen las directrices para el seguimiento y notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero.



Gráfico 3.10. Cotización del derecho de emisión (2005-2012) (euros/tn CO₂)

Fuente: elaboración propia a partir de información de SENDECO2

El total de instalaciones del sector cementero incluidas en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE supera las 30 en España (ver Tabla 3.7), liderando junto con el sector eléctrico la autorización de emisiones en los dos PNAE. La evolución de éstas respecto a las emisiones reales pasamos a comentarla en los sucesivos subapartados, diferenciado las tres etapas referidas anteriormente.

Sector	Número de instalaciones	% sobre Total	% sobre Subtotal
Combustión (1.b-1.c)	443	38,4	100
Generación: otros	12	1	11,43
Generación: ciclo combinado	26	2,3	24,76
Generación: carbón	36	3,1	34,29
Generación: extrapeninsular	21	1,8	20,00
Generación: fuel	10	0,9	9,52
Industria: azulejos y baldosas	37	3,2	6,10
Industria: cal	24	2,1	3,95
Industria: cemento	37	3,2	6,10
Industria: fritas	23	2	3,79
Industria: pasta y papel	116	10	19,11
Industria: refino de petróleo	13	1,1	2,14
Industria: siderurgia	32	2,8	5,27
Industria: tejas y ladrillos	287	24,8	47,28
Industria: vidrio	38	3,3	6,26
Subtotal: Generación	105	9,1	100
Subtotal: Combustión (1.b-1.c)	443	38,4	100
Subtotal: Industria	607	52,6	100
Total	1155	100	100

Tabla 3.7. Instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE
Fuente: Balance global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2011 [MMA, 2012]

a) Etapa pre-Kyoto (PNA 2005-2007)

El PNA I fue concebido como un período de aprendizaje, comprendido entre 2005 y 2007, que se aquejó de una serie de fallos debido al carácter preparatorio de esta etapa. Desde el inicio se gestó de forma apresurada consecuencia de la presión social. Muchos temas estaban todavía sin tratar, como el procedimiento de medición de emisiones, su fiscalidad, contabilidad, entre otros, provocando la asignación de una cantidad excesiva de derechos a las diferentes instalaciones [Rovira, 2008]. El objetivo para este periodo

de tiempo era conseguir una estabilización de las emisiones globales de CO₂ (sólo bajarán un 0,2% respecto a 2002).

En esta primera etapa, como se puede apreciar en la Tabla 3.8, aunque los derechos asignados al sector cementero representan el 97,6% de los solicitados por las instalaciones afectadas, la tasa de cobertura, para el conjunto de las instalaciones, es superior al 100%.

Sectores Directiva CE	Plan Nacional de Asignación 2005-2007								
	Promedio anual de emisiones 2005-2007		Emisiones verificadas					Tasa de cobertura (%) (2)	Número de instalaciones (2007)
	Solicitadas por instalaciones	Asignación (1)	2005	2006	2007	Promedio 2005-2007			
Generación eléctrica (3)	148.844,30	83.084,6	100.974,9	93.828,8	99.587,7	98.130,5	84,7	85	
Combustión 1b y 1c (4)(5)	22.891,3	20.135,9	14.166,5	17.076,9	18.066,9	16.436,8	122,5	377	
Subtotal Industria:	76.527,1	72.577,7	68.485,2	68.805,5	68.897,4	68.729,4	105,6	603	
Refino	16.994,4	15.458,4	15.464,2	15.494,8	15.138,0	15.365,6	100,6	13	
Siderurgia y coque (3)	11.514,0	11.521,8	11.314,2	11.052,5	11.369,9	11.245,5	102,5	30	
Cemento	29.064,6	28.368,8	27.384,6	27.366,0	27.468,1	27.406,2	103,5	37	
Cal	2.880,5	2.451,6	2.063,2	2.205,1	2.335,8	2.201,4	111,4	24	
Vidrio	2.385,3	2.252,4	1.993,2	1.996,9	1.974,9	1.988,3	113,3	38	
Fritas	746,4	704,1	579,2	551,5	497,8	542,8	129,7	23	
Ladrillos y tejas	6.060,1	4.923,0	4.145,1	4.146,1	4.043,1	4.111,4	119,7	287	
Azulejos y baldosas (6)	1.299,3	1.377,1	801,1	1.381,5	1.358,3	1.369,9	100,5	36	
Pasta de papel, papel y cartón	5.582,5	5.520,5	4.740,5	4.611,0	4.711,6	4.687,7	117,8	115	
Total sectores afectados	248.262,7	175.798,2	183.626,7	179.711,2	186.552,0	183.296,6	95,9	1.065	
Total emisiones España (7)	—	—	411.150,0	433.070,0	442.322,0	—	—	—	
Sectores afectados por comercio de emisiones / total economía			41,6%	41,5%	42,2%				

(1) Asignaciones definitivas procedentes del cierre del período 2005-2007. Aplicación de la Ley 1/2005 en España. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Marino y Rural (mayo de 2008).

(2) Relación existente entre los derechos de emisión asignados y las emisiones verificadas, a cada sector, ambos en promedio anual.

(3) Tanto la asignación de derechos de emisión como la verificación de las emisiones originadas por la combustión de los gases siderúrgicos, que se lleva a cabo en las instalaciones de generación eléctrica, se han contabilizado en el sector siderúrgico.

(4) El epígrafe 1b comprende instalaciones de cogeneración con independencia del sector en el que se encuentren, exceptuando los diez sectores industriales relacionados a continuación. En el 1c se encuentran otras instalaciones de combustión (dispositivos), con potencia térmica nominal superior a los 20 Mw no incluidas en dichos sectores.

(5) El aumento de las emisiones verificadas entre 2005 y 2006 se debe a la inclusión, a partir de este último, de una serie de nuevos dispositivos de combustión en el ámbito normativo de la Ley 1/2005 (instalaciones atomizadas de arcilla del sector cerámico).

(6) En las emisiones verificadas del sector, a partir de 2006, se incluyeron una serie de instalaciones atomizadas que no estaban anteriormente afectadas por el comercio de emisiones. Por ello, el promedio del período, que afecta al cálculo de la tasa de cobertura, se ofrece para 2006-2007 en vez de los tres años del PNA. Igualmente, en la solicitud se han incluido las de dichas instalaciones para 2006-2007.

(7) MMARM. Inventarios de Emisiones. Ed. 2009.

Tabla 3.8. Balance del PNA I en el sector del cemento (2005-2007) (miles derechos o miles tn equivalentes de CO₂)
Fuente: [Riestra et al., 2009]

En este periodo, la intensidad de emisión del sector del cemento (las emisiones de CO₂ por tn de producto fabricado) ha experimentado una ligera disminución (4,7% respecto a la intensidad media de emisiones 2001-2004), a pesar de haber sufrido un leve aumento la producción de las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Directiva (ver Tabla 3.9). Ello refleja el esfuerzo realizado por la industria cementera por compatibilizar su actividad productiva con la protección del medio ambiente. En concreto, en este primer periodo, el sector ha conseguido ahorrar 2,7 millones de

toneladas de CO₂, gracias, fundamentalmente, a que la industria ha invertido más de 600 millones de euros en los últimos seis años en mejoras encaminadas a proteger el entorno natural. Entre éstas, destaca la apuesta de la industria por la implantación de las MTDs y el fomento de la valorización (energética y material) de los residuos en el proceso de producción (ver Apartados 3.2.1 y 3.2.2).

Sectores industriales	2005			2006			2007		
	Producción	Emisión	Intensidad de emisión	Producción	Emisión	Intensidad de emisión	Producción	Emisión	Intensidad de emisión
Refino	60,89	15,46	0,254	61,95	15,49	0,250	60,39	15,14	0,251
Siderurgia (1)	17,90	11,23	0,627	18,40	11,00	0,598	19,00	11,30	0,595
Coque	0,28	0,08	0,290	0,23	0,05	0,237	0,29	0,07	0,229
Cemento	31,74	27,38	0,863	32,08	27,37	0,853	32,05	27,47	0,857
Cal	2,19	2,06	0,941	2,25	2,21	0,982	2,36	2,34	0,989
Vidrio	4,03	1,99	0,495	4,02	2,00	0,496	4,01	1,97	0,492
Fritas	0,91	0,58	0,639	0,89	0,55	0,620	0,86	0,50	0,580
Ladrillos y tejas	21,46	4,15	0,193	22,39	4,15	0,185	21,85	4,04	0,185
Azulejos y baldosas (2)	11,16	1,25	0,112	11,47	1,38	0,120	11,45	1,36	0,119
Pasta de papel, papel y cartón	7,67	4,74	0,618	8,39	4,61	0,550	8,79	4,71	0,536

(1) Aunque la verificación de las emisiones originadas por la combustión de los gases siderúrgicos se lleve a cabo en las instalaciones de generación eléctrica, dichas emisiones se han contabilizado en el sector siderúrgico.
 (2) Para evitar la ruptura de la serie de producción y emisiones del sector Azulejos y baldosas, se han incluido en 2005 las estimadas y comunicadas por una serie de instalaciones atomizadoras que se incorporaron al comercio de emisiones a partir de 2006.

Tabla 3.9. Emisiones de CO₂ y producción de las industrias afectadas por el comercio de emisiones (2005-2007)

Fuente: [Riestra et al., 2009]

No obstante, a nivel general, el carácter preparatorio de esta fase y su gestión de forma apresurada [Riestra et al., 2009], justifican en parte la sobreasignación de emisiones, provocando un superávit de derechos en el mercado con la consecuente bajada de los precios de los derechos y cuestionándose, por tanto, el sistema propuesto como dinamizador de la capacidad de reducción de emisión de la industria europea.

b) Etapa Kyoto (PNA 2008-2012)

Conforme a lo establecido en la Ley 1/2005 y la Directiva comunitaria, el objetivo básico del PNA-II⁹³, es que no aumenten las emisiones de GEI por encima del 37% respecto al año base⁹⁴. Así, la cantidad total de derechos asignados para el periodo 2008-2012

⁹³El balance de la primera etapa permitió reconsiderar las asignaciones de derechos para el siguiente Plan (PNA 2008-2012), pero con ciertas modificaciones (recorte del 0,28% de la cantidad total de derechos y una reducción del porcentaje de créditos procedentes de mecanismos de flexibilidad del PK) incluidas en el Real Decreto 1030/2007, de 20 de julio.

⁹⁴ Pretende alcanzarse a través de la suma del 15% de incremento del objetivo Kyoto (que pretendía que España sólo aumentara en un 15% desde 1990), un 2% adicional a través de las actividades de forestación y reforestación y de la adquisición del equivalente a un 20% en créditos de carbono procedentes de los mecanismos de flexibilidad del PK (RCE y URE) [RD 1370/2006].

asciende a 145,97 millones de toneladas de CO₂/año, lo que supone una reducción del 21,7% respecto a las emisiones verificadas del año 2007.

La propuesta de asignación para las 37 instalaciones de la industria cementera para esta etapa es de 29,015 Mtn/año de derechos de emisión, el 5% del total de las asignaciones y aproximadamente el 40% de las del sector industrial (ver Tabla 3.10).

Sectores Directiva	Emisiones autorizadas PNA II (1)	Emisiones verificadas				
		2008	2009	2010	2011	Total
Generación eléctrica	242,36	88,73	72,84	56,41	70,09	288,07
Combustión (1.b - 1.c)	74,01	15,59	15,29	15,80	15,77	46,65
Subtotal: Industria	289,73	59,14	48,81	49,26	46,82	204,03
Refino de petróleo	67,18	14,6	13,75	13,28	14,08	55,71
Siderurgia	39,02	7,97	6,4	7,51	7,15	29,03
Cemento	116,66	23,4	18,22	17,76	15,03	74,41
Cal	9,81	2,19	1,91	2,09	2	8,19
Vidrio	8,71	1,85	1,65	1,68	1,69	6,87
Fritas	2,55	0,47	0,34	0,41	0,41	1,63
Tejas y ladrillos	17,66	2,83	1,49	1,28	1,12	6,72
Azulejos y baldosas	5,96	1,15	77	0,84	0,97	79,96
Pasta y papel	22,19	4,68	4,26	4,42	4,37	17,73
Total S. afectados	606,1	163,46	136,94	121,48	132,68	554,56

(1) No incluye las emisiones de 2012

Tabla 3.10. Emisiones autorizadas vs. emisiones verificadas de las instalaciones afectadas por el comercio de emisiones (2008-2011)

Fuente: elaboración propia a partir del Balance global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2011 [MMA, 2012]

La caída continua de la producción del cemento en este periodo de tiempo (2008-2012), en un contexto generalizado de crisis, justifica en gran medida, al igual que para el resto de la industria afectada, el excedente de asignación de derechos, que a diferencia del primer PNA, puede ser utilizado en el siguiente periodo. En esta etapa, debido a la existencia de limitaciones tecnológicas y el poco margen de maniobra que disponen las instalaciones para mejorar la eficiencia energética⁹⁵, el potencial de reducción de emisiones de CO₂ es inferior al de la fase pre-Kyoto.

⁹⁵ Es cuatro puntos más eficiente que la media del sector de la UE y significativamente más eficiente que la media de los grandes productores mundiales de cemento, habiendo reducido su consumo energético más de un 40% en los últimos 25 años [OFICEMEN, 2011a].

Asimismo, el excedente de derechos de esta etapa, se debe también a la participación de las instalaciones del sector en proyectos de AC y MDL, que en aplicación del PK, también ha compensado parte de sus emisiones con la entrega de RCE y URE, siendo el único sector industrial que ha invertido de manera directa en MDL (ver Tabla 3.11). En 2008, más del 50% de las instalaciones de este sector entregó RCE/URE para la compensación anual de emisiones, reduciéndose esta proporción en los dos años siguientes, tomando valores del 36% (con 13 instalaciones) en 2009 y del 40% (con 15 empresas) en 2010, e incrementándose en 2011, con 24 empresas. No obstante, el sector del cemento, con una proporción alta de instalaciones que entregan estos créditos, hasta 2011 no alcanza una tasa de utilización significativa, tanto en relación a las emisiones como a la asignación (18,32 y 9,47% respectivamente). En el resto del periodo no se alcanza el 5% de las mismas.

	2008	2009	2010	2011
Entrega RCE/URE (tn CO ₂ equivalente)	769.701	212.995	348.481	2.754.127
Excedente derechos (Mtn CO ₂)	5,84	11,06	12,68	14,04
Nº instalaciones que entregaron RCE/URE	19	13	15	24
% RCE/URE s/asignación emisiones PNA	2,63	0,73	1,2	9,47
% RCE/URE s/emisiones verificadas	3,29	1,17	1,96	18,32

Tabla 3.11. Aplicación de otros mecanismos de flexibilidad (AC y MDL) en el sector cementero (2008-2011)

Fuente: elaboración propia a partir de los informes y de los balances globales/sectoriales de aplicación de la Ley 1/2005 (2008-2011)

Por todo lo expuesto, el balance de este periodo, se traduce en una sobreasignación de derechos de emisión, constatándose una reducción progresiva de las emisiones verificadas de CO₂ para el mismo. El excedente total asciende a 42,25 Mtn CO₂, distribuidas a lo largo de los cuatro primeros años de esta etapa, en sentido ascendente: 5,84 Mtn en 2008, 11,06 Mtn en 2009, 11,31 Mtn en 2010 y 14,04 Mtn en 2011 (ver Gráfico 3.11).

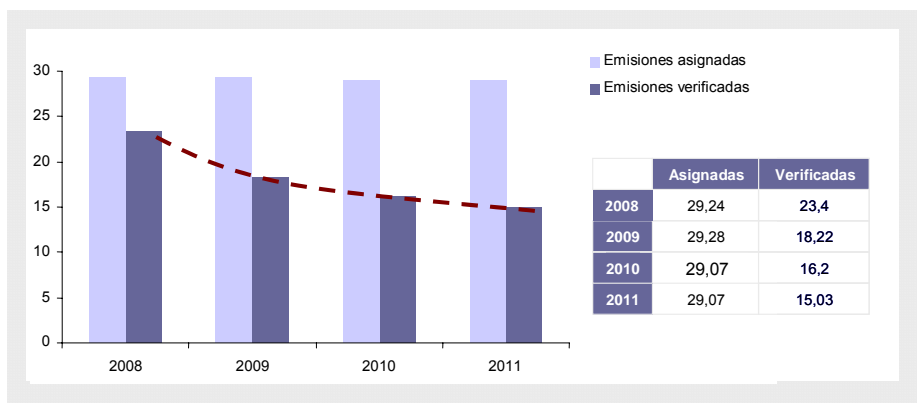


Gráfico 3.11. Emisiones autorizadas vs. emisiones verificadas de la industria del cemento (2008-2011)
Fuente: elaboración propia a partir del Balance global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2011 [MMA, 2012]

c) Etapa post-Kyoto

A diferencia de las dos etapas que le preceden, en esta etapa la asignación de derechos no es gratuita para todos los sectores implicados (ver Cuadro 3.6). A partir del 1 de enero de 2013, se adopta un enfoque comunitario, tanto en lo que respecta a la determinación del volumen total de derechos de emisión, como en lo relativo a la metodología para asignar los derechos de emisión. Por ello, de conformidad con lo establecido en el artículo 17 de la Ley 1/2005, de 9 de marzo, tras su modificación por la Ley 13/2010, de 5 de julio, para transponer las novedades introducidas en el Régimen Europeo de Comercio de Derechos de Emisión mediante la Directiva 2009/29/CE, la metodología de asignación gratuita transitoria vendrá determinada por las normas armonizadas que se adopten a nivel comunitario⁹⁶.

A partir de aquella fecha se prevé que el sector cementero tendrá asignación gratuita del 80% sobre prorrateo de las emisiones totales de la UE 2005-2007 y decrecimiento lineal hasta la asignación gratuita nula en 2020. En los sectores con riesgo de fuga de carbón⁹⁷ o deslocalización se podrán conceder hasta el 100% de los derechos de forma gratuita.

⁹⁶ La Decisión de la Comisión 2011/278/UE, de 27 de abril de 2011, por la que se determinan las normas transitorias de la Unión para la armonización de la asignación gratuita de derechos de emisión con arreglo al artículo 10 bis de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo fue publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea del día 17 de mayo de 2011.

⁹⁷ Incluidos en el Anexo de la Decisión de la Comisión, de 24 de diciembre de 2009, por la que se determina, de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, una

La propuesta provisional de asignación individualizada de derechos de emisión de GEI para el periodo 2013-2020 asciende a 23.995.431 (equivalentes tn de CO₂) para el conjunto del sector analizado, distribuida entre las instalaciones afectadas en este periodo [MAAMA, 2012b].

Esta última etapa de las analizadas, caracterizada precisamente por la falta de estabilidad económica, marca un antes y un después del PK, condicionando el marco en el cual las cementeras tendrán que asumir nuevos retos y oportunidades para seguir compatibilizando su producción con la protección del medio ambiente⁹⁸. Al estudio de algunos de ellos dedicamos el siguiente apartado.

3.4. MIRANDO AL FUTURO: NUEVOS RETOS Y OPORTUNIDADES

A pesar de la recesión que ha experimentado en los últimos años el sector del cemento y las previsiones poco alentadoras que se vislumbran para los próximos años para afrontar la situación crítica por la que atraviesa la economía en general, el escenario descrito en los apartados anteriores implica nuevos retos y oportunidades para el sector del cemento, que marcan futuras líneas de actuación que permitirán consolidar las acciones emprendidas en la última década en materia medioambiental e iniciar otras nuevas en diferentes ámbitos, destacando por su impacto las destinadas a reducir las emisiones de los GEI.

Así pues, la industria analizada, en su afán por compatibilizar la actividad productiva desarrollada con la protección y conservación del medio ambiente en el marco legal, económico y tecnológico actual, apuesta por una producción ecoeficiente, invirtiendo en I+D para la fabricación y comercialización de los denominados "ecocementos" o "cementos ecológicos", contribuyendo de esta manera al desarrollo de tecnología innovadora para una economía respetuosa con el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Ya son varios los proyectos que en este ámbito se han puesto marcha y que han obtenido sus primeros resultados. Una muestra de ellos son los siguientes:

lista de los sectores y subsectores que se consideran expuestos a un riesgo significativo de fuga de carbono.

⁹⁸ Ver, entre otros, [Elorrieta, 2011], [Moya et al., 2010], [Baeza et al., 2009], [Riestra et al., 2009], [Zaragoza, 2009], [Rovira, 2008], etc.

- La nueva técnica de producción desarrollada por el grupo de Nanomateriales en Construcción (NANOC) de Tecnalía Corporación Tecnológica, que sustituye la piedra caliza como materia prima por residuos sólidos de las centrales térmicas (principalmente cenizas volantes). Con ello pretenden alcanzar varios objetivos: realizar una gestión eficaz de los residuos a través del reciclaje, contribuir a la preservación de los recursos naturales del planeta, evitar la emisión directa de CO₂ a la atmósfera derivada del proceso de descarbonatación y reducir el consumo energético.
- El nuevo tipo de cemento desarrollado por la empresa británica Novacem, que se compone principalmente de silicato de magnesio, recurso muy abundante y fácil de extraer y producir. Con la sustitución del carbonato de calcio por el silicato, el proceso de carbonatación⁹⁹ es mucho más rápido, requiere temperaturas mucho más bajas, la generación de dioxinas es un 90% menor que en la producción del cemento Pórtland y además se absorbe CO₂ durante la producción en mayor cantidad de la que se produce, de ahí que le llamen Cemento Carbono Negativo¹⁰⁰.
- Otros procesos que conlleven una reducción de las emisiones, como los desarrollados por Cementos Calera que utiliza un proceso denominado mineralización de carbonatos por precipitación acuosa para fabricar otro tipo de cemento ecológico¹⁰¹.
- El desarrollo de estándares de calidad medioambiental específicos del sector, que garanticen el uso racional de los recursos naturales, la reducción del consumo energético y de las emisiones de sustancias contaminantes a la atmósfera en los procesos de producción, como es el caso de Ecocem del grupo

⁹⁹ El proceso de producción de este cemento utiliza una carbonatación acelerada de silicatos de magnesio a 180°, los carbonatos producidos se calientan a temperaturas bajas de 700°C para producir óxido de magnesio, principal compuesto de dicho cemento junto al carbonato de magnesio hidratado.

¹⁰⁰ Las emisiones de CO₂ se reducen a la mitad (0,5 toneladas por tonelada de cemento fabricado), y absorbe cuando se endurece alrededor de 1,1 toneladas de CO₂. Su huella de carbono es negativa, pues elimina 0,6 toneladas de CO₂ por cada tonelada producida. Sin embargo, el silicato de magnesio está asociado a enfermedades pulmonares y algunos tipos de cáncer, por ello algunas organizaciones no aconsejan su utilización.

¹⁰¹ Actualmente los cementos de Calera se utilizan como aditivos para el cemento Pórtland y no como sustituto de éste, como en el caso de Novacem.

cementero Holcim, Ecooperando¹⁰² del grupo Cemex o el sello FSC de Lafarge Cementos¹⁰³.

En otra línea de actuación, teniendo en cuenta la relevancia que para esta industria tiene las limitaciones de las emisiones de CO₂ derivadas del PK, así como las limitaciones técnicas y económicas que para el sector tienen las alternativas disponibles para reducirlas y el reducido margen de maniobra con el que cuentan para seguir reduciendo a mínimos el impacto sobre el medio ambiente¹⁰⁴, sin mermar la calidad de su producción, y de cara al futuro, hay que destacar las actuaciones que se centran en analizar la viabilidad de la aplicación de la tecnología de captura y almacenamiento de CO₂ (CAC¹⁰⁵) en el sector, fomentando la investigación, desarrollo y demostración (I+D+D) de tecnologías aplicables como complemento al esfuerzo que está realizando el sector para reducir sus emisiones.

El interés de la aplicación de la tecnología de CAC surge de un consenso internacional científico y de desarrollo tecnológico, promovido por gobiernos e industrias de los países más avanzados, como una herramienta más -junto al aumento de las renovables y la eficiencia energética- para mitigar el cambio climático y como una oportunidad para la industria. El Informe especial sobre la captación y el almacenamiento de dióxido de carbono (2005), elaborado por el Grupo de trabajo III del IPCC por invitación de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, constituye un importante avance en esta línea de actuación, convirtiéndose en un documento base para la aplicación y desarrollo de la tecnología CAC [Metz et al., 2005].

Así pues, la CAC, como una de las opciones de la cartera de medidas de mitigación para la estabilización de las concentraciones atmosféricas de GEI, contempladas en la Estrategia Internacional del Cambio Climático, consiste en un proceso de separación del CO₂ emitido en algunos procesos industriales y fuentes relacionadas con la energía, su

¹⁰² Ver http://www.cemex.es/ce/ce_pr_cc.html/.

¹⁰³ Con esta certificación, Lafarge Cementos garantiza que la madera o el papel con los que se han fabricado los productos finales que compra la industria (sacos y palets, fundamentalmente) proceden de fuentes sostenibles, legales y controladas.

¹⁰⁴ Las plantas españolas de cementos se encuentran entre las más eficientes a nivel global, junto con Japón y Corea del Sur, siendo cuatro puntos más eficientes que la media europea [OFICEMEN, 2011c].

transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo (ver Figura 3.2).

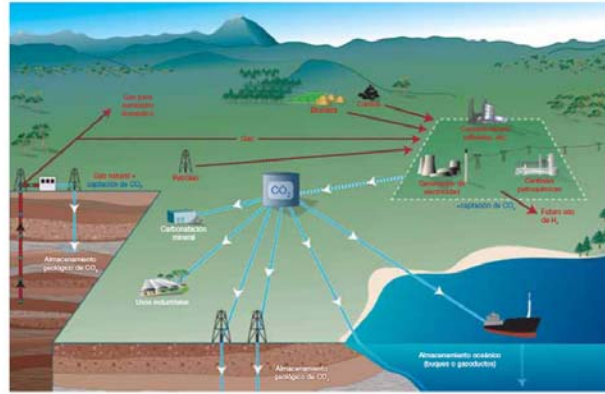


Figura 3.2. Diagrama esquemático de los posibles sistemas de CAC
Fuente: [Metz et al., 2005]

Aunque existen diferentes métodos para la separación del CO_2 , dos de ellos han sido identificados potencialmente factibles para la industria del cemento: poscombustión y oxidación.

La tecnología de poscombustión se refiere a la separación del CO_2 del gas de escape al final del horno de cemento. Esta tecnología se podría aplicar en las plantas cementeras actuales sin efectuar modificaciones importantes en el proceso de producción.

Por su parte, la tecnología de oxidación implica la operación del horno de cemento con una mezcla de oxígeno puro y CO_2 reciclado, en lugar de usar aire, lo que da como resultado un gas de escape de CO_2 puro. Ésta puede ser una solución a largo plazo, y será aplicable para las plantas cementeras nuevas, pues se requerirá de una nueva generación de quemadores, líneas de hornos de cemento y configuraciones de las plantas.

La otra posibilidad, la tecnología de precombustión, tiene una aplicación más limitada en la industria del cemento por las características del proceso de producción y por los requerimientos de inversión superior a las otras dos alternativas posibles.

Salvo en el caso de que las plantas estén ubicadas directamente sobre un lugar de almacenamiento seguro, el CO₂ captado debe ser transportado desde el punto de captación hasta un lugar de almacenamiento geológico¹⁰⁶ (yacimientos de petróleo y gas, formaciones, salinas profundas y capas de carbón inexplotables) u oceánico, a través de gaseoductos o en estado líquido, también, por vía terrestre o marítima (buques, vagones o camiones cisternas).

Es indiscutible pues en este contexto la relevancia del apoyo institucional y la colaboración de la industria para avanzar en las posibles aplicaciones de la CAC. Así pues, en los últimos años se han desarrollado, en esta línea, distintas iniciativas, públicas y privadas, en la UE y en España, con el fin de cumplir los compromisos de reducción de emisión de GEI y contribuir al desarrollo tecnológico en el ámbito energético. En España, en el marco de la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia, el esfuerzo se ha consolidado con tres grandes proyectos significativos, en los que participan empresas y organismos de investigación. Se trata de la constitución de la Fundación Ciudad de la Energía (Ciuden)¹⁰⁷, el Proyecto Singular Estratégico Tecnologías Avanzadas de Generación, Captura y Almacenamiento de CO₂ (PSE-CO₂)¹⁰⁸ y el Programa CENIT CO₂.

En este contexto, la implicación del sector de cemento español es imprescindible para el desarrollo y aplicación de iniciativas que promuevan el uso de la CAC en sus procesos de producción, que se vislumbra como una prometedora oportunidad en este campo. Así pues, a través de la agrupación de fabricantes (Oficemen), la industria del cemento colabora en diferentes proyectos, como el de la Fundación Ciudad de la Energía para abordar de forma conjunta la realización de plantas experimentales necesarias para diseñar procesos específicos de captura del CO₂ adaptados a sus necesidades, o a

¹⁰⁶ La Unión Europea, a través de la Directiva 2009/31/CE, establece un marco legislativo para el almacenamiento geológico del dióxido de carbono en condiciones seguras para el medio ambiente. Este nuevo marco legislativo tiene como objetivo prevenir o, cuando esto no sea posible, suprimir al máximo los nefastos efectos de las emisiones de CO₂, al objeto de contribuir a la lucha contra el cambio climático.

¹⁰⁷ Fundación creada por el Gobierno de España por Acuerdo del Consejo de Ministros de 12 mayo de 2006, dirigida, entre otras cuestiones, a la construcción y explotación de una planta oxí-combustión con transporte, captura y almacenamiento de CO₂, a través del Centro de Desarrollo de Tecnologías de Captura de CO₂ (es.CO₂).

¹⁰⁸ Financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y coordinado por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), dependiente del Ministerio de Economía y Competitividad (<http://www.ciemat.es/>).

través de su participación en la Plataforma Tecnológica Española del CO₂ (PTECO₂)¹⁰⁹, para promover el desarrollo de tecnologías de CAC y su implantación en la industria para posibilitar el cumplimiento por parte de España de los compromisos de reducción de emisiones de CO₂, dentro del objetivo general de disminuir el impacto ambiental, social y económico derivado de las emisiones de GEI. Asimismo, colabora con otras organizaciones internacionales e instituciones académicas para determinar la viabilidad técnica y económica de la CAC en la industria cementera¹¹⁰.

No obstante, aunque la tecnología de CAC en el sector de cemento es una atractiva solución potencial para reducir el CO₂ emitido por sus instalaciones, su correcta aplicación requiere de un adecuado marco legal, político, económico y social que favorezca la integración de las mismas en sus procesos productivos. Así pues, el esfuerzo a desarrollar por todos los agentes implicados se convierte en un aliado para la consecución de los objetivos, marcándose como horizonte las previsiones que el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) establece en "Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050" [WBCSD/IEA, 2009], cuando apunta que desde el punto de vista técnico, la tecnología de la captura de carbono no estaría disponible antes de 2020.

¹⁰⁹ Iniciativa promovida por Empresas, Centros de Investigación y Universidad, amparada por el Ministerio de Ciencia e Innovación y apoyada por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

¹¹⁰ Como el caso del grupo CEMEX que participa activamente en la exploración de tecnologías de CAC y su aplicación al proceso de producción de cemento.

PARA FINALIZAR este capítulo, resaltamos que la necesidad de un cambio de modelo de producción en el sector cementero es un hecho constatado (ver Figura 3.3), que requiere, por tanto, de nuevos planteamientos de la planificación de la producción que incorpore criterios de sostenibilidad, incluyendo variables y parámetros que hasta fechas recientes no eran relevantes, ni tenían repercusión directa sobre la cuenta de resultados de la empresa.

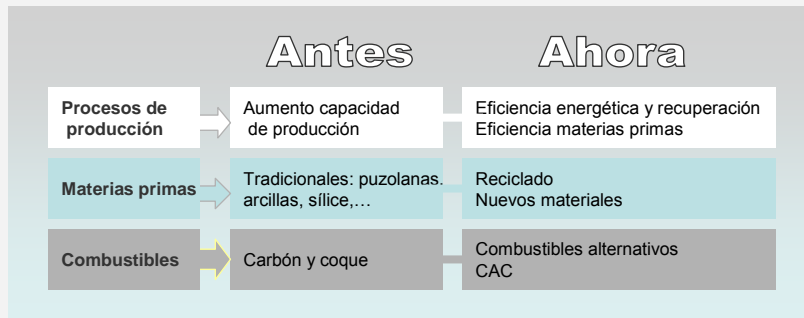


Figura 3.3. Nuevo modelo de producción del cemento
Fuente: <http://www.recuperaresiduosencementeras.org>

Por todo ello, bajo los aspectos analizados en esta parte del trabajo, en el siguiente capítulo abordamos un nuevo enfoque de la planificación de la producción del cemento, incluyendo el objetivo de reducción de emisiones de CO₂ (al ser éstas un input más del proceso productivo, por el que hay que asumir un coste) y las alternativas viables para su consecución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Águila, 2002] Águila, I. (2002): *Exploración técnico-económica del empleo de residuos para la producción de cemento puzolánico*, Ejercicio de Evaluación de Tesis Doctoral, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela.

[Baeza et al., 2009] Baeza, R.; Martín, I.; Rilo, R.; Yáñez, M. y Wittum, L. (2009): "Evaluación del impacto de la subasta de derechos de emisión de CO₂ en el periodo 2013-2020 en el sector cementero europeo", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 926, pp. 42-49.

[Capros et al., 2008] Capros, P.; Mantzos, L.; Papandreou, V. y Tasios, N. (2008): *Model-based analysis of the 2008 EU policy package on climate change and renewables*, E3MLab, National Technical University, Athens.

[CEMA, 2007] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2007): *Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España (Instituto Cerdá)*, Madrid, CEMA-Estudio.

[CEMA, 2008] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2008): "Valoración de residuos en la industria cementera europea: estudio comparado", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 910, pp. 52-74.

[CEMA, 2009] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2009): *Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España (Instituto Cerdá)*, Madrid, CEMA-Cuaderno Técnico.

[CEMBUREAU et al., 2009] CEMBUREAU; OFICEMEN; Fundación CEMA; Sustainable Energy Europe (2009): *La recuperación de residuos como combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera*.

[CEMBUREAU, 2009a] CEMBUREAU (2009): *Activity report 2008*, CEMBUREAU. Disponible en web: http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/Activity_Report_2008.pdf.

[CEMEX, 2010b] CEMEX (2010): *Memoria de Sostenibilidad 2009. Cemex en España*, CEMEX, España.

[Chen et al., 2010a] Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi, Y. y Jullien, A. (2010): "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation", *Journal of Cleaner Production*, Vol.18, Nº 5, pp. 478-485.

[Decisión 2007/589/CE] Decisión de la Comisión de 18 de julio de 2007, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

[Decisión 2011/278/UE] Decisión de la Comisión 2011/278/UE de 27 de abril de 2011, por la que se determinan las normas transitorias de la Unión para la armonización de la asignación gratuita de derechos de emisión con arreglo al artículo 10 bis de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

[Directiva 2000/76/CE] Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos.

[Directiva 2003/35/CE] Directiva 2003/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de mayo de 2003, por la que se establecen medidas para la participación del público en la elaboración de determinados planes y programas relacionados con el medio ambiente y por la que se modifican, en lo que se refiere a la participación del público y el acceso a la justicia, las Directivas 85/337/CEE y 96/61/CE del Consejo.

[Directiva 2003/4/CE] Directiva 2003/4/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 28 de enero de 2003, relativa al acceso del público a la información medioambiental y por la que se deroga la Directiva 90/313/CEE del Consejo.

[Directiva 2003/53/CE] Directiva 2003/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de junio de 2003, por la que se modifica por vigésimo sexta vez la

Directiva 76/769/CEE del Consejo respecto a la limitación de la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilatos de nonilfenol y cemento).

[Directiva 2003/87/CE] Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de Octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo.

[Directiva 2008/1/CE] Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación (deroga a la Directiva 96/61/CE).

[Directiva 2008/101/CE] Directiva 2008/101/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE con el fin de incluir las actividades de aviación en el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

[Directiva 2008/98/CE] Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directiva, L312/3.

[Directiva 2009/29/CE] Diario Oficial de la Unión Europea, Directiva 2009/29/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, L 140/63.

[Directiva 2009/31/CE] Directiva 2009/31/CE establece un marco legislativo para el almacenamiento geológico del dióxido de carbono (CO₂) en condiciones seguras para el medio ambiente.

[Directiva 2010/75/UE] Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y el Consejo de 24 de noviembre de 2010 sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), Diario Oficial de la Unión Europea L 334/17.

[Directiva 91/689/CEE] Directiva 91/689/CEE, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos. DOCE 377/L, de 31-12-91.

[Directiva 96/61/CE] Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación (DOCE núm. L 257, de 10 de octubre de 1996).

[EIPPCB, 2001] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (2001): *Reference Document on Best Available Techniques (BREF) for Cement and Lime Production*.

[EIPPCB, 2010] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (2010): *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide manufacturing Industries*. Disponible en web: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf. (Traducido al español con el título: *Prevención y Control Integrados de la Contaminación Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio RC-08. Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08*. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento (Aprobada por Real Decreto 956/2008 de 6 de junio)).

[Elorrieta, 2011] Elorrieta, J.I. (2011): "Reducción de CO₂ en la industria cementera", *ASEGRE*, 26 de mayo de 2011. Disponible en web: http://hcredos.asegre.com/DOCUMENTACION_JORNADA_HC_26_MAYO_2011/Ponencias/Ignacio%20Elorrieta.pdf.

[Fenoy, 2009] Fenoy, C. (2009): "Holcim invierte 74 millones en mejoras ambientales en 6 años". Disponible en web: <http://www.elalmeria.es/article/finanzasyagricultura/495065/holcim/invierte/millones/mejoras/ambientales/anos.html>.

[FLACEMA, 2009] Fundación laboral andaluza del cemento y el medio ambiente (2009): *Memoria de sostenibilidad del sector cementero andaluz*. [Foro pro-clima Madrid, 2012].

[Foro pro-clima Madrid, 2012] Foro pro-clima Madrid (2012): *Guía de Buenas*

Prácticas Ambientales en el diseño, construcción, uso, conservación y demolición de edificios e Instalaciones, Ayuntamiento de Madrid.

[Gómez, 2007] Gómez-Rivas, J.J. (2007): *Estudio económico ambiental de la reducción de emisiones en una planta cementera por la combustión de biomasa*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Pontificia de Comilla, Madrid.

[Hoenig y Twigg, 2009] Hoenig, V. y Twigg, C. (2009): *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to look ahead*, Düsseldorf, Geneva, 4 June (World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative- European Cement Research Academy).

[IDAE, 2010] Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía; Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid; Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2010): *Guía de valoración energética de residuos*, Madrid.

[Jonson, 2011] Jonson, J. (2011): "Retos y soluciones para una comunicación efectiva de cara al co-procesamiento – Europa", *Foro de comunicadores con énfasis en co-procesamiento*. Disponible en web: <http://www.ficem.org/multimedia/2011/cam bio11/7-Jessica%20Johnson%20-%20CEMBUREAU%20-%20Co-processing%20and%20communications.pdf>.

[Ley 1/2005] Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, BOE nº 59.

[Ley 10/1998] Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.

[Ley 11/1997] Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases.

[Ley 16/2002] Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (Ley IPPC), modificada por la Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de accesos a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE); y por la Ley

42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

[Ley 22/2011] Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

[Ley 27/2006] Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de accesos a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE).

[Ley 34/2007] Ley 34/2007, Ley marco sobre atmósfera.

[Ley 42/2007] Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

[Lizarraga, 2006] Lizarraga S. (2006): "Estudio del comportamiento del sulfato ferroso heptahidratado como agente reductor de Cr (VI)", *Revista Cemento-Hormigón*, Nº 887, Abril, pp. 4-8.

[MAAMA, 2012a] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012): *Nota explicativa sobre la aplicación de las recomendaciones del Grupo Técnico de Comercio de Emisiones de la CCPPC, de 18 de febrero de 2011, sobre el seguimiento de las emisiones de los NFUs*.

[Metz et al., 2005] Metz, B.; Davidson, O.; De Coninck, H.; Loos, M. y Meyer, L. (2005): *Carbon dioxide capture and storage*, IPCC, Cambridge University Press, England (Versión en español: *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono*).

[MMA los informes y de los balances globales/sectoriales de

[MMA, 2004] Ministerio de Medio Ambiente (2004): *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento*, Centro de Publicaciones-Secretaría General Técnica- Ministerio de Medio Ambiente.

[MMA, 2009] Ministerio de Medio Ambiente (2009): *Balace global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2008*.

[MMA, 2010] Ministerio de Medio Ambiente (2010): *Balace global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2009*.

[MMA, 2011] Ministerio de Medio Ambiente (2011): *Balance global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2010*.

[MMA, 2012] Ministerio de Medio Ambiente (2012): *Balance global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2011*.

[MMA, 2012] Ministerio de Medio Ambiente (2012): *Balance global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2011*.

[MMAMRM, 2011b] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MMAMRM) (2011): *Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de España e Información Adicional. Años 1990-2009*. Secretaría de Estado de Cambio Climático, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, Dirección General Oficina Española de Cambio Climático.

[Moya et al., 2010] Moya, J.A.; Pardo, N. y Mercier (2010): *Energy efficiency and CO₂ Emissions: Prospective Scenarios for the cement Industry*, JRC Scientific and Technical Reports. European Commission Joint Research Centre Institute for Energy, Publications Office of the European Union.

[Norma UNE-EN 197-1:2000] Norma UNE-EN 197-1:2000. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

[OFICEMEN, 2006] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2006): *Memoria Oficemen 2005*, Oficemen.

[OFICEMEN, 2007] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2007): *Memoria Oficemen 2006*, Oficemen.

[OFICEMEN, 2008b] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2008): *Informe de Actividades 2007*.

[OFICEMEN, 2008c] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2008): *Memoria Oficemen 2007*, Oficemen.

[OFICEMEN, 2009a] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2009): *Boletín Infocemento*, Septiembre. Disponible en http://www.infocemento.com/lstBoletines.asp?id_cat=1.

[OFICEMEN, 2009b] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2009): *Estudio de métodos de medición, cálculo y*

estimación para las emisiones de las sustancias PRTR adecuadas al sector del cemento en España. Guía PRTR Sector Cemento, OFICEMEN.

[OFICEMEN, 2009c] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2009): *Informe de Actividades 2008*.

[OFICEMEN, 2009d] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2009): *Memoria Oficemen 2008*.

[OFICEMEN, 2010a] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2010): *Informe de Actividades 2009*.

[OFICEMEN, 2010b] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2010): *Memoria Oficemen 2009*.

[OFICEMEN, 2011a] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2011): *Informe de Actividades 2010*.

[OFICEMEN, 2011c] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2011): *Memoria Oficemen 2010*.

[Oficemen, 2012] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2012): *Informe de Actividades 2011*.

[ONU, 1998] Organización de las Naciones Unidas (1998): *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, Documento FCCC/INFORMAL/83 GE.05-61702 (S) 130605 130605.

[Orden PRE/1954/2004] Orden PRE/1954/2004 de 22 de junio, por la que se modifica el Anexo I del Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre, por el que se imponen limitaciones a la comercialización y uso de ciertas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilados de nonilfenol y cemento).

[Palomino, 2010] Palomino, S. (2010): "La sustitución de combustibles fósiles en el sector cementero. Oportunidad para reducir el vertido de residuos", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 936, pp. 44-65.

[RAE, 2012] Real Academia Española, vigésima segunda edición en <http://www.rae.es/rae.html>.

[Ramos, 2005] Ramos (2005): "El papel de los Fondos de Carbono en la estrategia

española de utilización de los mecanismos flexibles del Protocolo de Kyoto: oportunidades de proyección internacional para la empresa española", *ICE*, N° 822, pp. 131-141.

[RD 100/2011] Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación.

[RD 1030/2007] Real Decreto 1030/2007, de 20 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.

[RD 1264/2005] Real Decreto 1264/2005, de 21 de octubre, por el que se regula la organización y funcionamiento del Registro Nacional de Derechos de emisión.

[RD 1370/2006] Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012 (BOE n° 282 de 25/11/06).

[RD 256/2003] Real Decreto 256/2003, de 28 de febrero, por el que se fijan los métodos de toma de muestras y de análisis para el control oficial del contenido máximo de plomo, cadmio, mercurio y 3-monocloropropano-1,2-diol en los productos alimenticios.

[RD 508/2007] Real Decreto 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas.

[RD 812/2007] Real Decreto 812/2007, de 22 de junio, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos.

[Registro PRTR-España] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes establecido por el Reglamento (CE) 166/2006 E-PRTR, y regulado en España por el Real Decreto 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de Autorizaciones Ambientales Integradas. Disponible en web:

<http://www.prtr-es.es/informes/industrialactivitypollutant.aspx>.

[Reglamento 166/2006] Reglamento (CE) 166/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de enero de 2006, relativo al establecimiento de un registro europeo de emisiones y transferencias de contaminantes y por el que se modifican las Directivas 91/689/CEE y 96/61/CE del Consejo.

[RENADE] Registro Nacional de Derechos de Emisión en <https://www.renade.es/welcome.do>.

[Riestra et al., 2009] Riestra, C.; López, A. y González, E. (2009): "El CO₂ y la industria en España. De la primera asignación de derechos a la etapa post-Kyoto", *Economía Industrial*, N° 371, pp. 59-77

[Rovira, 2008] Rovira, M.J. (2008): "Futuro esquema europeo de comercio de derechos de emisiones (EU ETS): propuesta de Directiva", *Análisis del funcionamiento del comercio de Gases de Efecto Invernadero (GEI) - Congreso Nacional del Medio Ambiente - Cumbre del Desarrollo Sostenible, CONAMA 9*.

[SENDECO2] Sistema Electrónico de Derechos de Emisión de Dióxido de Carbono, EUA 2008-2012, Daily prices [en línea]. Disponible en Web:<www.sendeco2.com> [última consulta: 05 de junio de 2012].

[UNDP, 2011] United Nations Development Programme (2011): *Summary and Analysis of UNFCCC Climate Change. Conference in Durban, South Africa, 28 Nov.-9 Dic.*

[Van Oss y Padovani, 2003] Van Oss, H.G. y Padovani, A.C. (2003): "Cement Manufacture and the Environment - Part II: Environmental Challenges and Opportunities", *Journal of Industrial ecology*, Vol. 7, N° 1, pp. 93-126.

[WBCSD/CSI, 2009b] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative (2009): *Cement Industry Energy and CO₂ Performance "Getting the Numbers Right"*, WBCSD.

[WBCSD/CSI, 2011c] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative

(2011): *Guía para la rehabilitación de canteras*. Disponible en web: <http://www.ficem.org/publicaciones-alianzas/Documentos-CSI/Documento-Recuperacio-de-canteras.pdf>.

[WBCSD/IEA, 2009] World Business Council for Sustainable Development/ International Energy Agency (2009): *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050*, OECD/IEA and WBCSD.

[Worrell et al., 2008] Worrell, E.; Galitsky, C. y Price, L. (2008): *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities*

for Cement Making. An energy star, Guide for Energy and Plant Managers. Disponible en web: <http://www.energystar.gov/ia/business/industry/LBNL-54036.pdf>.

[Zaragoza, 2009] Zaragoza, A. (2009): "Retos y oportunidades ante el nuevo escenario mundial global o cómo hacer de la necesidad una virtud", *Combustibles alternativos en hornos de cemento: una contribución a la Sostenibilidad y al Protocolo de Kyoto*, Barcelona, 5 de Noviembre de 2009.

Capítulo 4

La producción sostenible del cemento y las emisiones de CO₂: un enfoque integrado de la planificación.

Propuesta de un modelo de optimización

4.1. Planificación de la producción de cemento y las emisiones de CO₂: análisis y evaluación de alternativas

4.1.1. Medidas de ajuste de las emisiones de CO₂. Limitaciones y posibilidades

4.1.2. Plan óptimo de producción: aplicación de un modelo de programación lineal

4.1.2.1 Definición del problema y formulación: parámetros y variables de decisión del modelo

4.1.2.2. Planteamiento del modelo de programación lineal

Capítulo 4

La producción sostenible del cemento y las emisiones de CO₂: un enfoque integrado de la planificación. Propuesta de un modelo de optimización

Es evidente que el escenario descrito en los capítulos anteriores condicionará la evolución y el desarrollo del sector cementero español en los próximos años, agravado aún más si cabe por la inestabilidad de la economía internacional en general y la española en particular, cuyas previsiones de recuperación no son muy alentadoras. Bajo esa premisa, el objetivo principal de este capítulo es analizar y evaluar la implicación que sobre la planificación de la producción del cemento (y por ende en los resultados) tiene la incorporación de criterios de sostenibilidad.

Para ello, tras presentar en el siguiente apartado, basándonos en lo establecido en los capítulos anteriores, el escenario en el cual la industria cementera tendrá que desarrollar su actividad productiva, y por consiguiente las diferentes alternativas disponibles para afrontar nuevos retos para seguir siendo competitivas (principalmente el derivado del compromiso de Kyoto), a continuación pasamos a evaluar dichas alternativas mediante la aplicación de un modelo matemático de programación lineal para la planificación de la producción, que a pesar de sus limitaciones, entendemos que, a través del análisis de sensibilidad o análisis postoptimal correspondiente, nos puede proporcionar información útil sobre el efecto que junto con el resto de las restricciones (demanda, capacidad, etc.) tiene la de las emisiones de CO₂ en los planes de producción, y el comportamiento de la empresa frente al mercado de derechos de emisión, y por consiguiente sobre la cuenta de resultados de las empresas afectadas.

4.1. PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO Y LAS EMISIONES DE CO₂: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

4.1.1. Medidas de ajuste de las emisiones de CO₂. Limitaciones y posibilidades

En líneas generales, la incorporación de criterios de sostenibilidad en la producción industrial requiere nuevos planteamientos en su planificación, incluyendo variables, tales como las emisiones de contaminantes, que hasta fechas recientes no eran tomadas en consideración, y por tanto excluidas de la lista de los inputs de los procesos de fabricación.

Prueba de ello son las implicaciones que el compromiso asumido en el PK ha tenido o puede tener sobre la planificación de la producción de la industria (y por consiguiente en el beneficio) incluida en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE, en tanto que las limitaciones de CO₂ impuestas suponen una restricción más para la misma y la puesta en marcha de los diferentes mecanismos de flexibilidad contemplados en el PK (ver Apartado 3.3) constituye una posible fuente de ingresos para dicha industria.

De esta manera, y en términos generales, la entrada en vigor del PK obliga a las instalaciones incluidas en la citada Directiva a controlar sus emisiones de CO₂ (procedentes de fuentes directas e indirectas), de manera que aquellas no superen a las emisiones autorizadas, en función estas últimas de las asignaciones iniciales de los PNA correspondientes y del nivel de utilización de los instrumentos disponibles para cumplir con el compromiso de reducción adquirido (participando en el mercado de derechos, comprando o vendiendo permisos y/o a través de los otros mecanismos de flexibilidad regulados en el PK -AC y MDL-). Ello implicará cambios en los planes de producción, que tendrán que incluir las limitaciones de emisiones, cuyo cumplimiento dependerá de las medidas de ajuste adoptadas por la industria, que tal y como se recoge en la Figura 4.1, podrán agruparse en dos bloques, según se actúe sobre las emisiones reales o sobre las autorizadas [Gessa et al., 2009b]:

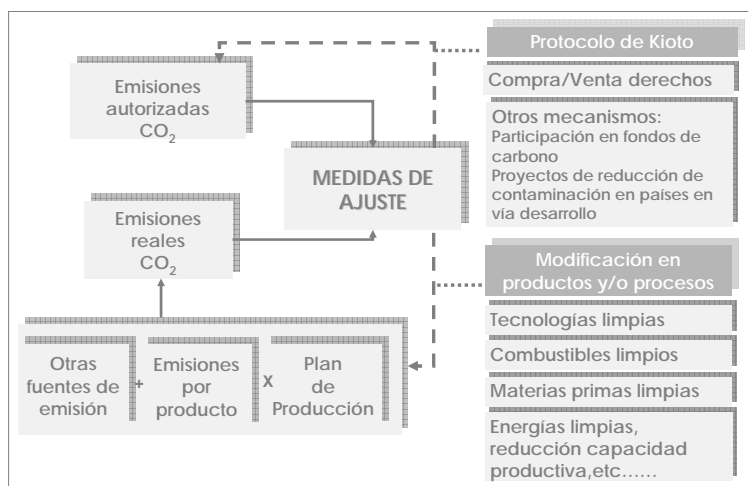


Figura 4.1. Emisiones autorizadas vs. emisiones reales de CO₂
 Fuente: [Gessa et al., 2009b]

- a) **Ajustes sobre las emisiones autorizadas**, las cuales dependen de la asignación inicial en el correspondiente PNA (según sector y método de cálculo) y del nivel de utilización de los mecanismos disponibles en el PK (mercado de derechos, aplicación conjunta, desarrollo limpio, etc.), siempre cumpliendo los límites vigentes de emisiones atmosféricas recogidos en las normativas aplicables a los procesos industriales implicados. De esta manera, las posibles alternativas se reducen a la participación en el mercado de derechos, comprando o vendiendo derechos (según tenga déficit o superávit respectivamente) y/o a la colaboración directa o indirecta en proyectos sostenibles, a través del resto de los mecanismos de flexibilidad (AC y/o MDL).

Por tanto, y teniendo en cuenta la gratuidad de los derechos asignados a la industria del cemento hasta 2012¹¹¹, el coste de reducción de las emisiones de CO₂ para este sector se verá incrementado para aquellas empresas deficitarias que acudan al mercado a adquirir nuevos permisos que le permitan incrementar las emisiones autorizadas inicialmente (por lo que tendrá que pagar una cantidad determinada) y/o por las inversiones en proyectos sostenibles regulados en el PK, o

¹¹¹ No ocurre igual a partir de 2013, en el que la gratuidad se reduce a un porcentaje inferior y a un periodo de tiempo más reducido (ver Apartado 3.3).

en su caso, se verá incrementado por el coste de penalización, en caso de no cumplir (si las emisiones verificadas son superiores a las emisiones autorizadas).

Por otro lado, los instrumentos contemplados en el PK, también constituyen una posible fuente de ingresos para aquellas empresas con superávit de derechos, bien por que hayan invertido en mejoras medioambientales que reduzcan las emisiones de CO₂ a niveles inferiores a los inicialmente autorizados o bien por que la producción se haya reducido, entre otras razones por la caída generalizada de la producción industrial en los últimos años por la crisis económica. En este caso, si la empresa acude al mercado para vender el excedente de derechos, el beneficio se verá incrementado por el importe íntegro de la venta de los derechos, si éstos se han obtenido gratuitamente, o por la diferencia entre el precio de venta y el importe de la compra de los derechos, en los demás casos.

De lo expuesto anteriormente, se identifican las variables a considerar en la propuesta de modelización de la producción del cemento que recogeremos en el Apartado 4.1.2. Se trata de:

- La **cantidad permitida de toneladas de emisiones de CO₂** a la atmósfera, que será igual a la suma de las emisiones autorizadas en los correspondientes PNA y de los permisos obtenidos a través de los diferentes mecanismos de flexibilidad regulados en el PK.
 - El **impacto económico de las alternativas utilizadas**, que dependerá de la cotización de los derechos de emisión en el mercado, de la gratuidad (parcial o total) de los derechos asignados, del coste de las inversiones realizadas en mejoras de eficiencia medioambiental, y en el caso de no cumplir, del importe de la sanción correspondiente¹¹².
- b) La otra alternativa es realizar **ajustes sobre las emisiones reales** de CO₂ procedentes de la fabricación del cemento, actuando sobre una o varias de las variables que influyen en el valor de las emisiones, tales como el volumen de producción, factor de emisión (emisión de CO₂ por unidad producida) y otras fuentes de emisión (como el transporte y el consumo de energía eléctrica). Ello

¹¹² La multa por emitir más CO₂ del asignado ha sido de 40 euros por tonelada durante el primer período de funcionamiento del mercado de derechos de emisión (2005-2007). Posteriormente, la sanción se elevó a 100 euros y, a partir de 2013, la sanción se establecerá en función del índice de inflación anual de la zona euro [CE, 2009].

implica la puesta en marcha de diferentes medidas, clasificadas según [Ammenberg et al., 2011] en cinco grupos (ver Cuadro 4.1).

Eficiencia productiva	Eficiencia energética	Eficiencia eléctrica Eficiencia térmica
	Recuperación de recursos	Utilización de parte de la energía térmica del gas de escape en el secado o pre-calentamiento de la materia prima o combustibles Cogeneración (calor y electricidad) Reciclado Prevención y control de la contaminación
Recursos alternativos	Materia prima	Producción de clínker a baja temperatura Consumo de materias primas alternativas en la producción del clínker
	Recursos energéticos	Utilización de combustibles alternativos Energía renovable
Cambios en productos	Mejora de los productos actuales	Sustitución del clínker (con materias primas alternativas) Mejora de las propiedades de los cementos
	Desarrollo de nuevos productos	Con una menor proporción de clínker y nuevos tipos de cementos "ecológicos"
Sinergias externas	CO ₂ y aprovechamiento del calor residual	Captura y almacenamiento de carbono Producción biológica ¹¹³ Calefacción sinérgica ¹¹⁴
	Procesos de integración e iniciativas industriales	Integración con plantas de energía Integración con empresas de tratamiento de residuos Sinergias con otras empresas
Administración	Estrategia medioambiental y nuevos enfoques de gestión	
	Marketing, educación y relaciones públicas	
	Normas y especificaciones	

Cuadro 4.1. Estrategias de reducción de las emisiones de CO₂ en la producción del cemento
Fuente: elaboración propia a partir de [Feiz, 2011] y [Ammenberg et al., 2011]

¹¹³ Muchos procesos biológicos requieren de CO₂ y calor, es posible beneficiarse de ello utilizándolos para producir subproductos. Por ejemplo, usar el calor residual de la planta de cemento para secar los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales y utilizarlo como combustible alternativo [CEMEX].

¹¹⁴ Recoger el calor residual de la planta de cemento y utilizarlo para calefacción y refrigeración en las redes de calefacción residencial o industrial del distrito [Ammar et al., 2011].

Como ya vimos en el Apartado 3.1, la producción del clínker es la principal responsable de las emisiones directas de esta industria, el 50-60% son provocadas por las reacciones químicas que sufren las materias primas en el horno¹¹⁵ y el 30-40% son generadas por la quema de combustibles fósiles, realizada principalmente para que se alcancen las altas temperaturas necesarias en el horno y equipos asociados (como los secadores). Por ello, el consumo de materia prima y de combustible en la producción del clínker se convierte en un factor clave de la reducción de las emisiones de CO₂ de la producción del cemento, convirtiéndose la valorización (tanto energética como material) de los residuos como una de las alternativas con mayor potencial de reducción de las emisiones de CO₂, a pesar de sus limitaciones técnicas y económicas.

Aunque, como ya vimos en el Apartado 3.2.1, el abanico de posibilidades en cuanto a las materias primas a emplear en la producción del clínker es muy amplio, su uso (en cuanto a tipo y cantidad de las mismas) está limitado por diferentes factores, tales como el tipo de cemento a fabricar, los requisitos de composición química del clínker, la normativa reguladora de diferentes aspectos, la disponibilidad de las mismas, las necesidades de inversión, el incremento de coste, etc.

De igual manera, en relación a los combustibles, aunque la variedad es muy amplia, su uso está limitado también por otros factores, tales como el poder calorífico, la oferta de mercado, el coste, los equipamientos, las inversiones de adaptación de las instalaciones, etc. ([CEMBUREAU, 2009a], [WBCSD/IEA, 2009] y [Van Oss y Padovani, 2003]).

Otra de las medidas viables para reducir las emisiones de CO₂, en relación también con la composición química y propiedades del cemento (esto es, el tipo de materia prima a emplear) es la producción de cementos que tengan menor impacto medioambiental, bien a través de mejoras en la producción de los existentes (con la sustitución parcial del clínker o mejorando las propiedades de los cementos mezclados) o desarrollando nuevos productos con menor proporción de clínker y de material calcáreo (ver Apartado 3.4).

Igualmente, otra de las vías de ajuste disponible para disminuir las emisiones de CO₂ en la producción del cemento, es reducir las procedentes del transporte y del consumo de energía eléctrica en otros procesos de la fábrica (principalmente en los molinos y en los extractores de gases). El consumo de energía eléctrica estará condicionado por la

¹¹⁵ Se genera durante la descomposición de la piedra caliza y otros materiales calcáreos para producir el clínker.

composición y las propiedades del material empleado (facilidad de molturación y finura, principalmente) y por la eficiencia energética de los equipos utilizados en las diferentes fases del proceso de producción del cemento. En relación a este último aspecto, se proponen diferentes medidas, cuya aplicación y valoración han sido abordado en diferentes trabajos tales como, [Moya et al., 2010], [Price et al., 2010], [US EPA, 2010], [Liu y Li, 2009], [Worrell et al., 2008], [Van der Vleuten, 1994], etc.

Asimismo, tal y como vimos también en el Apartado 3.4, aunque actualmente está en fase experimental y por tanto, a corto plazo no es viable como medida de ajuste, las técnicas de CAC, en un futuro podrá incorporarse entre las alternativas posibles para reducir las emisiones de la producción del cemento.

Por todo lo expuesto, y de forma análoga a las emisiones autorizadas, la selección de una u otra de las alternativas propuestas para reducir las emisiones de CO₂ de la producción del cemento, dependerá del valor que tomen las siguientes variables:

- **La cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera**, que dependerá del tipo y cantidad de cemento fabricado (proporción de clínker que incorpora y porcentaje y tipo de adición utilizada en la fase de la molienda), del tipo y cantidad de materia prima y combustible consumida en la producción del clínker, y de la eficiencia energética de los equipos e instalaciones de la planta de producción.
- **El impacto económico de las medidas adoptadas** por la industria para la consecución de los objetivos de reducción de las emisiones de CO₂, que dependerá de las necesidades de inversión (adaptación de instalaciones, nuevas tecnologías, etc.) que tenga cada planta, que consecuentemente repercutirán en el coste de los productos fabricados.

Por todo lo expuesto, y teniendo en cuenta la cantidad de variables consideradas y las múltiples relaciones que existe entre ellas, la búsqueda de la solución más favorable pasa por encontrar la combinación adecuada de las medidas de ajuste propuestas, actuando conjuntamente sobre las emisiones reales y autorizadas, para optimizar el resultado de la empresa (maximizar el beneficio o minimizar el coste de la empresa), teniendo en cuenta las características del propio sector, tales como sus procesos de producción, las normativas reguladoras sobre diferentes aspectos medioambientales (AAI, gestión de residuos, registro y control de emisiones de contaminantes a la atmósfera, etc.), la asignación de derechos de emisión en los correspondientes PNA, etc.

Con este propósito presentamos en el apartado siguiente una propuesta de valoración, mediante un modelo de programación lineal, a través del cual se reflejen los cambios que ocasionan las limitaciones de las emisiones de CO₂ en la planificación de la producción del cemento, con el fin de determinar anticipadamente decisiones que permitan optimizar el uso de los recursos productivos.

4.1.2. Plan óptimo de producción: aplicación de un modelo de programación lineal

Una vez planteadas y analizadas en el apartado anterior las posibles vías de ajuste de las emisiones de CO₂ de la industria del cemento, nuestro trabajo a partir de este momento se centra en la búsqueda del plan de producción que proporcione un resultado óptimo compatible con la restricción de las emisiones de CO₂. Con ello pretendemos, tal y como expusimos en el Capítulo 1, cubrir una clara brecha o necesidad de estudios que aborden los temas de decisiones de optimización a través de un enfoque integrado, capaz de evaluar las consecuencias derivadas de las opciones de mejora ([Zhou et al., 2012], [Avetisyan, 2009], [Gómez, 2007]).

Además, a pesar de que cada vez son más los estudios, que bajo diferentes perspectivas, analizan y evalúan las medidas adoptadas por la industria para reducir las emisiones de CO₂, aquellos se caracterizan en la mayoría de los casos, por ser de carácter parcial, en la medida que analizan de manera independiente diferentes aspectos relacionados con las limitaciones de las emisiones de CO₂. Algunos se centran en el estudio de las implicaciones que el cumplimiento del PK tiene para la industria afectada, mientras que otros, analizan aspectos relacionados con las alternativas de ajuste de las emisiones reales de CO₂¹¹⁶.

Este estudio pretende contribuir a cubrir este vacío incluyendo en la valoración, bajo un enfoque integrador, las acciones de mejora, tanto las alternativas disponibles (los mecanismos de flexibilidad del PK) para la industria incluida en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE, como las otras alternativas reconocidas de manera generalizada en la teoría y la práctica empresarial, tal y como expusimos en el apartado anterior.

¹¹⁶ Entre otros: [Oberndorfer y Rennings, 2007], [Weyant, 1999] y [Nordhaus, 1993].

Así pues, al alcanzar este punto del trabajo, nos proponemos buscar el programa óptimo de producción que maximice el beneficio de la empresa, incluyendo la restricción de las emisiones de CO₂ derivadas del PK y las medidas viables de mejora medioambiental de ahorro de CO₂ (preferentemente valorización de residuos), mediante la aplicación de un modelo de programación lineal¹¹⁷.

Dependiendo del enfoque de modelado (tipo de representación de las relaciones y los aspectos a considerar), así como otros supuestos (certidumbre o incertidumbre), son varias las técnicas matemáticas (como la probabilidad y cálculo) que se pueden utilizar para realizar la planificación de la producción para la consecución de un objetivo, tal como la minimización de costes o la maximización de beneficios [Mula et al., 2006a].

Una de las técnicas analíticas para el modelado de la planificación de la producción y el transporte dentro de la cadena de suministro es la programación matemática de carácter determinista. Se trata de una técnica de optimización, cuya modalidad más extendida es la programación lineal y programación lineal entera y mixta, como puede comprobarse en los ejemplos expuestos en [Vidal y Goetschalckx, 1997].

A pesar de las limitaciones para su aplicación y la dificultad para su resolución, existen numerosas referencias de interés que contemplan el uso de los modelos de optimización para integrar los criterios medioambientales en la planificación de la producción. Algunas citas que se destacan corresponden a los trabajos de [Radulescu et al., 2009], [Elkamel et al., 2008], [Subai et al., 2006], [Letmathe y Balakrishnan, 2005], [Wu y Chang, 2004], [Tan et al., 2002] y [Remmers et al., 1990].

Por todo ello, y teniendo en cuenta los objetivos que nos propusimos al iniciar este trabajo, y conscientes de las limitaciones de su aplicación, antes de seleccionar y definir las variables de decisión y los parámetros necesarios para su desarrollo, además de asumir los supuestos de cualquier aplicación de programación lineal¹¹⁸, presentamos los que consideramos en la propuesta de modelización que realizamos:

¹¹⁷ Para un estudio más detallado puede verse: [Castillo et al., 2012], [Faulín y Juan, 2012], [Mateo y Lahoz, 2009], [Mula et al., 2006b], [Domínguez-Machuca et al., 1995b], [Reeb y Leavengood, 2000], entre otros.

¹¹⁸ Se trata de **certidumbre**: los coeficientes tanto de la función objetivo como de las diferentes restricciones son conocidos con exactitud y no variarán durante el desarrollo del estudio; **divisibilidad**: las soluciones del problema serán, en general, números reales (no necesariamente enteros); **proporcionalidad**, tanto en la función objetivo como en las restricciones; **aditividad** de actividades: la contribución de cada variable, en la función objetivo y en las restricciones, es independiente de los valores del resto de las variables, siendo el total de todas las actividades igual

a) Partimos de una situación de referencia, representativa de la realidad de la industria de cemento en España (100% de combustible tradicional o una proporción muy reducida de combustible alternativo, tipo de proceso empleado -vía seca-, planta integral de cemento -obtención de clínker y molienda-, etc.) para alcanzar una situación objetivo, marcada por la reducción de emisiones de CO₂ a conseguir y las medidas propuestas para su consecución. Entre éstas y , destacamos como la principal, el incremento del porcentaje de sustitución de combustibles y materias primas alternativos (ver Figura 4.2), y como vía complementaria, la fabricación de cementos adicionados.

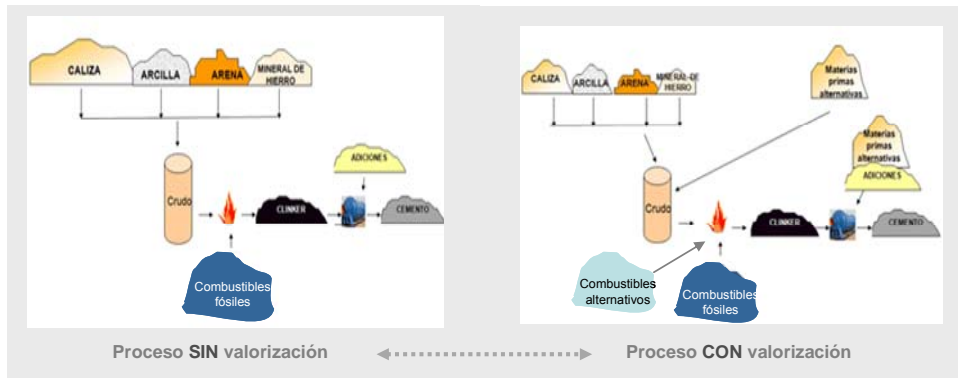


Figura 4.2. Situación de partida vs. situación objetivo

Fuente: elaboración propia a partir de <http://www.cportland.es/es/portal.do?IDM=100&NM=2>

b) Teniendo en cuenta que el principal responsable de las emisiones de CO₂ en la producción del cemento es la producción del clínker (30-40% de combustión y 50-60% de proceso) y el escaso margen de maniobra que el sector del cemento tiene en relación a la mejora de la eficiencia energética, nuestro estudio contempla como principal medida de mejora la valorización de los residuos en la producción del clínker, mediante la sustitución parcial de los combustibles y de las materias primas empleadas tradicionales por otros alternativos, sin que se produzcan alteraciones significativas en el balance térmico y por tanto en el proceso de producción. Para ello, es preciso marcar como objetivo una tasa de sustitución de combustibles tradicionales por alternativos y de materias primas que garantice la ausencia de cambios significativos que afecten a la calidad del proceso y del producto, tal y como se pone de manifiesto en diferentes estudios técnicos ([WBCSD/IEA, 2009], [Gómez, 2007], [MMA, 2004]). Así pues, el valor

a la suma de cada actividad individual; y **no negatividad**: todas las variables del modelo tomarán siempre valores positivos [Faulín y Juan, 2012].

que tome esa proporción de sustitución será determinado por cada empresa, en función de sus necesidades y de sus posibilidades.

Para cuantificar el impacto sobre las emisiones a la atmósfera y el consumo de recursos de las diversas opciones de producción del clínker, diversos estudios¹¹⁹ muestran el estudio del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) (Life-Cycle-Assesment) del producto como una de las principales alternativas.

c) Por las mismas razones expuestas en el apartado anterior, y consecuencia por tanto del mismo, adoptamos un enfoque parcial¹²⁰, centrando básicamente el estudio en el impacto de la producción del clínker sobre el medio atmosférico¹²¹. No por ello, dejamos de ser conscientes de la relevancia de otras fuentes de contaminación en la producción del cemento, y por tanto no se dejarán de considerar otros aspectos relevantes del proceso de producción del cemento (como la molienda) en cuanto al impacto medioambiental analizado (emisiones de CO₂), como es el consumo de energía eléctrica y otros aspectos e impactos medioambientales de la producción del cemento.

d) El estudio desarrollado se enmarca dentro del nivel táctico del proceso de planificación y control de la producción, por lo que el horizonte temporal considerado es el año, dentro del intervalo aceptado de manera generalizada en la práctica empresarial [Domínguez-Machuca et al., 1995b].

e) Además, según el caso, se añadiría a los supuestos anteriores, aquellos que se consideren necesarios para modelizar la planificación industrial correspondiente a cada uno de ellos.

¹¹⁹ Entre otros: [Valderrama et al., 2012], [Ammenberg et al., 2011], [Boesch y Hellweg, 2010], [Chen et al., 2010b], [Strazza et al., 2010], [Avetisyan, 2009], [Boesch et al., 2009], [Huntzinger y Eatmon, 2009].

¹²⁰ Otra opción es realizar un estudio bajo un enfoque integral, que comprenda la totalidad del proceso de producción del cemento (obtención del clínker y molienda del cemento).

¹²¹ Supuesto que se refuerza por el criterio de asignación de derechos de emisión de CO₂ finalmente adoptado por la Unión Europea, según un benchmark sectorial por tn de clínker (766 Kg CO₂/tn clínker), y no por tn de producto final terminado.

4.1.2.1 Definición del problema y formulación: parámetros y variables de decisión del modelo

Bajo los supuestos enumerados, para la consecución de nuestro objetivo, abordamos en este apartado la selección y definición de las variables de decisión y los parámetros del modelo, que recogemos de manera esquematizada en el Cuadro 4.2.

X_j : cantidad a fabricar de los diferentes tipos de producto (tipos de cementos y clínker) $j=1, \dots, n$	
A_i : cantidad disponible de los factores productivos limitados (1) $i=1, \dots, m$	$i=1 \rightarrow$ emisiones de CO_2 $i=2 \rightarrow$ capacidad de producción de clínker $i=3 \rightarrow$ demanda de los productos $i=4 \rightarrow$ consumo de combustibles alternativos $i=5 \rightarrow$ consumo de materias primas alternativas $i=6 \rightarrow$ otras restricciones
$A_1 = EA =$ Emisiones autorizadas de CO_2 $A_2 = CP_c =$ Capacidad de producción de clínker $A_3 = D_j =$ Demanda del producto j $A_4 = LIM_{comb} =$ Limitación de consumo de combustible alternativo $A_5 = LIM_{mp} =$ Limitación de consumo de materia prima alternativa $A_6 =$ otra limitación	
a_{ij} : cantidad necesaria del factor i para obtener una unidad del producto j (coeficientes tecnológicos) (2)	
Cu_j : coste unitario de producción del producto j	
Iu_j : Ingreso unitario del producto j	
C_j : beneficio unitario del producto j ($Iu_j - Cu_j$)	
(1) Puede representar también la cantidad total de un requerimiento o condición i establecida, según la restricción represente un requerimiento o una condición respectivamente.	
(2) Cuando la limitación es de un requerimiento o condición i , los a_{ij} representan la cantidad del requerimiento o condición i limitada, que aporta cada unidad de la variable j , al requerimiento o condición total establecida.	

Cuadro 4.2. Variables de decisión y parámetros del modelo de producción sostenible del cemento
Fuente: elaboración propia

a) Variables de decisión

Las cantidades a fabricar de cada tipo de producto (X_j) para maximizar el beneficio constituyen las variables de decisión del programa de producción. Se incluyen tantas variables como tipos de producto fabrique la empresa, incluida la cantidad a fabricar del clínker (producto intermedio obtenido en el proceso de producción) para vender o transferir a otras instalaciones del mismo u otro grupo empresarial.

La principal diferencia entre los distintos tipos de cementos está en la proporción de clínker que contiene (principal responsable de las emisiones de CO₂) y en el tipo de aditivos empleados en la obtención del producto final. Esto, como vimos en el Apartado 3.1, condicionará, junto con las características técnicas de las instalaciones, el consumo energético asociado a cada tipo de cemento y la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera (ver Figura 4.3).

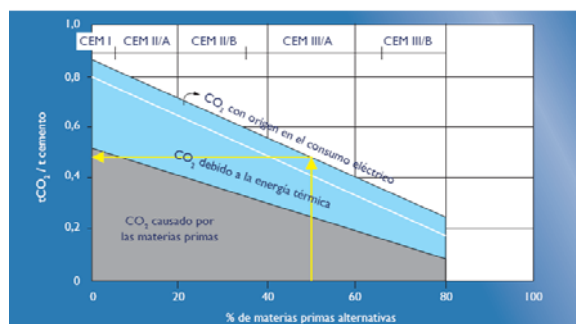


Figura 4.3. Emisiones de CO₂ en la producción de cementos
Fuente: [EUPAVE, 2009]

b) Parámetros

Como en todo planteamiento de programación lineal, es preciso identificar todos los parámetros que permitan definir la función objetivo y las restricciones de los recursos limitados para la obtención del plan óptimo de producción. Para ello, no podemos olvidar que si bien las medidas de ajuste disponibles para reducir las emisiones de CO₂ son varias (ver Apartado 4.1.1), nuestro estudio, por las razones ya expuestas, se centra en la valorización (tanto material como energética) de los residuos como alternativa principal para la consecución del objetivo de reducción de emisiones de CO₂ fijado por la empresa.

En concreto, se trata de determinar los siguientes parámetros:

1) Coste unitario de cada tipo de producto fabricado (C_{uj})

Las características propias del proceso de producción del cemento justifican la estructura de costes del sector¹²² (ver Figura 4.4). Tal y como nos apuntaron desde el mismo sector, aproximadamente las partidas variables representan el 50% del coste total, de las cuales el 80% corresponde a consumo energético (eléctrico y térmico) y el 20% a consumo de materia prima. En cuanto a las partidas fijas, la mano de obra y las amortizaciones comparten porcentajes similares (40% aproximadamente), correspondiendo el resto (20% de los costes fijos y 10% del total) a otros servicios (mantenimiento, seguridad, limpieza, etc.).

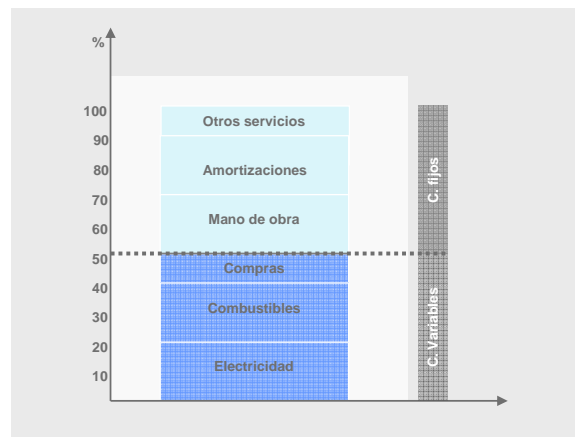


Figura 4.4. Estructura de costes del sector cementero
Fuente: elaboración propia a partir de información sectorial

De acuerdo con lo anterior, el coste de producción¹²³ de cada uno de los productos fabricados por la instalación vendría dado por la siguiente expresión:

$$\text{Coste de producción del producto } j \text{ (} C_{uj} \text{)} = \sum CVu + \sum CFu \quad [4.1]$$

donde:

CVu: coste variable unitario de producción

¹²² Para un estudio más pormenorizado puede consultarse: [Avetisyan, 2009], [Legarreta, 2009], [Nadal et al., 2009] y [Ortega, 2006], entre otros.

¹²³ Incluye el incremento de costes por reducción de emisiones de CO₂.

CFu: costes fijos de producción/ volumen de producción

Dada la estructura del proceso productivo y del nivel de uso de las instalaciones, asumimos como aceptable un comportamiento lineal en los costes de fabricación (a un bajo uso, los coste fijos son absorbidos por menos unidades, por lo que aumenta el coste unitario de producción y viceversa).

2) Valor de la medida global de efectividad, que representa el rendimiento del programa de producción (Z) que define la función objetivo, esto es, maximizar el beneficio. Éste vendrá dado por:

$$\sum C_j X_j \quad [4.2]$$

donde C_j = Ingreso unitario del producto j (Iu_j) – Coste unitario del producto j (Cu_j)

3) Cantidad disponible de cada recurso limitado para asignar a la producción de los productos (A_i)

En este apartado se incluyen todos los factores productivos cuya disponibilidad está limitada por razones legales, comerciales, de mercado, económicas y/o técnicas. De esta manera, si la restricción es un requerimiento o una condición, los A_i representarán la cantidad total de un requerimiento o condición establecida, respectivamente.

Teniendo en cuenta las limitaciones de las medidas de ajuste de las emisiones de CO₂ analizadas en el Apartado 4.1.1 y el objetivo de nuestro estudio, consideramos las siguientes:

- la capacidad de producción del clínker (CP_c) o del cemento (CP_{ce}),
- la demanda de los productos a fabricar (diferentes cementos y clínker) (D_j),
- el consumo de combustibles alternativos (LIM_{comb}),
- el consumo de materias primas alternativas (LIM_{mp}),
- las emisiones autorizadas de CO₂ (EA),
- el consumo de energía (térmica y eléctrica) (LIM_{en})
- y otras limitaciones (mano de obra, adición de cemento, emisiones limitadas de otros contaminantes, etc.).

4) Cantidad de cada recurso limitado (i) consumido por cada tonelada de tipo de producto fabricado (j). Son los denominados coeficientes tecnológicos (a_{ij}) de las restricciones de los diferentes factores productivos limitados del modelo de programación lineal.

En nuestro caso, de acuerdo con las restricciones fijadas en el apartado anterior, los factores productivos considerados son las materias primas y los combustibles alternativos empleados en la obtención del clínker, cuyo uso está sujeto, por un lado, a las limitaciones de carácter técnico, legal, comercial y/o económica, y, por otro, por la de las emisiones de CO_2 , derivada del compromiso de PK.

Para determinar el valor de los a_{ij} de cada recurso considerado será preciso disponer de información relativa al consumo de los recursos productivos limitados por unidad de producto fabricado (tonelada de cada tipo de cemento fabricado y/o clínker). Para ello, se dispone de los balances de masa y de energía de los diferentes productos, donde se incluya también la cantidad de CO_2 emitida por cada tipo de cemento considerado. En la Figura 4.5, se muestra un balance tipo de masa de la producción de 1 tn de cemento con el proceso vía seca, para una fábrica que utilice coque como combustible.

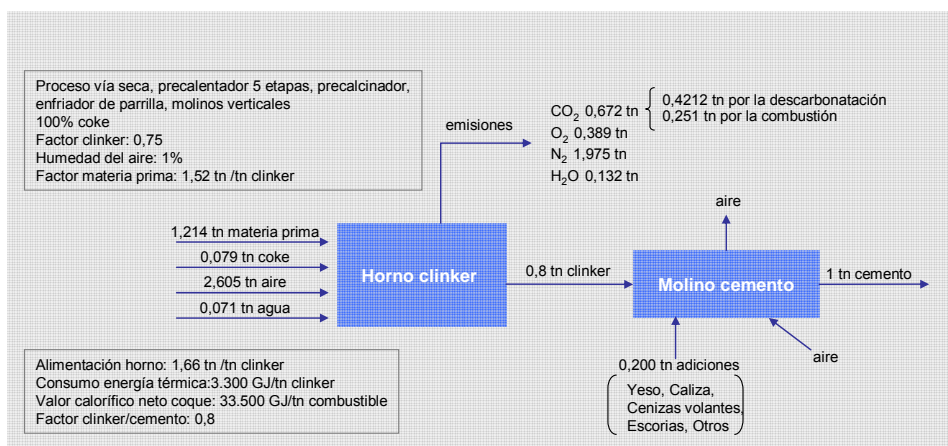


Figura 4.5. Balance de masa para la producción de una tonelada de cemento
Fuente: [EIPPCB, 2010]

En nuestro caso, considerando los supuestos de partida (ver Apartado 4.1.2), tendríamos que obtener el balance de masa, contemplando la medida de mejora propuesta para reducir las emisiones de CO₂ por tonelada de clínker fabricado, es decir variando el mix de combustibles y de materias primas empleado para fabricar el clínker, según la tasa de sustitución fijada por la empresa. Por tanto, considerando los requerimientos actuales de la planta en cuanto a consumo de energía, materia prima, combustible y otros recursos productivos, y bajo el supuesto del mínimo impacto económico para reducir las emisiones, en cuanto a cambios en tecnologías, equipos, etc., sería necesario determinar el consumo de cada uno de esos factores productivos limitados (materia prima y combustible alternativos) para obtener una tonelada de clínker, en cuyo proceso de fabricación se emita una cantidad de CO₂ igual a la propuesta como objetivo (factor de emisión del clínker óptimo, que supondrá un porcentaje de reducción respecto al factor de emisión de referencia).

Para ello, será necesario determinar el mix óptimo de combustibles y de materias primas para obtener el clínker óptimo, manteniendo las condiciones técnicas actuales de fabricación, en función de factores tales como el poder calorífico, factor de emisión, coste y otras limitaciones técnicas, económicas o de disponibilidad de los diferentes combustibles y materias primas a emplear.

De esta manera, podría aplicarse también un modelo matemático de optimización para obtener el mix óptimo de combustibles y materias primas que minimice costes, (los denominados "modelos de mezcla"¹²⁴), cuyo planteamiento representamos en el Cuadro 4.3. Así pues, las cantidades necesarias de cada uno de los combustibles y de las materias primas a emplear (para obtener una tonelada de clínker óptimo, con una emisión de CO₂ determinada), serán aquellas que minimicen el coste, teniendo en cuenta los requerimientos fijados, tanto de poder calorífico como de emisiones de CO₂, propiedades químicas (aportación de los compuestos químicos necesarios para no afectar la calidad de los cementos fabricados), así como cualquier otro factor (técnico, legal, etc.) que limite el uso de los diferentes recursos productivos en la producción del cemento.

El valor que obtengan las variables de decisión del modelo del mix de combustible y de materia prima se corresponde con el valor que tomen los coeficientes técnicos de la

¹²⁴ Ver, entre otros, [Álvarez y Reinoso, 2009] y [Letmathe y Balakrishnan, 2005].

restricción de consumo de combustible y de materia prima respectivamente, del modelo propuesto de producción del cemento.

Variables de decisión y parámetros del modelo

g_u : consumo del combustible alternativo "u" por unidad del producto fabricado	($u=1,\dots,n$)
y_k : consumo del combustible tradicional "k" por unidad del producto fabricado	($k=1,\dots,m$)
z_s : consumo de la materia prima alternativa "s" por unidad del producto fabricado	($s=1,\dots,p$)
v_r : consumo de la materia prima natural "r" por unidad del producto fabricado	($r=1,\dots,q$)

A_i : requerimiento/disponibilidad de los factores productivos limitados $i=1,\dots,x$	$i=1$ → emisiones de CO_2 por combustión
	$i=2$ → poder calorífico de los combustibles
	$i=3$ → otros factores relacionados con los combustibles
	$i=4$ → Contenido de CaO (óxido de calcio) de la materia prima
	$i=5$ → Contenido de MgO (óxido de magnesio) de la materia prima
	$i=6$ → emisiones de CO_2 por proceso
	$i=7$ → otros factores relacionados con las materias primas

$A_1 = OBJ_{em.cob}$ = objetivo de emisión de combustión

$A_2 = PC_c$ = requerimiento calorífico de la instalación

$A_3 = \dots\dots\dots$

$A_4 = Min_{CaO}$ = contenido mínimo de CaO por tn de producto

$A_5 = Min_{MgO}$ = contenido mínimo de MgO por tn de producto

$A_6 = OBJ_{em.pr}$ = objetivo de emisión de proceso

$A_7 = \dots\dots\dots$

C_u : coste unitario del combustible alternativo "u"

C_k : coste unitario de combustible tradicional "k"

C_s : coste unitario de la materia prima alternativa "s"

C_r : coste unitario de la materia prima natural "r"

Planteamiento del modelo

$$Z(\min) = \sum C_u g_u + \sum C_k y_k + \sum C_s z_s + \sum C_r v_r$$

s.a.:

- Emisiones de CO_2 por combustión

$$\sum a_{1j} g_u + \sum a_{1k} y_k \leq OBJ_{em.cob}$$

donde

a_{1j} = factor emisión del combustible alternativo u (cantidad emitida de CO_2 por cada unidad de combustible utilizado)

a_{1k} = factor de emisión del combustible tradicional k

- Aportación calorífica

$$\sum a_{2j}g_u + \sum a_{2k}y_k \geq PC_c$$

donde

a_{2j}= poder calorífico del combustible alternativo u

a_{2k}= poder calorífico del combustible tradicional k

- Contenido de CaO

$$\sum a_{4s}z_s + \sum a_{4r}v_r \geq Min_{CaO}$$

donde

a_{4s}= proporción de CaO en la materia prima alternativa s

a_{4r}= proporción de CaO en la materia prima natural r

- Contenido de MgO

$$\sum a_{5s}z_s + \sum a_{5r}v_r \geq Min_{MgO}$$

donde

a_{5s}= proporción de MgO en la materia prima alternativa s

a_{5r}= proporción de MgO en la materia prima natural r

- Emisiones de CO₂ por proceso

$$\sum a_{6s}z_s + \sum a_{6r}v_r \leq OBJ_{em,pr}$$

donde

a_{6j}= factor emisión CO₂ de la materia prima alternativa s

a_{6k}= factor de emisión CO₂ de la materia prima natural r

Otras restricciones:

- Consumo de combustible alternativo ≥ Objetivo de la empresa (tasa de sustitución)
- Disponibilidad de cada combustible alternativo
- Consumo de materia prima alternativa ≥ Objetivo de la empresa (tasa de sustitución)
- Disponibilidad de la materia prima alternativa
- Otros requerimientos de producción

Cuadro 4.3. Modelo de optimización del mix óptimo de combustibles y materias primas para la producción de una tonelada de clínker
Fuente: elaboración propia

La combinación óptima de materias primas y combustibles seleccionada determinará la composición del clínker y por tanto, la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera por cada tipo de producto fabricado, teniendo en cuenta que una de las principales diferencias que existe entre los cementos es precisamente el porcentaje de clínker que incorpora, que puede oscilar entre el 20 y el 100%, según la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08) (ver Cuadro 2.4). Esas cantidades determinarán los coeficientes de la

restricción de las emisiones de CO₂ del modelo propuesto para la obtención del programa óptimo de producción.

Otra alternativa, aún no generalizada en el sector del cemento, para obtener la cantidad de CO₂ emitida por unidad de producto fabricado es el cálculo de la huella de carbono¹²⁵, distinguiendo las diferentes etapas del proceso y por tanto las distintas fuentes de emisión [Caro et al., 2011]. Ésta junto con el análisis del ciclo de vida del producto constituyen herramientas potenciales que se utilizan para definir y optimizar el impacto medioambiental de un proceso o producto. Concretamente, el ACV permite evaluar la mejora de los procesos industriales en general ([Marceau et al., 2006], [Navia et al., 2006], [Gäbel et al., 2004] y [Josa et al., 2004]), y el impacto medioambiental de la producción del clínker y sus cadenas de suministro, en particular. Trabajos como los de [Boesch y Hellweg, 2010] y [Boesch et al., 2009] recogen aplicaciones de esta técnica en el sector de cemento.

El resto de restricciones del modelo recogidas en el apartado anterior requerirá del cálculo de los diferentes coeficientes (a_{ij}). Para la capacidad del clínker, los coeficientes vendrán dados por el porcentaje que de este subproducto incorpora cada tipo de cemento considerado. Y para la demanda de cada tipo de producto, se considerará la previsión de la misma para cada uno de éstos en el horizonte de planificación fijado, teniendo en cuenta la cuota de mercado que representa cada tipo de producto, por separado y/o sobre el total, o si también, en su caso, se requiere un mix de producto concreto para rentabilizar el proceso de producción.

4.1.2.2. Planteamiento del modelo de programación lineal

Teniendo en cuenta las variables de decisión y los parámetros identificados y definidos en el apartado anterior, recogemos en esta parte del trabajo el planteamiento del modelo que ilustramos en la Figura 4.6, determinando la función objetivo y las restricciones a las que está sujeta.

¹²⁵ Aunque el cálculo de la huella de carbono constituye actualmente uno de los retos del sector del cemento, algunos grupos cementeros que operan en España ya se han adelantado (por ejemplo Portland Valderrivas y CEMEX).

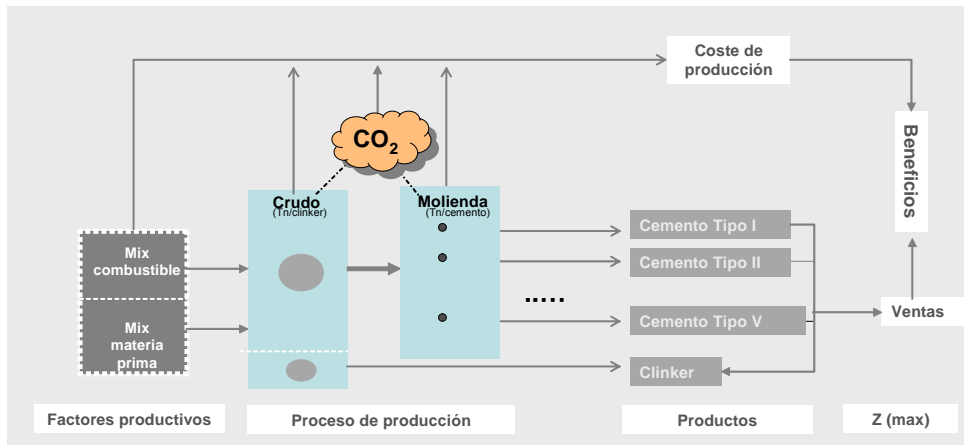


Figura 4.6. Modelo de programación lineal de la producción del cemento
Fuente: elaboración propia

a) Restricciones del modelo de PL

Considerando que las restricciones, desde el punto de vista matemático, son funciones lineales expresadas como igualdades o desigualdades, que limitan el valor de las variables de decisión a valores permisibles, aquellas pueden representar recursos, condiciones o requerimientos establecidos.

De esta manera, y bajo el escenario descrito, en nuestro caso de estudio, las restricciones a considerar en la planificación de la producción del cemento son las relativas a:

- las emisiones de CO₂,
- el consumo de combustibles alternativos,
- el consumo de materias primas alternativas,
- la capacidad de producción
- y la demanda de los productos.

1) Emisiones de CO₂

Conocida la cantidad emitida de CO₂ por tonelada de producto fabricado¹²⁶ (a_{ij}), el total de las emisiones de CO₂ procedentes de la fabricación del cemento para un año, no podrá superar a las emisiones autorizadas (EA). Así pues, la restricción relativa a las emisiones de CO₂ quedaría de la siguiente manera:

$$\sum a_{ij} X_j \leq EA \text{ (tn CO}_2\text{)} \quad [4.3]$$

Donde a_{ij} = % clínker que incorpora el producto j * cantidad emitida de CO₂ por tn de clínker fabricado, bajo las consideraciones realizadas.

EA = emisiones autorizadas en el PNA + excedente de permisos de periodos anteriores + permisos de emisión de otros mecanismos de flexibilidad (AC + MDL)

Otra alternativa, más recomendable en el caso de optar por un enfoque integral de la planificación de la producción (incluir las otras fuentes de emisión y no centrarnos sólo en la producción del clínker) consistiría en desglosar la restricción anterior en tantas ecuaciones como fuentes de emisión consideremos, según el origen de las emisiones de CO₂ (combustión, proceso y consumo de energía eléctrica), así como de la proporción que representa cada una de ellas sobre el total. De esta manera, la restricción de las emisiones de CO₂ quedaría representada en las siguientes desigualdades:

$$\sum a_{cij} X_j \leq EAc \text{ (emisiones por combustión)} \quad [4.4]$$

$$\sum a_{p ij} X_j \leq EAp \text{ (emisiones por proceso)} \quad [4.5]$$

$$\sum a_{eij} X_j \leq EAe \text{ (emisiones por consumo eléctrico)} \quad [4.6]$$

donde a_{cij} , $a_{p ij}$ y a_{eij} representan la cantidad emitida de CO₂ por combustión, proceso y consumo eléctrico, respectivamente, por tn de producto fabricado,

de manera que $EA = EAc + EAp + EAe$

Asimismo, tal y como ya vimos, a pesar de que la posibilidad de introducir las técnicas de captura y almacenamiento en el sector analizado no es viable a c/p , por encontrarse actualmente en plena fase de desarrollo experimental, en el caso de contemplarse, la ecuación [4.3] se transformaría en la siguiente desigualdad:

¹²⁶ Se obtiene del balance de masa para una tonelada de clínker óptimo, calculado previamente según el mix óptimo de combustibles y materia primas del apartado anterior.

$$\sum a_{ij} X_j - CAC \leq EA \text{ (tn CO}_2\text{)}, \quad [4.7]$$

donde CAC = ahorro de emisiones de CO₂ (tn) por captura y almacenamiento.

2) Consumo de combustibles alternativos

El consumo total de cada combustible alternativo empleado en la producción de los diferentes tipos del cemento y del clínker no podrá superar el límite fijado para cada uno de ellos (LIM_{comb}), de manera que la restricción relativa a cada combustible alternativo utilizado tomará la siguiente expresión:

$$\sum a_{ij} X_j \leq LIM_{comb} \text{ (tn combustible/tn clínker ó GJ/tn clínker)} \quad [4.8]$$

donde:

a_{ij} = cantidad de combustible alternativo necesario para fabricar una tonelada del producto j o cantidad de energía térmica del combustible alternativo necesaria para obtener una tonelada del producto j¹²⁷.

LIM_{comb}= limitación del uso del combustible alternativo= mínimo {limitación legal¹²⁸, limitación operativa¹²⁹, comercial¹³⁰}

3) Consumo de materias primas alternativas

De acuerdo con el mix óptimo de materia prima obtenido para la fabricación del clínker en condiciones óptima (con un determinado porcentaje de materia prima alternativa y para unas emisiones de CO₂ también previamente fijadas), el consumo de cada tipo de materia prima alternativa no podrá superar, al igual que sucede con los combustibles alternativos, la limitación impuesta a cada tipo de ellas, de manera que:

$$\sum a_{ij} X_j \leq LIM_{mp} \text{ (tn materia prima alternativa)} \quad [4.9]$$

¹²⁷ Para la consecución del objetivo de reducción de emisiones de CO₂, en el caso de aplicar el modelo de mezcla propuesto para obtener el mix óptimo de combustibles y materias primas, se correspondería con el valor de sus variables de decisión (g_u) (ver Cuadro 4.3).

¹²⁸ La establecida, por ejemplo, en una Autorización Ambiental Integrada.

¹²⁹ Requerimiento de inversión para adaptar las instalaciones para el uso del combustible alternativo. La valorización de combustibles requiere inversiones para adecuar las instalaciones de producción de clínker con controles de recepción estrictos, ello se traduce en un incremento del coste de producción [Urcelay, 2006].

¹³⁰ Disponibilidad del combustible en el mercado.

donde:

a_{ij} = cantidad de materia prima alternativa utilizada para fabricar una tonelada del producto j

LIM_{mp} = limitación de consumo de materia prima alternativa = mínimo {limitación legal, limitación operativa, comercial}

4) Capacidad de producción

Como en cualquier proceso de planificación de la producción industrial, la capacidad disponible limita la producción, no pudiendo superar ésta a aquella. En el caso de la producción del cemento, sin olvidar el enfoque adoptado para nuestro análisis, la capacidad de producción vendrá marcada por la capacidad del clínker, componente principal del cemento (con diferente cantidad dependiendo del tipo de cemento), que a su vez puede ser vendido también como un producto final. De esta manera, y teniendo en cuenta la proporción de clínker que cada tipo de producto incorpora¹³¹ (pc_j), el total de la producción no puede superar la capacidad disponible de la instalación (CP_c):

$$\sum pc_j X_j \leq CP_c \quad (\text{tn clínker/año}) \quad [4.10]$$

que expresada en función de toneladas de cemento disponible (CP_{ce}), teniendo en cuenta que la empresa produce con un determinado factor proporción clínker/cemento, la expresión [4.10] quedaría:

$$\sum X_j \leq CP_{ce} \quad (\text{tn cemento/año}) \quad [4.11]$$

5) Demanda de los productos (mix de ventas)

Para evitar una producción superior a la demanda, ya que implicaría desperdicio de recursos y no se podría garantizar su consumo, es preciso tener en cuenta en la planificación de la producción, y por tanto, en el planteamiento del modelo, la restricción correspondiente a la demanda de cada producto. De esta manera, para aquellos productos que tengan una demanda limitada (incluido el clínker), tendríamos:

$$X_j \leq \text{Demanda del producto } j \quad (\text{unidades de } j) \quad [4.12]$$

¹³¹ En el caso del clínker para vender $pc_j = 1$.

Además, si fuera preciso, habría que añadir otra restricción más en este apartado, que permita relacionar las demandas de los productos en función del mix de venta. Precisamente, en los últimos años, la composición del mix de ventas ha experimentado importantes cambios, debido a la paralización de determinado tipo de construcción, consecuencia de la crisis¹³². Asimismo, sería conveniente incluir también la cuota de mercado de las nuevas familias de cementos ecoeficientes (ecocementos), que poco a poco van ganando posición en el mercado, satisfaciendo así las nuevas demandas, reconocidas como verdes, ecológicas o sostenibles.

6) Otras restricciones

Según el caso y bajo supuestos no considerados anteriormente, además de la restricción de no negatividad, podría incluirse otras restricciones más al planteamiento del modelo de programación lineal propuesto, tanto las relacionadas directamente con las emisiones de CO₂ como cualquier otro tipo de limitación de la producción industrial (mano de obra, otros requisitos legales, limitaciones de exportación, capacidad de almacenaje, etc.).

Así, por ejemplo, si la empresa, para reducir las emisiones de CO₂, baraja entre sus posibilidades simultanear las alternativas contempladas (sustitución parcial y progresiva de los combustibles y materias primas) con la reducción del consumo de energía eléctrica¹³³, tendría que incluirse al planteamiento del modelo la siguiente restricción:

$$\sum a_{ij}X_j \leq \text{objetivo de consumo de energía eléctrica} \quad [4.13]$$

donde a_{ij} es la cantidad de energía eléctrica consumida por tn de producto fabricado.

Igualmente, si incluimos en el modelo propuesto la fase de molienda del cemento, y la empresa se plantea, al igual que en la fase de obtención del clínker, incrementar el porcentaje de aditivos utilizados y así contribuir a la reducción de las emisiones de CO₂, el consumo de éstas estará limitado por la normativa reguladora de la composición de

¹³² Precisamente en 2010, en CEMEX España, el factor clínker/cemento aumentó respecto a 2008 (de 78,1 a 80,9) porque fue mayor la demanda de cementos de mayor porcentaje de clínker (indicado principalmente para construcción de infraestructuras) [CEMEX, 2011b].

¹³³En 2009 la media europea de consumo de energía eléctrica es de 111 KWh/tn de cemento [WBCSD/CSI, 2009b]. Los principales usuarios de energía eléctrica son los molinos (molienda de las materias primas, los combustibles sólidos y la final molienda del cemento) que representa más del 60% del consumo de electricidad [Hoenig y Twigg, 2009] y el tubo de escape ventiladores (horno/rawmills y molinos de cemento) que, junto con los molinos representan más del 80% del consumo de energía eléctrica [EIPPCB, 2010].

cada tipo de cemento (que garantiza las propiedades físico-químicas de cada uno de ellos), así como la disponibilidad de las mismas en el mercado. De esta manera, para cada aditivo, la restricción se representaría como:

$$\sum a_{ij} X_j \leq \text{cantidad permitida del tipo de adición } i, \quad [4.14]$$

donde a_{ij} es la cantidad de la adición i que incorpora el producto j .

b) Función objetivo

Para completar el planteamiento del modelo de PL propuesto, quedaría por formular la función que representa el rendimiento del programa óptimo de producción, que sería igual a:

$$Z (\max) = \sum C_j X_j, \quad [4.15]$$

donde C_j es el beneficio unitario del producto j .

De acuerdo con todo lo expuesto anteriormente, dicho modelo quedaría planteado analíticamente tal y como se recoge en el Cuadro 4.4.

$$\begin{aligned} Z (\max) &= \sum C_j X_j, \\ \text{s.a.:} \\ \sum a_{ij} X_i &\leq EA \text{ (tn CO}_2\text{)} \\ \sum a_{ij} X_i &\leq LIM_{\text{comb}} \text{ (tn combustible/tn clínker ó GJ/tn clínker)} \\ \sum a_{ij} X_i &\leq LIM_{\text{mp}} \text{ (tn materia prima)} \\ \sum p_{c_i} X_i &\leq CP_c \text{ (tn clínker/año)} \\ \sum X_i &\leq Demanda_i \text{ (tn productos)} \\ X_j &\geq 0 \end{aligned}$$

Cuadro 4.4. Planteamiento del modelo de PL para la producción del cemento
Fuente: elaboración propia

En dicho planteamiento, se contemplan, tanto las limitaciones de las emisiones de CO_2 , como las derivadas de las alternativas consideradas para reducirlas (valorización de residuos y producción de ecocementos).

PARA FINALIZAR este capítulo, quisiéramos decir, que a pesar de las limitaciones de la programación lineal, su aplicación, en una primera aproximación, nos ha permitido realizar una propuesta, que permita optimizar la producción de cemento, incluyendo criterios medioambientales en la planificación de la producción. Propuesta que viene dada por la necesidad de un cambio de orientación en la problemática que nos ocupa, como un verdadero reflejo del compromiso asumido por el sector con la protección del entorno natural, y más concretamente, con las emisiones de CO₂ procedentes de sus instalaciones.

El proceso propuesto, al margen de que pueda ser perfeccionable, constituye un adecuado marco de referencia para analizar el impacto de la limitación de las emisiones de CO₂ derivadas del Protocolo de Kyoto, que desde su entrada de vigor se convierten en un input más de los procesos productivos de la industria del cemento. Su aplicación, como veremos en el estudio del caso del Capítulo 5, permitirá determinar, anticipadamente, decisiones que permitan optimizar el uso de los recursos productivos, considerando, por un lado las cantidades de CO₂ emitidas a la atmósfera y por otro lado, las alternativas para reducirlas a mínimos legales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [**Álvarez y Reinoso, 2009**] Álvarez-Clifford, F. y Reinoso, H. (2009): "An Optimization Model for the Production Planning of a Steel Company", *Revista Ingeniería Industrial*, Año 8, Nº 1.
- [**Ammar et al., 2011**] Ammar, Y.; Joyce, S.; Norman, R.; Wang, Y. y Roskilly, A.P. (2011): "Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK", *Applied Energy*, Vol. 89, Nº 1, pp. 3-20. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.003>.
- [**Ammenberg et al., 2011**] Ammenberg, J.; Feiz, R.; Helgstrand, A.; Eklund, M. y Baas, L. (2011): "Industrial symbiosis for improving the CO₂-performance of cement", Final report of the CEMEX-Linköping University industrial ecology project.
- [**Avetisyan, 2009**] Avetisyan, H. (2009): "Life Cycle Cost Minimization for Cement Production under Various Constraints", *World of Coal Ash Conference* (May 4-7, 2009 in Lexington, KY, USA). Disponible en web: <http://www.flyash.info/2009/084-avetisyan2009.pdf> [última consulta: 21 de enero de 2012]
- [**Boesch et al., 2009**] Boesch, M.E.; Koehler, A. y Hellweg, S. (2009): "Model for cradle-to-gate life cycle assessment of clinker production", *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, Nº 19, pp. 7578-7583.
- [**Boesch y Hellweg, 2010**] Boesch, M.E. y Hellweg, S. (2010): "Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment", *Environmental Science Technology*, Vol. 44, Nº 23, p.p. 9143-9149.
- [**Caro et al., 2011**] Caro, F.; Corbett, C.; Tan, T. y Zuidwijk, R.A. (2011): "Carbon-Optimal and Carbon-Neutral Supply Chains", *Beta Working Paper series 358*, Eindhoven, Holland, Octubre 2011. Disponible en web: http://cms.ieis.tue.nl/Beta/Files/WorkingPapers/wp_358.pdf.
- [**Castillo et al., 2002**] Castillo, E.; Conejo, A.J.; Pedergal, P.; García, R. y Alguacil, N. (2002): *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. Disponible en web: http://www.investigacion-operaciones.com/ARCHIVOS_LIBRO/LibroCompleto.pdf.
- [**CE, 2009**] Comisión Europea (2009): *El régimen de comercio de derechos de emisión de la UE*, Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.
- [**CEMBUREAU, 2009a**] CEMBUREAU (2009): *Activity report 2008*, CEMBUREAU. Disponible en web: http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/Activity_Report_2008.pdf.
- [**CEMEX, 2011b**] CEMEX (2011): *Memoria de Sostenibilidad 2010. Cemex en España*, CEMEX, España.
- [**CEMEX**] <http://www.cemex.com/>.
- [**Chen et al., 2010b**] Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi, Y.; Jullien, A. y Ventura, A. (2010): "LCA allocation procedure used as an initiative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete", *Resources, Conservation and Recycling*, Nº 54, pp. 1231-1240.
- [**Directiva 2003/87/CE**] Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de Octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo.
- [**Domínguez-Machuca et al., 1995b**] Domínguez-Machuca, J.A.; García-González, S.; Ruiz-Jiménez, A.; Domínguez-Machuca, M.A. y Álvarez-Gil, M.J. (1995): *Dirección de operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, Ed. McGraw-Hill, Madrid.
- [**EIPPCB, 2010**] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (2010): *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide manufacturing Industries*. Disponible en web: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf. (Traducido al español con el título: *Prevención y Control Integrados de la Contaminación Documento de referencia*)

sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio RC-08. Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento (aprobada por Real Decreto 956/2008 de 6 de junio)).

[Elkamel et al., 2008] Elkamel, A.; Ba-Shammakh, M.; Douglas, P.L. y Croiset, E. (2008): "An optimization approach for integrating planning and CO₂ emission reduction in the petroleum refining industry", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 47, pp.760–776.

[EUPAVE, 2009] European Concrete Paving Association; Agrupación de Fabricantes de Cemento de España; Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (2009): *Pavimentos de hormigón: una alternativa inteligente y sostenible*.

[Faulín y Juan, 2012] Faulín, J. y Juan, A.A. (2012): "Introducción a la investigación operativa". *Proyecto e- Math financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD)*. Disponible en web: http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Intro_I_O.pdf.

[Feiz, 2011] Feiz, R. (2011): *Improving climate performance of cement production. Developing an assessment framework and applying it to a CEMEX cement production cluster in Germany*, Thesis Report, Linköping University, Suecia.

[Gäbel et al., 2004] Gäbel, K.; Forsberg, P. y Tillman, A.M. (2004): "The design and building of a life cycle-based process model for simulating environmental performance, product performance and cost in cement manufacturing", *Journal of Cleaner Production*, N° 12, pp. 77-93.

[Gessa et al., 2009b] Gessa-Perera A., Jurado-Martín J. A. y Rabadán-Martín, I. (2009): "El Cumplimiento del Protocolo de Kyoto en tiempos de crisis: ¿una oportunidad o una amenaza?", *Boletín Económico de Información Comercial Española (ICE)*, N° 2979, pp. 23 -32.

[Gómez, 2007] Gómez-Rivas, J.J. (2007): *Estudio económico ambiental de la reducción de emisiones en una planta cementera por la combustión de biomasa*, Proyecto Fin de

Carrera, Universidad Pontificia de Comilla, Madrid.

[Hoenig y Twigg, 2009] Hoenig, V. y Twigg, C. (2009): *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to look ahead*, Düsseldorf, Geneva, 4 June (World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative- European Cement Research Academy).

[Huntzinger y Eatmon, 2009] Huntzinger, D.N. y Eatmon, T.D. (2009): "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies", *Journal of Cleaner Production*, N° 17, pp. 668-675.

[Josa et al., 2004] Josa, A.; Aguado, A.; Heino, A.; Byers, E. y Cardim, A. (2004): "Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU", *Cement and Concrete Research*, N° 34, pp. 1.313-1.320.

[Legarreta, 2009] Legarreta-Fernández, J.A. (2009): "Uso sostenible de los recursos en el sector cementero", *Jornada sobre Sostenibilidad Industrial (Navarra)*. Disponible en web: http://www.concretonline.com/pdf/lotos_articulos/Cementos/RRCementeras7.pdf.

[Letmathe y Balakrishnan, 2005] Letmathe, P. y Balakrishnan, N. (2005): "Environmental considerations on the optimal product mix", *European Journal of Operational Research*, Vol. 167, N° 2, pp. 398-412.

[Liu y Li, 2009] Liu, N.C. y Li, Z.F. (2009): "One High Efficiency Production Line of Clinker and Slag Grinding Separately by Roller Mill in Cement Industry", *Advanced Materials Research*, N° 58, pp. 83-89. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.58.83.

[Marceau et al., 2006] Marceau, M.; Nisbet, M. y VanGeem, M. (2006): *Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture*, Portland Cement Association, R&D Serial N° 2095b. Disponible en web: http://www.nrmca.org/taskforce/item_2_talkingpoints/sustainability/sustainability/sn2095b%20-%20cement%20lci%202006.pdf.

[Mateo y Lahoz, 2009] Mateo, P.M. y Lahoz, D. (2009): "Programación Lineal III. Análisis Post-Optimal". Disponible en web: <http://ocw.unizar.es/ocw/enseñanzas-tecnicas/modelos-de-investigacion-operativa/ficheros/OCWSensiPara.pdf>.

[MMA, 2004] Ministerio de Medio Ambiente (2004): *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento*, Centro de Publicaciones-Secretaría General Técnica- Ministerio de Medio Ambiente.

[Moya et al., 2010] Moya, J.A.; Pardo, N. y Mercier (2010): *Energy efficiency and CO₂ Emissions: Prospective Scenarios for the cement Industry*, JRC Scientific and Technical Reports. European Commission Joint Research Centre Institute for Energy, Publications Office of the European Union.

[Mula et al., 2006a] Mula-Bru, J.; Poler-Escoto, R. y García-Sabater, J.P. (2006): "Aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos en la Planificación de la Producción: Un Estudio de la Literatura", VIII Congreso de Ingeniería de Organización, 9 y 10 de septiembre, Leganés.

[Mula et al., 2006b] Mula-Bru, J.; Poler-Escoto, R. y García-Sabater, J.P. (2006): "Modelo de programación lineal multi-objetivo para la resolución del MRP con restricciones de capacidad", X Congreso de Ingeniería de Organización, 7 y 8 de septiembre, Valencia.

[Nadal et al., 2009] Nadal, M.; Schuhmacher, M. y Domingo, J.L. (2009): "Cost-benefit analysis of using sewage sludge as alternative fuel in a cement plant: a case study", *Environmental Science and Pollution Research*, Nº 16, pp. 322–328.

[Navia et al., 2006] Navia, R.; Rivelab, B.; Sorber, K.E. y Menéndez, C.R. (2006): "Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: Life cycle assessment", *Resources, Conservation and Recycling*, Nº 48, pp. 339–356, doi:10.1016/j.resconrec.2006.01.007.

[Nordhaus, 1993] Nordhaus, W.D. (1993): "Rolling the "DICE": An optimal transition path for controlling greenhouse gases", *Resource and Energy Economics*, Nº 15, pp. 27-50. Disponible en web:

[http://dx.doi.org/10.1016/0928-7655\(93\)90017-O](http://dx.doi.org/10.1016/0928-7655(93)90017-O).

[Oberndorfer y Rennings, 2007] Oberndorfer, U. y Rennings, K. (2007): "Costs and competitiveness effects of the European Union emissions trading scheme", *European Environment*, Vol. 17, Nº 1, pp.1-17.

[Ortega, 2006] Ortega-Valenzuela, A. (2006): *Análisis técnico y de costos para implementar plan de mantenimiento predictivo mediante termografía en cementos "Bío-Bío"*, Memoria para optar al título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica, Universidad de Talca, Chile.

[Price et al., 2010] Price, L.; Hasanbeigi, A. y Lu, H. (2010): "Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants", *Energy*, Nº 35, pp. 3461-3473.

[Radulescu et al., 2009] Radulescu, M.; Radulescu, S. y Radulescu, C.Z. (2009): "Sustainable production technologies which take into account environmental constraints", *European Journal of Operational Research*, Vol. 193, Nº 3, pp. 730-740.

[Reeb y Leavengood, 2000] Reeb, J.; Leavengood, S. (2000): "Using Duality and Sensitivity Analysis to Interpret Linear Programming Solutions", *Performance Excellence in the Wood Products Industry-Operations Research*, OSU Extension and Experiment Station Communications, EM 8744. Disponible en web: <http://extension.oregonstate.edu/catalog/pdf/em/em8744-e.pdf>.

[Remmers et al., 1990] Remmers, J.; Morgenstern, T.; Schons, G.; Haasis, H.D. y Rentz, O. (1990): "Integration of air pollution control technologies in linear energy-environmental models", *European Journal of Operational Research*, Vol. 47, Nº 3, pp. 306–316.

[Strazza et al., 2010] Strazza, C., Borghi, A.D., Blengini, G.A. y Gallo, M. (2010): Definition of methodology for a sector EPD (environmental Product Declaration): Case study of the average Italian cement, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Nº 15, pp. 540-548.

- [Subai et al., 2006]** Subai, C.; Baptiste, P. y Niel, E. (2006): "Scheduling issues for environmentally responsible manufacturing: The case of hoist scheduling in an electroplating line", *International Journal of Production Economics*, Vol. 99, Nº 1, pp. 74-87.
- [Tan et al., 2002]** Tan, X.C.; Liu, F.; Cao, H.J. y Zhang, H. (2002): "A decision-making framework model of cutting fluid selection for green manufacturing and a case study", *Journal of Materials Processing Technology*, Nº 129, pp. 467-470.
- [Urcelay, 2006]** Urcelay-Gordóbil, C. (2006): "Utilización de combustibles alternativos en las fábricas de cemento", CONAMA 8. Disponible en web: <http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/CTs/CT120.pdf>.
- [US EPA, 2010]** U.S. Environmental Protection Agency (2010): *Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Portland Cement Industry*, Research Triangle Park, North Carolina 27711. Disponible en web: <http://www.epa.gov/nsr/ghgdocs/cement.pdf>.
- [Valderrama et al., 2012]** Valderrama, C.; Granados, R.; Cortina, J.L.; Gasol, C.M.; Guillem, M.; Josa, A. (2012): "Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 25, pp. 60-67.
- [Van der Vleuten, 1994]** Van der Vleuten, F.P. (1994): "Cement in Development", *Energy and Environment*, Petten, Netherlands: Netherlands Energy Res. Found.
- [Van Oss y Padovani, 2003]** Van Oss, H.G. y Padovani, A.C. (2003): "Cement Manufacture and the Environment - Part II: Environmental Challenges and Opportunities", *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 7, Nº 1, pp. 93-126.
- [Vidal y Goetschalckx, 1997]** Vidal, C.J. y Goetschalckx, M. (1997): "Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models", *European Journal of Operational Research*, Vol. 98, Nº 1, pp.1-18.
- [WBCSD/CSI, 2009b]** World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative (2009): *Cement Industry Energy and CO₂ Performance "Getting the Numbers Right"*, WBCSD.
- [WBCSD/IEA, 2009]** World Business Council for Sustainable Development/International Energy Agency (2009): *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050*, OECD/IEA and WBCSD.
[Weyant, 1999] y
- [Weyant, 1999]** Weyant, J.P. (1999): "The Costs of the Kyoto Protocol: a Multi-Model Evaluation", *The Energy Journal*, Nº 20, pp. 157-175.
- [Worrell et al., 2008]** Worrell, E.; Galitsky, C. y Price, L. (2008): *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making. An energy star*, Guide for Energy and Plant Managers. Disponible en web: <http://www.energystar.gov/ia/business/industry/LBNL-54036.pdf>.
- [Wu y Chang, 2004]** Wu, C.C. y Chang, N. B. (2004): "Corporate optimal production planning with varying environmental costs: A grey compromise programming approach", *European Journal of Operational Research*, Vol. 155, Nº 1, pp. 68-95.
- [Zhou et al., 2012]** Zhou, M.; Pan, C.; Chen, Z.; Yang, W. y Li, B. (2012): "Selection and evaluation of green production strategies: analytic and simulation models", *Journal of Cleaner Production*, Nº 26, pp. 9-17.

Capítulo 5

Aplicación del modelo propuesto de optimización. Análisis de un caso

5.1. Presentación del caso

5.2. Propuesta de reducción de emisiones de CO₂: valorización de residuos

5.3. Planteamiento del modelo de producción

5.4. Resultados. Análisis y discusión

5.4.1. Plan óptimo de producción

5.4.2. Análisis de sensibilidad de los resultados

Capítulo 5

Aplicación del modelo propuesto de optimización. Análisis de un caso

Para ilustrar la aplicación del modelo propuesto en el capítulo anterior analizamos un caso¹³⁴, basándonos en una fábrica de cemento, integrada en uno de los principales grupos cementeros que opera en España, que desde hace tiempo, en línea con el sector cementero, asume el compromiso de mejorar de forma continua la eficiencia de sus procesos productivos, minimizando su impacto ambiental en el entorno.

A continuación, dedicamos el siguiente apartado a la presentación y descripción del caso de estudio, cuyo análisis presentamos en los sucesivos epígrafes, tras la aplicación del modelo de planificación de la producción propuesto en el Apartado 4.1.2.2.

5.1. PRESENTACIÓN DEL CASO

La fábrica objeto de estudio, que inició su actividad productiva en la década de los 60, actualmente con una extensión de 321.804 m² y una superficie disponible de explotación autorizada de cantera de 4.800.000 m², desarrolla en sus instalaciones todo el proceso de fabricación del cemento (planta integral de cemento) (Código NACE 07.23.51; 07.08.11), desde la obtención de la materia prima en las canteras hasta la expedición de los productos finales (ver Cuadro 5.1).

¹³⁴ Los datos utilizados en el caso se han obtenido a través de las memorias e informes anuales de la propia instalación y de diferentes organizaciones (OFICEMEN, AFCA, FLACEMA, IECA, etc.), así como registros oficiales (Registro PRTR), otros estudios técnicos, económicos, medioambientales del sector e información proporcionada directamente por el sector. Por deseo expreso de los responsables de la planta cementera y para garantizar el carácter confidencial de los datos recabados, mantendremos en anonimato el caso sujeto a estudio.

Fases	Equipamiento
Obtención de marga	Cantera (explotación a cielo abierto)
Recepción y trituración de margas	Dos alimentadores de láminas
Almacenamiento de materias primas	Silos de almacenamiento de materias primas
Secado, molienda y homogeneización de crudo	Secadores Molino Silos de almacenamiento de harina
Clinkerización	Torres de intercambio Horno horizontal rotatorio de clínker (vía seca) Silos de almacenamiento de clínker
Molienda del cemento	Cuatro molinos Silos de almacenamiento de cemento
Expedición del cemento	2 líneas de ensacado

Cuadro 5.1. Proceso de producción del cemento: etapas y equipamiento
Fuente: elaboración propia a partir de información pública corporativa

En sus instalaciones obtiene varios tipos de cementos, en función de su composición (proporción de clínker y de adiciones), resistencias y otras características adicionales, certificados todos ellos con la marca N de certificación de Productos AENOR, así como de marcado CE, cumpliendo la legislación vigente y las exigencias normativas (ver Cuadro 5.2).

Productos	NORMA	Composición		% producción (2010)	Usos y aplicaciones principales
		Factor clínker (1)	Adiciones		
CEM I 42,5-52,5 R	UNE-EN 80.301-1	95%	5% caliza	27,44	Altas resistencias iniciales
CEM II/A	UNE-EN 197-1	82-88%	6% caliza L ¹³⁵ 12% cenizas volantes- 12% caliza L	50,76	Usos generales
CEM II/B	UNE-EN 197-1	67%	30% caliza L 3% cenizas volantes	21,8	Usos generales

(1) cantidad de clínker consumido en el cemento producido

Cuadro 5.2. Tipos de cementos fabricados
Fuente: ficha técnica de los productos fabricados (información pública corporativa)

¹³⁵ La diferencia entre la caliza L y LL es el contenido de carbono orgánico total, que no excede del 0,5 y 0,2% respectivamente [Sanjuán, 2007].

Además de los diferentes tipos de cementos fabricados, un porcentaje de la producción del clínker (15,63% aproximadamente del total de la producción) lo vende directamente o transfiere a otras instalaciones de la compañía [OFICEMEN, 2011c].

Al igual que el resto de la industria cementera, el margen de beneficio de los productos de la planta analizada ha experimentado en los últimos años, un descenso generalizado. Como nos informó el jefe de optimización de la planta, en épocas anteriores a la crisis, el margen de beneficios de las instalaciones cementeras rondaba el 25% de media, dependiendo del precio de venta¹³⁶. Sin embargo, la actual situación ha provocado una disminución del beneficio, obteniendo unos márgenes medios que varían de un 5 a un 10%, siendo prácticamente nulos en el cemento CEM II/A-L (utilizado fundamentalmente para el hormigón) y en el caso de la exportación de los mismos.

Los datos relativos de la actividad productiva de la planta cementera analizada en relación al comportamiento medioambiental se recogen en el Cuadro 5.3. Éstos representan la situación de referencia de nuestro estudio.

¹³⁶ Éste sufre importantes fluctuaciones en función de diferentes variables, como la localización geográfica (alto coste de transporte, productos de escaso valor añadido), tipo de clientes (volumen de ventas, forma de pago, duración de los contratos, etc.), etc.

Variables	Valor	Unidades
Capacidad de producción	1.200.000	tn de clínker
Producción		
◦ Clínker	781.610 (1)	tn
◦ Cemento	818.080	
Consumo de materia prima		
◦ Horno clínker	1.327.287,33	
◦ Molienda	187.426,95	tn
Consumo de combustibles (100% coque)	84.450,93	tn
Consumo de energía		GJ/tn clínker MWh/tn producto fabricado (2)
◦ Térmica	2,9854	
◦ Eléctrica	0,110	
Emisiones de CO ₂		
◦ Directas	671.664	tn
◦ Indirectas	35.350,7	
Otras emisiones		
◦ NO _x	1.664.773,764	
◦ SO ₂	4.736,431	Kg
◦ Partículas	45.943	
Emisiones autorizadas de CO ₂ (PK)		
PNA II (EUA)	1.000.000	tn
Otros mecanismos de flexibilidad (CER/ERU)	0	tn
Normativa ambiental aplicable		
◦ AAI		
◦ Protocolo de Kyoto		
◦ Ley 13/2010		
◦ Ley 6/2010		
◦ RD 367/2010		
◦		
Sistema de Gestión Medioambiental	ISO 14001/EMAS	

(1) 151.550 tn se venden directamente
(2) producción de cemento y clínker expedido

Cuadro 5.3. Datos de la actividad productiva de la planta analizada (2010)

Fuente: elaboración propia a partir de [OFICEMEN, 2011c], [Registro PRTR-España], Memoria y AAI de la empresa

Así pues, bajo las condiciones apuntadas anteriormente, para la obtención de una tonelada de producto con una proporción media de clínker de 0,8543 tn, el balance de masa¹³⁷ representado en la Figura 5.1 constituye el marco de referencia para analizar el

¹³⁷ Dependiendo del caso, para la producción de una tonelada de cemento típico se requiere aproximadamente 1,5 tn de materia prima, un consumo 3.300-4.300 MJ de energía térmica y 100-120 KWh de energía eléctrica, emitiendo a la atmósfera 0,9 tn de CO₂ [Nicolas y Jochen, 2008], [EIPPCB, 2010] y [Price et al., 2010].

efecto de las medidas contempladas por la compañía para reducir las emisiones de CO₂, lo que constituye el objetivo de nuestro estudio.

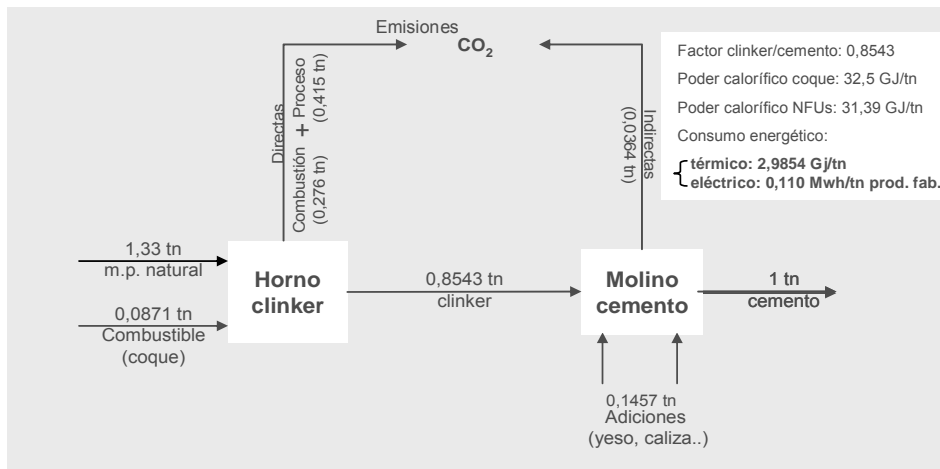


Figura 5.1. Balance de masa sin valorización de residuos
 Fuente: elaboración propia a partir de información sectorial

Partiendo de la situación anterior y teniendo en cuenta, de un lado, que el mayor porcentaje de las emisiones de CO₂ corresponde a las emisiones directas (de las cuales, un 30-40% procede de la combustión y un 60-70% de la descarbonatación en la fase de obtención del clínker) y de otro lado, las posibilidades y limitaciones de las medidas de ajuste analizadas en el Apartado 4.1.1 (entre otras, el reducido margen de reducción del consumo de energía eléctrica existente, responsable de un considerable porcentaje de las emisiones indirectas del proceso de producción), la valorización (energética y material) de residuos en la obtención del clínker se convierte en una de las principales medidas con mayor potencial de reducción de las emisiones de CO₂ del proceso de producción del cemento para el caso analizado, como en el resto del sector¹³⁸.

Por ello, a continuación presentamos la propuesta para reducirlas.

¹³⁸ Entre otros, [Bolwerk, 2012], [Conesa et al., 2011], [Rovira et al., 2011], [Beckers, 2010] y [Murray y Price, 2008].

5.2. PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO₂: VALORIZACIÓN DE RESIDUOS

Partiendo de la situación descrita en el apartado anterior, para el caso analizado contemplamos como medida principal para reducir las emisiones de CO₂, la reducción del consumo de combustibles tradicionales y materias primas naturales, fijando unos determinados porcentajes de sustitución de los mismos por combustibles y materias primas alternativas respectivamente, cuya viabilidad técnica, económica y medioambiental es previamente analizada.

En relación a **los combustibles**, se propone la sustitución parcial del único combustible utilizado, en el momento del estudio, por la planta de cemento (coque de petróleo) por los neumáticos fuera de uso (NFUs), combustible parcialmente biomasa¹³⁹, cuyo consumo ha ido incrementándose paulatinamente en los últimos años, tanto a nivel general de la industria como a nivel de cementeras (ver Gráfico 5.1). Su uso, no sólo permite reducir las emisiones de CO₂, aportando energía al proceso de producción, sino también aporta hierro a la composición del clínker. En este caso, además de la valorización energética, la materia prima contenida en el residuo se recicla en el clínker.

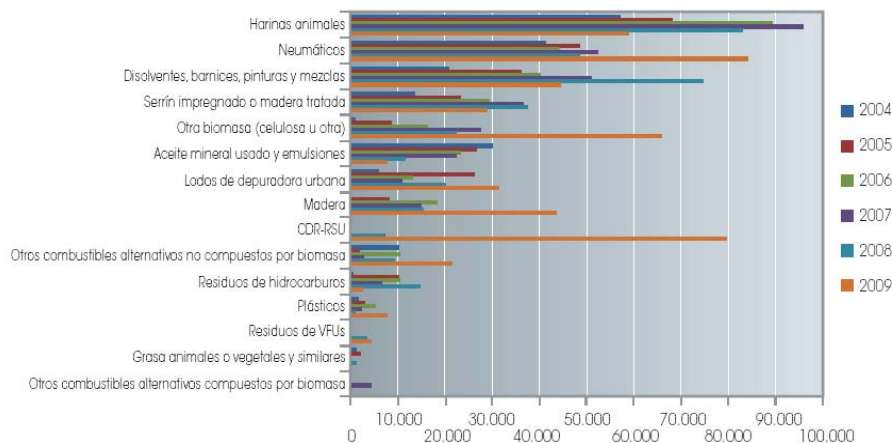


Gráfico 5.1. Evolución del consumo de combustibles alternativos en España (2004-2009)
Fuente: [CEMA, 2010b]

¹³⁹ La biomasa, por su abundancia, es considerada una de las fuentes renovables con mayor potencial de desarrollo. Además, la emisión de CO₂ derivada de su uso energético es contabilizada como nula, de acuerdo a la Directiva 2003/87/CE para comercio de derechos de emisión de GEI de la Comisión Europea [Gómez, 2007].

De esta manera, bajo la premisa de que no se altere significativamente las condiciones técnicas y económicas del proceso productivo, y suponiendo una tasa de sustitución del 10% del coque del petróleo por los NFUs, la cantidad a utilizar de los mismos dependerá del poder calorífico (PC) de ambos combustibles y del requerimiento de energía térmica del proceso de obtención del clínker de referencia (consumo actual de combustible).

Porcentajes superiores de sustitución pueden provocar desequilibrios en el balance térmico, y por lo tanto, en el proceso, que son insostenibles debido a variaciones en los caudales de aire de combustión que afectarían a otras salidas de calor [Gómez, 2007]. Además, el porcentaje propuesto coincide con la tasa de sustitución contemplada en los indicadores de la hoja de ruta de tecnología del cemento Cement Technology Roadmap, 2009 [WBCSD/IEA, 2009].

Así pues, manteniendo las mismas condiciones de producción (ver Figura 5.1), la relación coque/NFUs, vendrá dada por la siguiente expresión:

$PC \text{ coque}/PC \text{ NFUs}^{140} = 32,5/31,39 = 1,035$, de manera que para sustituir una tonelada de coque es necesario $1,035^{141}$ tn de NFUs.

Por tanto, para el consumo actual de energía térmica por unidad de producto fabricada ($2,9854 \text{ GJ/tn producto}^{142}$), que implica el consumo de $0,0871 \text{ tn coque/tn de producto}$, la sustitución parcial (10%) del uso del coque por los NFUs, implicaría un consumo de coque por tn de producto fabricado de $0,07839 \text{ tn}$ y de NFUs de $0,00901 \text{ tn}$.

A partir de los cálculos anteriores y en función de la proporción de clínker que incorpora los diferentes cementos fabricados por la planta, el consumo de cada tipo de combustible para cada uno de ellos varía, tal y como se recoge en la Tabla 5.1.

¹⁴⁰ [MMAMRM, 2011b].

¹⁴¹ Tasa equivalente de sustitución dentro del intervalo estimado para los NFUs para sustituir una tonelada de coque (0,9-1,1) [Elorrieta, 2011].

¹⁴² Se encuentra dentro del intervalo reconocido para las MTDs en condiciones óptimas de producción ($2,9-3,3 \text{ GJ/tn producto}$) [MMA, 2004].

Producto	% clínker	Combustibles	
		Coque	NFUs
Clínker	100	0,0917	0,0105
CEM I 42,5-52,5 R	95	0,0871	0,0100
CEM II/A	82-88 (85)	0,078	0,0089
CEM II/B	67	0,0614	0,00706

Tabla 5.1. Consumo de combustibles por tn de producto fabricado (tn)
Fuente: elaboración propia

En relación a la otra medida propuesta, **la valorización material de los residuos**, se propone como objetivo sustituir el 15% del consumo actual de materia prima natural por materia prima alternativa total o parcialmente descarbonatada, de manera que la calidad del producto fabricado no se vea alterada, teniendo en cuenta además la capacidad de la instalación para procesar estos materiales, así como otros factores, tales como el coste y disponibilidad de los mismos.

Así pues, considerando una tasa de equivalencia materia prima natural/alternativa de 1¹⁴³, según el balance de masa actual de la planta (ver Figura 5.1), para la obtención de un tonelada de clínker¹⁴⁴ será necesario consumir aproximadamente 1,36 tn de materia prima natural y 0,24 tn de materia prima alternativa, y para el resto de los productos fabricados dependerá de la proporción de clínker que incorpora cada uno de ellos (ver Tabla 5.2).

Producto	% clínker	Materias primas		
		Natural	Alternativa	Total
Clínker	100	1,36	0,24	1,6
CEM I 42,5 - 52,5 R	95	1,292	0,228	1,52
CEM II/A	82-88 (85)	1,156	0,204	1,36
CEM II/B	67	0,9112	0,1608	1,072

Tabla 5.2. Consumo de materias primas por tn de producto fabricado (tn)
Fuente: elaboración propia

¹⁴³ Valor que puede variar según el tipo de materia prima alternativa, en función de su composición y requerimientos técnicos de producción, entre otros factores.

¹⁴⁴ Para 1 tn de clínker se necesita 1,6 tn de materia prima, porque para 0,8543 tn de clínker se necesita 1,34 tn de materia prima (ver Figura 5.1).

La medida propuesta de disminución del consumo de coque y de materia prima natural en la obtención del clínker, además de racionalizar el consumo de recursos naturales, permite reducir, de manera directa o indirecta el impacto sobre el medio atmosférico¹⁴⁵.

Por el objetivo de nuestro estudio, nos centramos en la reducción de las emisiones directas de CO₂. Concretamente, para el caso analizado, las emisiones de CO₂ por combustión son las recogidas en la Tabla 5.3, cuyo cálculo se ha realizado a partir del poder calorífico y factor emisión¹⁴⁶ de los dos combustibles utilizados (coque y NFUs) en la producción, según fórmula y datos facilitados por el Grupo Técnico de Comercio de Emisiones de la Comisión de Coordinación de Políticas de Cambio Climático (CCPCC) en sus recomendaciones del 18 de febrero de 2011¹⁴⁷.

¹⁴⁵ Por ejemplo, emisiones evitadas en caso de haber destinado los residuos a otras finalidades, por el transporte desde los lugares lejanos de exportación de los combustibles fósiles, daño evitado en el medio ambiente por su almacenaje en lugares autorizados o no para ello, etc.

¹⁴⁶ Según el último inventario de GEI España (1990-2009) [MMAMRM, 2011b].

¹⁴⁷ En ausencia de ensayo normalizado para la determinación de la fracción de biomasa y de laboratorios acreditados para su realización (según Decisión 2007/589/CE), el Grupo Técnico de Comercio de Emisiones de la CCPCC elaboró unas recomendaciones relativas a la metodología del seguimiento de las emisiones correspondientes a la fracción de biomasa contenida en algunos combustibles parcialmente biomasa como los NFUs. Estas recomendaciones fueron refrendadas por la CCPCC en su reunión del día 13 de febrero de 2007.

Posteriormente, el 18 de febrero de 2011 el Grupo Técnico adoptó unas nuevas recomendaciones en las que se establecía la metodología aplicable para las emisiones procedentes de la quema de NFUs correspondientes al periodo 2010-2011. Aquellas establecían el uso de la metodología de seguimiento actualizada presentada por el IECA, conforme a los resultados del análisis de la fracción de biomasa de los NFUs de la campaña de muestreo y análisis realizado en 2010. Para las emisiones del año 2011 se utilizó el factor de emisión, valor calorífico neto y factor de oxidación del Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de España años 1990-2009 (Abril de 2011).

El problema para la aplicación de esta metodología ha surgido debido a que el factor de emisión para los neumáticos publicado en la tabla A8.4.- Sector: Cemento del Informe citado anteriormente está referido a la fracción fósil de carbono contenida en el combustible, es decir, ya descontando una fracción de biomasa neutra en emisiones de CO₂ que no coincide con el valor obtenido en la campaña de muestreo y análisis realizada por el IECA.

El equipo encargado de la elaboración del Inventario Nacional de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente informó de que la fracción fósil que empleó para determinar estos valores es del 69%, es decir, una fracción de biomasa del 31% que fue tomada de los informes de emisiones del año 2009 de algunas instalaciones cementeras.

Sin embargo, el factor de emisión para los neumáticos en su totalidad, sin tener en cuenta fracción de biomasa alguna contenida en el mismo, del Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de España años 1990-2009 es de 85 kg/Gj y proceden del World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) - Working Group Cement: "The Cement CO₂ Protocol: CO₂ Emissions Monitoring and Reporting Protocol from the European Emissions Reduction & Trading System". Guide to the Protocol. 22 de Mayo. 2003 [WBCSD, 2003]. De conformidad con la metodología establecida en las recomendaciones acordadas anteriormente, sería este factor de emisión referido al neumático total el que habría que aplicar en la determinación de las emisiones de los NFUs.

Emisiones de CO₂ Comb. Tradicionales (Kg CO₂)= consumo combustible (tn) x PCI (GJ/tn) x FE (KgCO₂/Gj_{PCI})					
Combustible	Consumo	PCI	FE (1)	Emisiones CO ₂	
Coque de petróleo	0,07839	32,5	98,3	250,43	
¹⁴⁸ Emisiones de CO₂ NFUs (Kg CO₂)= Neumáticos consumidos (tn) x (1-FB¹⁴⁹) x PCI (GJ/tn) x FE (KgCO₂/Gj_{PCI})					
Combustible	Consumo	FB	PCI	FE (1)	Emisiones CO ₂
NFUs	0,00901	0,2472	31,39	85	18,09
TOTAL EMISIONES CO₂ COMBUSTIÓN (Kg)					268,52

(1) factor de oxidación implícito

Tabla 5.3. Emisiones de CO₂ por combustión por tn de producto fabricado (para una proporción media clínker/cemento de 85,4)
Fuente: elaboración propia

Tras los cálculos realizados, la reducción de emisiones de CO₂ por combustión, después de incluir la sustitución parcial del coque por NFUs asciende a 10,14 Kg CO₂/tn clínker.

Por otra parte, el ahorro de emisiones de CO₂ por proceso debido al uso de materias primas alternativas, dependerá del recurso utilizado, cuya composición de óxido de calcio (CaO) y de óxido de magnesio (MgO), será determinante para obtener el factor de emisión del clínker, según la metodología básica propuesta en el Anexo VII de la Decisión 2007/589/CE de la Comisión, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo¹⁵⁰. Su valor vendrá dado por la siguiente fórmula:

¹⁴⁸ Fórmula y datos facilitados por el Grupo Técnico de Comercio de Emisiones de la CCPC en sus recomendaciones del 18 de febrero de 2011 [MMAMRM, 2011c].

¹⁴⁹ La fracción de biomasa viene dada por la cantidad de caucho natural presente en el neumático, que se determinará por termogravimetría a través de análisis realizados por laboratorios independientes de reconocido prestigio, no siendo exigible su acreditación. Se analizaran varias muestras compuestas por neumáticos de turismos y camiones a través de un determinado plan de trabajo que garantice la calidad de la medida, siendo también necesario determinar la proporción de neumáticos ligeros y pesados consumidos (estos últimos tienen un mayor contenido de caucho natural) [MMAMRM, 2011c].

¹⁵⁰ Otra alternativa para calcular el CO₂ emitido por proceso es, considerando solamente el contenido de óxido de calcio (CaO) por cada tonelada de clínker producido [Ammenberg et al., 2011]. En este caso el factor emisión a considerar, es el propuesto por [IPPC, 2000], 785 Kg CO₂ por cada tn de CaO que contenga el clínker.

$$\text{Emisión CO}_2 \text{ proceso (Kg CO}_2\text{/tn clínker)} = 785 * \% \text{CaO} + 1.092 * \% \text{MgO}$$

Considerando los principales residuos utilizados en la producción del clínker (escorias, cenizas, arenas, escombros, residuos de hormigón, etc.) y a partir de la fórmula anterior, según el estudio realizado por [Elorrieta, 2011], el valor medio del ahorro de emisiones de CO₂ por tn de materia prima alternativa consumida es de 0,0476 tn¹⁵¹, de manera que las nuevas emisiones de proceso serían las recogidas en la Tabla 5.4.

Productos	% clínker	Emisiones CO ₂
Clínker	100	0,474786
CEM I	95	0,450846
CEM II/A	85	0,4035
CEM II/B	67	0,314616

Tabla 5.4. Emisiones de CO₂ por procesos por tipo de producto fabricado (tn)

Fuente: elaboración propia

Basándonos en los cálculos anteriores, el ahorro de emisiones de CO₂ por proceso, tras las medidas de ajuste propuestas, sería de aproximadamente de 0,0114 tn de CO₂ por tn de clínker fabricada.

Aunque las medidas propuestas para reducir las emisiones directas de CO₂ pueden implicar el incremento del consumo de energía eléctrica¹⁵², como no se ha contemplado específicamente medidas destinadas a reducir el consumo energético, consideramos que las emisiones indirectas de CO₂ (básicamente las derivadas del consumo de energía eléctrica¹⁵³), se mantendrán exactamente igual a las condiciones previas a la valorización de los residuos, en tanto que el uso de residuos como recursos energéticos y materiales en el proceso de producción también pueden influir indirectamente sobre otras emisiones de CO₂, compensándose posiblemente unas con otras.

¹⁵¹ Para un consumo de 314.579 tn de materias primas alternativas en el clínker (lodos de papelera, escoria blanca, yeso residual y cascarilla de laminación, entre otras), el ahorro de emisiones de CO₂ es de, aproximadamente, 15.000 tn [Elorrieta, 2011].

¹⁵² Así, por ejemplo, la humedad del combustible es la variable fundamental que limita la introducción de biomasa en el proceso, puesto que los Kg de agua que hay que evaporar son superiores con la introducción de biomasa, lo cual requiere de un consumo de calor adicional para completar esta evaporación.

¹⁵³ El consumo de electricidad varía entre 90 y 130 KWh/tn cemento, dependiendo de los siguientes factores: la facilidad de molienda de los materiales (básicamente relacionado con su estructura mineralógica), la eficiencia energética de los equipos de molienda y la finura del material molido (especialmente en la producción de cementos de diferentes categorías resistentes) [MMA, 2004].

No obstante, cabe destacar, que para determinar las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía eléctrica bastaría con calcular el factor emisión de CO₂ atribuible al suministro eléctrico, también conocido como mix eléctrico. Éste representa las emisiones asociadas a la generación eléctrica conectada a la red nacional necesaria para cubrir el consumo¹⁵⁴.

Bajo las consideraciones anteriores, la Tabla 5.5 refleja las emisiones¹⁵⁵ de CO₂ por cada tipo de producto fabricado por la empresa, diferenciando las emisiones directas¹⁵⁶ (combustión y proceso) de las indirectas.

Tipos de productos	% clínker	Emisiones de CO ₂			
		Combustión	Proceso	Indirectas	Total
Clínker	100	0,314	0,474786	0,04265	0,831436
CEM I	95	0,298	0,450846	0,04055	0,789396
CEM II/A	85	0,2669	0,4035	0,0362	0,7066
CEM II/B	67	0,21	0,314616	0,0286	0,553216

Tabla 5.5. Emisiones de CO₂ por tipo de producto fabricado (con valorización) (tn CO₂/tn clínker)
Fuente: elaboración propia

De igual manera, el Gráfico 5.2 muestra la relación lineal entre el porcentaje de clínker que incorpora cada producto y las cantidades de CO₂ emitidas a la atmósfera por cada unidad de producto fabricado.

¹⁵⁴ En 2010 la instalación consumió 110 KWh/tn producto fabricado (producción de cemento más clínker vendido), provocando unas emisiones de CO₂ procedentes del consumo eléctrico de 19,91 Kg CO₂/KWh, resultado de multiplicar el consumo por el mix eléctrico (0,181 Kg CO₂/KWh).

¹⁵⁵ Por la complejidad del cálculo y la reducida repercusión, no consideramos otras emisiones procedentes de otras fuentes como el contenido de carbono orgánico en piedras calizas y pizarras, y las materias primas utilizadas para el lavado de gases residuales (contenidas en la Decisión 2007/589/CE).

¹⁵⁶ Son directamente proporcionales al consumo de combustibles y a la relación entre el contenido de carbono y el poder calorífico del combustible.

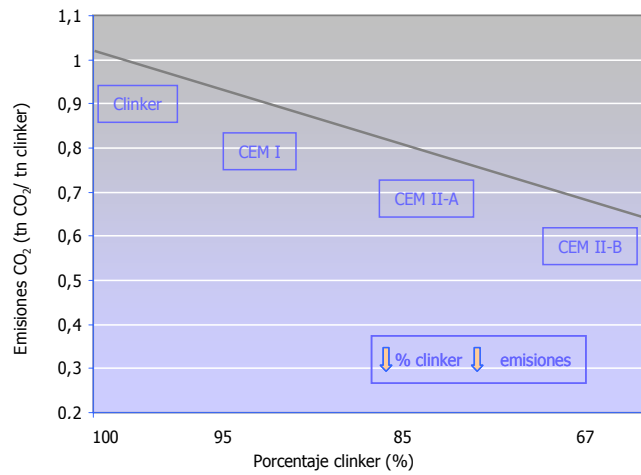


Gráfico 5.2. Relación entre el contenido de clínker de cada tipo de producto y las emisiones de CO₂
Fuente: elaboración propia

Los cálculos realizados confirman analíticamente el potencial de reducción de la medida propuesta para disminuir las emisiones de CO₂, propiciado un acercamiento a las emisiones directas de CO₂ por tn de clínker (788 Kg CO₂/tn clínker) al valor del benchmark de emisión de CO₂¹⁵⁷ (766 Kg CO₂/tn clínker) y liderando las reducción de emisiones de CO₂ en el sector a nivel nacional e internacional (ver Gráfico 5.3).

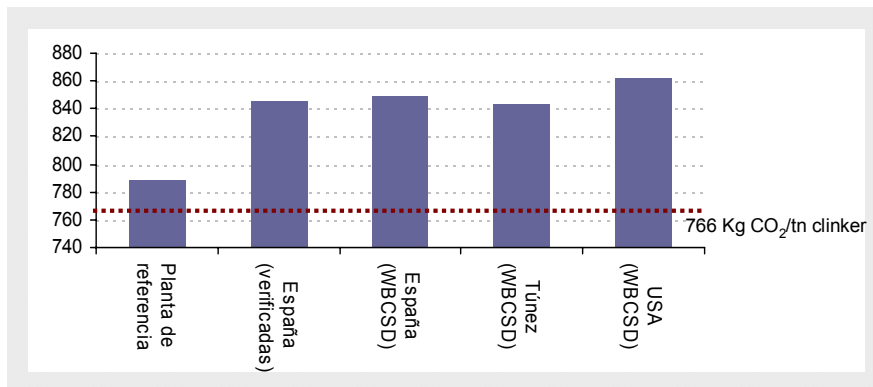


Gráfico 5.3. Emisiones directas de CO₂ de las fábricas de cemento (kg/tn clínker) (calculadas según la Iniciativa para la Sostenibilidad del cemento del WBCSD)
Fuente: información corporativa

¹⁵⁷ [EC, 2010].

Aunque el ahorro de emisiones de CO₂ por tn de producto fabricado, pueda parecer insignificante (entre 0,0187 y 0,02156 tn de CO₂) (Tabla 5.6), para un volumen de producción bajo las condiciones consideradas, la incorporación paulatina de la valorización de los residuos en la producción del cemento implicaría una disminución anual de las emisiones de CO₂ de aproximadamente 26.000 tn/año.

Productos	Sin valorización	Con valorización	Ahorro emisión
Clínker	0,853	0,831436	0,021564
CEM I	0,811	0,789396	0,021604
CEM II/A	0,725	0,7066	0,0184
CEM II/B	0,572	0,553216	0,018784

Tabla 5.6. Ahorro de emisiones de CO₂ por tipo de producto fabricado (tn CO₂/tn producto)

Fuente: elaboración propia

El análisis comparativo es también ilustrado en el Gráfico 5.4.

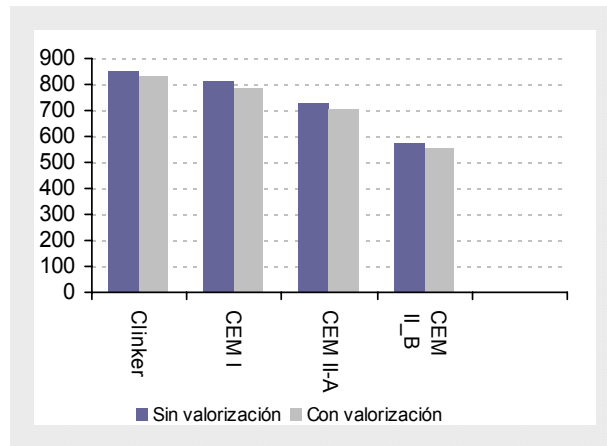


Gráfico 5.4. Emisiones de CO₂ por tn de producto fabricado sin-con valorización (Kg CO₂/tn producto)

Fuente: elaboración propia

La aplicación de la valorización de los residuos en la producción del cemento bajo los supuestos considerados, manteniendo la misma proporción de clínker (85,4) implicaría cambios en el balance de masas de la Figura 5.1, tal y como se aprecia en la Figura 5.2. El nuevo balance de masa se convierte en el escenario en el cual va a desarrollar la

empresa su actividad productiva, y por tanto va a ser considerado en el modelo propuesto en este trabajo, cuyo planteamiento y resultados pasamos a analizar en los sucesivos apartados.

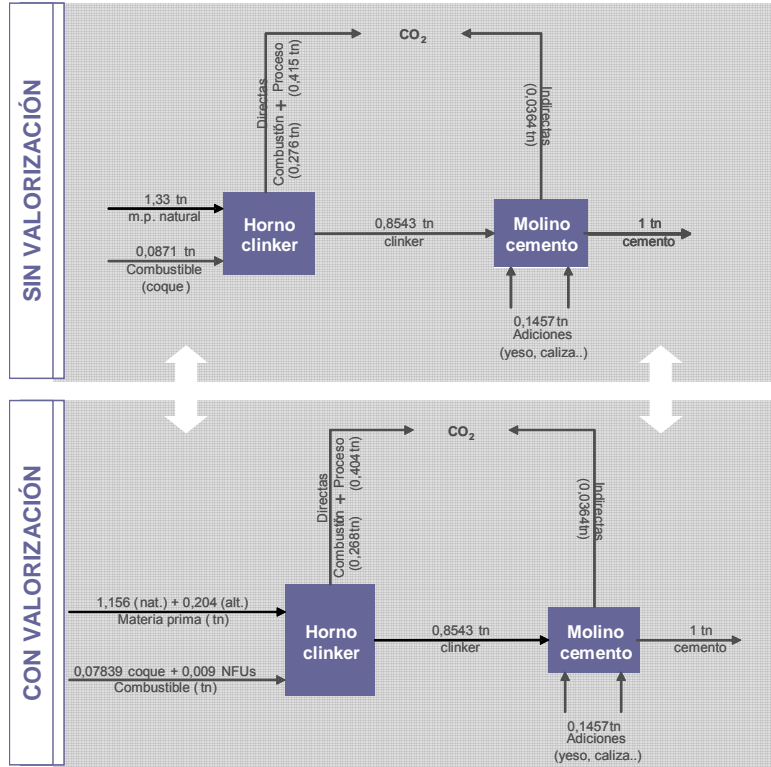


Figura 5.2. Balance de masa sin/con valorización de residuos
Fuente: elaboración propia

5.3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE PRODUCCIÓN

La aplicación del modelo propuesto en el Apartado 4.1.2.2 al caso de estudio, requiere la identificación de las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones para las condiciones de producción establecidas en el apartado anterior, incluyendo las medidas propuestas para reducir las emisiones de CO₂, así como las limitaciones para su puesta en marcha, tanto económicas, técnicas, legales y medioambientales.

Las cantidades a producir anualmente de los diferentes productos fabricados en la planta cementera (diferentes tipos de cemento y clínker) (tn de producto) constituyen las incógnitas del problema de programación lineal, identificadas por las siguientes variables de decisión:

X_1 : cantidad a fabricar de clínker para vender o transferir a otras instalaciones

X_2 : cantidad a fabricar del cemento I (95% de clínker)

X_3 : cantidad a fabricar del cemento II/A (85% de clínker)

X_4 : cantidad a fabricar del cemento II/B (67% de clínker)

El beneficio unitario¹⁵⁸ estimado para cada uno de los productos fabricados (diferentes tipos de cemento y clínker) constituye los rendimientos directos (C_j) de la función objetivo del modelo (Z), que representa el rendimiento asociado al programa de producción que maximiza el beneficio, recogido en la siguiente expresión:

$$Z (\text{máx}) = 1,5 X_1 + 4,28 X_2 + 2,2 X_3 + 7,73 X_4 \quad [5.1]$$

En dicha partida se considera el incremento del coste derivado del cumplimiento de la normativa medioambiental y, por tanto, de las estrategias de reducción de emisiones de CO_2 propuestas en este estudio, para así cumplir el compromiso de Kyoto. Se incluye, entre ellos, el coste operativo derivado del incremento del precio de los recursos energéticos; el coste de las mejoras introducidas (principalmente inversiones en tecnología); y otros costes derivados del compromiso medioambiental como asesoramiento, transmisión y control de información, gastos de formación de personal, etc. No se incluye el coste por la compra de derechos, al considerarse ésta, como veremos más adelante, como una alternativa más de las propuestas consideradas para cumplir el PK en el trabajo desarrollado.

Para completar el planteamiento del modelo lineal de producción propuesto para el caso sujeto de estudio, es preciso determinar las restricciones contempladas en el modelo teórico propuesto, teniendo en cuenta que el objetivo es obtener el mix óptimo de productos que maximice el beneficio de la empresa, minimizando a su vez el impacto

¹⁵⁸ Para reflejar la situación actual del sector, estimamos el beneficio de cada producto, de acuerdo con la información facilitada por el jefe de optimización de la planta, oscilando entre un 5 y 10%, dependiendo del tipo de producto fabricado.

medioambiental, en relación a las emisiones de CO₂, considerando la medida propuesta para reducirlas.

Por razones legales y medioambientales, es preciso incorporar al planteamiento del modelo de PL la restricción de las emisiones de CO₂, de manera que las cantidades emitidas en el proceso de producción de los diferentes productos a fabricar ($\sum a_{ij} \cdot X_j$) no superen las autorizadas en el correspondiente PNA (EA). De esta manera, a partir de los datos de la Tabla 5.5 y de las emisiones autorizadas¹⁵⁹ de CO₂ para el caso de estudio (1.000.000 tn de CO₂¹⁶⁰), la restricción relativa a las emisiones de CO₂, vendrá dada por la siguiente expresión para el caso planteado:

$$0,8314 X_1 + 0,7893 X_2 + 0,7066 X_3 + 0,553216 X_4 \leq 1.000.000 \text{ (tn CO}_2\text{)} \quad [5.2]$$

Para alcanzar los niveles de emisión de CO₂ representados en los coeficientes de la restricción anterior relativa a las emisiones de CO₂, la empresa incorpora la valorización (material y energética) de residuos en el proceso de producción en las líneas establecidas, cuyo consumo también está limitado por restricciones de carácter técnico, legal, económico¹⁶¹ y/o medioambiental¹⁶².

Así pues, suponiendo para el combustible alternativo propuesto (NFUs) un consumo limitado de 7.500 tn de NFUs/año¹⁶³, y para la materia prima alternativa una

¹⁵⁹ El promedio anual de emisiones autorizadas de las instalaciones de cemento para el periodo 2008-2012 es de 29,015 millones tn (Orden PRE/2827/2009, de 19 de octubre, por la que se modifican las cuantías de las asignaciones sectoriales establecidas en el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión de Gases de Efecto Invernadero, 2008-2012, aprobado por el Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre).

¹⁶⁰ No participa directa ni indirectamente en ningún proyecto de reducción de CO₂ (MDL y AC) de los contemplados en la Directiva 2003/87/CE, por lo que las EA provienen en su totalidad de las asignadas en el PNA correspondiente.

¹⁶¹ La valorización de combustibles requiere inversiones para adecuar las instalaciones de producción de clínker con controles de recepción estrictos, ello se traduce en un incremento del coste de producción [Urcelay, 2006].

¹⁶² Las autoridades ambientales competentes establecen en los permisos las limitaciones en cuanto a composición y cantidad de residuos, de forma que se garantice la compatibilidad ambiental de la actividad. También establecen los límites de emisión que debe respetar la instalación durante la combustión de los residuos, los cuales son normalmente más estrictos que los límites habituales, intentando que el ahorro de costes energéticos obtenido por el operador revierta de alguna forma en inversiones y mejoras ambientales añadidas ([Gómez, 2007] y [MMA, 2004]).

¹⁶³ Valor medio del límite máximo de consumo de NFUs como combustible alternativo en la producción de cemento en instalaciones de similares características (capacidad de producción, equipamiento, capacidad de gestión de residuos- recepción, almacenaje, tratamiento/preparación y control-, etc.) a la de nuestro caso de estudio (es el caso de la planta del grupo Valderrivas en Venta de Baños, Palencia) (Resolución de 4 de noviembre de 2011, de la Dirección General de Calidad y Sostenibilidad Ambiental, por la que se hace pública la Orden por la que se autoriza como modificación no sustancial el proyecto de utilización de escombros varios y balasto de vías férreas

disponibilidad de 300.000 tn/año¹⁶⁴, las restricciones relativas al consumo de residuos como alternativa para reducir las emisiones de CO₂, quedarían recogidas respectivamente en las siguientes expresiones, cuyos coeficientes tecnológicos son los obtenidos en las Tablas 5.1 y 5.2 para el combustible y la materia prima, respectivamente:

$$0,01055X_1+0,01002X_2+0,009X_3+0,00707X_4 \leq 7.500 \text{ (tn NFUs)} \quad [5.3]$$

$$0,24X_1+0,228X_2+0,204X_3+0,1608X_4 \leq 300.000 \text{ (tn materia prima alternativa)} \quad [5.4]$$

Asimismo, tal y como se recoge en el Apartado 4.1.2.2, para completar el planteamiento del problema, hay que incluir aquellos otros factores que de alguna manera condicionen la producción de la planta, suponiendo una limitación más para la factoría a considerar. Así pues, bajo el supuesto de determinados requerimientos, como la limitación de la demanda de determinados productos (concretamente el clínker, con el que la empresa tiene el compromiso de abastecer a otras instalaciones) y de la capacidad de producción de la planta cementera, incluimos al planteamiento del modelo las siguientes restricciones.

Para la capacidad de las instalaciones¹⁶⁵:

$$X_1+0,95 X_2+0,85 X_3+0,67 X_4 \leq 1.200.000 \text{ (tn de clínker)} \quad [5.5]$$

y para satisfacer la demanda del clínker para vender o transferir a otras instalaciones:

$$X_1 \geq 151.550 \text{ (tn de clínker)} \quad [5.6]$$

como materia prima en la fábrica de cemento y clínker ubicada en el término municipal de Venta de Baños, Palencia, de la empresa Cementos Pórtland Valderrivas S.A. y se modifica la Orden de 21 de septiembre de 2010, por la que se concede Autorización Ambiental a esa empresa).

¹⁶⁴ Valor medio de consumo máximo de materia prima alternativa, establecido en las diferentes AAI de instalaciones con similares características a la de nuestro estudio, como la del grupo Holcim en Gádor (Almería). Se establecen máximos de sustitución en el uso de materias primas alternativas con límites muy variables entre cada planta, desde 30.000 a 657.500 t/año, en función del tamaño de planta y tipo de residuo. Para los residuos o subproductos que tradicionalmente se han empleado como materia prima alternativa (cenizas volantes, escorias y otros materiales normalizados) no se considera necesario establecer limitaciones en su composición. Para otros residuos o subproductos, que por su procedencia puedan contener algún componente con potenciales efectos negativos sí se han establecido limitaciones en determinadas sustancias (halógenos, cloro, flúor, azufre, mercurio, cadmio, talio, etc.) [CEMA, 2010b].

¹⁶⁵ Según datos de Oficemen, para un total de 35 instalaciones, la capacidad total de clínker es de 34.247.000 tn y de cemento gris de 43.238.750 tn.

Así pues, para el escenario descrito, el modelo de PL que generaría la función objetivo y las restricciones definidas anteriormente quedaría recogido en el Cuadro 5.4.

$$Z \text{ (máx)} = 1,5 X_1 + 4,28 X_2 + 2,2 X_3 + 7,73 X_4$$

s.a.:

$$0,8314 X_1 + 0,7893 X_2 + 0,7066 X_3 + 0,553216 X_4 \leq 1.000.000 \text{ (tn CO}_2\text{)}$$

$$0,01055 X_1 + 0,01002 X_2 + 0,009 X_3 + 0,00707 X_4 \leq 7.500 \text{ (tn NFUs)}$$

$$0,24 X_1 + 0,228 X_2 + 0,204 X_3 + 0,1608 X_4 \leq 300.000 \text{ (tn materia prima alternativa)}$$

$$X_1 + 0,95 X_2 + 0,85 X_3 + 0,67 X_4 \leq 1.200.000 \text{ (tn de clínker)}$$

$$X_1 \geq 151.550 \text{ (tn de clínker)}$$

$$X_j \geq 0$$

Cuadro 5.4. Modelo de PL con valorización de residuos
Fuente: elaboración propia

Otra alternativa para reducir las emisiones de CO₂, compatible con la planteada anteriormente (valorización de residuos), es la fabricación de productos con menor proporción de clínker (cementos más adicionados o mezclados, reconocidos también como ecocementos o cementos ecológicos) (ver Apartado 3.4.) y, por tanto, menor impacto medioambiental. Ello implicaría la ampliación de la cartera de productos, incluyendo una variable más al planteamiento del modelo anterior, que representaría la cantidad a fabricar del nuevo cemento (X₅), cuya proporción de clínker consideramos que se reduciría al 34%¹⁶⁶ y cuyo volumen de producción estaría limitado por las exigencias actuales de mercado y/o de adaptación de las instalaciones (consideramos, aproximadamente, un 20% de la capacidad de producción). El beneficio estimado por unidad del nuevo cemento comercializada, según información sectorial, sería de 4 euros/tn.

Las consideraciones anteriores implicarían el replanteamiento del modelo de PL del Cuadro 5.4, incluyendo la variable que represente la cantidad a fabricar del nuevo cemento (X₅), tanto en la función objetivo como en las restricciones (de emisiones de

¹⁶⁶ Por ejemplo, el cemento CEM III B, uno de los cementos con menor proporción de clínker con mayor demanda [OFICEMEN, 2011b]. Su bajo porcentaje de clínker (34%), junto con los bajos contenidos en aluminatos y los altos contenidos de escoria de alto horno (62%), hacen que sean especialmente duraderos frente a ambientes químicamente agresivos y adecuados para ser usados incluso a alta temperatura ambiente [Holcim, 2011].

CO₂, consumo de combustibles y de materias primas alternativas), cuyos coeficientes se obtienen en función de la proporción del clínker que incorpora el nuevo producto (34%), a través de los cálculos realizados anteriormente para cada una de las restricciones afectadas. Asimismo, por las razones expuestas, se añadiría una nueva restricción de la producción del nuevo cemento, limitada por razones de mercado, técnica y/o económica¹⁶⁷.

La nueva situación descrita supone otro escenario alternativo al planteado en el Cuadro 5.4, cuya expresión analítica se recoge en el Cuadro 5.5.

$$Z \text{ (máx)} = 1,5 X_1 + 4,28 X_2 + 2,2 X_3 + 7,73 X_4 + 4 X_5$$

s.a.:

$$0,8314 X_1 + 0,7893 X_2 + 0,7066 X_3 + 0,553216 X_4 + 0,2807 X_5 \leq 1.000.000 \text{ (tn CO}_2\text{)}$$

$$0,01055 X_1 + 0,01002 X_2 + 0,009 X_3 + 0,00707 X_4 + 0,00359 X_5 \leq 7.500 \text{ (tn NFUs)}$$

$$0,24 X_1 + 0,228 X_2 + 0,204 X_3 + 0,1608 X_4 + 0,0816 X_5 \leq 300.000 \text{ (tn materia prima alternativa)}$$

$$X_1 + 0,95 X_2 + 0,85 X_3 + 0,67 X_4 + 0,34 X_5 \leq 1.200.000 \text{ (tn de clínker)}$$

$$X_1 \geq 151.550 \text{ (tn de clínker)}$$

$$X_5 \leq 240.000 \text{ (tn del nuevo cemento)}$$

$$X_j \geq 0$$

Cuadro 5.5. Modelo de PL con valorización de residuos y nuevo cemento

Fuente: elaboración propia

La resolución del modelo planteado (con o sin ecocemento) mediante la herramienta SOLVER de la hoja de cálculo Excel del paquete Office, nos permitirá obtener el mix óptimo de producto que maximice el beneficio, considerando las alternativas propuestas para reducir las emisiones de CO₂ (valorización de residuos, con o sin nuevo cemento).

Los resultados obtenidos son presentados y analizados en el siguiente apartado¹⁶⁸, contemplando diferentes escenarios para poder ejemplificar un mayor número de casos posibles en la toma de decisiones. Se trataría de diferenciar, en relación a las emisiones

¹⁶⁷ La penetración en el mercado de una tipología de cemento con menor proporción de clínker depende de la disponibilidad de las materias primas, las propiedades de aquella, el precio de los sustitutos del clínker, su uso y aplicación, las normas nacionales y la aceptación del mercado [Hoenig y Twigg, 2009].

¹⁶⁸ Para más detalle, el Anexo II recoge los resultados obtenidos directamente de la aplicación informática utilizada.

autorizadas de CO₂, la situación actual de la futura, considerando en este último caso un volumen de emisiones autorizadas inferior a la actual (concretamente el 50% de las emisiones autorizadas en el PNA II).

5.4. RESULTADOS. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Partiendo de la situación de referencia, para presentar los resultados y analizarlos, diferenciamos dos escenarios, en función de las emisiones autorizadas de CO₂. Un primer escenario (1) considerando las emisiones autorizadas en el último PNA (2008-2012) (PNA II) (1.000.000 tn) y otro segundo escenario (2), bajo el supuesto más restrictivo de emisiones de CO₂. Para este último caso se asume, una reducción del 50% de aquellas, que coincide precisamente con la propuesta de asignación individualizada de derechos de emisión para la instalación para el periodo post-Kyoto (2013-2020) [MAAMA, 2012b].

A su vez, diferenciamos dos casos, dependiendo de la aplicación conjunta o no de las alternativas de reducción de las emisiones de CO₂ propuestas anteriormente. Un primer Caso (A), sin incluir la producción de una nueva gama de cementos adicionados con menor proporción de clínker y otro segundo Caso (B), incluyéndola en la planificación de la producción del cemento, junto con la valorización (energética y material) de los residuos.

Asimismo, en todos los casos planteados contemplamos la posibilidad de que la instalación equipare o no la venta de los derechos de emisión a la producción de cementos, de manera que si aquella prima la fabricación de sus productos respecto al uso de los derechos como otra posible fuente de ingresos, asignamos a los derechos de emisión un rendimiento directo (C_d) de cero en la función objetivo del modelo¹⁶⁹. Por el contrario, cuando el objetivo principal de la instalación sea la maximización de beneficios, pudiendo optar la misma por utilizar sus derechos en la fabricación de sus productos o bien por venderlos en el mercado, el rendimiento directo de la variable representativa de los derechos de emisión tomará un valor igual al beneficio obtenido por la venta de los mismos. Éste será igual al precio de mercado en el momento de la

¹⁶⁹ En este supuesto, el excedente de derecho de emisiones de CO₂ tiene tratamiento de variable de holgura en la resolución del modelo de PL, mientras que en el caso contrario, los derechos de emisión constituyen una variable de decisión más del modelo.

venta, si han sido obtenidos de manera gratuita (como en el caso actual¹⁷⁰), o por la diferencia entre el precio de venta y el de adquisición del derecho, cuando la concesión de derechos deje de ser gratuita.

De esta manera, los diferentes casos a analizar son:

Caso 1A.1. Emisiones autorizadas PNA II, sin nuevo cemento y $Cd = 0$

Caso 1A.2. Emisiones autorizadas PNA II, sin nuevo cemento y $Cd = \text{beneficio}$

Caso 1B.1. Emisiones autorizadas PNA II, con nuevo cemento y $Cd = 0$

Caso 1B.2. Emisiones autorizadas PNA II, con nuevo cemento y $Cd = \text{beneficio}$

Caso 2A.1. Emisiones autorizadas reducidas, sin nuevo cemento y $Cd = 0$

Caso 2A.2. Emisiones autorizadas reducidas, sin nuevo cemento y $Cd = \text{beneficio}$

Caso 2B.1. Emisiones autorizadas reducidas, con nuevo cemento y $Cd = 0$

Caso 2B.2. Emisiones autorizadas reducidas, con nuevo cemento y $Cd = \text{beneficio}$

Tras aplicar la herramienta informática, el plan óptimo de producción, para cada uno de los casos identificados se recoge en el siguiente apartado.

5.4.1. Plan óptimo de producción

La solución óptima del modelo de PL planteado en los términos expuestos en el Cuadro 5.5, para cada uno de los casos identificados en el apartado anterior, se recoge en la Tabla 5.7.

¹⁷⁰ El valor medio del precio del derecho de emisión en el primer semestre de 2012 fue de 7,24 euros [SENDECO2].

		Escenario 1: Emisiones autorizadas PNA II 1.000.000 tn CO ₂				Escenario 2: Emisiones autorizadas reducidas 500.000 tn CO ₂			
		Caso 1A. Sin nuevo cemento		Caso 1B. Con nuevo cemento		Caso 2A. Sin nuevo cemento		Caso 2B. Con nuevo cemento	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
2	Rendimiento directo del derecho de emisión (C _d)	0	7,24	0	7,24	0	7,24	0	7,24
3	Z(max)	6.679.357,56	9.662.792,04	6.697.325,31	9.681.334,04	5.451.336,98	5.451.336,98	5.470.412,23	5.470.412,23
4	Producción	986.224,328	986.224,328	1.104.357,2	1.104.357,2	827.360,08	827.360,08	945.636,35	945.636,35
5	X ₁	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550
6	X ₂	0	0	0	0	0	0	0	0
7	X ₃	0	0	0	0	0	0	0	0
8	X ₄	834.674,328	834.674,328	712.807,284	712.807,284	675.810,089	675.810,089	554.086,356	554.086,356
9	X ₅ (nuevo)	-	0	240.000	240.000	-	0	240.000	240.000
10	X _d (dchos)	-	412.076,587	-	412.155,902	-	0	-	0
11	Sobrante derechos (tn)	412.076,587	0	412.155,902	0	0	0	0	0
12	Sobrante combustible (tn)	0	0	0	0	1.123,17017	1.123,17017	1.122,15697	1.122,15697
13	Sobrante materia prima (tn)	129.412,368	129.412,368	129.424,589	129.424,5887	154.957,738	154.957,738	154.946,914	154.946,914
14	Sobrante capacidad tn	489.218,2	489.218,2	489.269,12	489.269,1195	595.657,241	595.657,241	595.612,142	595.612,142

Tabla 5.7. Solución óptima del modelo de PL (escenarios 1 y 2)
Fuente: elaboración propia

Tal y como se recoge en la Tabla 5.7, el plan de producción que maximiza el beneficio, independientemente del caso, prima la producción de los cementos con menor proporción de clínker. En el caso de incluir el nuevo cemento propuesto con menor proporción de clínker (34%), el plan óptimo de producción implicaría la producción del 100% de la cuota establecida (240.000 tn) (fila 9) para ese tipo de cemento. En este caso, en el primer escenario, la ejecución del plan de producción supondría el 21,7% del total de la producción y en el segundo escenario, el 25,4% de la misma (ver Tabla 5.8).

Casos	Clínker (100) (1)	CEM I (95)	CEM II/A (85)	CEM II/B (67)	CEM III/B (34)
1A.1	15,4	-	-	84,6	
1A.2	15,4	-	-	84,6	
1B.1	13,8	-	-	64,5	21,7
1B.2	13,8	-	-	64,5	21,7
2A.1	18,3	-	-	81,7	
2A.2	18,3	-	-	81,7	
2B.1	16	-	-	58,6	25,4
2B.2	16	-	-	58,6	25,4

(1) (% clínker)

Tabla 5.8. Mix óptimo de producción (% sobre el total de producción)

Fuente: elaboración propia

Asimismo, en cuanto a la producción del clínker destinada a la venta o transferencia a otras instalaciones, en todas las alternativas posibles consideradas el volumen de la misma no supera el límite fijado para dicha variable (151.550 tn) (fila 5). En principio, una producción superior del clínker, bajo las hipótesis de partida, no resultaría rentable, en tanto que es el producto que emite más CO₂ a la atmósfera en su proceso de producción y menos beneficio, en términos unitarios, aporta a la cuenta de resultados de la empresa.

Por otro lado, es indiscutible el papel que juega el montante de emisiones de CO₂ autorizadas, diferenciándose claramente dos escenarios, en el que el factor productivo que limita la producción es diferente. Para el caso de que las emisiones consideradas sean las autorizadas en el PNA II (1.000.000 tn CO₂), y suponiendo que las condiciones de producción sean las mismas, dicha producción estaría limitada por la disponibilidad de combustible alternativo. Y para unas emisiones reducidas (50%), la limitación viene

impuesta por las propias emisiones de CO₂, poniéndose de manifiesto la insuficiencia de la asignación de emisiones en este caso para las condiciones de producción de la planta cementera.

Por otro lado, en ninguno de los casos propuestos, bajo las condiciones establecidas de sustitución parcial de la materia prima natural por recursos alternativos, aquella restringe la producción de la planta. El porcentaje de consumo de materia prima alternativa respecto a la permitida, oscila entre el 43 y 52%, dependiendo de las asignaciones de emisiones de CO₂, correspondiendo el menor porcentaje para el supuesto de una asignación mayor de emisiones de CO₂.

Asimismo, en relación a otra de las restricciones impuestas en la producción, la capacidad de las instalaciones, el plan óptimo de producción obtenido para todos los casos implica una infrautilización de la capacidad de la planta. Para unas emisiones autorizadas de 1.000.000 tn de CO₂, el nivel de utilización es del 60% de la capacidad instalada, y para unas emisiones reducidas, es del 50% aproximadamente.

Por último, en relación al beneficio asociado al programa óptimo de producción (fila 3), para todos los casos del escenario 2 (emisiones de CO₂ reducidas), aquel procede sólo de la producción y venta de los diferentes productos (con o sin nueva gama de producto), al no existir excedente de derechos de CO₂ para su posible venta en ninguno de los supuestos. El margen de beneficio varía, según el escenario, dependiendo de la inclusión o no en la cartera de productos del nuevo cemento adicionado, incrementándose para los casos donde se incluye (Casos 2B.1 y 2B.2) (ver Tabla 5.9).

Casos	Mix producción	Venta producción	Venta derechos	Beneficio Total
1A.1	Clínker	6.679.357,56	0	6.679.357,56
1A.2	CEM II/B	6.679.357,56	2.983.434,49	9.662.792,04
1B.1	Clínker	6.697.325,31	0	6.697.325,31
1B.2	CEM II/B CEM III/B	6.697.325,31	2.984.008,73	9.681.334,04
2A.1	Clínker	5.451.336,98	0	5.451.336,98
2A.2	CEM II/B	5.451.336,98	0	5.451.336,98
2B.1	Clínker	5.470.412,23	0	5.470.412,23
2B.2	CEM II/B CEM III/B	5.470.412,23	0	5.470.412,23

Tabla 5.9. Beneficio del programa óptimo de producción (€)
Fuente: elaboración propia

Por el contrario, en los casos del escenario 1 (emisiones de CO₂ del PNA II), al existir excedente de derechos de CO₂, el beneficio está condicionado, no sólo por la inclusión o no del nuevo cemento con menor proporción de clínker (CEM III/B) como en el escenario 2, sino por la posibilidad de vender o no los mismos, equiparando o no su venta a la fabricación de los diferentes productos respectivamente. El máximo beneficio corresponde al Caso 1B.2, que incluye el nuevo cemento y obtiene por la venta de los derechos no utilizados en la producción un beneficio de 2.984.009 euros (412.156 derechos x 7,24 euros), que sumado al obtenido por la producción y venta del mix óptimo de producción, proporciona un resultado de 9.681.334,04 euros, el máximo beneficio posible a obtener en el escenario primero descrito.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la relevancia que las limitaciones de las emisiones de CO₂ tienen para la producción de cemento, tanto de manera directa como de forma indirecta, a través de las medidas de ajuste implantadas (valorización de residuos y producción de cementos con menor proporción de clínker), algunas de las cuales también limitan la producción del cemento por razones de carácter técnico, económico, comercial y/o legal.

Concluimos, por tanto, del análisis realizado, destacando la conveniencia de incluir el nuevo tipo de cemento con menor proporción de clínker, independientemente del montante de las emisiones autorizadas de CO₂ (igual o inferior a las autorizadas en el PNA II), tras verificarse el impacto positivo que tiene sobre el beneficio total del plan óptimo de producción de cada caso. Asimismo, en los casos que contemplan la venta de los derechos sobrantes, se incrementa el beneficio respecto a los casos en los que no se contempla su posible venta, en los que se prima la producción frente a otra posible fuente de ingreso. Ello puede incentivar el desarrollo de inversiones que minimicen el impacto medioambiental, en la medida que el beneficio que se obtenga de la venta del excedente de derechos permita cubrir el coste de aquellas.

Así pues, teniendo en cuenta la reconversión tecnológica que el sector en general ha experimentado en los últimos años y la fase en la que se encuentran las investigaciones encaminadas a ahorrar CO₂, con tecnologías como la CAC, según el análisis realizado, las estrategias para reducir el impacto medioambiental mediante la reducción de las emisiones de CO₂ deben encaminarse a modificar la cartera de productos, incorporando productos cuya fabricación tengan un menor impacto, bien sea a través de nuevos productos o de los productos actuales fabricados con modificaciones sustanciales en su

composición (más proporción de materias primas alternativas). Igualmente, el ahorro de emisiones de CO₂ por la utilización de residuos como combustibles alternativos en la producción del cemento, también justifica la necesidad de incorporar nuevos planteamientos en la producción industrial, tanto a nivel de planta, como a nivel general, requiriéndose la colaboración de los diferentes agentes implicados (empresas, administraciones, sociedad, etc.). Ello permitiría que, poco a poco, vaya desapareciendo la situación de desventaja de las instalaciones ubicadas en nuestro país, respecto a las de otros países europeos más avanzados en esta línea, como es el caso de Holanda¹⁷¹, Suecia, Austria, etc., cuyos procesos de producción confirman la rentabilización del consumo de residuos como combustibles.

En cambio, teniendo en cuenta las limitaciones de uso de materia prima alternativa para la obtención del clínker (principalmente por requerimientos de composición química y de disponibilidad), y el escaso margen que representa respecto a la otra alternativa planteada (valorización energética de residuos), el excedente de materia prima que se obtiene en todos los casos nos confirma de nuevo, la dirección que debe tomar las estrategias de reducción de emisiones de CO₂.

Aunque en todos los casos analizados, el planteamiento de la planificación de la producción del cemento se ha hecho bajo el escenario de producción continua, considerando, además de las restricciones derivadas de la limitación de emisiones de CO₂, las de capacidad y de demanda (en situación normal), no podemos obviar, y por tanto considerar, en un contexto general de crisis como el actual, la situación por la que atraviesa el sector cementero en la actualidad, con una reducción de manera significativa de la producción.

En este último caso, la reducción que ha experimentado la demanda de los productos cementeros en los últimos años condiciona la planificación de la producción del sector, que tal y como nos apuntó el jefe de optimización de la planta cementera, se refleja en el flujo de producción, alternándose periodos de paradas con periodos de producción, durante los cuales la empresa trabaja aproximadamente al 90% de su capacidad. Así pues, en este escenario de producción discontinua, la limitación de la capacidad de producción, vendrá marcada, tal como nos apuntaron desde el sector, por la capacidad

¹⁷¹ La producción se concentra en una sola planta de producción con un nivel de consumo de residuos como combustibles del 90% aproximadamente.

de almacenaje¹⁷² de las instalaciones (CA) y el periodo de reposición¹⁷³ (Pr), de manera que:

$$\text{Volumen de producción} = \text{Pr} \times \text{CA}$$

Así pues, para representar el citado escenario de producción discontinua, a continuación presentamos en la Tabla 5.10 los resultados para el escenario 2¹⁷⁴, considerando un Pr=2 y una capacidad de almacenaje de 200.000 tn. Dichos resultados representarían un tercer escenario (emisiones reducidas de CO₂ y limitación de demanda), que al igual que los escenarios 1 y 2, agruparían los cuatro posibles casos, esto es:

Caso 3A.1. Emisiones autorizadas reducidas, sin nuevo cemento y Cd = 0

Caso 3A.2. Emisiones autorizadas reducidas, sin nuevo cemento y Cd = beneficio

Caso 3B.1. Emisiones autorizadas reducidas, con nuevo cemento y Cd = 0

Caso 3B.2. Emisiones autorizadas reducidas, con nuevo cemento y Cd = beneficio

		Escenario 3: Emisiones autorizadas reducidas 500.000 tn CO ₂			
		Caso 3A. Sin nuevo cemento		Caso 3B. Con nuevo cemento	
		(1)	(2)	(1)	(2)
2	Rendimiento directo del derecho de emisión	0	7,24	0	7,24
3	Z(max)	3.093.770,52	4.315.855,51	3.112.325,75	4.334.680,45
4	Producción	522.370,896	522.370,896	640.579,851	640.579,851
5	X ₁	151.550	151.550	151.550	151.550
6	X ₂	0	0	0	0
7	X ₃	0	0	0	0
8	X ₄	370.820,896	370.820,896	249.029,851	249.029,851
9	X ₅ (nuevo)	-	-	240.000	240.000
10	X _d (dchos)	-	168.796,269	-	168.833,523
11	Sobrante derechos (tn)	168.796,269	0	168.833,523	0
12	Sobrante combustible(tn)	3.279,444	3.279,444	3.278,906	3.278,906
13	Sobrante materia prima (tn)	204.000	204.000	204.000	204.000
14	Sobrante capacidad almacenaje (tn)	0	0	0	0

Tabla 5.10. Solución óptima del modelo de PL (escenario 3)

Fuente: elaboración propia

¹⁷² n° de silos x capacidad de cada silo.

¹⁷³ Número de veces que se vacían los silos donde se almacenan los productos fabricados.

¹⁷⁴ Sólo el escenario 2, porque las emisiones autorizadas de CO₂ son las previstas para el periodo post-Kyoto.

Aunque los resultados obtenidos reflejan una reducción del beneficio respecto a los otros dos escenarios anteriores, debido a la caída de la demanda, sigue primando la producción de los productos con menor proporción de clínker, representando el cemento adicionado en el Caso 3.B el 37,4% del total de los productos fabricados, proporción más elevada que en los otros escenarios (21,7 y 25,4% del total de la producción en los Casos 1.B y 2.B, respectivamente) (ver Tabla 5.11).

Casos	Clínker	CEM I	CEM II/A	CEM II/B	CEM III/B
% clínker	100	95	85	67	34
3A.1	29	-	-	71	-
3A.2	29	-	-	71	-
3B.1	23,65	-	-	38,95	37,4
3B.2	23,65	-	-	38,95	37,4
2A.1	18,3	-	-	81,7	
2A.2	18,3	-	-	81,7	
2B.1	16	-	-	58,6	25,4
2B.2	16	-	-	58,6	25,4

Tabla 5.11. Mix óptimo de producción (% sobre el total de producción)
Fuente: elaboración propia

Respecto a los resultados obtenidos para el escenario 2, la disminución es de aproximadamente un 43% en los casos que no se contemplan la venta de los derechos sobrantes y aproximadamente un 20% en los casos que se considera como una fuente más de ingreso para la empresa (Casos 3A.2 y 3B.2).

En este escenario (3), el excedente de combustibles y materias primas alternativos representa aproximadamente el 44 y 68% de las cantidades disponibles de los mismos, respectivamente.

Los resultados presentados hasta aquí, reflejan el plan óptimo de producción para cada uno de los escenarios planteados. Su análisis nos ha permitido, bajo un enfoque estático, identificar para cada caso cuál/es son los factores productivos limitadores de la producción y el beneficio que supondría la ejecución del plan óptimo de producción para cada uno de los casos estudiados, bajo las condiciones de producción expuestas.

Las variaciones que dichos resultados pueden experimentar tras introducir cambios en los parámetros y variables considerados en el modelo propuesto, se presentan en el apartado siguiente, mediante el desarrollo del análisis de sensibilidad correspondiente.

5.4.2. Análisis de sensibilidad de los resultados

Como en cualquier modelo de PL, los resultados obtenidos en el apartado anterior son sensibles a cambios en las variables y parámetros considerados en el modelo propuesto de planificación de la producción. Para analizar el impacto que sobre la solución óptima tienen esos posibles cambios, realizamos el análisis de sensibilidad¹⁷⁵ utilizando la herramienta SOLVER, cuyos resultados recogemos de manera agregada en la Tabla 5.12 y de manera detallada en el Anexo II que presentamos al final del trabajo. Para ello, en primer lugar, consideramos los dos escenarios propuestos (1 y 2), teniendo en cuenta que en cada uno de ellos el factor que limita la producción es diferente. En el escenario 1, es la disponibilidad de combustibles alternativos y en el escenario 2, la disponibilidad de derechos de CO₂.

¹⁷⁵ Ver, entre otros, [Mateo y Lahoz, 2009], [Domínguez-Machuca et al., 1995b] y [Castillo et al., 2002].

		Escenario 1: Emisiones autorizadas reales 1.000.000 tn CO ₂				Escenario 2: Emisiones autorizadas reducidas 500.000 tn CO ₂			
		Caso 1A. Sin nuevo cemento		Caso 1B. Con nuevo cemento		Caso 2A. Sin nuevo cemento		Caso 2B. Con nuevo cemento	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
2	Rendimiento directo del derecho de emisión	0	7,24	0	7,24	0	7,24	0	7,24
	Z(max)	6.679.357,56	9.662.792,04	6.697.325,31	9.681.334,04	5.451.336,98	5.451.336,98	5.470.412,23	5.470.412,23
3	Producción	986224,328	986224,328	1.104.357,2	1.104.357,2	827.360,08	827.360,08	945.636,35	945.636,35
4	X ₁	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550
5	X ₂	0	0	0	0	0	0	0	0
6	X ₃	0	0	0	0	0	0	0	0
7	X ₄	834.674,328	834.674,328	712.807,284	712.807,284	675.810,089	675.810,089	554.086,356	554.086,356
8	X ₅ (nuevo)	-	0	240.000	240.000	-	0	240.000	240.000
9	X _d (dchos)	-	412.076,587	-	412.155,902	-	0	-	0
10	Sobrante derechos (tn)	412.076,587	0	412.155,902	0	0	0	0	0
11	Sobrante combustible (tn)	0	0	0	0	1.123,17017	1.123,17017	1.122,15697	1.122,15697
12	Sobrante materia prima (tn)	129.412,368	129.412,368	129.424,589	129.424,5887	154.957,738	154.957,738	154.946,914	154.946,914
13	Sobrante capacidad (tn)	489.218,2	489.218,2	489.269,12	489.269,1195	595.657,241	595.657,241	595.612,142	595.612,142
14	Aumento máx. recurso restrictivo	Combustible (tn)				Derechos de emisión (n°)			
15	Precio sombra derechos	5.162,34	5.162,34	5.162,88	5.162,88	87.923,41	87.923,41	87.844,098	87.844,098
16	Precio sombra combustible	0	7,24	0	7,24	13,96	13,96	13,96	13,96
17	Var. B° unit x ₂	1.093,35	526,59	1.093,35	526,59	0	0	0	0
18	Var. B° unit x ₃	6,675	6,712	6,675	6,712	6,747	6,747	6,747	6,747
19	Var. B° unit x ₄	7,640	7,643	7,640	7,643	7,647	7,647	7,647	7,647
20	Var. B° unit x ₅	-4,71	-3,72	-4,71	-3,72	-4,73	-3,723	-4,73	-3,723
21	Var. B° unit x _d : dcho	-	-	-0,07	-0,08	-	-	-0,08	-0,08
22	PM derecho para no fabricar	0	0	0	0	0	6,727	0	6,727
23			13,96		13,96		13,96		13,96

Tabla 5.12. Resultados del análisis de sensibilidad (escenarios 1 y 2)
Fuente: elaboración propia

a) Escenario 1: Emisiones autorizadas PNA II

Como vimos con anterioridad, bajo este escenario, la producción se encuentra limitada por la disponibilidad de los combustibles alternativos y no por las emisiones de CO₂ (excedente del 41,27% de las autorizadas).

Según el análisis de sensibilidad realizado, para incrementar la producción de cemento (con o sin nuevo cemento), la cantidad máxima dispuesta a pagar por una tonelada adicional de NFUs es de 526,59 ó 1.093,35 euros (fila 17), según sea el rendimiento directo (C_d) igual a 7,24 ó 0 euros, respectivamente. En cualquiera de los casos planteados, el límite máximo asciende a 5.162 toneladas, cantidad a partir de la cual ya no sería conveniente, en tanto en cuanto la producción se encuentra limitada por otro(s) factor(es) productivo(s), como las emisiones de CO₂ o la capacidad de las instalaciones.

En cuanto a los derechos asignados y no utilizados, cuando no se incorporan al modelo de producción como variable de decisión (Casos 1A.1 y 1B.1), la instalación se puede plantear reservarlos para utilizarlos en posteriores periodos o bien venderlos en el mercado. En este caso se considerarán otras cuestiones, tales como la posible tendencia creciente del precio del derecho en el mercado o la utilización del excedente para incrementos de producción en periodos futuros.

Por otro lado, cuando la empresa contemple entre sus estrategias la venta de derechos, es decir, cuando el rendimiento directo de los derechos asignados es mayor que 0 (Casos 1A.2 y 1B.2), la instalación vende todos los permisos de emisión no utilizados, obteniendo una ganancia¹⁷⁶ de 9.681.334,04 ó 9.662.792,04 euros, según incorpore o no la producción del cemento de menor proporción de clínker, respectivamente. En este caso, según los resultados obtenidos, la cantidad máxima que la empresa estaría dispuesta a pagar por un derecho equivalente a una tn de CO₂ adicional no sobrepasa el valor medio del precio del derecho en el primer semestre de 2012 (7,24 euros) (fila 16), que corresponde a la cotización media anual más baja del periodo 2008-2012 (ver Gráfico 5.5).

¹⁷⁶ Incluye la producción y venta del mix óptimo de productos.

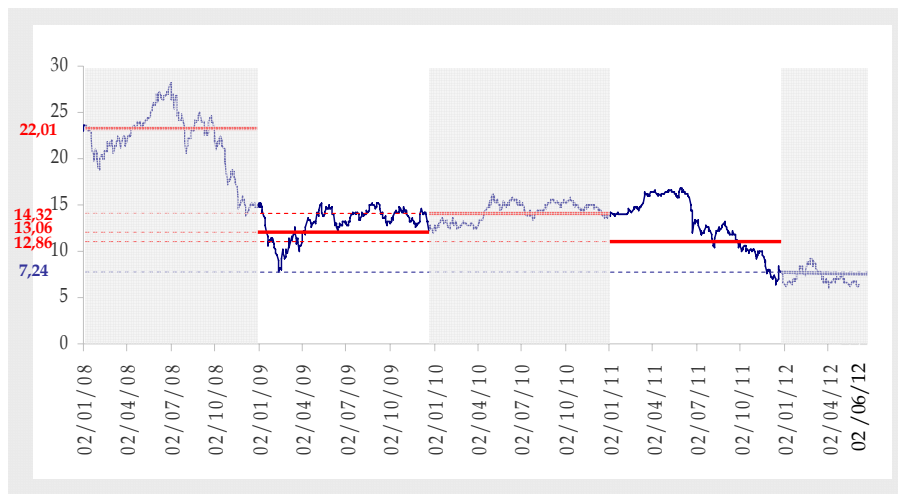


Gráfico 5.5. Cotización del derecho de emisión (2008-2012)
Fuente: elaboración propia a partir de [SENDECO2]

Asimismo, a través del análisis de sensibilidad, podemos valorar bajo qué condiciones le interesa a la instalación fabricar cada tipo de producto (ver Figura 5.3). Así pues, si nos fijamos en la Tabla 5.12 (filas 18 y 19), observamos que sería conveniente producir los cementos tipo I (X_2) y tipo II/A (X_3), y por tanto formar parte del programa óptimo de producción, siempre y cuando sus beneficios unitarios se incrementarán en 6,712 y 7,643 euros (Casos 1A.2 y 2A.2, respectivamente), considerando la venta de los permisos sobrantes; ó 6,675 y 7,640 euros si no se venden esos derechos (Casos 1A.1 y 1B.1, respectivamente).

Igualmente, si nos fijamos en las filas 20 y 21 de la Tabla 5.12, comprobamos que si los beneficios unitarios de estos productos se mantienen, pero se reducen el del cemento tipo II/B (X_4) en 3,72 ó 4,71 euros, según considere o no la venta de derechos, respectivamente, y en su caso, el del cemento nuevo (X_5) en 0,08 ó 0,07 euros, según se incluya o no los derechos de emisión en la función objetivo, respectivamente, dejará de interesar fabricar estos últimos.

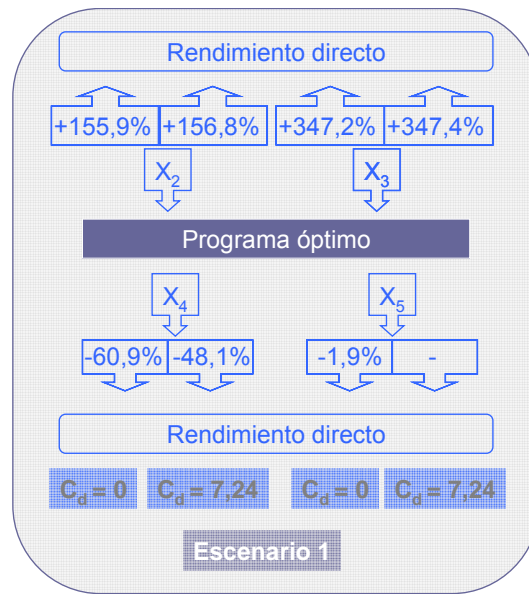


Figura 5.3. Sensibilidad de los resultados a variaciones de los rendimientos directos (escenario 1)
Fuente: elaboración propia

Por todo lo expuesto, y según los resultados, el tipo de cemento que su comercialización aporta más beneficio es siempre el de menor proporción de clínker¹⁷⁷. Es el más aconsejable, aún cuando el rendimiento directo es un 51,7% menor que el del cemento con menor proporción de clínker de los fabricados actualmente por la planta cementera (tipo II B).

Por otro lado, como ya vimos, además de sobrar derechos de emisión, hemos comprobado que la capacidad de la empresa está infrautilizada¹⁷⁸, con un excedente aproximado del 50%, siendo pues necesario que la instalación se plantee el análisis de la viabilidad de estrategias encaminadas a aprovechar el excedente de capacidad instalada, tales como procesos de simbiosis industrial, que permitan aprovechar sinergias entre

¹⁷⁷ Pero hemos establecido un máximo de producción debido a que es un producto nuevo para la instalación y la demanda de este tipo de cementos es inferior al resto de los tipos de cementos.

¹⁷⁸ En nuestro modelo y en este escenario, la producción está limitada por la disponibilidad de combustibles alternativos. Pero en la situación real, la disminución de la demanda de las distintas tipologías de cemento debido a la coyuntura económica, representa la principal limitación de la producción de cualquier instalación cementera, siendo necesaria la adopción de diversas estrategias tendientes a la optimización de los recursos de las mismas.

instalaciones de la misma o diferente empresa para aprovechar sus recursos. Otra alternativa posible es la exportación del excedente de producción, cuya viabilidad está limitada por las características propias de la actividad industrial y el contexto económico actual.

Igualmente, el modelo presenta un excedente de materias primas alternativas, por lo que esta situación no presenta una limitación, puesto que la instalación dispone de una cantidad muy superior a la que necesita con la producción limitada por el combustible alternativo disponible. No obstante, si se aumentase la proporción de sustitución de estas materias primas o si se pudiera disponer de más combustibles alternativos que logrará aumentar la producción, entonces sí que habría que considerarla como otra importante limitación.

Por tanto, bajo el escenario descrito de las emisiones autorizadas en el PNA II, son los combustibles alternativos los que limitan la producción, resaltando pues la importancia de su disponibilidad bajo el enfoque de una producción sostenible, utilizando la valorización de residuos como alternativa para reducir el impacto sobre el medio ambiente, y fundamentalmente para reducir las emisiones de CO₂. Por ello, la instalación se debe plantear las acciones necesarias para poder disponer de una cantidad de combustibles alternativos superior a la actual.

Es en este ámbito pues, donde se hace imprescindible la tan solicitada colaboración de las diferentes administraciones, mediante el desarrollo de un marco normativo adecuado y líneas de ayudas económicas, debido a que un mayor uso de combustible alternativo requiere una importante inversión en equipos. Su cuantía varía en función de las dificultades de manipulación del residuo y de las precauciones que deban tomarse. En los casos más favorables, tales como los residuos líquidos no peligrosos, la inversión podría ser inferior al millón de euros. Cuando los equipos deben diseñarse para tratar residuos voluminosos y/o peligrosos, las cifras de inversión pueden acercarse a los cinco millones de euros. Estas cifras incluyen los sistemas de control y análisis, los almacenamientos y sus sistemas de protección y los equipos de alimentación al horno. No se incluyen los costes de operación, que dependerán del tipo de residuo y de los controles externos exigidos por las autoridades. Además, si fuera necesario, habría que sumar las inversiones en equipos de depuración para adecuar el comportamiento de la fábrica a las mayores exigencias medioambientales [Gómez, 2007].

b) Escenario 2: Emisiones autorizadas reducidas

En el caso hipotético de una asignación inferior de derechos de emisión (500.000 tn), son éstos los que limitan la producción, tanto en los casos que se contemple o no como posible fuente de ingreso vendiéndolos, y que se incorpore o no el cemento con menor proporción de clínker en el mix óptimo de producción. En todos los casos hay excedente de capacidad, combustibles y materias primas alternativas.

Por ese motivo, tras realizar el análisis postoptimal, el importe máximo a pagar por la empresa por cada derecho adicional sería de 13,96 € (fila 16) con un límite máximo de 87.844 ó 87.923 derechos (fila 15), según incorpore o no el nuevo cemento en el planteamiento, respectivamente. Esta cantidad máxima de compra estará limitada por el resto de recursos productivos de la empresa, ya que no le interesará adquirir más derechos de los que puede utilizar, para consumir el excedente del resto de los factores productivos (capacidad, materia primas y/o combustibles), excepto que sus intenciones sean especulativas. En este último caso, la compañía podrá adquirir más derechos de los necesarios para verificar sus emisiones de CO₂, para su posterior venta.

Asimismo, en todos los casos del escenario, el análisis de sensibilidad refleja que para que fuera rentable incorporar los cementos tipo I (X₂) y tipo II/A (X₃) al programa objetivo sería preciso incrementar el beneficio unitario en 6,747 y 7,647 euros respectivamente (filas 18 y 19). Igualmente para que sea más conveniente vender los derechos asignados y no utilizarlos para incrementar la producción de la planta, el precio de venta de los derechos debe superar los 13,96 euros (fila 23).

Observamos pues, la importancia que tiene la evolución del precio del mercado de los derechos de emisión, pudiéndose plantear la instalación, según su tendencia, utilizarlos para ser enajenados en el mercado, en vez de destinarlos en la fabricación de sus productos o reservarlos para posteriores aplicaciones.

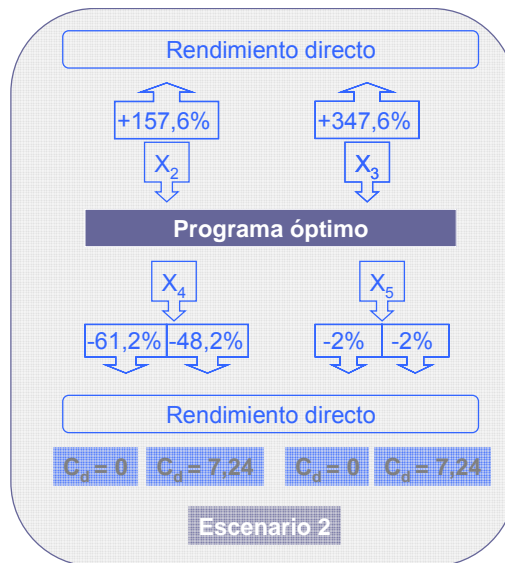


Figura 5.4. Sensibilidad de los resultados a variaciones de los rendimientos directos (escenario 2)
Fuente: elaboración propia

Por otra parte para que el cemento tipo II/B (X_4) se dejará de producir, su rendimiento directo debería disminuir 3,72 ó 4,73 euros, en función de considerar un rendimiento directo igual a 7,24 ó 0 respectivamente (fila 20), manteniéndose el resto de variables constante, en el caso de no incluir el nuevo cemento, y en los modelos que incorporan este nuevo producto, su precio tendría que descender 0,08 € (fila 21), para que dejara de formar parte de la solución óptima del modelo propuesto.

Por último, para completar el análisis de sensibilidad, los resultados para el escenario 3 (ver Tabla 5.13), en relación a la composición del mix de producción no reflejan cambios significativos respecto a los obtenidos en el escenario 2, siendo el incremento máximo de producción del 50% de la considerada (400.000 tn). De igual manera, para que sea más rentable vender los derechos asignados y no utilizarlos para incrementar la producción de la planta, el precio de venta de los derechos debe superar los 13,96 euros (fila 23), valor que se corresponde, aproximadamente, con la cotización media de los derechos en el mercado durante el año 2010.

		Escenario 3: Emisiones autorizadas reducidas				Escenario 2: Emisiones autorizadas reducidas				
		Caso 3A. Sin nuevo cemento		Caso 3B. Con nuevo cemento		Caso 2A. Sin nuevo cemento		Caso 2B. Con nuevo cemento		
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
2	Rendimiento directo del derecho de emisión	0	7,24	0	7,24	0	7,24	0	7,24	
	Z(max)	3.093.770,52	4.315.855,51	3.112.325,75	4.334.680,45	5.451.336,98	5.451.336,98	5.470.412,23	5.470.412,23	
3	Producción	522.370,896	522.370,896	640.579,851	640.579,851	827.360,08	827.360,08	945.636,35	945.636,35	
4	X ₁	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	151.550	
5	X ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	X ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	X ₄	370.820,896	370.820,896	249.029,851	249.029,851	675.810,089	675.810,089	554.086,356	554.086,356	
8	X ₅ (nuevo)	-	-	240.000	240.000	-	-	240.000	240.000	
9	X ₆ (dchos)	-	168.796,269	-	168.833,523	-	0	-	0	
10	Sobrante derechos (tn)	168.796,269	0	168.833,523	0	0	0	0	0	
11	Sobrante combustible (tn)	3.279,444	3.279,444	3.278,906	3.278,906	1.123,17017	1.123,17017	1.122,15697	1.122,15697	
12	Sobrante m.p. (tn)	204.000	204.000	204.000	204.000	154.957,738	154.957,738	154.946,914	154.946,914	
13	Sobrante capacidad almacenaje (tn)	0	0	0	0	595.657,241	595.657,241	595.612,142	595.612,142	
Programa óptimo	14	Aumento máx. recurso restrictivo	Producción (tn)				DE (nº)			
	15	Precio sombra derechos	204.342,76	204.342,76	204.387,86	204.387,86	87.923,41	87.923,41	87.844,098	87.844,098
	16	Precio sombra capacidad almacenaje	0	7,24	0	7,24	13,96	13,96	13,96	13,96
	17	Var. Bº unit	11,537	5,557	11,537	5,557	0	0	0	0
	18	Var. Bº unit	6,68	6,715	6,68	6,715	6,747	6,747	6,747	6,747
	19	Var. Bº unit	7,607	7,627	7,607	7,627	7,647	7,647	7,647	7,647
	20	Var. Bº unit	-4,71	-3,72	-4,71	-3,72	-4,73	-3,723	-4,73	-3,723
	21	Var. Bº unit	-	-	-0,077	-	-	-	-0,08	-0,08
	22	Var. Bº unit	0	0	0	0	0	6,727	0	6,727
	23	PM dcho no fabricar		13,96		13,96		13,96		13,96

Tabla 5.13. Resultados del análisis de sensibilidad (escenario 3 vs. escenario 2)
Fuente: elaboración propia

El análisis de sensibilidad realizado, para los tres escenarios, nos refleja, que si bien la situación de partida, bajo un enfoque estático, prima la producción de los cementos de menor proporción de clínker, las alternativas para aprovechar mejor y más los recursos dependerá del caso analizado.

PARA FINALIZAR este capítulo, quisiéramos destacar, que el análisis del caso nos ha permitido contrastar empíricamente la propuesta de la planificación de la producción realizada en el Capítulo 4, bajo la consideración de diferentes escenarios posibles, según los supuestos planteados para la resolución, diferenciando la información que nos puede otorgar el programa óptimo, en función de que éste implique el consumo total o parcial de los derechos de emisión disponibles y de que se contemple, en su caso, la posibilidad de vender el excedente de derechos a un precio estimado de venta del permiso de emisión en el mercado.

Los resultados mostrados nos confirman la viabilidad y compatibilidad de las alternativas propuestas y analizadas para reducir las emisiones de CO₂ (valorización energética y material de los residuos y la producción de cementos ecológicos), así como la sensibilidad de los resultados a variaciones de los parámetros y variables considerados en el modelo de planificación de la producción del cemento.

Por todo lo expuesto, la aplicación del modelo propuesto permitirá determinar anticipadamente decisiones que permitan optimizar el uso de los recursos productivos, considerando, por un lado las cantidades de CO₂ emitidas a la atmósfera y por otro lado, las alternativas para reducirlas.

Entre las posibles aplicaciones prácticas del modelo propuesto, destacamos la posibilidad de conocer el precio que estaría dispuesta a pagar la empresa para aumentar su producción mediante la adquisición de más derechos de emisión en el mercado y la cantidad de éstos que podría comprar sin que la producción quede limitada por otro factor productivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Beckers, 2010] Beckers, G. (2010): "Combustibles secundarios, energía para la industria del cemento. Preparación de muestras altamente heterogéneas para el control de calidad", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 936, pp. 26-28.

[Bolwerk, 2012] Bolwerk, R. (2012): "Co-Processing of Waste and Energy Efficiency by Cement Plants", *Parallel session: Innovative energy efficiency examples of different industrial sectors*. Disponible en web: <http://www.scribd.com/doc/85332341/Co-Processing-of-Waste-and-Energy-Efficiency-by-Cement-Plants>.

[Castillo et al., 2002] Castillo, E.; Conejo, A.J.; Pedregal, P.; García, R. y Alguacil, N. (2002): *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. Disponible en web: http://www.investigacion-operaciones.com/ARCHIVOS_LIBRO/LibroCompleto.pdf.

[CEMA, 2010b] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2010): *Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España (actualización periodo 2007-2009)* (Instituto Cerdá), Madrid, CEMA-Cuaderno Técnico.

[Conesa et al., 2011] Conesa, J.A.; Rey, L.; Egea, S. y Rey M.D. (2011): "Pollutant Formation and Emissions from Cement Kiln Stack Using a Solid Recovered Fuel from Municipal Solid Waste", *Environmental Science & Technology*, Nº 45, pp. 5.878-5.884. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1021/es200448u>.

[Decisión 2007/589/CE] Decisión de la Comisión de 18 de julio de 2007, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

[Directiva 2003/87/CE] Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de Octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y

por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo.

[Directiva 2009/29/CE] Diario Oficial de la Unión Europea, Directiva 2009/29/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, L 140/63.

[Dominguez-Machuca et al., 1995b] Domínguez-Machuca, J.A.; García-González, S.; Ruiz-Jiménez, A.; Domínguez-Machuca, M.A. y Álvarez-Gil, M.J. (1995): *Dirección de operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, Ed. McGraw-Hill, Madrid.

[EC, 2010] European Commission (2010): *Draft Commission Decision of determining transitional Union-wide rules for harmonised free allocation of emission allowances pursuant to Article 10a of Directive 2003/87/CE*. Disponible en web: http://www.cogeneurope.eu/wpcontent/uploads/2010/10/Commission_decision_Free-allocation_22-Oct.pdf

[EIPPCB, 2010] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (2010): *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide manufacturing Industries*. Disponible en web: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf. (Traducido al español con el título: *Prevención y Control Integrados de la Contaminación Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio RC-08. Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08*. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento (Aprobada por Real Decreto 956/2008 de 6 de junio)).

[Elorrieta, 2011] Elorrieta, J.I. (2011): "Reducción de CO₂ en la industria cementera", *ASEGRE*, 26 de mayo de 2011. Disponible en web: http://hcredos.asegre.com/DOCUMENTACION_JORNADA_HC_26_MAYO_2011/Ponencias/Ignacio%20Elorrieta.pdf.

[Gómez, 2007] Gómez-Rivas, J.J. (2007): *Estudio económico ambiental de la reducción de emisiones en una planta cementera por la combustión de biomasa*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Pontificia de Comilla, Madrid.

[Hoenig y Twigg, 2009] Hoenig, V. y Twigg, C. (2009): *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to look ahead*, Düsseldorf, Geneva, 4 June (World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative- European Cement Research Academy).

[Holcim, 2011] Holcim España (2011): *Informe de Sostenibilidad 2010*, Holcim España.

[IPPC, 2000] Intergovernmental Panel on Climate Change (2000): *Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories*, Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Disponible en web: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/gpgaum_en.html.

[Mateo y Lahoz, 2009] Mateo, P.M. y Lahoz, D. (2009): *"Programación Lineal III. Análisis Post-Optimal"*. Disponible en web: <http://ocw.unizar.es/ocw/enseñanzas-tecnicas/modelos-de-investigacion-operativa/ficheros/OCWSensiPara.pdf>.

[MAAMA, 2012b] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012): *Sistema Europeo de Comercio de Derechos de Emisión: período 2013-2020. Propuesta de Asignación Individualizada de Derechos de Emisión de Gases de Efecto Invernadero*, Secretaría de Estado de Medio Ambiente-Oficina Española de Cambio Climático.

[MMA, 2004] Ministerio de Medio Ambiente (2004): *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento*, Centro de Publicaciones-Secretaría General Técnica- Ministerio de Medio Ambiente.

[MMAMRM, 2011b] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MMAMRM) (2011): *Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de España e Información Adicional. Años 1990-2009*. Secretaría de Estado de Cambio Climático, Dirección

General de Calidad y Evaluación Ambiental, Dirección General Oficina Española de Cambio Climático.

[MMAMRM, 2011c] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MMAMRM) (2011): *Recomendaciones del Grupo Técnico de Comercio e Emisiones de la CCPC sobre la Metodología de seguimiento aplicable a las emisiones correspondientes a la fracción de biomasa contenida en los neumáticos fuera de uso*, 18 de febrero de 2011.

[Murray y Price, 2008] Murray, A. y Price, L. (2008): "Use of alternative fuels in cement manufacture: analysis of fuel characteristics and feasibility for use in the Chinese cement sector", Lawrence Berkeley National Laboratory, N° 525, Berkeley, California. Disponible en web: <http://china.lbl.gov/publications/use-alternative-fuels-cement-manufacture-analysis-fuel-characteristics-and-feasibility/>.

[Nicolas y Jochen, 2008] Nicolas, M. y Jochen, H. (2008): *A blueprint for a climate friendly cement industry*, WWF (World Wide Fund for Nature). Disponible en web: <http://www.panda.org>.

[OFICEMEN, 2011c] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2011): *Memoria Oficemen 2010*.

[Orden PRE/2827/2009] Orden PRE/2827/2009, de 19 de octubre, por la que se modifican las cuantías de las asignaciones sectoriales establecidas en el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión de Gases de Efecto Invernadero, 2008-2012, aprobado por el Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre.

[Price et al., 2010] Price, L.; Hasanbeigi, A. y Lu, H. (2010): "Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants", *Energy*, N° 35, pp. 3461-3473.

[RD 1370/2006] Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012 (BOE n° 282 de 25/11/06).

[Registro PRTR-España] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes establecido por el Reglamento (CE) 166/2006 E-PRTR, y regulado en España por

el Real Decreto 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de Autorizaciones Ambientales Integradas. Disponible en web: <http://www.prtr-es.es/informes/industrialactivitypollutant.aspx>

[Rovira et al., 2011] Rovira, M.J.; Mari, M.; Nadal, M.; Schuhmacher, M. y Domingo, J.L. (2011): "Use of sewage sludge as secondary fuel in a cement plant: human health risks", *Environment International*, Nº 37, pp. 105-111. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2010.08.004>.

[Sanjuán, 2007] Sanjuán, M.A. (2007): "Los Cementos de Adición en España del año 2000 al 2005", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 909, pp. 4-55.

[SENDECO2] Sistema Electrónico de Derechos de Emisión de Dióxido de Carbono, EUA 2008-2012, Daily prices [en línea]. Disponible en Web: <www.sendeco2.com> [última consulta: 05 de junio de 2012].

[Urcelay, 2006] Urcelay-Gordóbil, C. (2006): "Utilización de combustibles alternativos en las fábricas de cemento", CONAMA 8. Disponible en web: <http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/CTs/CT120.pdf>.

[WBCSD, 2003] World Business Council for Sustainable Development-Working Group Cement. (2003): "The Cement CO₂ Protocol: CO₂ Emissions Monitoring and Reporting Protocol from the European Emissions Reduction & Trading System", *Guide to the Protocol*, 22 de Mayo.

[WBCSD/CSI, 2010] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative (2010): Global Cement Database on CO₂ and Energy Information.

[WBCSD/IEA, 2009] World Business Council for Sustainable Development/International Energy Agency (2009): *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050*, OECD/IEA and WBCSD.

Capítulo 6

Conclusiones generales e implicaciones de la investigación

6.1. Conclusiones

6.2. Principales aportaciones de la tesis

6.3. Limitaciones de la investigación

6.4. Futuras líneas de investigación

Capítulo 6

Conclusiones generales e implicaciones de la investigación

Hasta aquí nuestra propuesta de planificación de la producción sostenible del cemento, y la exposición de todos los aspectos que la justifican y le sirven de base. Si bien, el lector ha tenido la oportunidad, a través de la lectura del trabajo, obtener sus propias conclusiones, intentaremos en este último capítulo resumir las principales conclusiones de nuestro trabajo de investigación.

Asimismo, completaremos esta última parte del trabajo con las principales aportaciones que creemos haber conseguido con el trabajo desarrollado, las limitaciones que en cualquier trabajo de este tipo existen y, finalmente, las futuras líneas de investigación, que consideramos pueden ser de interés para seguir avanzando en este campo de investigación.

6.1. CONCLUSIONES

Aunque son muchas las conclusiones que han sido puestas de relieve a lo largo del presente trabajo, como es procedente, a continuación, exponemos de forma genérica, los logros alcanzados, y para no ser reiterativos, remitimos a los apartados y capítulos correspondientes para un estudio en profundidad de los aspectos aquí tratados.

Teniendo en cuenta que el propósito general de nuestra investigación era ***abordar las decisiones de optimización en la planificación de la producción de cemento a través de un enfoque integrado, que contemple conjuntamente las alternativas disponibles para reducir las emisiones de CO₂***, las principales conclusiones con relación a cada uno de los objetivos fijados se exponen a continuación.

Objetivo 1.

Contextualizar, en el ámbito económico y medioambiental, la actividad productiva del sector del cemento en los últimos años en España, mediante el análisis de sus principales variables económicas e indicadores medioambientales.

El estudio realizado en los Capítulos 2 y 3 nos ha permitido alcanzar este objetivo. En ellos se ha realizado un análisis pormenorizado del sector cementero español, destacando aquellos aspectos, tanto del ámbito económico como medioambiental, que han marcado su evolución en la última década.

Fruto del análisis desarrollado en dichos capítulos, se han obtenido los siguientes resultados o conclusiones:

- En los últimos años el desarrollo sostenible es un factor que se incorpora de manera progresiva en la actividad industrial de nuestro país. El estudio desarrollado nos confirma que la industria cementera no es ajena a esta tendencia, que persigue compatibilizar la actividad de fabricación con una mayor protección del medio ambiente.
- Aunque existen dos etapas claramente diferenciadas en la evolución del sector en la primera década del siglo actual (reflejo, como en etapas anteriores, de la evolución de los ciclos económicos) (ver Apartado 2.2), el compromiso de la sostenibilidad con el medio ambiente de esta industria ha estado siempre presente en la gestión de las empresas, incluso en etapas difíciles, impulsado por la importante reconversión tecnológica que ha experimentado este sector en los últimos años, bajo un actualizado marco normativo en relación a diferentes aspectos e impactos medioambientales (emisiones atmosféricas, recursos energéticos, residuos, etc.). Ese compromiso se materializa en diferentes actuaciones, que condicionadas por las características propias del proceso de producción y de las circunstancias económicas de cada momento, integran la gestión medioambiental de la industria cementera.
- Tras la reconversión tecnológica que ha experimentado el sector en aras a mejorar la eficiencia energética de sus procesos productivos, en los últimos años, la gestión sostenible de los recursos consumidos (valorización de los

residuos y la utilización de materiales reciclados en la producción del cemento) ha constituido para este sector línea prioritaria de actuación en este ámbito, por las consecuencias que conlleva (búsqueda de la eficiencia energética y reducción de las emisiones a la atmósfera).

- Uno de los indicadores que, a nuestro juicio, es bastante revelador de la importancia real que para la industria cementera tiene el compromiso con el medio ambiente es el sacrificio económico que aquellas han realizado para introducir mejoras en procesos y productos en la última década. El volumen de las inversiones en materia medioambiental ha representado un porcentaje considerable del total de las inversiones realizadas por las empresas del sector en la última década (ver Apartado 3.2.5).
- Consecuencia de las anteriores, y tras el análisis de la evolución de los principales indicadores medioambientales (emisiones de contaminantes, consumo de recursos naturales y energéticos, etc.), se pone de manifiesto una clara relación causa-efecto, entre las inversiones realizadas por la industria analizada y la mejora medioambiental lograda.
- Desde la entrada en vigor del PK, las emisiones de CO₂ de las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE (entre la que se incluyen las de cemento), dejan de ser un residuo más de sus procesos productivos, que a parte del daño medioambiental que ocasiona, no tiene efectos directos sobre los resultados de las empresas, para convertirse en un input más de sus procesos, que limita junto con otros factores productivos su capacidad productiva.
- La búsqueda hacia el equilibrio entre producción, emisiones de contaminantes a la atmósfera y eficiencia constituye la base de las actuaciones de los fabricantes de cemento incluidos en el ámbito de aplicación del Real Decreto Ley 5/2004 que regula el régimen de comercio de derechos de emisión de GEI.
- La política de mejora continua que ha venido desarrollando el sector en sus instalaciones con anterioridad al PK, ha favorecido un desarrollo económico sostenible, apostando para el futuro por mejoras encaminadas fundamentalmente a reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Éstas también se ha visto reducida por el impacto de la recesión económica

sobre la producción del cemento. En relación a esto último, desde Oficemen se prevé que el sector cerrará 2012 con un consumo de 15 millones de toneladas, lo que representa una caída del 73% respecto al máximo histórico alcanzado en 2007 de 56 millones de toneladas. El sector podría cerrar el año con un consumo per cápita de tan solo 325 kg por habitante, cifra que no se obtenía en nuestro país desde 1964 y que resulta aún más alarmante si tenemos en cuenta que el contexto en aquellos años era de crecimiento económico y no de recesión como el actual.

- En cuanto a las emisiones de CO₂, y en relación al cumplimiento del PK, en el análisis por etapas realizado en el Apartado 3.3, se verifica una sobreasignación creciente de derechos de emisión en la etapa Kyoto, respecto a la anterior, a pesar de disminuir progresivamente la cantidad de derechos asignados y el potencial de reducción de emisiones de CO₂ en dicho periodo. El carácter preparatorio de la primera fase y su gestión de forma apresurada, así como la participación de las empresas del sector en proyectos de AC y MDL y la caída de la producción en la segunda etapa, debida a la crisis económica, se señalan como las principales causas de los desajustes existentes entre las emisiones autorizadas y verificadas de emisiones de CO₂.

Asimismo, la etapa post-Kyoto, caracterizada, precisamente y a priori, por la falta de estabilidad económica, marca un antes y un después del PK, condicionando el marco en el cual las cementeras tendrán que asumir nuevos retos y oportunidades para seguir compatibilizando su producción con la protección del medio ambiente.

- Por todo lo anterior, concluimos afirmando que la necesidad de un cambio de modelo de producción en el sector cementero es un hecho constatado (ver Figura 3.3), que requiere, por tanto, de nuevos enfoques de la planificación de la producción que incorpore criterios de sostenibilidad, incluyendo variables y parámetros que hasta fechas recientes no eran relevantes, ni tenían repercusión directa sobre la cuenta de resultados de la empresa. A ello, entendemos que puede contribuir nuestra propuesta.

Objetivo 2.

Determinar todos aquellos aspectos que nos permitan identificar las limitaciones y posibilidades que tiene el sector del cemento para compatibilizar los objetivos de producción con las nuevas exigencias medioambientales en cuanto a emisiones de CO₂ se refiere y asociados con las MTDs para la producción del cemento.

Fruto del análisis desarrollado en el Capítulo 3 y en la primera parte del Capítulo 4, para la consecución de este objetivo, se han obtenido los siguientes resultados o conclusiones, que exponemos a continuación, agrupándolos, según el subobjetivo correspondiente.

En relación con el **Subobjetivo 2.1**, que recordamos, era *“realizar un estudio detallado del proceso de producción de cemento y su impacto sobre el medio atmosférico, para delimitar todas aquellas variables y parámetros a considerar en la planificación de la producción, y por tanto en la modelización de la producción que proponemos”*, destacamos los siguientes resultados:

- Las características propias del proceso de producción y del producto de la industria del cemento (actividad intensiva de energía y de recursos naturales), la convierten en uno de los sectores industriales potencialmente más contaminantes (ver Apartado 3.1).
- Las sustancias contaminantes liberadas a la atmósfera, junto con el consumo de recursos naturales y energéticos, se identifican como los principales impactos medioambientales de la actividad industrial analizada (ver Apartado 3.1).
- Por su condición de GEI y por los grandes volúmenes en que se presenta el CO₂ en las instalaciones de cemento, este contaminante se convierte en uno de los impactos ambientales más dañinos de la producción del cemento.
- El desarrollo de una profusa normativa (a distintos niveles) reguladora de los diferentes aspectos e impactos medioambientales de la producción del cemento en general y de las emisiones de CO₂, en particular, han contribuido a controlar y minimizar dichos impactos.

- La producción del clínker es la principal responsable de las emisiones directas de CO₂ de esta industria, el 50-60% son provocadas por las reacciones químicas que sufren las materias primas en el horno y el 30-40% son generadas por la quema de combustibles fósiles, realizada principalmente para que se alcancen las altas temperaturas necesarias en el horno y otros equipos asociados.
- El resto de las emisiones de CO₂ de la industria del cemento procede del transporte y del consumo de energía eléctrica en otros procesos de la fábrica (principalmente en los molinos y en los extractores de los gases).

En relación al **Subobjetivo 2.2**, que recordamos de nuevo era "**determinar las alternativas disponibles para reducir las emisiones de CO₂ (y así cumplir el Protocolo de Kyoto) y su viabilidad, en función de los diferentes escenarios**", se ha desarrollado, según lo establecido en el Capítulo 3, en la primera parte del Capítulo 4, donde se exponen las diferentes vías de ajuste de las emisiones de CO₂ de la producción del cemento. Como resultado:

- Las características del impacto del proceso de fabricación del cemento sobre el medio ambiente y la normativa vigente reguladora de diferentes aspectos relacionados con el mismo (Directiva de Prevención y Control Integrado de la Contaminación, Protocolo de Kyoto, Directiva Marco de Residuos, etc.), condicionan las medidas adoptadas por los grupos cementeros para reducirlo y así compatibilizar la actividad productiva con la protección del entorno, optimizando el comportamiento de las instalaciones de fabricación a través de una mejora continua, la modernización de equipos y la inversión en medios de reducción de los distintos impactos ambientales.
- Las medidas de ajuste de las emisiones de CO₂ para cumplir el PK, como en cualquier otro sector industrial, podrán realizarse sobre las emisiones autorizadas (derivadas de las asignaciones iniciales de los PNA correspondientes y del nivel de utilización de los instrumentos disponibles para cumplir con el compromiso de reducción adquirido) y/o sobre las emisiones reales de los procesos de producción.

La selección de una u otra alternativa dependerá de un lado, de factores relacionados con los mecanismos de flexibilidad regulados en el PK, tales como

la cotización de los permisos de emisión, el volumen de emisiones autorizadas en los correspondientes PNA, la trayectoria tecnológica de la empresa, el nivel de participación en proyectos de MDL y AC y de otro lado, de aquellas variables vinculadas directamente a la producción del cemento que influyen en el valor de las emisiones, tales como el tipo y cantidad de cemento fabricado, consumo de recursos naturales y energéticos y de la eficiencia energética de los equipos e instalaciones de las plantas industriales.

- Los ajustes sobre las emisiones autorizadas se materializan en la utilización de los diferentes mecanismos de flexibilidad del PK (mercado de derechos, AC y/o MDL). En el caso del sector del cemento, según la información recogida en el Apartado 3.3, a nivel global, la participación en el mercado de derechos no ha sido significativa, en relación a otros sectores. Por el contrario, es el único sector industrial que ha invertido de manera directa en MDL.
- Según la clasificación propuesta por [Feiz, 2011] y [Ammenberg et al., 2011] (ver Cuadro 4.1) para reducir directamente las emisiones de CO₂, el estudio de la evolución de los indicadores sobre aspectos e impactos medioambientales de la industria española del cemento, desarrollado en el Capítulo 3 muestra, la implantación generalizada, en mayor o menor medida, de algunas de las prácticas referidas (principalmente valorización de los residuos), y la escasa relevancia aún de otras, actualmente en fase de I+D (como los blended cements y la CAC). Estas últimas se convierten así en nuevos retos y oportunidades para el sector, que permitirán continuar en la dirección hacia el desarrollo sostenible, consolidando las acciones emprendidas en etapas anteriores.
- Asimismo, hay que resaltar la reconversión tecnológica que este sector ha experimentado en los últimos años, que de manera indirecta han favorecido la reducción de las emisiones de CO₂, mejorando principalmente la eficiencia energética de sus procesos de producción.
- La colaboración y el apoyo de la Administración, solicitada por el sector cementero español en todos estos años, es de vital importancia para seguir avanzando en este camino, que permita suavizar el impacto que la Directiva de Comercio de Derechos ha expuesto a los sectores industriales afectados, y así

garantizar la competitividad del sector, resentida por la crisis económica y la presión importadora de terceros países de fuera de la Unión Europea y no firmantes del Protocolo de Kyoto.

Objetivo 3

Proponer y aplicar al caso que nos ocupa, un proceso que nos permita obtener el programa óptimo de producción para cada uno de los posibles escenarios identificados, teniendo en cuenta todas las variables consideradas como relevantes, que permita compatibilizar la actividad productiva con las exigencias medioambientales.

Este objetivo es desarrollado en los Capítulos 4 y 5 de este trabajo, donde hacemos en primer lugar, la propuesta para la determinación del plan de producción de cemento que permita optimizar el uso de los recursos productivos, mediante la aplicación de un modelo de programación lineal, y después la aplicación del modelo a un caso, para contrastar empíricamente la propuesta realizada.

Las principales conclusiones relacionadas con este objetivo se exponen a continuación, diferenciándolas, al igual que en el objetivo anterior, según los subobjetivos derivados del objetivo 3.

En cuanto el Subobjetivo 3.1, hemos llegado a "**identificar las variables de decisión y parámetros que nos permitan modelizar la planificación de la producción mediante programación lineal, bajo un enfoque integrado**", destacando los siguientes resultados:

- A pesar de caracterizarse la producción del cemento por su homogeneidad, resulta de suma importancia la diferenciación de los tipos de productos a fabricar (clínker y diferentes tipos de cementos), que constituyen las variables de decisión del programa de producción. La proporción de clínker que contiene cada uno de los tipos de productos fabricados, así como los aditivos empleados en su fabricación son factores clave de la planificación de la producción sostenible, a fin de compatibilizar la reducción de las emisiones de CO₂ con los objetivos de producción.

En este sentido, la inclusión de nuevos productos, cuya fabricación requiera menos consumo de recursos naturales y energéticos, y por tanto emitan menos CO₂, se contempla en la propuesta realizada como una alternativa, compatible con la valorización de residuos, principal alternativa del estudio realizado.

- Además de las restricciones contempladas tradicionalmente en la planificación de la producción (capacidad de producción, demanda, coste, etc.), las limitaciones derivadas de las medidas recogidas como alternativas para reducir las emisiones de CO₂ (sustitución parcial de recursos –materiales y energéticos– tradicionales por alternativos e incorporación de cementos ecológicos en la cartera de productos) determinan el nuevo planteamiento del modelo de PL, con la inclusión de los parámetros relacionados con las mismas. A destacar:
 - Cantidad de CO₂ emitida por unidad de producto fabricada.
 - Consumo de recursos alternativos (materiales y energéticos) por unidad de producto fabricado.
 - Objetivo de sustitución de recursos (materias primas y combustibles) por otros menos contaminantes.
 - Tasa de sustitución de los recursos productivos empleados por alternativos, sin alterar significativamente las características técnicas y económicas de la producción. Además del coste y disponibilidad, en el caso de los combustibles, dependerá de su poder calorífico y del requerimiento de energía térmica del proceso de obtención del producto, y en el caso de los materiales, de las propiedades químicas y de la capacidad de la instalación de procesarlos.
 - Límite de emisiones autorizadas (las de los PNA y las derivadas de la participación en mecanismos de MDL y AC).
 - Demanda de productos ecológicos.
 - Otros límites legales de otros impactos medioambientales (emisiones de otros contaminantes, residuos, etc.).
 - Coste de producción de los diferentes ítems.

- En relación con la anterior, destacar la relevancia del cálculo del factor de emisión por unidad de producto fabricado, que dependerá de un lado, del combustible utilizado y de otro, del tipo de materia prima consumida (composición y cantidad). Cantidades que resultarán de las medidas desarrolladas por las empresas, y que quedarán recogidas en el nuevo balance de masa, reflejo de los cambios experimentados por la empresa hacia la producción sostenible del cemento.
- Por todo ello, se hace imprescindible recoger todos los cambios propuestos en el balance de masa, de manera que éste represente la producción sostenible del cemento.

En relación al **Subobjetivo 3.2**, que era "**analizar y evaluar, mediante la aplicación de un caso, las consecuencias que sobre la producción del cemento tienen las limitaciones de emisiones CO₂ bajo diferentes escenarios**", determinando además, como afectan o interfieren entre si las diferentes variables y parámetros del modelo identificadas previamente, mediante el correspondiente análisis de sensibilidad, buscando, en cualquier caso, la combinación óptima que resulte más rentable, compatibilizando los objetivos de producción con la reducción de las emisiones de CO₂ impuestas por el PK. Aunque el análisis y discusión de los resultados de la aplicación del caso (ver Apartado 5.4) recogen todas las conclusiones de manera detallada, entendemos que resulta de interés resaltar algunas de ellas:

- La aplicación del modelo propuesto a un caso sujeto a las limitaciones de emisiones de CO₂ del PK nos ha permitido evaluar diferentes escenarios, según los supuestos planteados para la resolución, diferenciando la información que nos puede otorgar el programa óptimo, en función de que éste implique el consumo total o parcial de los derechos de emisión disponibles y de que se contemple, en su caso, la posibilidad de vender el excedente de derechos a un precio estimado de venta del permiso de emisión en el mercado.
- Los resultados han demostrado que el modelo utilizado es sensible a la variación de los parámetros considerados, destacando el papel determinante que ejerce los derechos disponibles y la cotización de éstos en el mercado de emisiones de

CO₂, favoreciendo o no, según el caso, la puesta en marcha de mejoras medioambientales en procesos y/o productos.

- La posibilidad de conocer el precio máximo que estaría dispuesta a pagar la empresa para aumentar su producción mediante la adquisición de más derechos de emisión en el mercado y la cantidad de éstos que podría comprar sin que la producción quede limitada por otro factor productivo, es otra de las posibles aplicaciones prácticas del modelo propuesto.
- En relación con la anterior, concluimos que el mercado de derechos de emisión se presenta como una nueva alternativa para la obtención de beneficios empresariales, no sólo con fines especulativos, sino también para mejorar la rentabilidad de las inversiones en mejoras que reduzcan las emisiones. En este último caso, la empresa podrá vender el excedente de derechos que provoca la reducción de las emisiones ocasionadas por la puesta en práctica de esas mejoras. Igualmente, la estimación del precio del permiso de emisión puede proporcionar a la empresa información relativa a la rentabilidad económica que se podría obtener con la implantación de esas medidas, ayudando a la toma de decisiones en relación a cuál de las alternativas de reducción de emisiones de CO₂ aportaría un mayor beneficio.
- Asimismo, el modelo propuesto, no exento de limitaciones, permite a través del análisis de sensibilidad, evaluar cambios en el plan óptimo de producción, en función de los diferentes parámetros considerados (beneficio unitario, materia prima empleada, etc.). Ello permitirá a la empresa orientar las actuaciones encaminadas a reducir su impacto medioambiental.
- Los resultados han demostrado la compatibilidad de las posibles vías de ajuste para reducir las emisiones de CO₂ (valorización de residuos y productos ecológicos). Precisamente, los modelos con mayor incremento de beneficio son los que incorporan en su plan de producción la tipología de cemento con menor proporción de clínker, debido a sus menores emisiones y menor consumo de combustibles y materias primas alternativas. Incluso con un rendimiento marginal menor que el resto de productos es mucho más rentable para la instalación producir este tipo de cemento, bajo las condiciones de producción consideradas.

- Tal y como se puso de manifiesto en la revisión bibliográfica realizada, y con la precaución y cautela que requiere, los resultados de nuestro estudio confirman la viabilidad de la producción de cementos mezclados, considerándola como una gran oportunidad para el sector, en aras a la consecución de una producción sostenible.
- La incorporación de otros tipos de cemento (como los cementos tipo I y II/A) en el plan óptimo de producción, también es otra alternativa viable para compatibilizar la producción del cemento con la protección del medio ambiente, siempre y cuando se incremente el beneficio unitario de los mismos, tal y como se reflejó en el análisis de sensibilidad (ver Apartado 5.4.2). Sin embargo, esta alternativa, a priori, no resulta viable, hoy por hoy, en tanto que la industria cementera opera en un entorno de fuerte competencia global, en el que las empresas disponen de poco margen para modificar los precios de sus productos.

6.2. PRINCIPALES APORTACIONES DE LA TESIS

Con toda la prudencia que debe presidir el discurso de aquel que pudiese argumentar haber realizado avances en el conocimiento científico de cualquier materia, exponemos a continuación algunas de las aportaciones que creemos pueden derivarse del trabajo que ahora estamos dando por finalizado. Algunas relativas al desarrollo metodológico y otras derivadas de la aplicación del modelo propuesto.

A nuestro juicio, las principales aportaciones son las que se enumeran a continuación:

- Con la realización de nuestro estudio creemos, a pesar de las simplificaciones introducidas en el análisis, y que podrán ser eliminadas en futuros desarrollos, haber contribuido a progresar en la comprensión de la relevancia de la limitación de las emisiones de CO₂ en la planificación de la producción del cemento. Para la obtención del mix óptimo de productos hemos considerado conjuntamente las posibles alternativas (sobre las emisiones reales y autorizadas) para reducir la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera, destacando el papel que juega el mercado de derechos de emisión, en relación a las decisiones de las empresas implicadas, respecto a la compra de nuevos

derechos para producir más y por tanto, emitir más CO₂ a la atmósfera o la venta de los permisos sobrantes o reserva para periodos posteriores.

- Así pues, la propuesta realizada puede proporcionar información relevante que oriente las decisiones de la industria para compatibilizar sus procesos productivos con las limitaciones de CO₂, sin sacrificar, en gran medida, sus intereses económicos. Por ello, además de permitir evaluar la reducción de las emisiones de CO₂, a diferencia del Análisis del Ciclo de Vida, permite analizar la viabilidad económica de las alternativas asociadas a aquellas, tanto las destinadas a ajustar las emisiones reales como las autorizadas.

En este sentido, la propuesta realizada, no sólo permite conocer los impactos ambientales y costes asociados a su proceso, sino que podrá simular y analizar el impacto que sobre aquellos tendría cualquier modificación en las variables consideradas en el modelo de PL (tasa de sustitución de recursos alternativos, beneficio de los productos, emisiones autorizadas de CO₂, etc.), a través del correspondiente análisis de sensibilidad.

- Además, aunque la aplicación de nuestra propuesta está orientada principalmente hacia las industrias del sector analizado, creemos que también puede contribuir indirectamente a un mayor y mejor entendimiento entre todos los agentes implicados, reorientando las actuaciones y políticas públicas relacionadas con las alternativas disponibles para reducir las emisiones de CO₂.
- De esta manera, creemos haber contribuido a cubrir, en la medida de nuestras posibilidades, ese vacío existente en la literatura sobre el área de investigación tratada, y que nos animó a desarrollar esta investigación, que damos por finalizada.
- En línea con la anterior, creemos que con nuestro estudio aportamos las bases sobre las cuales debería estar fundamentado un modelo dinámico y más complejo, que por estar dentro del campo de investigación tecnológica, quedaba inicialmente fuera de las expectativas del presente trabajo.
- Facilitar a investigadores de este campo de investigación, información actualizada del sector, tanto a nivel general, como la relativa a la gestión medioambiental del mismo, en particular, de manera que puedan encontrar en

nuestro trabajo una base documental y bibliográfica que les sirva de punto de arranque y apoyo, en sus investigaciones, y que todo investigador agradece.

6.3. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Como cualquier trabajo de investigación de este tipo, su desarrollo, y por tanto los resultados obtenidos están sujetos a limitaciones de diferente índole. Aunque ya se han estado refiriendo a lo largo de los distintos capítulos que componen este trabajo de investigación, a modo de resumen pasaremos a continuación a citarlas. Se trata de las derivadas, principalmente de:

- El carácter multidisciplinar del estudio realizado, que requiere de la inclusión de diferentes ramas del saber.
- La propia metodología que hemos empleado en el estudio empírico y de la necesidad de establecer supuestos de partida y restricciones que limitan la amplia variedad de situaciones que se pueden dar en las empresas del sector del cemento en relación a la planificación de la producción.
- El cambio del escenario económico, a partir del cual se diseñó toda la normativa reguladora del Protocolo de Kyoto, y fundamentalmente la relativa al régimen de comercio de derechos de emisión.
- Las dificultades propias de la recogida de información de un estudio como el que hemos desarrollado, a pesar de la colaboración directa de la empresa objeto de análisis y de la disponibilidad de una gran cantidad de información recogida en bases de datos, registros y otras publicaciones de acceso público.

6.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A medida que avanzábamos en el desarrollo de nuestra investigación, y en consonancia con la inquietud por conocer más de aquello que ya se conoce, o comienza a conocerse, nos han surgido futuros caminos de investigación que podrían desarrollarse como complemento o continuación de la que estábamos desarrollando y que ahora damos por terminada. Más allá de la obvia profundización en el trabajo realizado, quizás las líneas más interesantes a desarrollar podrían ser las siguientes: las relacionadas con la

metodología aplicada y la validación del modelo propuesto, bajo otros supuestos de producción.

En relación con la metodología propuesta en esta tesis, obviamente, a pesar de considerarse la más apropiada para nuestro caso, no es la única posible, ya que pueden proponerse otros métodos, alternativos o complementarios, para resolver los problemas planteados.

Por otro lado, para profundizar el estudio desarrollado sería preciso contrastar empíricamente la aplicación del modelo propuesto bajo otros supuestos de producción, incluyendo otras fuentes indirectas de emisiones, otras alternativas de reducción de emisiones de CO₂ (como la importación del clínker y algunas de las referidas en el Apartado 4.1.2.2) y considerando asimismo los otros mecanismos contemplados en el PK para mitigar el impacto económico de las medidas reductoras de emisiones de CO₂ (proyectos de aplicación conjunta y de desarrollo limpio), así como el escenario futuro próximo de la etapa post-Kyoto.

Anexo I

Anexo Normativo

Registro, inventario y control de contaminación atmosférica

[Comisión de las Comunidades Europeas, 2007] Comisión de las Comunidades Europeas (SEC (2007) 1682) (2007): Documento de Trabajo de los Servicios de la Comisión. Resumen de la evaluación del impacto que acompaña a la propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), [COM (2007) 843 final], [COM (2007) 844 final], [SEC (2007) 1679].

[Decisión 2000/479/CE] Decisión 2000/479/CE, de 17 de julio de 2000, relativa a la realización de un inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER) con arreglo al artículo 15 de la Directiva 96/61/CE del Consejo relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (IPPC).

[Decisión 2007/589/CE] Decisión de la Comisión de 18 de julio de 2007, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

[Decreto 833/1975] Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972 de Protección del Ambiente Atmosférico, BOE nº 96 (22-04-75).

[Directiva 1999/13/CE] Directiva 1999/13/CE del Consejo de 11 de marzo de 1999 relativa a la limitación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes orgánicos en determinadas actividades e instalaciones. DOCE nº L 85. (29-3-99). Rectificación a esta Directiva (DOCE nº L 188, de 21.7.99). Corrección de errores (DOCE nº L 165, de 21.06.01).

[Directiva 1999/30/CE] Directiva 1999/30/CE, del Consejo, de 22 de abril de 1999, relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente, DOCE nº L 163 (29-06-99).

[Directiva 2001/100/CE] Directiva 2001/100/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de diciembre de 2001, por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de medidas contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor, DOCE nº L 16 (18-01-02).

[Directiva 2001/81/CE] Directiva 2001/81/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos, DOCE nº L 309 (27-11-01).

[Directiva 2008/1/CE] Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación (deroga a la Directiva 96/61/CE).

[Directiva 2009/31/CE] Directiva 2009/31/CE establece un marco legislativo para el almacenamiento geológico del dióxido de carbono (CO₂) en condiciones seguras para el medio ambiente.

[Directiva 2010/75/UE] Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y el Consejo de 24 de noviembre de 2010 sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), Diario Oficial de la Unión Europea L 334/17.

[Directiva 96/61/CE] Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación (DOCE núm. L 257, de 10 de octubre de 1996).

[Directiva 96/62/CE] Directiva 96/62/CE, de 27 de septiembre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire, DOCE nº L 296 (21-11-1996).

[Ley 16/2002] Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (Ley IPPC), modificada por la Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de accesos a la

información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE); y por la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

[Ley 34/2007] Ley 34/2007, Ley marco sobre atmósfera.

[Ley 38/1972] Ley 38/1972 de Protección del Ambiente Atmosférico, de 22 de diciembre de 1972, BOE nº 309 (26-12-72).

[Ley 4/1998] Ley 4/1998, de 3 de marzo, por la que se establece el régimen sancionador previsto en el Reglamento (CE) 3093/1994, del Consejo de 15 de diciembre, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, BOE nº 54 (4-3-98) (desarrolla el artículo 19 del Reglamento (CE) 3093/1994).

[Ley 6/2001] Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental.

[Orden de 18 de octubre de 1976] Orden de 18 de octubre de 1976 sobre prevención y corrección de la contaminación atmosférica de origen industrial (Ministerio de Industria y Energía), BOE nº 290 (03-12-76).

[RD 100/2011] Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación.

[RD 1073/2002] Real Decreto 1073/2002 sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente como resultado de la aplicación de las Directivas 96/62/CE y 111/30/CE.

[RD 1131/1998] Real Decreto 1131/1998, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del RD 1302/86, de Evaluación de Impacto Ambiental, BOE nº 230 (05-10-88).

[RD 1302/1986] Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental, BOE nº 155 (30-06-1986).

[RD 1321/1992] Real Decreto 1321/1992 de 30 de octubre, por el que se modifica parcialmente el Real Decreto 1613/1985, de

1 de agosto, y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a la contaminación por dióxido de azufre y partículas.

[RD 1494/1995] Real Decreto 1494/1995, sobre contaminación atmosférica por ozono, BOE nº 230 (26-09-95).

[RD 1613/1985] Real Decreto 1613/1985, de 1 de agosto, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, de 6 de febrero, y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de azufre y partículas.

[RD 1800/1995] Real Decreto 1800/1995, de 3 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 646/1991, de 22 de abril, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación a las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión y se fijan las condiciones para el control de los límites de emisión de SO₂ en la actividad del refino de petróleo.

[RD 508/2007] Real Decreto 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas.

[RD 509/2007] Real Decreto 509/2007, para el desarrollo y ejecución de la Ley 16/2002 de prevención y control integrados de la contaminación IPPC.

[RD 547/1979] Real Decreto 547/1979, de 20 de febrero, sobre modificación del Anexo IV del Decreto 833/1975, de 8 de febrero, por el que se desarrolla la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico.

[RD 646/1991] Real Decreto 646/1991, de 22 de abril, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, BOE nº 99 (25-04-91).

[RD 717/1987] Real Decreto 717/1987, de 27 de mayo, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, de 6 de febrero, y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de nitrógeno y plomo.

[RD 812/2007] Real Decreto 812/2007, de 22 de junio, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos.

[RDL 1302/1986] Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.

[RDL 9/2000] Real Decreto-Ley 9/2000, de 6 de octubre, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.

[Reglamento 166/2006] Reglamento (CE) 166/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de enero de 2006, relativo al establecimiento de un registro europeo de emisiones y transferencias de contaminantes y por el que se modifican las Directivas 91/689/CEE y 96/61/CE del Consejo.

[Reglamento 2037/2000] Reglamento 2037/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de junio de 2000 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono, DOCE nº 244 (29-09-00).

Gestión de residuos

[Decisión 2003/33/CE] Decisión 2003/33/CE, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al Anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

[Directiva 101/1987/CEE] Directiva 101/1987/CEE, de 22 de diciembre de 1986, que modifica la Directiva 75/439/CEE, relativa a la gestión de Aceites Usados.

[Directiva 1999/31/CE] Directiva 1999/31/CE, del Consejo, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos.

[Directiva 2000/76/CE] Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos.

[Directiva 2003/53/CE] Directiva 2003/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de junio de 2003, por la que se modifica por vigésimo sexta vez la Directiva 76/769/CEE del Consejo respecto a la limitación de la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilatos de nonilfenol y cemento).

[Directiva 2005/20] Directiva 2005/20, de 9 de marzo, por la que se modifica la Directiva 94/62, relativa a los envases y residuos de envases.

[Directiva 2006/12] Directiva 2006/12, de 5 de abril, relativa a los residuos.

[Directiva 2008/98/CE] Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directiva, L312/3.

[Directiva 75/442/CEE] Directiva 75/442/CEE, de 15 de julio, relativa a los residuos.

[Directiva 91/689/CEE] Directiva 91/689/CEE, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos. DOCE 377/L, de 31-12-91.

[Directiva 94/31/CE] Directiva 94/31/CE de 27 de junio de 1994 por la que se modifica la Directiva 91/689/CEE relativa a los residuos peligrosos.

[Directiva 94/62/CE] Directiva 94/62/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a los envases y residuos de envases.

[Directiva 94/67/CE] Directiva 94/67 del Consejo, relativa a la incineración de Residuos Peligrosos.

[Ley 10/1998] Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.

[Ley 11/1997] Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases.

[Ley 22/2011] Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

[Orden de 13 de octubre de 1989] Orden de 13 de octubre de 1989 por la que se determinan los métodos de caracterización de los residuos tóxicos y peligrosos.

[Orden MAM/304/2002] Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

[Orden PRE/1954/2004] Orden PRE/1954/2004 de 22 de junio, por la que se modifica el Anexo I del Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre, por el que se imponen limitaciones a la comercialización y uso de ciertas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilados de nonilfenol y cemento).

[RD 1481/2001] Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (BOE nº 25 de 29/01/02).

[RD 1619/2005] Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.

[RD 252/2006] Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización

establecidos en la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases, y por el que se modifica el RD 782/1998.

[RD 653/2003] Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.

[RD 679/2006] Real Decreto 679/2006, de 2 de junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados.

[RD 782/1998] Real Decreto 782/1998, de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases.

[RD 833/1988] Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986 básica de residuos tóxicos y peligrosos.

[RD 952/1997] Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento de ejecución de la Ley 20/86, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos.

[RDL 4/2001] Real Decreto-Ley 4/2001, de 16 de febrero, sobre el régimen de intervención administrativa aplicable a la valorización energética de harinas de origen animal procedentes de la transformación de despojos y cadáveres de animales.

[Reglamento 1013/2006] Reglamento 1013/2006, de 14 de junio, relativo a los traslados de residuos.

[Reglamento 801/2007] Reglamento 801/2007, relativo a la exportación, con fines de valorización, de determinados residuos, a determinados países a los que no es aplicable la decisión de la OCDE sobre el control de los movimientos transfronterizos de residuos.

Protocolo de Kyoto

[Decisión 2011/278/UE] Decisión de la Comisión 2011/278/UE de 27 de abril de 2011, por la que se determinan las normas transitorias de la Unión para la armonización de la asignación gratuita de derechos de emisión con arreglo al artículo 10 bis de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

[Decisión 280/2004/CE] Decisión 280/2004/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, relativa a un mecanismo para el seguimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Comunidad y para la aplicación del Protocolo de Kyoto.

[Decisión de la Comisión de 22 de octubre de 2010] Diario Oficial de la Unión Europea, Decisión de La Comisión de 22 de octubre de 2010 por la que se adapta la cantidad de derechos de emisión que deben expedirse para el conjunto de la Unión en 2013 de conformidad con el régimen de la Unión y se deroga la Decisión 2010/384/UE. L 279/34.

[Decisión de la Comisión de 24 de diciembre de 2009] Decisión de la Comisión, de 24 de diciembre de 2009, por la que se determina, de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, una lista de los sectores y subsectores que se consideran expuestos a un riesgo significativo de fuga de carbono.

[Decisión de la Comisión de 9 de julio de 2010] Diario Oficial de la Unión Europea, Decisión de La Comisión de 9 de julio de 2010 relativa a la cantidad de derechos de emisión que deben expedirse para el conjunto de la Comunidad en 2013 de conformidad con el régimen de comercio de derechos de emisión de la UE, L 175/36.

[Decisión del Consejo de 25 de Abril de 2002] Decisión del Consejo, de 25 de Abril de 2002, relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y al cumplimiento conjunto de los

compromisos contraídos con arreglo al mismo.

[Directiva 2003/87/CE] Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de Octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo.

[Directiva 2008/101/CE] Directiva 2008/101/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE con el fin de incluir las actividades de aviación en el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

[Directiva 2009/29/CE] Directiva 2009/29/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, L 140/63.

[Ley 1/2005] Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, BOE nº 59.

[Ley 13/2010] Ley 13/2010, de 5 de julio, por la que se modifica la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, para perfeccionar y ampliar el régimen general de comercio de derechos de emisión e incluir la aviación en el mismo, BOE nº 163.

[ONU, 1998] Organización de las Naciones Unidas (1998): *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, Documento FCCC/INFORMAL/83 GE.05-61702 (S) 130605 130605.

[Orden MAM/1445/2006] Orden MAM/1445/2006, sobre tarifas del Registro Nacional de Derechos de Emisión.

[Orden PRE/2827/2009] Orden PRE/2827/2009, de 19 de octubre, por la que se modifican las cuantías de las asignaciones sectoriales establecidas en el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión de Gases de Efecto Invernadero, 2008-2012, aprobado por el Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre.

[RD 1030/2007] Real Decreto 1030/2007, de 20 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.

[RD 1264/2005] Real Decreto 1264/2005, de 21 de octubre, por el que se regula la organización y funcionamiento del Registro Nacional de Derechos de emisión.

[RD 1315/2005] Real Decreto 1315/2005, de 4 de noviembre, por el que se establecen las bases de los sistemas de seguimiento y verificación de emisiones de gases de efecto invernadero en las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

[RD 1370/2006] Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos

de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012 (BOE nº 282 de 25/11/06).

[RD 1866/2004] Real Decreto 1866/2004, de 6 de Septiembre, por el que se aprueba el Plan nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007.

[RD 777/2006] Real Decreto 777/2006, de 23 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión, 2005/2007 (BOE nº 150 de 24/06/06).

[RDL 5/2004] Real Decreto Ley 5/2004, de 27 de Agosto, por el que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, BOE nº 208 de 28-08-04.

[Reglamento 1031/2010] Reglamento 1031/2010 de la Comisión de 12 de noviembre de 2010 sobre el calendario, la gestión y otros aspectos de las subastas de los derechos de emisión de gases de efecto invernadero con arreglo a la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad L 302/1.

Otros

[Directiva 2003/35/CE] Directiva 2003/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de mayo de 2003, por la que se establecen medidas para la participación del público en la elaboración de determinados planes y programas relacionados con el medio ambiente y por la que se modifican, en lo que se refiere a la participación del público y el acceso a la justicia, las Directivas 85/337/CEE y 96/61/CE del Consejo.

[Directiva 2003/4/CE] Directiva 2003/4/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 28 de enero de 2003, relativa al acceso del público a la información medioambiental y por la que se deroga la Directiva 90/313/CEE del Consejo.

[Ley 27/2006] Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de accesos a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE).

[Ley 42/2007] Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

[RD 1130/2008] Real Decreto 1130/2008, de 4 de julio, por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

[RD 256/2003] Real Decreto 256/2003, de 28 de febrero, por el que se fijan los métodos de toma de muestras y de análisis para el control oficial del contenido máximo de plomo, cadmio, mercurio y 3-monocloropropano-1,2-diol en los productos alimenticios.

[RD 457/2007] Real Decreto 475/2007, de 13 de abril, por el que se aprueba la Clasificación Nacional de Actividades Económicas 2009 (CNAE-2009).

[RD 956/2008] Real Decreto 956/2008 de 6 de junio (Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08 y las Normas UNE, concordantes con la Norma europea EN 197).

Anexo II

Resultados del modelo

CASO 1A.1. EMISIONES AUTORIZADAS REALES, SIN NUEVO CEMENTO Y $C_D = 0$

	x_1	x_2	x_3	x_4	Consumo	P_0	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	587923,413	1000000	412076,587
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	7500	7500	0
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	170587,632	300000	129412,368
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	710781,8	1200000	489218,2
Demanda Clínker	1				151550	151550	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	6679357,56		
Valores variables X_j	151550	0	0	834674,328			

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]Caso 1a1

Informe creado: 14/06/2012 11:26:43

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$F\$10	FO Consumo	0	6679357,557

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$12	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$12	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$12	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$12	Valores variables Xj x4	0	834674,3281

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$F\$2	Emisiones Consumo	587923,4134	\$F\$2<=\$G\$2	Opcional	412076,5866
\$F\$3	Combustibles Consumo	7500	\$F\$3<=\$G\$3	Obligatorio	0
\$F\$4	Materia prima Consumo	170587,632	\$F\$4<=\$G\$4	Opcional	129412,368
\$F\$5	Capacidad Consumo	710781,7999	\$F\$5<=\$G\$5	Opcional	489218,2001
\$F\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$F\$6>=\$G\$6	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]Caso 1a1

Informe creado: 14/06/2012 11:26:43

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$12	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,03486563	1E+30
\$C\$12	Valores variables Xj x2	0	-6,675388967	4,28	6,675388967	1E+30
\$D\$12	Valores variables Xj x3	0	-7,640169731	2,2	7,640169731	1E+30
\$E\$12	Valores variables Xj x4	834674,3281	0	7,73	1E+30	4,71007984

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$F\$2	Emisiones Consumo	587923,4134	0	1000000	1E+30	412076,5866
\$F\$3	Combustibles Consumo	7500	1093,352192	7500	5162,347276	5901,1475
\$F\$4	Materia prima Consumo	170587,632	0	300000	1E+30	129412,368
\$F\$5	Capacidad Consumo	710781,7999	0	1200000	1E+30	489218,2001
\$F\$6	Demanda Clinker Consumo	151550	-10,03486563	151550	559350,4739	151550

CASO 1A.2. EMISIONES AUTORIZADAS REALES, SIN NUEVO CEMENTO Y $C_b = \text{BENEFICIO}$

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_d	Consumo	P_o	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	1	1000000	1000000	0
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	0	7500	7500	0
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	0	170587,632	300000	129412,368
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	0	710781,8	1200000	489218,2
Demanda Clínter	1					151550	151550	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	7,24	9662792,04		
Valores variables X_j	151550	0	0	834674,328	412076,587			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 1A2

Informe creado: 14/06/2012 17:58:30

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$G\$9	Función Objetivo Consumo	9662792,043	9662792,043

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	151550
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$11	Valores variables Xj x4	834674,3281	834674,3281
\$F\$11	Valores variables Xj xd	412076,5866	412076,5866

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$G\$2	Emisiones Consumo	1000000	\$G\$2<=\$H\$2	Obligatorio	0
\$G\$3	Combustibles Consumo	7500	\$G\$3<=\$H\$3	Obligatorio	0
\$G\$4	Materia prima Consumo	170587,632	\$G\$4<=\$H\$4	Opcional	129412,368
\$G\$5	Capacidad Consumo	710781,7999	\$G\$5<=\$H\$5	Opcional	489218,2001
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$G\$6>=\$H\$6	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 1A2

Informe creado: 14/06/2012 17:58:30

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,07367551	1E+30
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	-6,71245531	4,280000001	6,71245531	1E+30
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	-7,64354908	2,200000001	7,64354908	1E+30
\$E\$11	Valores variables Xj x4	834674,3281	0	7,73	1E+30	3,723022
\$F\$11	Valores variables Xj xd	412076,5866	0	7,24	6,726934682	7,24

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$G\$2	Emisiones Consumo	1000000	7,24	1000000	1E+30	412076,5866
\$G\$3	Combustibles Consumo	7500	526,5943423	7500	5162,347276	5901,1475
\$G\$4	Materia prima Consumo	170587,632	0	300000	1E+30	129412,368
\$G\$5	Capacidad Consumo	710781,7999	0	1200000	1E+30	489218,2001
\$G\$6	Demanda Clinker Consumo	151550	-10,07367551	151550	559350,4739	151550

CASO 1B.1. EMISIONES AUTORIZADAS REALES, CON NUEVO CEMENTO Y $C_D = 0$

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Consumo	P_o	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	0,2807	587844,098	1000000	412155,902
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	0,00359	7500	7500	0
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	0,0816	170575,411	300000	129424,589
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	0,34	710730,88	1200000	489269,12
Demanda Clínter	1					151550	151550	0
Demanda nuevo cemento					1	240000	240000	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	4	6697325,31		
Valores variables X_j	151550	0	0	712807,284	240000			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 1B1

Informe creado: 14/06/2012 18:22:58

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$G\$9	Función Objetivo Consumo	0	6697325,308

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$11	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$11	Valores variables Xj x4	0	712807,2843
\$F\$11	Valores variables Xj x5	0	240000

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$G\$2	Emissiones Consumo	587844,098	\$G\$2<=\$H\$2	Opcional	412155,902
\$G\$3	Combustibles Consumo	7500	\$G\$3<=\$H\$3	Obligatorio	0
\$G\$4	Materia prima Consumo	170575,4113	\$G\$4<=\$H\$4	Opcional	129424,5887
\$G\$5	Capacidad Consumo	710730,8805	\$G\$5<=\$H\$5	Opcional	489269,1195
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$G\$6>=\$H\$6	Obligatorio	0
\$G\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	\$G\$7<=\$H\$7	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 1B1

Informe creado: 14/06/2012 18:22:58

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,03486563	1E+30
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	-6,675388967	4,28	6,675388967	1E+30
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	-7,640169731	2,2	7,640169731	1E+30
\$E\$11	Valores variables Xj x4	712807,2843	0	7,73	0,147437326	4,71007984
\$F\$11	Valores variables Xj x5	240000	0	4	1E+30	0,074865629

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$G\$2	Emisiones Consumo	587844,098	0	1000000	1E+30	412155,902
\$G\$3	Combustibles Consumo	7500	1093,352192	7500	5162,88459	5039,5475
\$G\$4	Materia prima Consumo	170575,4113	0	300000	1E+30	129424,5887
\$G\$5	Capacidad Consumo	710730,8805	0	1200000	1E+30	489269,1195
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	-10,03486563	151550	477682,2275	151550
\$G\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	0,074865629	240000	1403773,677	240000

CASO 1B.2. EMISIONES AUTORIZADAS REALES, CON NUEVO CEMENTO Y C_D = BENEFICIO

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_d	Consumo	P_0	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	0,2807	1	1000000	1000000	0
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	0,00359	0	7500	7500	0
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	0,0816	0	170575,411	300000	129424,589
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	0,34	0	710730,88	1200000	489269,12
Demanda Clínter	1						151550	151550	0
Demanda nuevo cemento					1		240000	240000	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	4	7,24	9681334,04		
Valores variables X_j	151550	0	0	712807,284	240000	412155,902			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 1B2

Informe creado: 14/06/2012 18:36:14

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$H\$9	Función Objetivo Consumo	0	9681334,038

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$11	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$11	Valores variables Xj x4	0	712807,2843
\$F\$11	Valores variables Xj x5	0	240000
\$G\$11	Valores variables Xj xd	0	412155,902

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$H\$2	Emisiones Consumo	1000000	\$H\$2<=\$I\$2	Obligatorio	0
\$H\$3	Combustibles Consumo	7500	\$H\$3<=\$I\$3	Obligatorio	0
\$H\$4	Materia prima Consumo	170575,4113	\$H\$4<=\$I\$4	Opcional	129424,5887
\$H\$5	Capacidad Consumo	710730,8805	\$H\$5<=\$I\$5	Opcional	489269,1195
\$H\$6	Demanda Clínter Consumo	151550	\$H\$6>=\$I\$6	Obligatorio	0
\$H\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	\$H\$7<=\$I\$7	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 1B2

Informe creado: 14/06/2012 18:36:14

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,07367551	1E+30
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	-6,71245531	4,28	6,71245531	1E+30
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	-7,643549081	2,2	7,643549081	1E+30
\$E\$11	Valores variables Xj x4	712807,2843	0	7,73	0,152149376	3,723022
\$F\$11	Valores variables Xj x5	240000	0	4	1E+30	0,077258311
\$G\$11	Valores variables Xj xd	412155,902	0	7,24	6,726934682	7,24

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$H\$2	Emisiones Consumo	1000000	7,24	1000000	1E+30	412155,902
\$H\$3	Combustibles Consumo	7500	526,5943423	7500	5162,88459	5039,5475
\$H\$4	Materia prima Consumo	170575,4113	0	300000	1E+30	129424,5887
\$H\$5	Capacidad Consumo	710730,8805	0	1200000	1E+30	489269,1195
\$H\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	-10,07367551	151550	477682,2275	151550
\$H\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	0,077258311	240000	1403773,677	240000

CASO 2A.1. EMISIONES AUTORIZADAS REDUCIDAS, SIN NUEVO CEMENTO Y $C_b = 0$

	x_1	x_2	x_3	x_4	Consumo	P_o	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	500000	500000	0
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	6376,82983	7500	1123,170174
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	145042,262	300000	154957,7378
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	604342,759	1200000	595657,2407
Demanda Clínker	1				151550	151550	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	5451336,98		
Valores variables X_j	151550	0	0	675810,089			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 2A1

Informe creado: 14/06/2012 18:51:16

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$F\$10	FO Consumo	0	5451336,984

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$12	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$12	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$12	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$12	Valores variables Xj x4	0	675810,0885

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$F\$2	Emisiones Consumo	500000	\$F\$2<=\$G\$2	Obligatorio	0
\$F\$3	Combustibles Consumo	6376,829826	\$F\$3<=\$G\$3	Opcional	1123,170174
\$F\$4	Materia prima Consumo	145042,2622	\$F\$4<=\$G\$4	Opcional	154957,7378
\$F\$5	Capacidad Consumo	604342,7593	\$F\$5<=\$G\$5	Opcional	595657,2407
\$F\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$F\$6>=\$G\$6	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 2A1

Informe creado: 14/06/2012 18:51:16

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$12	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,10973512	1E+30
\$C\$12	Valores variables Xj x2	0	-6,746894932	4,28	6,746894932	1E+30
\$D\$12	Valores variables Xj x3	0	-7,646688951	2,2	7,646688951	1E+30
\$E\$12	Valores variables Xj x4	675810,0885	0	7,73	1E+30	4,729663078

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$F\$2	Emissiones Consumo	500000	13,96693468	500000	87923,41341	374027,0935
\$F\$3	Combustibles Consumo	6376,829826	0	7500	1E+30	1123,170174
\$F\$4	Materia prima Consumo	145042,2622	0	300000	1E+30	154957,7378
\$F\$5	Capacidad Consumo	604342,7593	0	1200000	1E+30	595657,2407
\$F\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	-10,10973512	151550	449968,232	151550

CASO 2A.2. EMISIONES AUTORIZADAS REDUCIDAS, SIN NUEVO CEMENTO Y C_D = BENEFICIO

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_d	Consumo	P_o	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	1	500000	500000	0
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	0	6376,82983	7500	1123,17017
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	0	145042,262	300000	154957,738
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	0	604342,759	1200000	595657,241
Demanda Clínter	1					151550	151550	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	7,24	5451336,98		
Valores variables X_j	151550	0	0	675810,089	0			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CAS0 2A2

Informe creado: 14/06/2012 19:01:31

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$G\$9	Función Objetivo Consumo	0	5451336,984

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$11	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$11	Valores variables Xj x4	0	675810,0885
\$F\$11	Valores variables Xj xd	0	0

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$G\$2	Emisiones Consumo	500000	\$G\$2<=\$H\$2	Obligatorio	0
\$G\$3	Combustibles Consumo	6376,829826	\$G\$3<=\$H\$3	Opcional	1123,170174
\$G\$4	Materia prima Consumo	145042,2622	\$G\$4<=\$H\$4	Opcional	154957,7378
\$G\$5	Capacidad Consumo	604342,7593	\$G\$5<=\$H\$5	Opcional	595657,2407
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$G\$6>=\$H\$6	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CAS0 2A2

Informe creado: 14/06/2012 19:01:31

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,10973512	1E+30
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	-6,746894932	4,28	6,746894932	1E+30
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	-7,646688951	2,2	7,646688951	1E+30
\$E\$11	Valores variables Xj x4	675810,0885	0	7,73	1E+30	3,723022
\$F\$11	Valores variables Xj xd	0	-6,726934682	7,24	6,726934682	1E+30

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$G\$2	Emisiones Consumo	500000	13,96693468	500000	87923,41341	374027,0935
\$G\$3	Combustibles Consumo	6376,829826	0	7500	1E+30	1123,170174
\$G\$4	Materia prima Consumo	145042,2622	0	300000	1E+30	154957,7378
\$G\$5	Capacidad Consumo	604342,7593	0	1200000	1E+30	595657,2407
\$G\$6	Demanda Clinker Consumo	151550	-10,10973512	151550	449968,232	151550

CASO 2B.1. EMISIONES AUTORIZADAS REDUCIDAS, CON NUEVO CEMENTO Y $C_D = 0$

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Consumo	P_o	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	0,2807	500000	500000	0
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	0,00359	6377,84303	7500	1122,15697
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	0,0816	145053,086	300000	154946,914
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	0,34	604387,858	1200000	595612,142
Demanda Clíinker	1					151550	151550	0
Demanda nuevo cemento					1	240000	240000	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	4	5470412,53		
Valores variables X_j	151550	0	0	554086,356	240000			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CAS02B1

Informe creado: 14/06/2012 19:08:06

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$G\$9	Función Objetivo Consumo	0	5470412,529

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$11	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$11	Valores variables Xj x4	0	554086,3556
\$F\$11	Valores variables Xj x5	0	240000

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$G\$2	Emisiones Consumo	500000	\$G\$2<=\$H\$2	Obligatorio	0
\$G\$3	Combustibles Consumo	6377,843034	\$G\$3<=\$H\$3	Opcional	1122,156966
\$G\$4	Materia prima Consumo	145053,086	\$G\$4<=\$H\$4	Opcional	154946,914
\$G\$5	Capacidad Consumo	604387,8582	\$G\$5<=\$H\$5	Opcional	595612,1418
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$G\$6>=\$H\$6	Obligatorio	0
\$G\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	\$G\$7<=\$H\$7	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CAS02B1

Informe creado: 14/06/2012 19:08:06

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coefficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,10973512	1E+30
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	-6,746894932	4,28	6,746894932	1E+30
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	-7,646688951	2,2	7,646688951	1E+30
\$E\$11	Valores variables Xj x4	554086,3556	0	7,73	0,156711792	4,729663078
\$F\$11	Valores variables Xj x5	240000	0	4	1E+30	0,079481435

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$G\$2	Emisiones Consumo	500000	13,96693468	500000	87844,098	306659,0935
\$G\$3	Combustibles Consumo	6377,843034	0	7500	1E+30	1122,156966
\$G\$4	Materia prima Consumo	145053,086	0	300000	1E+30	154946,914
\$G\$5	Capacidad Consumo	604387,8582	0	1200000	1E+30	595612,1418
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	-10,10973512	151550	368922,0715	151550
\$G\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	0,079481435	240000	1092479,849	240000

CASO 2B.2. EMISIONES AUTORIZADAS REDUCIDAS, CON NUEVO CEMENTO Y C_D = BENEFICIO

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_d	Consumo	P_0	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	0,2807	1	500000	500000	0
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	0,00359	0	6377,84303	7500	1122,15697
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	0,0816	0	145053,086	300000	154946,914
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	0,34	0	604387,858	1200000	595612,142
Demanda Clínter	1						151550	151550	0
Demanda nuevo cemento					1		240000	240000	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	4	7,24	5470412,53		
Valores variables X_j	151550	0	0	554086,356	240000	0			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 2B2

Informe creado: 14/06/2012 19:12:46

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$H\$9	Función Objetivo Consumo	0	5470412,529

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$11	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$11	Valores variables Xj x4	0	554086,3556
\$F\$11	Valores variables Xj x5	0	240000
\$G\$11	Valores variables Xj xd	0	0

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$H\$2	Emisiones Consumo	500000	\$H\$2<=\$I\$2	Obligatorio	0
\$H\$3	Combustibles Consumo	6377,843034	\$H\$3<=\$I\$3	Opcional	1122,156966
\$H\$4	Materia prima Consumo	145053,086	\$H\$4<=\$I\$4	Opcional	154946,914
\$H\$5	Capacidad Consumo	604387,8582	\$H\$5<=\$I\$5	Opcional	595612,1418
\$H\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$H\$6>=\$I\$6	Obligatorio	0
\$H\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	\$H\$7<=\$I\$7	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER_14_06_2012.xls]CASO 2B2

Informe creado: 14/06/2012 19:12:46

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,10973512	1E+30
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	-6,746894932	4,28	6,746894932	1E+30
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	-7,646688951	2,2	7,646688951	1E+30
\$E\$11	Valores variables Xj x4	554086,3556	0	7,73	0,156711792	3,723022
\$F\$11	Valores variables Xj x5	240000	0	4	1E+30	0,079481435
\$G\$11	Valores variables Xj xd	0	-6,726934682	7,24	6,726934682	1E+30

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$H\$2	Emissiones Consumo	500000	13,96693468	500000	87844,098	306659,0935
\$H\$3	Combustibles Consumo	6377,843034	0	7500	1E+30	1122,156966
\$H\$4	Materia prima Consumo	145053,086	0	300000	1E+30	154946,914
\$H\$5	Capacidad Consumo	604387,8582	0	1200000	1E+30	595612,1418
\$H\$6	Demanda Clínker Consumo	151550	-10,10973512	151550	368922,0715	151550
\$H\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	0,079481435	240000	1092479,849	240000

CASO 3A.1. EMISIONES AUTORIZADAS REDUCIDAS, SIN NUEVO CEMENTO Y $C_D = 0$

	x_1	x_2	x_3	x_4	Consumo	P_0	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	331203,731	500000	168796,2689
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	4220,55623	7500	3279,443769
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	96000	300000	204000
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	400000	400000	0
Demanda Clínter	1				151550	151550	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	3093770,52		
Valores variables X_i	151550	0	0	370820,896			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER CASO 3_08_07_2012.xls]CASO 3A1

Informe creado: 09/07/2012 8:30:21

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$F\$10	FO Consumo	0	3093770,522

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$12	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$12	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$12	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$12	Valores variables Xj x4	0	370820,8955

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$F\$2	Emisiones Consumo	331203,7311	\$F\$2<=\$G\$2	Opcional	168796,2689
\$F\$3	Combustibles Consumo	4220,556231	\$F\$3<=\$G\$3	Opcional	3279,443769
\$F\$4	Materia prima Consumo	96000	\$F\$4<=\$G\$4	Opcional	204000
\$F\$5	Capacidad almacenaje Consumo	400000	\$F\$5<=\$G\$5	Obligatorio	0
\$F\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$F\$6>=\$G\$6	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER CASO 3_08_07_2012.xls]CASO 3A1

Informe creado: 09/07/2012 8:30:21

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$12	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,03731343	1E+30
\$C\$12	Valores variables Xj x2	0	-6,680447761	4,28	6,680447761	1E+30
\$D\$12	Valores variables Xj x3	0	-7,606716418	2,2	7,606716418	1E+30
\$E\$12	Valores variables Xj x4	370820,8955	0	7,73	1E+30	4,711473684

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$F\$2	Emisiones Consumo	331203,7311	0	500000	1E+30	168796,2689
\$F\$3	Combustibles Consumo	4220,556231	0	7500	1E+30	3279,443769
\$F\$4	Materia prima Consumo	96000	0	300000	1E+30	204000
\$F\$5	Capacidad almacenaje Consumo	400000	11,53731343	400000	204342,7593	248450
\$F\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	-10,03731343	151550	248450	151550

CASO 3A.2. EMISIONES AUTORIZADAS REDUCIDAS, SIN NUEVO CEMENTO Y $C_D = \text{BENEFICIO}$

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_d	Consumo	P_o	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	1	500000	500000	0
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	0	4220,55623	7500	3279,44377
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	0	96000	300000	204000
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	0	400000	400000	0
Demanda Clínter	1					151550	151550	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	7,24	4315855,51		
Valores variables X_j	151550	0	0	370820,896	168796,269			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER CASO 3_08_07_2012.xls]CASO 3A2

Informe creado: 09/07/2012 8:35:14

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$G\$9	Función Objetivo Consumo	0	4315855,509

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$11	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$11	Valores variables Xj x4	0	370820,8955
\$F\$11	Valores variables Xj xd	0	168796,2689

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$G\$2	Emissiones Consumo	500000	\$G\$2<=\$H\$2	Obligatorio	0
\$G\$3	Combustibles Consumo	4220,556231	\$G\$3<=\$H\$3	Opcional	3279,443769
\$G\$4	Materia prima Consumo	96000	\$G\$4<=\$H\$4	Opcional	204000
\$G\$5	Capacidad Consumo	400000	\$G\$5<=\$H\$5	Obligatorio	0
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$G\$6>=\$H\$6	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER CASO 3_08_07_2012.xls]CASO 3A2

Informe creado: 09/07/2012 8:35:14

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,07485445	1E+30
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	-6,714891791	4,28	6,714891791	1E+30
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	-7,627436866	2,2	7,627436866	1E+30
\$E\$11	Valores variables Xj x4	370820,8955	0	7,73	1E+30	3,723022
\$F\$11	Valores variables Xj xd	168796,2689	0	7,24	6,726934682	7,24

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$G\$2	Emisiones Consumo	500000	7,24	500000	1E+30	168796,2689
\$G\$3	Combustibles Consumo	4220,556231	0	7500	1E+30	3279,443769
\$G\$4	Materia prima Consumo	96000	0	300000	1E+30	204000
\$G\$5	Capacidad Consumo	400000	5,556749254	400000	204342,7593	248450
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	-10,07485445	151550	248450	151550

CASO 3B.1. EMISIONES AUTORIZADAS REDUCIDAS, CON NUEVO CEMENTO Y $C_b = 0$

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Consumo	P_o	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	0,2807	331166,477	500000	168833,523
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	0,00359	4221,09354	7500	3278,90646
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	0,0816	96000	300000	204000
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	0,34	400000	400000	0
Demanda Clínker	1					151550	151550	0
Demanda nuevo cemento					1	240000	240000	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	4	3112325,75		
Valores variables x_j	151550	0	0	249029,851	240000			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER CASO 3_08_07_2012.xls]CAS03B1

Informe creado: 09/07/2012 8:40:39

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$G\$9	Función Objetivo Consumo	0	3112325,746

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$11	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$11	Valores variables Xj x4	0	249029,8507
\$F\$11	Valores variables Xj x5	0	240000

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$G\$2	Emisiones Consumo	331166,4774	\$G\$2<=\$H\$2	Opcional	168833,5226
\$G\$3	Combustibles Consumo	4221,093545	\$G\$3<=\$H\$3	Opcional	3278,906455
\$G\$4	Materia prima Consumo	96000	\$G\$4<=\$H\$4	Opcional	204000
\$G\$5	Capacidad Consumo	400000	\$G\$5<=\$H\$5	Obligatorio	0
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	\$G\$6>=\$H\$6	Obligatorio	0
\$G\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	\$G\$7<=\$H\$7	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER CASO 3_08_07_2012.xls]CAS03B1

Informe creado: 09/07/2012 8:40:40

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coefficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,03731343	1E+30
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	-6,680447761	4,28	6,680447761	1E+30
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	-7,606716418	2,2	7,606716418	1E+30
\$E\$11	Valores variables Xj x4	249029,8507	0	7,73	0,152352941	4,711473684
\$F\$11	Valores variables Xj x5	240000	0	4	1E+30	0,077313433

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$G\$2	Emisiones Consumo	331166,4774	0	500000	1E+30	168833,5226
\$G\$3	Combustibles Consumo	4221,093545	0	7500	1E+30	3278,906455
\$G\$4	Materia prima Consumo	96000	0	300000	1E+30	204000
\$G\$5	Capacidad Consumo	400000	11,53731343	400000	204387,8582	166850
\$G\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	-10,03731343	151550	166850	151550
\$G\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	0,077313433	240000	490735,2941	240000

CASO 3B.2. EMISIONES AUTORIZADAS REDUCIDAS, CON NUEVO CEMENTO Y C_D = BENEFICIO

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_d	Consumo	P_o	Excedente/Déficit
Emisiones	0,83123	0,7895	0,705	0,55345	0,2807	1	500000	500000	0
Combustibles	0,01055	0,01002	0,009	0,00707	0,00359	0	4221,09354	7500	3278,90646
Materia prima	0,24	0,228	0,204	0,1608	0,0816	0	96000	300000	204000
Capacidad	1	0,95	0,85	0,67	0,34	0	400000	400000	0
Demanda Clíinker	1						151550	151550	0
Demanda nuevo cemento					1		240000	240000	0
Función Objetivo	1,5	4,28	2,2	7,73	4	7,24	4334680,45		
Valores variables X_j	151550	0	0	249029,851	240000	168833,523			

Microsoft Excel 11.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER CASO 3_08_07_2012.xls]CASO 3B2

Informe creado: 09/07/2012 8:45:54

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$H\$9	Función Objetivo Consumo	0	4334680,45

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$B\$11	Valores variables Xj x1	0	151550
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	0
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	0
\$E\$11	Valores variables Xj x4	0	249029,8507
\$F\$11	Valores variables Xj x5	0	240000
\$G\$11	Valores variables Xj xd	0	168833,5226

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	fórmula	Estado	Divergencia
\$H\$2	Emissiones Consumo	500000	\$H\$2<=\$I\$2	Obligatorio	0
\$H\$3	Combustibles Consumo	4221,093545	\$H\$3<=\$I\$3	Opcional	3278,906455
\$H\$4	Materia prima Consumo	96000	\$H\$4<=\$I\$4	Opcional	204000
\$H\$5	Capacidad Consumo	400000	\$H\$5<=\$I\$5	Obligatorio	0
\$H\$6	Demanda Clínter Consumo	151550	\$H\$6>=\$I\$6	Obligatorio	0
\$H\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	\$H\$7<=\$I\$7	Obligatorio	0

Microsoft Excel 11.0 Informe de sensibilidad

Hoja de cálculo: [SOLUCION SOLVER CASO 3_08_07_2012.xls]CASO 3B2

Informe creado: 09/07/2012 8:45:54

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor Igual	Gradiente reducido	Coficiente objetivo	Aumento permisible	Aumento permisible
\$B\$11	Valores variables Xj x1	151550	0	1,5	10,07485445	1E+30
\$C\$11	Valores variables Xj x2	0	-6,714891791	4,28	6,714891791	1E+30
\$D\$11	Valores variables Xj x3	0	-7,627436866	2,2	7,627436866	1E+30
\$E\$11	Valores variables Xj x4	249029,8507	0	7,73	0,154567529	3,723022
\$F\$11	Valores variables Xj x5	240000	0	4	1E+30	0,078437254
\$G\$11	Valores variables Xj xd	168833,5226	0	7,24	6,726934682	7,24

Restricciones

Celda	Nombre	Valor Igual	Sombra precio	Restricción lado derecho	Aumento permisible	Aumento permisible
\$H\$2	Emissiones Consumo	500000	7,24	500000	1E+30	168833,5226
\$H\$3	Combustibles Consumo	4221,093545	0	7500	1E+30	3278,906455
\$H\$4	Materia prima Consumo	96000	0	300000	1E+30	204000
\$H\$5	Capacidad Consumo	400000	5,556749254	400000	204387,8582	166850
\$H\$6	Demanda Clíinker Consumo	151550	-10,07485445	151550	166850	151550
\$H\$7	Demanda nuevo cemento Consumo	240000	0,078437254	240000	490735,2941	240000

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- [Adaska y Taubert, 2008]** Adaska, W.S. y Taubert, D.H. (2008): "Beneficial uses of cement kiln dust", *Cement Industry Technical Conference Record*, pp. 210–228. (Presented at 2008 IEEE/PCA 50th Cement Industry Technical Conf., Miami, FL, May 19–22, 2008).
- [Águila, 2002]** Águila, I. (2002): *Exploración técnico-económica del empleo de residuos para la producción de cemento puzolánico*, Ejercicio de Evaluación de Tesis Doctoral, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela.
- [Aitcin, 2000]** Aitcin, P.C. (2000): "Cements of yesterday and today, Concrete of tomorrow", *Cement and Concrete Research*, Nº 20, pp. 1349–1359.
- [Alarcón y Martínez, 2008]** Alarcón-Barrio, A. y Martínez-Lebrusant, R. (2008): "Diseño de un plan de muestreo para realizar el descuento de la biomasa contenida en los neumáticos fuera de uso", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 921, pp. 60–67.
- [Alberola et al., 2008]** Alberola, E.; Chevallier, J. y Cheze, B. (2008): "The EU Emissions Trading Scheme: the Effects of Industrial Production and CO₂ Emissions on Carbon Prices," *Economie Internationale*, Nº 116, pp. 93–126.
- [Alcántara, 2009]** Alcántara-Escolano, V. (2009): "Consumo energético y emisiones de CO₂ en la industria española. Una primera aproximación a la situación actual", *Economía Industrial*, Nº 371, pp. 49–57.
- [Ali et al., 2011]** Ali, M.; Saidur, R. y Hossain, M. (2011): "A review on emission analysis in cement industries", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Nº 15, pp. 2252–2261.
- [Alsop et al., 2007]** Alsop, P.A.; Chen, H. y Tseng, H. (2007): *Cement Plant Operations Handbook: For Dry Process Plants*, International Cement Review, U.K.
- [Álvarez y Reinoso, 2009]** Álvarez-Clifford, F. y Reinoso, H. (2009): "An Optimization Model for the Production Planning of a Steel Company", *Revista Ingeniería Industrial*, Año 8, Nº 1.
- [Ammar et al., 2011]** Ammar, Y.; Joyce, S.; Norman, R.; Wang, Y. y Roskilly, A.P. (2011): "Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK", *Applied Energy*, Vol. 89, Nº 1, pp. 3–20. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.003>.
- [Ammenberg et al., 2011]** Ammenberg, J.; Feiz, R.; Helgstrand, A.; Eklund, M. y Baas, L. (2011): "Industrial symbiosis for improving the CO₂-performance of cement", Final report of the CEMEX-Linköping University industrial ecology project.
- [Anand et al., 2006]** Anand, S.; Vrat, P. y Dahiya, R. (2006): "Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation", *Journal of Environmental Management*, Vol. 79, Nº 4, pp. 383–398.
- [Arnal, 2010]** Arnal-Mañas, A.J. (2010): "Diseño de una instalación para la producción de 500.000 tn/año de cemento Portland", Proyecto Final de Carrera, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza.
- [Arundel et al., 2006]** Arundel, A.; Kemp, R. y Parto, S. (2006): "Indicators for environmental innovation: what and how to measure", *International handbook on environment and technology management*, pp. 324–339 (edited by Marinova D., Annandale D. and Phillimore J., Edward Elgar, Cheltenham).
- [ASEGRE, 2010]** Asociación de Empresas Gestoras de Residuos y Recursos Especiales (2010): *Protocolo para la cuantificación de emisiones de GEI en actividades de gestión de residuos*, Asegre. Disponible en web: http://hcredos.asegre.com/DOCUMENTACION_JORNADA_HC_26_MAYO_2011/EpE%20Protocol/Documento%20Protocolo.pdf

- [Avetisyan, 2009]** Avetisyan, H. (2009): "Life Cycle Cost Minimization for Cement Production under Various Constraints", *World of Coal Ash Conference* (May 4-7, 2009 in Lexington, KY, USA). Disponible en web: <http://www.flyash.info/2009/084-avetisyan2009.pdf> [última consulta: 21 de enero de 2012]
- [Baena y Pueyo, 2007]** Baena, A. y Pueyo, A. (2007): "Competitividad y cambio climático. Nuevos retos para la industria española", *Colección EOI (Escuela de organización Industrial) Medio Ambiente*, Fundación EOI.
- [Baeza et al., 2008]** Baeza, R.; Martín, I.; Rilo, R.; Yáñez, M. y Wittum, L. (2008): *Assessment of the impact of the 2013-2020 ETS proposal on the European cement industry*, Boston Consulting Group.
- [Baeza et al., 2009]** Baeza, R.; Martín, I.; Rilo, R.; Yáñez, M. y Wittum, L. (2009): "Evaluación del impacto de la subasta de derechos de emisión de CO₂ en el periodo 2013-2020 en el sector cementero europeo", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 926, pp. 42-49.
- [Barker et al., 2009]** Barker, D.J.; Turner, S.A.; Napier-Moore, P.A.; Clarck, M. y Davison, J.E. (2009): "CO₂ capture in the cement industry", *Energy Procedia*, Nº 1, pp. 87-94.
- [Batra et al., 2005]** Batra, V.K.; Mittal, P.K.; Kumar, K. y Chhanangani, P.N. (2005): *Modern Processing Techniques to minimise cost in cement industry*, Holtec Consulting Private Limited, Gurgaon. Disponible en web: http://www.holtecnet.com/web/content/referencas/TechnicalPapers/p_2005_2.pdf.
- [Bauer y Hoenig, 2009]** Bauer, K. y Hoenig, V. (2009): "Energy efficiency of cement plants". *Proceedings of the 6th International VDZ Congress, Process Technology of Cement Manufacturing*, Düsseldorf.
- [Beckers, 2010]** Beckers, G. (2010): "Combustibles secundarios, energía para la industria del cemento. Preparación de muestras altamente heterogéneas para el control de calidad", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 936, pp. 26-28.
- [Benjaafar et al., 2010]** Benjaafar, S.; Li, Y. y Daskin, M. (2010): "Carbon Footprint and the Management of Supply Chains: Insights from Simple Models", Working paper, University of Minnesota, USA.
- [Biello, 2008]** Biello, D. (2008): "Cement from CO₂: a concrete cure for global warming", *Scientific American*. Disponible en web: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm>.
- [Blok et al., 2012]** Blok, K.; Höhne, N.; Van der Leun, K. y Harrison, N. (2012): "Bridging the greenhouse gas emissions gap", *Nature Climate Change*, Nº 2, pp. 471-474. DOI:10.1038/nclimate1602.
- [BOCYL, 2011]** Boletín Oficial de Castilla y León (2011): Resolución de 4 de noviembre de 2011, de la Dirección General de Calidad y Sostenibilidad Ambiental, por la que se hace pública la Orden por la que se autoriza como modificación no sustancial el proyecto de utilización de escombros varios y balasto de vías férreas como materia prima en la fábrica de cemento y clínker ubicada en el término municipal de Venta de Baños, Palencia, de la empresa Cementos Pórtland Valderrivas S.A. y se modifica la Orden de 21 de septiembre de 2010, por la que se concede Autorización Ambiental a esa empresa.
- [Bode, 2006]** Bode, S. (2006): "Multi-period emissions trading in the electricity sector-winners and losers", *Energy Policy*, Vol. 34, Nº 6, pp. 680-691.
- [Boesch et al., 2009]** Boesch, M.E.; Koehler, A. y Hellweg, S. (2009): "Model for cradle-to-gate life cycle assessment of clínker production", *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, Nº 19, pp. 7578-7583.
- [Boesch y Hellweg, 2010]** Boesch, M.E. y Hellweg, S. (2010): "Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment", *Environmental Science Technology*, Vol. 44, Nº 23, p.p. 9143-9149.
- [Bolwerk, 2012]** Bolwerk, R. (2012): "Co-Processing of Waste and Energy Efficiency by Cement Plants", *Parallel session: Innovative energy efficiency examples of different industrial sectors*. Disponible en web: <http://www.scribd.com/doc/85332341/Co->

Processing-of-Waste-and-Energy-Efficiency-by-Cement-Plants.

[Bonenti et al., 2012] Bonenti, F.; Oggioni, G.; Allevi, E. y Marangoni, G. (2012): "Evaluating the impacts of the EU-ETS on prices, investments and profits of the Italian electricity market", *SSRN Working Paper Series*, Rochester. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/919473227?accountid=14549/>.

[Borralleras, 2010] Borralleras, P. (2010): "Reutilización y recuperación de residuos en Europa en el sector del cemento y del hormigón", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 938, pp. 4-7.

[Borrego et al., 2005] Borrego, C.; Martins, H. y Lopes, M. (2005): "Portuguese industry and the EU trade emissions directive: development and analysis of CO₂ emission scenarios", *Environmental Science & Policy*, Vol. 8, Nº 1, pp. 75-84. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2004.08.008>.

[Bosoaga et al., 2009] Bosoaga, A.; Masek, O. y Oakey, J.E. (2009): "CO₂ Capture Technologies for Cement Industry", *Energy Procedia*, Nº 1, pp. 133-140.

[Brewer, 2005] Brewer, T.L. (2005): "Business perspectives on the EU emissions trading scheme", *Climate Policy*, Vol. 5, Nº 1, pp. 137-144.

[Cagiao et al., 2010] Cagiao, J.; Gómez, B.; Doménech, J.L.; Gutiérrez, S.; Gutiérrez, H.; Martínez, F. y González, M.B. (2010): *Huella Ecológica del Cemento. Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción*, Laboratorio de Ingeniería Sostenible.

[Capros et al., 2008] Capros, P.; Mantzos, L.; Papandreou, V. y Tasios, N. (2008): *Model-based analysis of the 2008 EU policy package on climate change and renewables*, E3MLab, National Technical University, Athens.

[Caro et al., 2011] Caro, F.; Corbett, C.; Tan, T. y Zuidwijk, R.A. (2011): "Carbon-Optimal and Carbon-Neutral Supply Chains", *Beta Working Paper series 358*, Eindhoven, Holland, Octubre 2011. Disponible en web:

http://cms.ieis.tue.nl/Beta/Files/WorkingPapers/wp_358.pdf.

[Carvajal y Bascones, 2010] Carvajal, A. y Bascones, P. (Garrigues Medio Ambiente) (2009): *Estudio del Impacto de la Propuesta de Modificación de la Directiva de Comercio de Emisiones en el Sector Cementero Español*, Flacema (Fundación laboral andaluz del cemento y medio ambiente). Disponible en web: <http://www.oficemen.com/Uploads/docs/Resumen%20Ejecutivo%20Impacto%20EU%20ETS%20GARRIGUES.pdf>

[Castagnoli et al., 2006] Castagnoli, D.; Kiener, M. y Gallestey, E. (2006): "Rentabilidad del cemento. Hacia la optimización total de las plantas industriales de minerales y cemento", *Revista ABB*, Nº 4, pp. 59-62.

[Castillo et al., 2002] Castillo, E.; Conejo, A.J.; Pedregal, P.; García, R. y Alguacil, N. (2002): *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. Disponible en web: http://www.investigacion-operaciones.com/ARCHIVOS_LIBRO/LibroCompleto.pdf.

[CE, 2009] Comisión Europea (2009): *El régimen de comercio de derechos de emisión de la UE*, Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.

[CEMA, 2006] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2006): *Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España (Instituto Cerdá)*, Madrid, CEMA-Cuaderno Técnico.

[CEMA, 2007] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2007): *Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España (Instituto Cerdá)*, Madrid, CEMA-Estudio.

[CEMA, 2008a] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2008): *La sustitución de combustibles fósiles en el sector cementero. Oportunidad para reducir el vertido de residuos (Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos-ISR)*, Madrid, CEMA-Cuaderno Técnico.

[CEMA, 2008b] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2008): "Valoración de residuos en la industria cementera europea: estudio comparado",

Revista Técnica Cemento-Hormigón, Nº 910, pp. 52-74.

[CEMA, 2009] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2009): *Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España (Instituto Cerdá)*, Madrid, CEMA-Cuaderno Técnico.

[CEMA, 2010a] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2010): *La sustitución de combustibles fósiles en el sector cementero. Oportunidad para reducir el vertido de residuos (Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos-ISR)*, Madrid, CEMA-Estudio.

[CEMA, 2010b] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2010): *Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España (actualización periodo 2007-2009) (Instituto Cerdá)*, Madrid, CEMA-Cuaderno Técnico.

[CEMA, 2011a] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2011): "Valoración Energética de Residuos en Fábricas de Cemento y Salud Ambiental", *XI Congreso Español – II Congreso Iberoamericano*.

[CEMA, 2011b] Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (2011): *Memoria de Actividades*.

[CEMBUREAU et al., 2009] CEMBUREAU; OFICEMEN; Fundación CEMA; Sustainable Energy Europe (2009): *La recuperación de residuos como combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera*.

[CEMBUREAU, 1999] CEMBUREAU (1999): *Best Available Techniques for the Cement Industry*, CEMBUREAU Report, The European Cement Association. D/1999/5457/December, Brussels en <http://www.cembureau.be>.

[CEMBUREAU, 2009a] CEMBUREAU (2009): *Activity report 2008*, CEMBUREAU. Disponible en web: http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/Activity_Report_2008.pdf.

[CEMBUREAU, 2009b] CEMBUREAU (2009): *CEMBUREAU Environmental Product Declaration for Cement*. Disponible en web: <http://www.cembureau.be/sites/default/files/01%20CEMBUREAU%20EPD%20CEM%20I>

[%20Net%20caloric%20value%20FINAL%202%20\(1%2008%202008\).pdf](http://www.cembureau.be/sites/default/files/02%20(1%2008%202008).pdf).

[CEMBUREAU, 2009c] CEMBUREAU (2009): *Co-Processing of alternative fuels and raw materials in the European cement Industry*. Disponible en web: <http://www.cembureau.eu/sites/default/files/Sustainable%20cement%20production%20Brochure.pdf>.

[CEMBUREAU, 2010] CEMBUREAU (2010): *Activity report 2009*, CEMBUREAU. Disponible en web: http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/Activity%20Report%202009_1.pdf.

[CEMBUREAU, 2011] CEMBUREAU (2011): *Activity report 2010*, CEMBUREAU. Disponible en web: http://www.cembureau.be/sites/default/files/Activity_Report_2010.pdf.

[CEMBUREAU, 2012] CEMBUREAU (2012): *Activity report 2011*, CEMBUREAU. Disponible en web: <http://www.cembureau.be/sites/default/files/AR2011.pdf>.

[CEMBUREAU] <http://www.cembureau.be/>.

[CEMEX, 2010a] CEMEX (2010): "Experiencias Industriales de Ecología Industrial. Autorizaciones Ambientales Integradas". Disponible en web: http://catedracemex.unizar.es/descargas/conf_12.pdf.

[CEMEX, 2010b] CEMEX (2010): *Memoria de Sostenibilidad 2009. Cemex en España*, CEMEX, España.

[CEMEX, 2011a] CEMEX (2011): *Informe de desarrollo sustentable 2010*, CEMEX, México.

[CEMEX, 2011b] CEMEX (2011): *Memoria de Sostenibilidad 2010. Cemex en España*, CEMEX, España.

[CEMEX] <http://www.cemex.com/>.

[Cervantes et al., 2009] Cervantes, G.; Sosa, R.; Rodríguez, G. y Robles, F. (2009): "Ecología industrial y desarrollo sustentable", *Ingeniería*, Vol. 13, Nº 1, pp. 63-70.

[Chen et al., 2010a] Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi, Y. y Jullien, A. (2010):

"Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation", *Journal of Cleaner Production*, Vol.18, Nº 5, pp. 478-485.

[Chen et al., 2010b] Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi, Y.; Jullien, A. y Ventura, A. (2010): "LCA allocation procedure used as an initiative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete", *Resources, Conservation and Recycling*, Nº 54, pp. 1231-1240.

[Chennoufi et al., 2010] Chennoufi, L.; Hoagland-Grey, H.; Breisinger, M. y Boulet, E. (2010): *Directrices para Fábricas de Cemento. Enfoque para la Reconciliación del Financiamiento de Fábricas de Cemento con Objetivos Referentes al Cambio Climático*, Banco Interamericano de Desarrollo.

[Chertow, 2007] Chertow, M.R. (2007): "Uncovering industrial symbiosis", *Journal of Industrial Ecology*, Nº 11, pp. 11-30.

[Comisión de las Comunidades Europeas, 2007] Comisión de las Comunidades Europeas (SEC(2007) 1682) (2007): Documento de Trabajo de los Servicios de la Comisión. Resumen de la evaluación del impacto que acompaña a la propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), [COM(2007) 843 final], [COM(2007) 844 final], [SEC(2007) 1679].

[Conesa et al., 2011] Conesa, J.A.; Rey, L.; Egea, S. y Rey M.D. (2011): "Pollutant Formation and Emissions from Cement Kiln Stack Using a Solid Recovered Fuel from Municipal Solid Waste", *Environmental Science & Technology*, Nº 45, pp. 5.878-5.884. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1021/es200448u>.

[Corbett y Klassen, 2006] Corbett, C.J. y Klassen, RD (2006): "Extending the horizons: Environmental excellence as key to improving operations", *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol. 8, Nº 1, pp. 5-22.

[Cortés, 2011] Cortés, V.J. (2011): "Una herramienta imprescindible para una economía competitiva baja en carbono", Universidad Rey Juan Carlos. Disponible en

web:

http://www.urjc.es/z_files/ab_invest/www/documentos/NOTA_DE_PRENSA_CO2.pdf

[Decisión 2000/479/CE] Decisión 2000/479/CE, de 17 de julio de 2000, relativa a la realización de un inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER) con arreglo al artículo 15 de la Directiva 96/61/CE del Consejo relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (IPPC).

[Decisión 2003/33/CE] Decisión 2003/33/CE, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al Anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

[Decisión 2007/589/CE] Decisión de la Comisión de 18 de julio de 2007, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

[Decisión 2011/278/UE] Decisión de la Comisión 2011/278/UE de 27 de abril de 2011, por la que se determinan las normas transitorias de la Unión para la armonización de la asignación gratuita de derechos de emisión con arreglo al artículo 10 bis de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

[Decisión 280/2004/CE] Decisión 280/2004/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, relativa a un mecanismo para el seguimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Comunidad y para la aplicación del Protocolo de Kyoto.

[Decisión de la Comisión de 22 de octubre de 2010] Diario Oficial de la Unión Europea, Decisión de La Comisión de 22 de octubre de 2010 por la que se adapta la cantidad de derechos de emisión que deben expedirse para el conjunto de la Unión en 2013 de conformidad con el régimen de la Unión y se deroga la Decisión 2010/384/UE. L 279/34.

[Decisión de la Comisión de 24 de diciembre de 2009] Decisión de la Comisión, de 24 de diciembre de 2009, por la que se determina, de conformidad con la

Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, una lista de los sectores y subsectores que se consideran expuestos a un riesgo significativo de fuga de carbono.

[Decisión de la Comisión de 9 de julio de 2010] Diario Oficial de la Unión Europea, Decisión de La Comisión de 9 de julio de 2010 relativa a la cantidad de derechos de emisión que deben expedirse para el conjunto de la Comunidad en 2013 de conformidad con el régimen de comercio de derechos de emisión de la UE, L 175/36.

[Decisión del Consejo de 25 de Abril de 2002] Decisión del Consejo, de 25 de Abril de 2002, relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y al cumplimiento conjunto de los compromisos contraídos con arreglo al mismo.

[Decreto 833/1975] Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972 de Protección del Ambiente Atmosférico, BOE nº 96 (22-04-75).

[Deja et al., 2010] Deja, J.; Uliasz-Bohenczyk, A. y Mokrzycki, E. (2010): "CO₂ emissions from Polish cement industry", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Nº 4, pp. 583-588.

[Del Río et al., 2008] Del Río, P.; Carrillo-Hermosilla, J.; Könnölä, T. y García-Suárez, C. (2008): "Challenges and opportunities of a post-Kyoto mitigation regime: a survey of the European electricity sector", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 13, Nº 8, pp. 863-885. DOI 10.1007/s11027-008-9146-5

[Demailly y Quirion, 2006] Demailly, D. y Quirion, P. (2006): "CO₂ abatement, competitiveness and leakage in the European cement industry under the EU ETS: Grandfathering vs. output-based allocation", *Climate Policy*, Vol. 6, Nº 1, pp. 93-113.

[Díaz et al, 2010] Díaz-Madroño, M.; Peidro, D.; Mula, J. y Ferriols, F.J. (2010): "Enfoques de programación matemática fuzzy multiobjetivo para la planificación operativa del transporte en una cadena de suministro del sector del automóvil", *Revista*

de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa, Nº 9, pp. 44-68. Disponible en web:

<http://www.upo.es/RevMetCuant/art37.pdf>.

[Directiva 101/1987/CEE] Directiva 101/1987/CEE, de 22 de diciembre de 1986, que modifica la Directiva 75/439/CEE, relativa a la gestión de Aceites Usados.

[Directiva 1999/13/CE] Directiva 1999/13/CE del Consejo de 11 de marzo de 1999 relativa a la limitación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes orgánicos en determinadas actividades e instalaciones. DOCE nº L 85. (29-3-99). Rectificación a esta Directiva (DOCE nº L 188, de 21.7.99). Corrección de errores (DOCE nº L 165, de 21.06.01).

[Directiva 1999/30/CE] Directiva 1999/30/CE, del Consejo, de 22 de abril de 1999, relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente, DOCE nº L 163 (29-06-99).

[Directiva 1999/31/CE] Directiva 1999/31/CE, del Consejo, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos.

[Directiva 2000/76/CE] Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos.

[Directiva 2001/100/CE] Directiva 2001/100/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de diciembre de 2001, por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de medidas contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor, DOCE nº L 16 (18-01-02).

[Directiva 2001/81/CE] Directiva 2001/81/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos, DOCE nº L 309 (27-11-01).

[Directiva 2003/35/CE] Directiva 2003/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de mayo de 2003, por la que se establecen medidas para la participación del público en la elaboración de

determinados planes y programas relacionados con el medio ambiente y por la que se modifican, en lo que se refiere a la participación del público y el acceso a la justicia, las Directivas 85/337/CEE y 96/61/CE del Consejo.

[Directiva 2003/4/CE] Directiva 2003/4/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 28 de enero de 2003, relativa al acceso del público a la información medioambiental y por la que se deroga la Directiva 90/313/CEE del Consejo.

[Directiva 2003/53/CE] Directiva 2003/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de junio de 2003, por la que se modifica por vigésimo sexta vez la Directiva 76/769/CEE del Consejo respecto a la limitación de la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos (nonilfenol, etoxilatos de nonilfenol y cemento).

[Directiva 2003/87/CE] Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de Octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo.

[Directiva 2005/20] Directiva 2005/20, de 9 de marzo, por la que se modifica la Directiva 94/62, relativa a los envases y residuos de envases.

[Directiva 2006/12] Directiva 2006/12, de 5 de abril, relativa a los residuos.

[Directiva 2008/1/CE] Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación (deroga a la Directiva 96/61/CE).

[Directiva 2008/101/CE] Directiva 2008/101/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE con el fin de incluir las actividades de aviación en el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

[Directiva 2008/98/CE] Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre

los residuos y por la que se derogan determinadas Directiva, L312/3.

[Directiva 2009/29/CE] Directiva 2009/29/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, L 140/63.

[Directiva 2009/31/CE] Directiva 2009/31/CE establece un marco legislativo para el almacenamiento geológico del dióxido de carbono (CO₂) en condiciones seguras para el medio ambiente.

[Directiva 2010/75/UE] Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y el Consejo de 24 de noviembre de 2010 sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), Diario Oficial de la Unión Europea L 334/17.

[Directiva 75/442/CEE] Directiva 75/442/CEE, de 15 de julio, relativa a los residuos.

[Directiva 91/689/CEE] Directiva 91/689/CEE, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos. DOCE 377/L, de 31-12-91.

[Directiva 94/31/CE] Directiva 94/31/CE de 27 de junio de 1994 por la que se modifica la Directiva 91/689/CEE relativa a los residuos peligrosos.

[Directiva 94/62/CE] Directiva 94/62/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a los envases y residuos de envases.

[Directiva 94/67/CE] Directiva 94/67 del Consejo, relativa a la incineración de Residuos Peligrosos.

[Directiva 96/61/CE] Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación (DOCE núm. L 257, de 10 de octubre de 1996).

[Directiva 96/62/CE] Directiva 96/62/CE, de 27 de septiembre, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire, DOCE nº L 296 (21-11-1996).

[Domínguez-Machuca et al., 1995a] Domínguez-Machuca, J.A. ; Álvarez-Gil, M.J.; Domínguez-Machuca, M.A.; García-González,

S.; Ruiz-Jiménez, A. (1995): *Dirección de operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y los servicios*, Ed. McGraw-Hill, Madrid.

[Domínguez-Machuca et al., 1995b] Domínguez-Machuca, J.A.; García-González, S.; Ruiz-Jiménez, A.; Domínguez-Machuca, M.A. y Álvarez-Gil, M.J. (1995): *Dirección de operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, Ed. McGraw-Hill, Madrid.

[Dykstra, 1984] Dykstra, D.P. (1984): *Mathematical Programming for Natural Resource Management*, New York: McGraw-Hill Inc.

[EC, 2010] European Commission (2010): *Draft Commission Decision of determining transitional Union-wide rules for harmonised free allocation of emission allowances pursuant to Article 10a of Directive 2003/87/CE*. Disponible en web: http://www.cogeneurope.eu/wpcontent/uploads/2010/10/Commission_decision_Free-allocation_22-Oct.pdf

[EC, 2011] European Commission (2011): *Report from the Commission to the European Parliament and the Council progress towards achieving the Kyoto objectives*, (required under Article 5 of Decision 280/2004/EC of the European Parliament and of the Council concerning a mechanism for monitoring Community greenhouse gas emissions and for implementing the Kyoto Protocol), Brussels, 7.10.2011, COM(2011) 624 final, SEC(2011) 1151 final.

[ECJRC, 2011] European Commission Joint Research Centre; Institute for Energy and Transport (2011): *2011 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan)*. Disponible en web: http://setis.ec.europa.eu/about-setis/technology-map/2011_Technology_Map1.pdf DOI: 10.2790/37519.

[Egenhofer, 2007] Egenhofer, C. (2007): "The Making of the EU Emissions Trading Scheme: Status, Prospects and Implications for Business", *European Management Journal*, Vol. 25, Nº 6, pp. 453-463.

[EIPPCB, 2001] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau

(2001): *Reference Document on Best Available Techniques (BREF) for Cement and Lime Production*.

[EIPPCB, 2010] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (2010): *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide manufacturing Industries*. Disponible en web: http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf. (Traducido al español con el título: *Prevención y Control Integrados de la Contaminación Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio RC-08. Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08*. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento (Aprobada por Real Decreto 956/2008 de 6 de junio)).

[Elkamel et al., 2008] Elkamel, A.; Ba-Shammakh, M.; Douglas, P.L. y Croiset, E. (2008): "An optimization approach for integrating planning and CO₂ emission reduction in the petroleum refining industry", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 47, pp.760-776.

[Elorrieta, 2011] Elorrieta, J.I. (2011): "Reducción de CO₂ en la industria cementera", *ASEGRE*, 26 de mayo de 2011. Disponible en web: http://hcredudos.asegre.com/DOCUMENTACION_JORNADA_HC_26_MAYO_2011/Ponencias/Ignacio%20Elorrieta.pdf.

[Engau y Hoffmann, 2011] Engau, C. y Hoffmann, V.H. (2011): "Corporate response strategies to regulatory uncertainty: evidence from uncertainty about post-Kyoto regulation", *Policy Sciences*, Vol. 44, Nº 1, pp. 53-80. DOI 10.1007/s11077-010-9116-0.

[Engin y Ari, 2005] Engin, T. y Ari, V. (2005): "Energy auditing and recovery for dry-type cement rotary kiln systems. A case study", *Energy Conversion and Management*, Nº 46, pp. 551-562.

[EUPAVE, 2009] European Concrete Paving Association; Agrupación de Fabricantes de Cemento de España; Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (2009): *Pavimentos de hormigón: una alternativa inteligente y sostenible*.

[Factor CO₂, 2008] Factor CO₂; Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria (2008): *El Comercio de Derechos de Emisión. Guía Formativa sobre la Aplicación del Régimen Europeo de Comercio de Derechos de Emisión en Cantabria*.

[Factor CO₂, 2010] Factor CO₂ (2010): *Los mercados de Carbono en España*.

[Fairbairn et al., 2010] Fairbairn, E.M.; Americano, B.B.; Cordeiro, G.C.; Paula, T.P.; Toledo-Filho, R.D. y Silvano, M.M. (2010): "Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits", *Journal of Environmental Management*, Vol. 91, Nº 9, pp. 1864-1871.

[Fankhauser y Hepburn, 2009] Fankhauser, S. y Hepburn, C. (2009): "Carbon markets in space and time", Working paper, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, London, UK.

[Faulín y Juan, 2012] Faulín, J. y Juan, A.A. (2012): "Introducción a la investigación operativa". *Proyecto e- Math financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD)*. Disponible en web: http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Intro_I_O.pdf.

[FCE, 2009] Fundación Ciudad de la Energía (2009): *Plataforma experimental de Tecnologías de Captura y Almacenamiento de CO₂*, Gobierno de España, El Bierzo, España.

[Feiz, 2011] Feiz, R. (2011): *Improving climate performance of cement production. Developing an assessment framework and applying it to a CEMEX cement production cluster in Germany*, Thesis Report, Linköping University, Suecia.

[Fell, 2010] Fell, H. (2010): "EU-ETS and Nordic Electricity: A CVAR Analysis", *The Energy Journal*, Vol. 31, Nº 2, pp. 1-25. Disponible en web: <http://0-search.proquest.com.columbus.uhu.es/docview/222030896?accountid=14549>.

[Fenoy, 2009] Fenoy, C. (2009): "Holcim invierte 74 millones en mejoras ambientales en 6 años". Disponible en web: <http://www.elalmeria.es/article/finanzasyagricultura/495065/holcim/invierte/millones/mejoras/ambientales/anos.html>.

[Fernández et al., 2010] Fernández, G.; Rodríguez, F.; Acosta, F.J.; Delgado, J.A.; Berzosa, A. y Barandita, J.M. (2010): "Emisiones de CO_{2eq} como indicador de sostenibilidad en infraestructuras lineales", *XIV International Congress on Project Engineering*, Madrid, pp. 1372-1383.

[Fernández et al., 2012] Fernández, Y.; Olmedillas, B.; Fernández, M.A. y González, D. (2012): "El protocolo de Kyoto y su implementación: los casos de España, Alemania, Francia e Italia", *XIV Reunión Economía Mundial, Internacionalización en tiempos de crisis*, Jaén.

[Ferrandis, 2011] Ferrandis, M. (2011): "La mejora de la Calidad Ambiental en el Sector Cementero", 12 mayo. Disponible en web: http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/SiteCollectionDocuments/Actividades/Seminarios/Barcelona%2012%2005%202011/7-Mercedes_Ferrandis.pdf.

[FLACEMA, 2009] Fundación laboral andaluza del cemento y el medio ambiente (2009): *Memoria de sostenibilidad del sector cementero andaluz*.

[Flores, 2003] Flores-Romero, A.E. (2003): *La Variable Ambiental en la Trayectoria Tecnológica de la Industria Cementera*, Tesis para obtener el grado de Maestro en Economía y Gestión del Cambio Tecnológico, Ciencias Sociales y Humanidades, México.

[Foro pro-clima Madrid, 2012] Foro pro-clima Madrid (2012): *Guía de Buenas Prácticas Ambientales en el diseño, construcción, uso, conservación y demolición de edificios e Instalaciones*, Ayuntamiento de Madrid.

[Frank, 2009] Frank, Z. (2009): "Oxygen combustion in cement production", *Energy Procedia*, Nº 1, pp. 187-194.

[Frías et al., 2010] Frías, M.; Sánchez-De Rojas, M.I.; Rodríguez, O. y Ferreiro, S. (2010): "Tendencias futuras en la fabricación de cementos comerciales: nuevas adiciones puzolánicas", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 940, pp. 14-22.

[FYM, 2011] FYM-Italcementi Group (2011): *Memoria de Sostenibilidad 2010*, Dirección de Comunicación FYM-Italcementi.

- [Gäbel et al., 2004]** Gäbel, K.; Forsberg, P. y Tillman, A.M. (2004): "The design and building of a life cycle-based process model for simulating environmental performance, product performance and cost in cement manufacturing", *Journal of Cleaner Production*, Nº 12, pp. 77-93.
- [Gäbel, 2001]** Gäbel, K. (2001): *A Life Cycle Process Model. Simulation of Environmental, Product and Economic Performance in Cement Production*, Thesis for the degree of Licentiate of Engineering, Department of Environmental Systems Analysis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- [Gagelmann y Frondel, 2005]** Gagelmann, F. y Frondel, M. (2005): "The impact of emission trading on innovation – science fiction or reality?", *European Environment*, Vol. 15, Nº 4, pp. 203-211. DOI: 10.1002/eet.387.
- [Galán et al., 2010]** Galán, I.; Andrade, C.; Prieto, M.; Mora, P.; López, J.C. y San Juan, M.A. (2010): "Estudio del efecto sumidero de CO₂ de los materiales de base cemento", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 939, pp. 70-83.
- [Gartner y Quillin, 2007]** Gartner, E. y Quillin, K. (2007): "Low-CO₂ cements based on calcium sulfoaluminates", *Sustainability in the Cement and Concrete Industry*, Norwegian Cement Association, Nº 16, pp. 95-105.
- [Gartner, 2004]** Gartner, E. (2004): "Industrially interesting approaches to 'low CO₂' cements", *Cement and Concrete Research*, Nº 34, pp. 1489-1498.
- [Generalitat de Catalunya, 2006]** Generalitat de Catalunya (2006): *Guía Práctica para la implementación de un Sistema de Gestión de Datos para el Seguimiento y la Notificación de Emisiones de gases de efecto invernadero*, Dirección General de Calidad Ambiental.
- [Generalitat de Catalunya, 2007]** Generalitat de Catalunya (2007): *Guía práctica para la implantación del Plan de Seguimiento en las instalaciones afectadas por la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero para el periodo de comercio 2008-2012*, Dirección General de Calidad Ambiental.
- [Generalitat de Catalunya, 2011]** Generalitat de Catalunya; Comisión Interdepartamental del Cambio Climático (2011): *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero*, versión de marzo de 2011.
- [Gessa et al., 2007]** Gessa-Perera, A.; Sancha-Dionisio, M.P. y García-González, S. (2007): "Actitud y comportamiento medioambiental de la industria andaluza del cemento: estrategias para cumplir el Protocolo de Kyoto", *Empresa Global y mercados Locales, XXI Congreso Anual AEDEM*. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos, 2007.
- [Gessa et al., 2009a]** Gessa-Perera, A.; Rabadán-Martín, I. y Jurado-Martín, J.A. (2009): "La Planificación de la Producción Industrial y las Emisiones de CO₂. Implicaciones del Protocolo de Kyoto", *DYNA Ingeniería e Industria*, Vol. 84, Nº 2, pp. 119-127.
- [Gessa et al., 2009b]** Gessa-Perera, A., Jurado-Martín, J. A. y Rabadán-Martín, I. (2009): "El Cumplimiento del Protocolo de Kyoto en tiempos de crisis: ¿una oportunidad o una amenaza?", *Boletín Económico de Información Comercial Española (ICE)*, Nº 2979, pp. 23-32.
- [Gibbins y Chalmers, 2008]** Gibbins, J. y Chalmers, H. (2008): "Carbon capture and storage", *Energy Policy*, Nº 36, pp. 4.317-4.322.
- [Gielen, 2008]** Gielen, D. (2008): *G8 activities and the cement industry*, November 2008. International Energy Agency. Disponible en web: http://www.wbcsdcement.org/pdf/14gielen_ia_eng.pdf.
- [Goedkoop y Spriensma, 2001]** Goedkoop, M. y Spriensma, R. (2001): *The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Eco-indicator 99 methodology report*, Product ecology consultants, Amersfoort, The Netherlands.
- [Gómez, 2007]** Gómez-Rivas, J.J. (2007): *Estudio económico ambiental de la reducción de emisiones en una planta cementera por la combustión de biomasa*, Proyecto Fin de

Carrera, Universidad Pontificia de Comilla, Madrid.

[Grau y Ferré, 2011] Grau, A. y Ferré, O. (2011): *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020*, IDEA (Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía), Madrid.

[GreenFacts, 2007] GreenFacts (2007): *Facts on CO₂ Capture and Storage. A Summary of a Special Report by the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

[Grönkvist et al., 2006] Grönkvist, S.; Bryngelsson, M. y Westermark, M. (2006): "Oxygen efficiency with regard to carbon capture", *Energy*, Nº 31, pp. 3220-3226.

[Grubb y Neuhoff, 2006] Grubb, M.; Neuhoff, K. (2006): "Allocation and Competitiveness in the EU Emission Trading Scheme: Policy Overview", *Climate Policy*, Vol. 6, Nº 1, pp. 5-28.

[GTZ-Holcim, 2006] GTZ-Holcim (2006): *Guidelines on co-processing waste materials in cement production.* Disponible en web: http://www.coprocem.com/trainingkit/documents/diverse/guideline_coprocem_v06-06.pdf.

[Guede et al., 2010] Guede, E.; Gutiérrez-Cañas, C. y Astarloa, S. (2010): "Trayectorias de metales pesados en la fabricación de cemento para una valorización sostenible de materiales alternativos", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 941, pp. 64-75

[Gunningham y Sinclair, 1997] Gunningham, N. y Sinclair, D. (1997): *Barriers and motivators to the adoption of cleaner production practices*, Australian Centre for Environmental Law- The Australian National University. Disponible en web: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd25/acel.pdf>.

[Habert y Rousell, 2009] Habert, G. y Rousell, N. (2009): "Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, Nº 6, pp. 397-402.

[Hasanbeigi et al., 2011] Hasanbeigi, A.; Menke, C. y Therdyothin, A. (2011): "Technical and cost assessment of energy

efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry", *Energy Efficiency*, Vol. 4, Nº 1, pp. 93-113. DOI 10.1007/s12053-010-9079-1.

[Hashimoto et al., 2010] Hashimoto, S., Fujita, T.; Geng, Y. y Nagasawa, E. (2010): "Realizing CO₂ emission reduction through industrial symbiosis: A cement production case study for Kawasaki", *Conservation and Recycling*, Vo. 54, Nº 10, pp. 704-71. DOI:10.1016/j.resconrec.2009.11.013

[Hegerland et al., 2006] Hegerland, G.; Pande, J.O.; Haugen, H.A.; Eldrup, N.; Tokheim, L.A. y Hatlevik, L.M. (2006): "Capture of CO₂ from a cement plant. Technical possibilities and economic estimates", 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, pp. 19-22, June 2006, Trondheim, Norway.

[Helm y Hepburn, 2009] Helm, D. y Hepburn, C. (2009): *The Economics and Politics of Climate Change*, Oxford University Press.

[Hidalgo et al., 2005] Hidalgo, I.; Szabó, L.; Ciscar, C. y Soria, A. (2005): "Technological prospects and CO₂ emission trading analyses in the iron and steel industry: A global model", *Energy*, Vol. 30, Nº 5, pp. 583-610.

[Hillier y Lieberman, 2001] Hillier, F.S. y Lieberman, G.J. (2001): *Introduction to Operations Research*, 7th Edition, New York: McGraw-Hill Inc.

[Hirsuta y Belarte, 2010] Hirsuta-Aguirre, L. y Belarte-Rodríguez, M. (2010): *Informe Anual del Sector de la Construcción 2009*, Instituto Tecnológico de la Construcción y Confederación Nacional de la Construcción.

[Hoenig y Twigg, 2009] Hoenig, V. y Twigg, C. (2009): *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to look ahead*, Düsseldorf, Geneva, 4 June (World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative- European Cement Research Academy).

[Hoffmann, 2007] Hoffmann, V.H. (2007): "EU ETS and Investment Decisions: The Case of the German Electricity Industry", *European Management Journal*, Vol.25, Nº 6, pp. 464-474.

[Holcim, 2011] Holcim España (2011): *Informe de Sostenibilidad 2010*, Holcim España.

[Huntzinger y Eatmon, 2009] Huntzinger, D.N. y Eatmon, T.D. (2009): "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies", *Journal of Cleaner Production*, Nº 17, pp. 668-675.

[ICO] Instituto de Crédito Oficial, <http://www.ico.es>.

[IDAE, 2010] Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía; Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid; Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2010): *Guía de valoración energética de residuos*, Madrid.

[IDAE, 2012] Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía en <http://www.idae.es>

[IEA, 2006] International Energy Agency (2006): *Perspectivas sobre Tecnología Energética. Escenarios y Estrategias hasta el año 2050*, IEA.

[IEA, 2007] International Energy Agency (2007): *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ emissions*. Disponible en web: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/tracking_emissions.pdf.

[IEA, 2008] International Energy Agency (2008): "Greenhouse Gas R&D programme CO₂ Capture in the cement Industry", *Technical Study*, Report Nº: 2008/3.

[IEA, 2010] International Energy Agency (2010): *ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme) - Technology Brief I03: Cement Production*. Disponible en web: http://www.iea-etsap.org/web/E-TechDS/PDF/I03_cement_June%202010_GS-gct.pdf.

[Imamura, 2002] Imamura, K. (2002): "Aiming to create a sustainable cement industry", *Business Leaders on the Environment*, October.

[INE] Instituto Nacional de Estadística, <http://www.ine.es>.

[IPPC, 2000] Intergovernmental Panel on Climate Change (2000): *Good practice guidance and uncertainty management in*

national greenhouse gas inventories, Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Disponible en web: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/gpgaum_en.html.

[Irassar et al., 2011] Irassar, E.F.; Violini, D.; Rahhal, V.F.; Milanese, C.; Trezza, M.A.; Milanese, C.; Trezza, M.A. y Bonavetti, V.L. (2011): "Influence of limestone content, gypsum content and fineness on early age properties of Portland limestone cement produced by inter-grinding", *Cement and Concrete Composites*, Nº 33, pp. 192-200.

[Jonson, 2011] Jonson, J. (2011): "Retos y soluciones para una comunicación efectiva de cara al co-procesamiento – Europa", *Foro de comunicadores con énfasis en co-procesamiento*. Disponible en web: <http://www.ficem.org/multimedia/2011/cam-bio11/7-Jessica%20Johnson%20-%20CEMBUREAU%20-%20Co-processing%20and%20communications.pdf>.

[Josa et al., 2004] Josa, A.; Aguado, A.; Heino, A.; Byers, E. y Cardim, A. (2004): "Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU", *Cement and Concrete Research*, Nº 34, pp. 1.313-1.320.

[Kawai y Osako, 2012] Kawai, K. y Osako, M. (2012): "Reduction of natural resource consumption in cement production in Japan by waste utilization", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 14, Nº 2, pp. 94-101. DOI 10.1007/s10163-012-0042-4.

[Khanna, 2001] Khanna, N. (2001): "Analyzing the economic cost of the Kyoto Protocol", *Ecological Economics*, Nº 38, pp. 59-69.

[Khurana et al., 2002] Khurana, S.; Banerjee, R. y Gaitonde, U. (2002): "Energy balance and cogeneration for a cement plant", *Applied Thermal Engineering*, Nº 22, pp. 485-494.

[Kim y Worrell, 2002] Kim, Y. y Worrell, E. (2002): "CO₂ emission trends in the cement industry: an international comparison", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 2, Nº 2, pp. 115-133. DOI: 10.1023/A:1022857829028.

- [Klassen y Whybark, 1999] Klassen, R.D. y Whybark, D.C. (1999): "Environmental management in operations", *Decision Sciences*, Vol. 30, pp. 601-631.
- [Kleindorfer et al., 2005] Kleindorfer, P.R.; Singhal, K. y Van-Wassenhove, L.N. (2005): "Sustainable operations management", *Production and Operations Management*, Vol. 14, Nº 4, pp. 482-492.
- [Krishnamurti y Hoque, 2011] Krishnamurti, C. y Hoque, A. (2011): "Efficiency of European Emissions Markets: Lessons and Implications", *Energy Policy*, Nº 39, pp. 6575-6582.
- [Labein, 2005] Fundación Labein; Gobierno Vasco (2005): *Guía técnica para la medición, estimación y cálculo de las emisiones al aire*, INHOBE (sociedad Pública de Gestión Ambiental).
- [Lafarge, 2011] Lafarge Cementos (2011): *Informe de Sostenibilidad 2008-2010*, Lafarge Cementos.
- [Lam et al., 2010] Lam, C.H.; Barford, J.P. y McKay, G. (2010): "Utilization of Incineration Waste Ash Residues in Portland Cement Clínter", *Chemical Engineering*, Nº 21, pp. 757-762.
- [Lapillonne y Pollier, 2008] Lapillonne, B. y Pollier, K. (2008): "Energy efficiency trends in industry: EU versus other OECD countries", Odysee/Mure, Paris. Disponible en web: <http://www.odyssee-indicators.org>.
- [Lapin, 1991] Lapin, LL. (1991): *Quantitative Methods for Business Decisions with Cases*, 5ª Edition, San Diego: Harcourt Brace Jovanovich Publishers.
- [Lavall et al., 2010] Lavall, A.; García, A.; González, C.; Liebert, C. y Perret, J.F. (2010): "Estudio sobre las emisiones y su posible efecto sobre el medio ambiente y la salud en el entorno de plantas cementeras", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 938, pp. 50-79.
- [LBNL, 2008a] Lawrence Berkeley National Laboratory (2008): "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making", *Report 54036*, Revision March 2008. Disponible en web: <http://china.lbl.gov/sites/china.lbl.gov/files/LBNL-54036-revision.doc>
- [LBNL, 2008b] Lawrence Berkeley National Laboratory (2008): "Guidebook for Using the Tool BEST Cement: Benchmarking and Energy Savings Tool for the Cement Industry", *Report 1989E*, July 2008. Disponible en web: <http://china.lbl.gov/sites/china.lbl.gov/files/LBNL1989E.BEST-Cement.Handbook.English.doc>
- [Lee et al., 2008] Lee, C.F.; Lin, S.J. y Lewis, C. (2008): "Analysis of the impacts of combining carbon taxation and emission trading on different industry sectors", *Energy Policy*, Nº 36, pp. 722-729.
- [Legarreta, 2009] Legarreta-Fernández, J.A. (2009): "Uso sostenible de los recursos en el sector cementero", *Jornada sobre Sostenibilidad Industrial (Navarra)*. Disponible en web: http://www.concretonline.com/pdf/lotos_articulos/Cementos/RRCementeras7.pdf.
- [Letmathe y Balakrishnan, 2005] Letmathe, P. y Balakrishnan, N. (2005): "Environmental considerations on the optimal product mix", *European Journal of Operational Research*, Vol. 167, Nº 2, pp. 398-412.
- [Lewis, 2010] Lewis, M. C. (2010): "How will the EU ETS shape the European power generation mix?", *Power Engineering International*, Nº 18, pp. 24-27. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/750367044?accountid=14549/>.
- [Ley 1/2005] Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, BOE nº 59.
- [Ley 10/1998] Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.
- [Ley 11/1997] Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases.
- [Ley 13/2010] Ley 13/2010, de 5 de julio, por la que se modifica la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, para perfeccionar y ampliar el régimen general de comercio de derechos de emisión e incluir la aviación en el mismo, BOE nº 163.

[Ley 16/2002] Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (Ley IPPC), modificada por la Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de accesos a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE); y por la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

[Ley 22/2011] Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

[Ley 27/2006] Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de accesos a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE).

[Ley 34/2007] Ley 34/2007, Ley marco sobre atmósfera.

[Ley 38/1972] Ley 38/1972 de Protección del Ambiente Atmosférico, de 22 de diciembre de 1972, BOE nº 309 (26-12-72).

[Ley 4/1998] Ley 4/1998, de 3 de marzo, por la que se establece el régimen sancionador previsto en el Reglamento (CE) 3093/1994, del Consejo de 15 de diciembre, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, BOE nº 54 (4-3-98) (desarrolla el artículo 19 del Reglamento (CE) 3093/1994).

[Ley 42/2007] Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

[Ley 6/2001] Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental.

[Li et al., 2008] Li, J.; Li, G. y Yu, Y. (2008): "The influence of compound additive on magnesium oxychloride cement/urban refuse floor tile", *Construction and Building Materials*, Nº 22, pp. 521-525.

[Lin y Zhao, 2009] Lin, Z. y Zhao, Q. (2009): "Strength of limestone-based non-calcined cement and its properties", *Journal of Wuhan University of Technology–Materials Science Edition*, Nº 24, pp. 471–475.

[Linares, 1999] Linares, P. (1999): "Integración de criterios medioambientales

en procesos de decisión: una aproximación multicriterio a la planificación integrada de recursos eléctricos", Tesis doctoral, Escuela técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.

[Linton et al., 2007] Linton, J.D.; Klassen, R. y Jayaraman, J. (2007): "Sustainable supply chains: An introduction", *Journal of Operations Management*, Vol.25, Nº 6, pp. 1075-1082.

[Liu y Li, 2009] Liu, N.C. y Li, Z.F. (2009): "One High Efficiency Production Line of Clínter and Slag Grinding Separately by Roller Mill in Cement Industry", *Advanced Materials Research*, Nº 58, pp. 83-89. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.58.83.

[Lizarraga, 2006] Lizarraga S. (2006): "Estudio del comportamiento del sulfato ferroso heptahidratado como agente reductor de Cr (VI)", *Revista Cemento-Hormigón*, Nº 887, Abril, pp. 4-8.

[Locher, 2006] Locher, F.W. (2006): *Cement: principles of production and use*, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf.

[Long et al., 2011] Long, Y.; Yue, L.; Li, G.; Lei, Y. y Wang, S. (2011): "The Basic Study on the Preparation of Steel Slag Cement with Gas Quenching Steel Slag", *Open Materials Science Journal*, Nº 5, pp. 72–77.

[Lu et al., 2009] Lu, H.; Masanet, E. y Price, L. (2009): "Evaluation of Life-Cycle Assessment Studies of Chinese Cement Production: Challenges and Opportunities", *Proceedings of the 2009 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*. Disponible en web: http://minotaur.lbl.gov/china.lbl.gov/sites/china.lbl.gov/files/LBNL-2335E.Evaluation_of_LCA_Studies_of_Chinese_Cement_Production.ACEEE_.pdf.

[Ludwig, 2009] Ludwig, H.M. (2009): "Production and properties of composite cements", *Proceedings of the 6th International VDZ Congress 2009: Process Technology of Cement Manufacturing*, Düsseldorf, 30 September to 2 October 2009.

[Lund, 2007] Lund, P. (2007): "Impacts of EU carbon emission trade directive on energy-intensive industries – Indicative

micro-economic analyses", *Ecological Economics*, Vol. 63, Nº 4, pp. 799-806.

[MAAMA, 2011a] Ministerio de de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2011): *Guía de la normativa estatal sobre emisiones a la atmósfera. Ley 34/2007 y Real Decreto 100/2011.*

[MAAMA, 2011b] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2011): *Principales resultados de la 17ª conferencia de las partes de la convención marco de naciones unidas sobre cambio climático (COP17), la séptima sesión de la conferencia de las partes que son partes del protocolo de Kyoto (CMP7) y del trigésimo quinto periodo de sesiones de los órganos subsidiarios, 28 de noviembre al 9 de diciembre de 2011.* Disponible en web: http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/120218_Nota_resultados_Durban_web-oecc-para_web_tcm7-182725.pdf/.

[MAAMA, 2012a] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012): *Nota explicativa sobre la aplicación de las recomendaciones del Grupo Técnico de Comercio de Emisiones de la CCPPCC, de 18 de febrero de 2011, sobre el seguimiento de las emisiones de los NFUs.*

[MAAMA, 2012b] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2012): *Sistema Europeo de Comercio de Derechos de Emisión: período 2013-2020. Propuesta de Asignación Individualizada de Derechos de Emisión de Gases de Efecto Invernadero, Secretaría de Estado de Medio Ambiente-Oficina Española de Cambio Climático.*

[Marañón et al., 2008] Marañón, E.; Iregui, G.; Doménech, J. L.; Fernández Nava, I. y González-Arenales, M. (2008): "Propuesta de índices de conversión para la obtención de la huella de los residuos y los vertidos", *Revista OIDLES (Observatorio Iberoamericano del Desarrollo Local y Economía Social)*, Vol. 2, Nº 4. Disponible en web: <http://www.eumed.net/rev/oidles/04/midng.htm>.

[Marceau et al., 2006] Marceau, M.; Nisbet, M. y VanGeem, M. (2006): *Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture*, Portland Cement Association, R&D Serial Nº.

2095b. Disponible en web: http://www.nrmca.org/taskforce/item_2_talkingpoints/sustainability/sustainability/sn2095b%20-%20cement%20lci%202006.pdf.

[Marinova et al., 2006] Marinova, D.; Annandale, D. y Phillimore, J. (2006): *The international handbook on environmental technology management.* Edward Elgar Publishing.

[Martin et al., 1999] Martin, N.; Worrell, E. y Price, L. (1999): "Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US cement industry", *Lawrence Berkeley National Laboratory*, Nº 44182, p.42. Disponible en web: <http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?url=/751775-bfyH4x/webviewable/751775.pdf>.

[Mateo y Lahoz, 2009] Mateo, P.M. y Lahoz, D. (2009): *"Programación Lineal III. Análisis Post-Optimal"*. Disponible en web: <http://ocw.unizar.es/ocw/enseñanzas-tecnicas/modelos-de-investigacion-operativa/ficheros/OCWSensiPara.pdf>.

[McLellan et al., 2011] McLellan, B.C.; Williams, R.P.; Lay J.; Van Riessen, A. y Corder, G.D. (2011): "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, Nº 9-10, pp. 1080-1090. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>.

[MDL, 2004] MDL-Comité ejecutivo (2004): Mecanismo para un Desarrollo Limpio, Formulario Documento de Diseño del Proyecto (MDL-DDP), 1 de julio de 2004.

[Meckling y Chung, 2009] Meckling, J.O. y Chung, G.Y. (2009): "Sectorial approaches for a post-2012 climate regime: a taxonomy", *Climate Policy*, Vol. 9, Nº 6, pp. 652-666.

[Menéndez et al., 2003] Menéndez, G.; Bonavetti, V. y Irassar, E.F. (2003): "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, Nº 25, pp. 61-67.

[Metz et al., 2005] Metz, B.; Davidson, O.; De Coninck, H.; Loos, M. y Meyer, L. (2005): *Carbon dioxide capture and storage*, IPCC, Cambridge University Press, England

(Versión en español: *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono*).

[MF, 2010] Ministerio de Fomento (2010): *Anuario Estadístico 2009*, Ministerio de Fomento-Inspección General de Fomento-Subdirección General de Tecnologías de la Información, Administración Electrónica y Estadísticas.

[Mikulcic et al., 2012] Mikulcic, H.; Vujanovic, M. y Duic, N. (2012): "Reducing the CO₂ emissions in Croatian cement industry", *Applied Energy*, article in press (available on line 27 March 2012). Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.083>.

[Ministerio de Fomento, 2009] Ministerio de Fomento (2009): *RC-08. Instrucción para la recepción de cementos*, Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.

[MITC, 2005] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio; Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2005): *Plan Nacional de Energía Renovable (2005-2010)*. Disponible en web: [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_PER_2005-2010_8_de_gosto-2005_Completo.\(modificacionpag_63\)_Copia_2_301254a0.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_PER_2005-2010_8_de_gosto-2005_Completo.(modificacionpag_63)_Copia_2_301254a0.pdf).

[MMA, 2004] Ministerio de Medio Ambiente (2004): *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento*, Centro de Publicaciones-Secretaría General Técnica- Ministerio de Medio Ambiente.

[MMA, 2009] Ministerio de Medio Ambiente (2009): *Balace global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2008*.

[MMA, 2010] Ministerio de Medio Ambiente (2010): *Balace global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2009*.

[MMA, 2011] Ministerio de Medio Ambiente (2011): *Balace global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2010*.

[MMA, 2012] Ministerio de Medio Ambiente (2012): *Balace global/sectorial de aplicación de la Ley 1/2005 en el año 2011*.

[MMAJ, 2007] Ministerio de Medio Ambiente de Japón; Fundación de Centro

Mundial del Medio Ambiente (GEC) (2007): *Herramientas de Estimación CER. Un conjunto de herramientas para ayudar a la evaluación inicial de las previsiones de generación de CER*, Versión 02, Ministerio de Medio Ambiente, Japón.

[MMAMRM, 2009] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2009): *Boletín Mensual de Estadística del MARM. Enero de 2009*, Secretaría General Técnica, Subdirección General de Estadística.

[MMAMRM, 2010] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2010): *Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de España e Información Adicional. Años 1990-2008*, Secretaría de Estado de Cambio Climático-Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental- Unidad de Información Ambiental Estratégica.

[MMAMRM, 2011a] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MMAMRM) (2011): *Guía de la normativa estatal sobre emisiones a la atmósfera. Ley 34/2007 y Real Decreto 100/2011*, Secretaria General Técnica-Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

[MMAMRM, 2011b] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MMAMRM) (2011): *Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de España e Información Adicional. Años 1990-2009*. Secretaría de Estado de Cambio Climático, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, Dirección General Oficina Española de Cambio Climático.

[MMAMRM, 2011c] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MMAMRM) (2011): *Recomendaciones del Grupo Técnico de Comercio e Emisiones de la CCPC sobre la Metodología de seguimiento aplicable a las emisiones correspondientes a la fracción de biomasa contenida en los neumáticos fuera de uso*, 18 de febrero de 2011.

[Monjon y Quirion, 2011a] Monjon, S. y Quirion, P. (2011): "A border adjustment for the EU ETS: Reconciling WTO rules and capacity to tackle carbon leakage", *Climate Policy*, Vol. 11, Nº 5, pp. 1212-1225. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/900888551?accountid=14549>.

- [Monjon y Quirion, 2011b]** Monjon, S. y Quirion, P. (2011): "Addressing leakage in the EU ETS: Border adjustment or output-based allocation?", *Ecological Economics*, Vol. 70, Nº 11, pp. 1957-1971.
- [Montabon et al., 2011]** Montabon. F.; Sroufe, R. y Melnyk S. (2011): "Integration of Environmental Management into Manufacturing Planning", *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 47, Nº 1, pp. 43-55.
- [Mora, 2003]** Mora, P. (2003): "Situación Actual y Retos de Futuro de la Industria de Fabricación De Cemento", *Congreso Tendencias de la Industria Química y de Procesos*, Oviedo, 6 de noviembre de 2003.
- [Mora, 2009a]** Mora, P. (2009): "Jornada sobre Sostenibilidad Industrial en la Industria Cementera", *Jornada sobre Sostenibilidad Industrial en la Industria Cementera Navarra*, Pamplona, 24 de noviembre.
- [Mora, 2009b]** Mora, P. (2009): "Uso sostenible de los recursos en el Sector Cementero", *Jornada sobre Desarrollo Sostenible*, Mérida, 7 de mayo.
- [Moreno-Fuentes y Dana, 2011]** Moreno-Fuentes, M. y Dana, S. (2011): "ETS markets and electricity futures prices", *SSRN Working Paper Series*, Rochester. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/864221771?accountid=14549>.
- [Moya et al., 2010]** Moya, J.A.; Pardo, N. y Mercier (2010): *Energy efficiency and CO₂ Emissions: Prospective Scenarios for the cement Industry*, JRC Scientific and Technical Reports. European Commission Joint Research Centre Institute for Energy, Publications Office of the European Union.
- [Moya et al., 2011]** Moya, J.A.; Pardo, N. y Mercier, A. (2011): "The potential for improvements in energy efficiency and CO₂ emissions in the EU27 cement industry and the relationship with the capital budgeting decision criteria", *Journal of Cleaner Production*, Nº 19, pp. 1207-1215.
- [Muhr, 2004]** Muhr, T. (coord.) (2004): *Baseline Report for the Aggregate and Concrete Industries in Europe ECO-SERVE Network, Cluster 3: Aggregate and Concrete Production*, ECO-SERVE.
- [Mula et al., 2002]** Mula-Bru, J.; Poler-Escoto, R. y Lario-Esteban, F.C. (2002): "Modelos y Métodos para la Planificación de la Producción de la Cadena de Suministro bajo Incertidumbre: Una introducción al Estado del Arte", II Conferencia de Ingeniería de Organización, 5 y 6 de septiembre, Vigo.
- [Mula et al., 2006a]** Mula-Bru, J.; Poler-Escoto, R. y García-Sabater, J.P. (2006): "Aplicaciones de la Teoría de los Conjuntos Difusos en la Planificación de la Producción: Un Estudio de la Literatura", VIII Congreso de Ingeniería de Organización, 9 y 10 de septiembre, Leganés.
- [Mula et al., 2006b]** Mula-Bru, J.; Poler-Escoto, R. y García-Sabater, J.P. (2006): "Modelo de programación lineal multi-objetivo para la resolución del MRP con restricciones de capacidad", X Congreso de Ingeniería de Organización, 7 y 8 de septiembre, Valencia.
- [Murray y Price, 2008]** Murray, A. y Price, L. (2008): "Use of alternative fuels in cement manufacture: analysis of fuel characteristics and feasibility for use in the Chinese cement sector", Lawrence Berkeley National Laboratory, Nº 525, Berkeley, California. Disponible en web: <http://china.lbl.gov/publications/use-alternative-fuels-cement-manufacture-analysis-fuel-characteristics-and-feasibility/>.
- [Murray, 2011]** Murray, P. (2011): "Reduce energy consumption: Cement production", *Control Engineering*, n/a. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/102331115?accountid=14549>.
- [Nadal et al., 2009]** Nadal, M.; Schuhmacher, M. y Domingo, J.L. (2009): "Cost-benefit analysis of using sewage sludge as alternative fuel in a cement plant: a case study", *Environmental Science and Pollution Research*, Nº 16, pp. 322-328.
- [Naranjo et al., 2011]** Naranjo, M.; Brownlow, D.T. y Garza, A. (2011): "CO₂ capture and sequestration in the cement industry", *Energy Procedia*, Nº 4, pp. 2716-2723.
- [Navarrete-Anabalón, 2006]** Navarrete-Anabalón, G.D. (2006): *Caracterización Del Cemento Blanco*, Tesis para optar al título de

Ingeniero Constructor, Universidad de Chile. Disponible en web: <http://es.scribd.com/doc/51679326/cemento-blanco>.

[Navia et al., 2006] Navia, R.; Rivelab, B.; Sorber, K.E. y Menéndez, C.R. (2006): "Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: Life cycle assessment", *Resources, Conservation and Recycling*, Nº 48, pp. 339–356, doi:10.1016/j.resconrec.2006.01.007.

[Neuhoff et al., 2006] Neuhoff, K.; Martinez, K. y Sato, M. (2006): "Allocation, incentives and distortions: the impact of EU ETS emissions allowance allocations to the electricity sector", *Climate Policy*, Vol. 6, Nº 1, pp. 73-91.

[Neuhoff, 2008] Neuhoff, K. (2008): *Tackling carbon. How to price carbon for Climate Policy*, University of Cambridge, Faculty of Economics. Disponible en web: <http://www.climatestrategies.org/component/reports/category/6/72.html/>.

[Nicolas y Jochen, 2008] Nicolas, M. y Jochen, H. (2008): *A blueprint for a climate friendly cement industry*, WWF (World Wide Fund for Nature). Disponible en web: <http://www.panda.org>.

[Nochaiya et al., 2010] Nochaiya, T.; Wongkeo, W. y Chaipanich, A. (2010): "Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete", *Fuel*, Nº 89, pp. 768-774. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.003>

[Nordhaus, 1993] Nordhaus, W.D. (1993): "Rolling the "DICE": An optimal transition path for controlling greenhouse gases", *Resource and Energy Economics*, Nº 15, pp. 27-50. Disponible en web: [http://dx.doi.org/10.1016/0928-7655\(93\)90017-0](http://dx.doi.org/10.1016/0928-7655(93)90017-0).

[Nordhaus, 2008] Nordhaus, W. D. (2008): *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*, New Haven and London, Yale University Press. Disponible en web: http://nordhaus.econ.yale.edu/Balance_2nd_proofs.pdf/.

[Norma ISO 14040:2006] Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

[Norma UNE 80301:1996] Norma UNE 80301:1996: Cementos. Cementos comunes. Composición, especificaciones y criterios de conformidad.

[Norma UNE 80601:2005] Norma UNE 80601:2005. Cemento. Evaluación del cumplimiento del cemento con el límite reglamentario del contenido de cromo hexavalente soluble en agua, de la Orden Ministerial PRE/1954/2004 de 22 de junio de 2004, transposición de la Directiva 2003/53/CE.

[Norma UNE-EN 197-1:2000] Norma UNE-EN 197-1:2000. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

[Núñez, 2010] Núñez, J.M. (2010): *Síntesis, desarrollo y caracterización de elementos prefabricados para la construcción utilizando ecocementos y desechos industriales*, Tesis para obtener el título de Ingeniería Civil, Universidad de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.

[O'Brien et al., 2009] O'Brien K.R.; Menache, J. y O'Moore, L.M. (2009): "Impact of fly ash content and fly ash transportation distance on embodied greenhouse gas emissions and water consumption in concrete", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 14, Nº 7, pp. 621-629. DOI: 10.1007/s11367-009-0105-5 2009.

[Oberheitmann, 2010] Oberheitmann, A. (2010): "A new post-Kyoto climate regime based on per-capita cumulative CO₂ - emission rights - rationale, architecture and quantitative assessment of the implication for the CO₂ - emissions from China, India and the Annex-I countries by 2050", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 15, Nº 2, pp. 137–168. DOI 10.1007/s11027-009-9207-4.

[Oberndorfer y Rennings, 2007] Oberndorfer, U. y Rennings, K. (2007): "Costs and competitiveness effects of the European Union emissions trading scheme", *European Environment*, Vol. 17, Nº 1, pp.1-17.

[OFICEMEN, 2005] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2005): *Memoria Oficemen 2004*.

- [**OFICEMEN, 2006**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2006): *Memoria Oficemen 2005*.
- [**OFICEMEN, 2007**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2007): *Memoria Oficemen 2006*.
- [**OFICEMEN, 2008a**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2008): *Guía de Buenas Prácticas para la Prevención de Riesgos Laborales en el Sector Cementero Español*.
- [**OFICEMEN, 2008b**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2008): *Informe de Actividades 2007*.
- [**OFICEMEN, 2008c**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2008): *Memoria Oficemen 2007*.
- [**OFICEMEN, 2009a**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2009): *Boletín Infocemento*, Septiembre. Disponible en web: http://www.infocemento.com/lstBoletines.asp?id_cat=1.
- [**OFICEMEN, 2009b**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2009): *Estudio de métodos de medición, cálculo y estimación para las emisiones de las sustancias PRTR adecuados al sector del cemento en España. Guía PRTR Sector Cemento*.
- [**OFICEMEN, 2009c**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2009): *Informe de Actividades 2008*.
- [**OFICEMEN, 2009d**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2009): *Memoria Oficemen 2008*.
- [**OFICEMEN, 2010a**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2010): *Informe de Actividades 2009*.
- [**OFICEMEN, 2010b**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2010): *Memoria Oficemen 2009*.
- [**OFICEMEN, 2011a**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2011): *Informe de Actividades 2010*.
- [**OFICEMEN, 2011b**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2011): *Memoria Anual Estadística 2010*.
- [**OFICEMEN, 2011c**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2011): *Memoria Oficemen 2010*.
- [**Oficemen, 2012**] Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (2012): *Informe de Actividades 2011*.
- [**OFICEMEN**] <http://www.oficemen.com>.
- [**Oliver et al., 2012**] Olivier, J.G.J.; Janssens-Maenhout, G. y Peters, J. (2012): *Trends in global CO₂ emissions. 2012 Report*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Disponible en web: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/CO2REPORT2012.pdf/>.
- [**ONU, 1998**] Organización de las Naciones Unidas (1998): *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, Documento FCCC/INFORMAL/83 GE.05-61702 (S) 130605 130605.
- [**Oppenheim y Beinhocker, 2009**] Oppenheim, J. y Beinhocker, E.D. (2009): *Climate change and the economy - myths versus realities*, Davos, Switzerland, McKinsey & Company, Inc.
- [**Orden de 13 de octubre de 1989**] Orden de 13 de octubre de 1989 por la que se determinan los métodos de caracterización de los residuos tóxicos y peligrosos.
- [**Orden de 18 de octubre de 1976**] Orden de 18 de octubre de 1976 sobre prevención y corrección de la contaminación atmosférica de origen industrial (Ministerio de Industria y Energía), BOE nº 290 (03-12-76).
- [**Orden MAM/1445/2006**] Orden MAM/1445/2006, sobre tarifas del Registro Nacional de Derechos de Emisión.
- [**Orden MAM/304/2002**] Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.
- [**Orden PRE/1954/2004**] Orden PRE/1954/2004 de 22 de junio, por la que se modifica el Anexo I del Real Decreto 1406/1989, de 10 de noviembre, por el que se imponen limitaciones a la comercialización y uso de ciertas sustancias y preparados

peligrosos (nonilfenol, etoxilados de nonilfenol y cemento).

[Orden PRE/2827/2009] Orden PRE/2827/2009, de 19 de octubre, por la que se modifican las cuantías de las asignaciones sectoriales establecidas en el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión de Gases de Efecto Invernadero, 2008-2012, aprobado por el Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre.

[Ortega, 2006] Ortega-Valenzuela, A. (2006): *Análisis técnico y de costos para implementar plan de mantenimiento predictivo mediante termografía en cementos "Bío-Bío"*, Memoria para optar al título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica, Universidad de Talca, Chile.

[Page, 2011] Page, F. (2011): "Desarrollan una herramienta para la producción sostenible en el sector cementero". Disponible en web: <http://negociosostenible.wordpress.com/2011/09/20/desarrollan-una-herramienta-para-la-produccion-sostenible-en-el-sector-cementero/>.

[Palomino, 2010] Palomino, S. (2010): "La sustitución de combustibles fósiles en el sector cementero. Oportunidad para reducir el vertido de residuos", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, N° 936, pp. 44-65.

[Palomo et al., 1999] Palomo, A.; Grutzeck, M.W. y Blanco, M.T. (1999): "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future", *Cement and Concrete Research*, N° 29, pp. 1323-1329.

[Papageorgiou et al., 2009] Papageorgiou, A.; Barton, J.R. y Karagiannidis, A. (2009): "Assessment of the greenhouse effect impact of technologies used for energy recovery from municipal waste: A case for England", *Journal of Environmental Management*, N° 90, pp. 2999-3012.

[Pardo et al., 2011] Pardo, N.; Moya, J.A. y Mercier, A. (2011): "Prospective on the energy efficiency and CO₂ emissions in the EU cement industry", *Energy*, Vol. 36, N° 5, pp. 3244-3254.

[Pera y Ambrose, 2004] Pera, J. y Ambrose, J. (2004): "New applications of calcium sulfoaluminate cement", *Cement and concrete research*, N° 34, pp. 671-676.

[Perdan y Azapagic, 2011] Perdan, S. y Azapagic, A. (2011): *Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists*, 2ª ed., Azapagic, A. and S. Perdan, eds., John Wiley & Sons, Chichester.

[Pinkse, 2007] Pinkse, J. (2007): "Corporate intentions to participate in emission trading", *Business Strategy and the Environment*, Vol. 16, N° 1, pp. 12-25.

[PNUMA, 2007] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2007): *Guía simplificada del Informe especial sobre captura y almacenamiento de dióxido de carbono del IPCC*.

[Pon et al., 2007] Pon, D.; Calvo, M.; Arto, I.; Fernández, M; Martínez, S. y Planas, V. (2007): *Análisis preliminar de la huella ecológica en España. Informe de Síntesis*, Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad-Ministerio de Medio Ambiente.

[Ponsard y Walker, 2008] Ponsard, J.P. y Walker, N. (2008): "EU Emissions Trading and the Cement Sector: A Spatial Competition Analysis", *Climate Policy*, Vol. 8, N° 5, pp. 467-493.

[Portland, 2006] Portland Cement Association (2006): *Concrete Thinking for a Sustainable World*. Disponible en web: [http://www.cement.org/briefingkit/images/ConcreteThinking-Community.PPT#256,1,Concrete Thinking for a Sustainable World](http://www.cement.org/briefingkit/images/ConcreteThinking-Community.PPT#256,1,ConcreteThinkingforaSustainableWorld).

[Portland, 2011] Grupo Cementos Portland Valderrivas (2011): *Declaración Ambiental 2010. Fábrica Alcalá de Guadaíra*, Cementos Portland Valderrivas.

[Price et al., 2010] Price, L.; Hasanbeigi, A. y Lu, H. (2010): "Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants", *Energy*, N° 35, pp. 3461-3473.

[Price y Worrell, 2006] Price, L. y Worrell, E. (2006): "Global Energy Use, CO₂ Emissions and the Potential for Reduction in the Cement Industry", *Cement Energy Efficiency Workshop*, organised by the IEA in cooperation with WBCSD, Paris, 4-5 September 2006.

[Puertas y Blanco, 2004] Puertas E. y Blanco, M.T. (2004): "Empleo de combustibles alternativos en la fabricación de cemento. Efecto en las características y propiedades de los clínkeres y cementos", *Revista de Materiales de Construcción*, Vol. 54, Nº 274, pp. 51-64. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2004.v54.i274>. 232.

[PWHC, 2004] PricewaterhouseCoopers (2004): *Efectos de la aplicación del Protocolo de Kyoto en la economía española*, PricewaterhouseCoopers.

[Radulescu et al., 2009] Radulescu, M.; Radulescu, S. y Radulescu, C.Z. (2009): "Sustainable production technologies which take into account environmental constraints", *European Journal of Operational Research*, Vol. 193, Nº 3, pp. 730-740.

[RAE, 2012] Real Academia Española, vigésima segunda edición en <http://www.rae.es/rae.html>.

[Ramos, 2005] Ramos (2005): "El papel de los Fondos de Carbono en la estrategia española de utilización de los mecanismos flexibles del Protocolo de Kyoto: oportunidades de proyección internacional para la empresa española", *ICE*, Nº 822, pp. 131-141.

[Rathmann, 2007] Rathmann, M. (2007): "Do support systems for RES-E reduce EU-ETS-driven electricity prices?", *Energy Policy*, Vol. 35, Nº 1, pp. 342-352. Disponible en web: <http://0-search.proquest.com.columbus.uhu.es/docview/205322818?accountid=14549/>.

[RD 100/2011] Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación.

[RD 1030/2007] Real Decreto 1030/2007, de 20 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.

[RD 1073/2002] Real Decreto 1073/2002 sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente como resultado de la

aplicación de las Directivas 96/62/CE y 111/30/CE.

[RD 1130/2008] Real Decreto 1130/2008, de 4 de julio, por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

[RD 1131/1998] Real Decreto 1131/1998, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del RD 1302/86, de Evaluación de Impacto Ambiental, BOE nº 230 (05-10-88).

[RD 1264/2005] Real Decreto 1264/2005, de 21 de octubre, por el que se regula la organización y funcionamiento del Registro Nacional de Derechos de emisión.

[RD 1302/1986] Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental, BOE nº 155 (30-06-1986).

[RD 1315/2005] Real Decreto 1315/2005, de 4 de noviembre, por el que se establecen las bases de los sistemas de seguimiento y verificación de emisiones de gases de efecto invernadero en las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

[RD 1321/1992] Real Decreto 1321/1992 de 30 de octubre, por el que se modifica parcialmente el Real Decreto 1613/1985, de 1 de agosto, y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a la contaminación por dióxido de azufre y partículas.

[RD 1370/2006] Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012 (BOE nº 282 de 25/11/06).

[RD 1481/2001] Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (BOE nº 25 de 29/01/02).

[RD 1494/1995] Real Decreto 1494/1995, sobre contaminación atmosférica por ozono, BOE nº 230 (26-09-95).

[RD 1613/1985] Real Decreto 1613/1985, de 1 de agosto, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, de 6 de febrero, y se establecen nuevas normas de

calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de azufre y partículas.

[RD 1619/2005] Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.

[RD 1800/1995] Real Decreto 1800/1995, de 3 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 646/1991, de 22 de abril, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación a las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión y se fijan las condiciones para el control de los límites de emisión de SO₂ en la actividad del refino de petróleo.

[RD 1866/2004] Real Decreto 1866/2004, de 6 de Septiembre, por el que se aprueba el Plan nacional de asignación de derechos de emisión, 2005-2007.

[RD 252/2006] Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización establecidos en la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases, y por el que se modifica el RD 782/1998.

[RD 256/2003] Real Decreto 256/2003, de 28 de febrero, por el que se fijan los métodos de toma de muestras y de análisis para el control oficial del contenido máximo de plomo, cadmio, mercurio y 3-monocloropropano-1,2-diol en los productos alimenticios.

[RD 457/2007] Real Decreto 475/2007, de 13 de abril, por el que se aprueba la Clasificación Nacional de Actividades Económicas 2009 (CNAE-2009).

[RD 508/2007] Real Decreto 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas.

[RD 509/2007] Real Decreto 509/2007, para el desarrollo y ejecución de la Ley 16/2002 de prevención y control integrados de la contaminación IPPC.

[RD 547/1979] Real Decreto 547/1979, de 20 de febrero, sobre modificación del Anexo IV del Decreto 833/1975, de 8 de febrero, por el que se desarrolla la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico.

[RD 646/1991] Real Decreto 646/1991, de 22 de abril, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, BOE nº 99 (25-04-91).

[RD 653/2003] Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.

[RD 679/2006] Real Decreto 679/2006, de 2 de junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados.

[RD 717/1987] Real Decreto 717/1987, de 27 de mayo, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, de 6 de febrero, y se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de nitrógeno y plomo.

[RD 777/2006] Real Decreto 777/2006, de 23 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 1866/2004, de 6 de septiembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión, 2005/2007 (BOE nº 150 de 24/06/06).

[RD 782/1998] Real Decreto 782/1998, de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases.

[RD 812/2007] Real Decreto 812/2007, de 22 de junio, sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos.

[RD 833/1988] Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986 básica de residuos tóxicos y peligrosos.

[RD 952/1997] Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento de ejecución de la Ley 20/86, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos.

[RD 956/2008] Real Decreto 956/2008 de 6 de junio (Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08 y las Normas UNE, concordantes con la Norma europea EN 197).

[RDL 1302/1986] Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.

[RDL 4/2001] Real Decreto-Ley 4/2001, de 16 de febrero, sobre el régimen de intervención administrativa aplicable a la valorización energética de harinas de origen animal procedentes de la transformación de despojos y cadáveres de animales.

[RDL 5/2004] Real Decreto Ley 5/2004, de 27 de Agosto, por el que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, BOE nº 208 de 28-08-04.

[RDL 9/2000] Real Decreto-Ley 9/2000, de 6 de octubre, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.

[Reeb y Leavengood, 2000] Reeb, J.; Leavengood, S. (2000): "Using Duality and Sensitivity Analysis to Interpret Linear Programming Solutions", *Performance Excellence in the Wood Products Industry-Operations Research*, OSU Extension and Experiment Station Communications, EM 8744. Disponible en web: <http://extension.oregonstate.edu/catalog/pdf/em/em8744-e.pdf>.

[Registro EPER-España] Registro Europeo de Emisiones de Sustancias Contaminantes (EPER) establecido según se establece en el art. 15 de la directiva IPPC y en la posterior Decisión 2000/479/CE.

[Registro PRTR-España] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes establecido por el Reglamento (CE) 166/2006 E-PRTR, y regulado en España por el Real Decreto 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de Autorizaciones Ambientales Integradas. Disponible en web: <http://www.prtr-es.es/informes/industrialactivitypollutant.aspx>.

[Reglamento 1013/2006] Reglamento 1013/2006, de 14 de junio, relativo a los traslados de residuos.

[Reglamento 1031/2010] Reglamento 1031/2010 de la Comisión de 12 de noviembre de 2010 sobre el calendario, la gestión y otros aspectos de las subastas de los derechos de emisión de gases de efecto invernadero con arreglo a la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del

Consejo, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad L 302/1.

[Reglamento 166/2006] Reglamento (CE) 166/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de enero de 2006, relativo al establecimiento de un registro europeo de emisiones y transferencias de contaminantes y por el que se modifican las Directivas 91/689/CEE y 96/61/CE del Consejo.

[Reglamento 2037/2000] Reglamento 2037/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de junio de 2000 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono, DOCE nº 244 (29-09-00).

[Reglamento 801/2007] Reglamento 801/2007, relativo a la exportación, con fines de valorización, de determinados residuos, a determinados países a los que no es aplicable la decisión de la OCDE sobre el control de los movimientos transfronterizos de residuos.

[Rehan y Henfdí, 2005] Rehan, R. y Hendí, M. (2005): "Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry", *Environmental Science & Policy*, Vol. 8, Nº 2, pp. 105-114. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2004.12.006>.

[Rehan, 2005] Rehan, R.; Nehdi, M. (2005): "Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry", *Environmental Science & Policy*, Nº 8, pp. 105-114.

[Remmers et al., 1990] Remmers, J.; Morgenstern, T.; Schons, G.; Haasis, H.D. y Rentz, O. (1990): "Integration of air pollution control technologies in linear energy-environmental models", *European Journal of Operational Research*, Vol. 47, Nº 3, pp. 306-316.

[RENADE] Registro Nacional de Derechos de Emisión en <https://www.renade.es/welcome.do>.

[Riding et al., 2010] Riding, K.; Silva, D.A. y Scrivener, K. (2010): "Early age strength enhancement of blended cement systems by CaCl₂ and diethanol-isopropanolamine", *Cement and Concrete Research*, Nº 40, pp. 935-946.

- [Riestra et al., 2009]** Riestra, C.; López, A. y González, E. (2009): "El CO₂ y la industria en España. De la primera asignación de derechos a la etapa post-Kyoto", *Economía Industrial*, Nº 371, pp. 59-77
- [Rodríguez et al., 2008]** Rodríguez, N.; Alonso, M.; Grasa, G. y Abanades, J.C. (2008): "Process for Capturing CO₂ Arising from the Calcination of the CaCO₃ used in Cement Manufacture", *Environmental Science & Technology*, Nº 42, pp. 6980-6984.
- [Rodríguez et al., 2009]** Rodríguez, N.; Alonso, M.; Abanades, J.C.; Grasa, G. y Murillo, R. (2009): "Analysis of a process to capture the CO₂ resulting from the pre-calcination of the limestone feed to a cement plant," *Energy Procedia*, Vol. 1, Nº 1, pp. 141-148.
- [Rodríguez-Luque, 2005]** Rodríguez-Luque, A. (2005): *Estudio técnico económico para la fabricación de 1.000.000 de toneladas anuales de cemento Portland*, Trabajo de Master de Ingeniería Técnica Industrial, Especialidad Química Industrial, Universidad Politécnica de Cataluña. DOI:<http://hdl.handle.net/2099.1/6181>.
- [Romeo et al., 2011]** Romeo, L.M.; Catalina, D.; Lisbona, P.; Lara, Y. y Martínez, A. (2011): "Reduction of greenhouse gas emissions by integration of cement plants, power plants, and CO₂ capture systems", *Greenhouse Gases: Science and Technology*, Vol. 1, Nº 1, pp. 72-82. DOI: 10.1002/ghg3.5.
- [Rosado, 2004]** Rosado-Cubero, A. (2004): "La Industria del Cemento en España. Magnitudes y evolución entre 1994 y 2003", *Economía Industrial*, Nº 355 y 366, pp. 239-249.
- [Rovira et al., 2011]** Rovira, M.J.; Mari, M.; Nadal, M.; Schuhmacher, M. y Domingo, J.L. (2011): "Use of sewage sludge as secondary fuel in a cement plant: human health risks", *Environment International*, Nº 37, pp. 105-111. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2010.08.004>.
- [Rovira, 2008]** Rovira, M.J. (2008): "Futuro esquema europeo de comercio de derechos de emisiones (EU ETS): propuesta de Directiva", *Análisis del funcionamiento del comercio de Gases de Efecto Invernadero (GEI)-Congreso Nacional del Medio Ambiente-Cumbre del Desarrollo Sostenible, CONAMA 9*.
- [Ruiz, 2009]** Ruiz-García, M. (2009): "Preparación de combustibles a partir de residuos y su valorización en cementera", *Congreso Nacional Pyme y Medioambiente (COPYMA)*, 4 de junio.
- [SABI]** Sistema de Análisis de Balances Ibéricos: base de datos económica-financiera.
- [Sacoto y Esquivel, 2008]** Sacoto, M.A. y Esquivel K.C. (2008): *Aplicación de un sistema de control estadístico de procesos en las áreas de producción de cemento en compañía industrias Guapan S.A.*, Tesis previa a la obtención del título de Ingeniera Industrial, Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, Ecuador.
- [Sandoff y Schaad, 2009]** Sandoff, A. y Schaad, G. (2009): "Does EU ETS lead to emission reductions through trade? The case of the Swedish emissions trading sector participants", *Energy Policy*, Vol. 37, Nº 10, pp. 3967-3977.
- [Sanjuán, 2007]** Sanjuán, M.A. (2007): "Los Cementos de Adición en España del año 2000 al 2005", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 909, pp. 4-55.
- [Sanjuán, 2010]** Sanjuán, M.A. (2010): "Determinación de los componentes del cemento", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 937, pp. 4-34.
- [Santamaría y Linares, 2011]** Santamaría, A.; Linares, P. (2011): *Costes de reducción de CO₂ en la industria española*, Instituto de Investigación Tecnológica, U. Pontificia Comillas. Disponible en web: <http://www.eforenergy.org>.
- [Sato et al., 2007]** Sato, M.; Grubb, M.; Matthes, F. y Graichen, V. (2007): *Differentiation and dynamics of EU ETS industrial competitiveness impacts*, Climate Strategies, London.
- [Saxena, 2003]** Saxena, J.P. (2003): *Refractory Engineering and Kiln Maintenance*

in Cement Plants, Tech Books International, New Delhi, India.

[Schleich y Betz, 2005] Schleich, J. y Betz, R. (2005): "Incentives for energy efficiency and innovation in the European Emission Trading System", Proceedings of the 2005 European Council for an Energy-Efficient Economy Summer Study, Energy Savings: What Works & Who Delivers?, pp. 1495-1506. Disponible en Web: http://www.eceee.org/conference_proceedings/eceee/2005c/Panel_7/7124schleich/Paper/.

[Schmidt et al., 2008] Schmidt, J.; Helme, N.; Lee, J. y Houdashelt, M. (2008): "Sector-based approach to the post-2012 climate change policy architecture", *Climate Policy*, Vol. 8, Nº 5, pp. 494-515.

[Schmidt et al., 2012] Schmidt, T.S.; Schneider, M.; Rogge, K.S.; Schuetz, M.J.A. y Hoffmann, V.H. (2012): "The effects of climate policy on the rate and direction of innovation: A survey of the EU ETS and the electricity sector", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 2, Nº 3, pp. 23-48. Disponible en web: <http://ac.els-cdn.com/S2210422411000499/dx.doi.org/10.1016/j.eist.2011.12.002>.

[Schneider et al., 2011] Schneider, M.; Romer, M.; Tschudin, M. y Bolio, H. (2011): "Sustainable cement production. Present and future", *Cement and Concrete Research*, Nº 41, pp. 642-650.

[Schuhmacher, 2009] Schuhmacher, M. (2009): "El Protocolo de Kyoto en la industria del Cemento y uso de combustibles alternativos", Barcelona Climate Change Talks, 5 de Noviembre de 2009.

[Schultz, 2002] Schultz A. (2002): "Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien" [*Method for integrated economic and ecological assessment of production processes and technologies*], Doctoral Dissertation Magdeburg.

[SENDECO2] Sistema Electrónico de Derechos de Emisión de Dióxido de Carbono, EUA 2008-2012, Daily prices [en línea]. Disponible en Web: <www.sendeco2.com> [última consulta: 05 de junio de 2012].

[SEOPAN, 2011] Asociación de Empresas constructoras de ámbito Nacional (2011): *Informe Económico 2010*, Edita ANCOF, Madrid.

[Serna, 2009] Serna-Urán, C.A. (2009): *Desarrollo de modelos de programación matemática fuzzy para la planificación de la producción en contextos de incertidumbre. Un caso aplicado a la industria automotriz*, Tesis de grado para optar al título de magíster en ingeniería administrativa, Universidad Nacional de Colombia.

[Serrano y Santamarta, 2009] Serrano, L.L. y Santamarta, J. (2009): *Evolución de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en España (1990-2008)*. Disponible en web: http://www.portaldelmedioambiente.com/documentos/5677/evolucion_de_las_emisiones_de_gases_de_efecto_invernadero_en_espana_1990-2008/.

[Shackelford y Doremus, 2008] Shackelford, J.F. y Doremus, R.H. (2008): *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*, Springer+Business Media, New York, USA.

[Smale et al., 2006] Smale R.; Hartley M.; Hepburn C.; Ward, J. y Grubb, M. (2006): "The impact of CO₂ emissions trading on firm profits and market prices", *Climate Policy*, Vol. 6, Nº 1, pp. 29-46.

[SME, 1996] Society of Manufacturing Engineers (1996): *Green Manufacturing SME*, Product ID: BB96WBD1. J.

[Srivastava, 2007] Srivastava, S.K. (2007): "Green supply-chain management: A state-of the-art literature review", *International Journal of Management Reviews*, Vol. 9, Nº 1, pp. 53-80.

[Stefanovic et al., 2010] Stefanovic, G.M.; Vuckovic, G.D.; Stojiljkovi, M.M. y Trifunovi, M.B. (2010): "CO₂ Reduction Options in Cement Industry-the Novi Popovac Case", *Thermal Science*, Vol. 14, Nº 3, pp. 671-679.

[Strazza et al., 2010] Strazza, C., Borghi, A.D., Blengini, G.A. y Gallo, M. (2010): Definition of methodology for a sector EPD /environmental Product Declaration): Case study of the average Italian cement, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Nº 15, pp. 540-548.

- [Subai et al., 2006]** Subai, C.; Baptiste, P. y Niel, E. (2006): "Scheduling issues for environmentally responsible manufacturing: The case of hoist scheduling in an electroplating line", *International Journal of Production Economics*, Vol. 99, Nº 1, pp. 74-87.
- [Subramanian y Talbot, 2007]** Subramanian, R.; Gupta, S. y Talbot, B. (2007): "Compliance Strategies under Permits for Emissions", *Production and Operations Management*, Vol. 16, Nº 6, pp. 763-779. DOI 10.3401/poms.
- [Sun et al., 2009]** Sun, H.; Jain, R.; Nguyen, K. y Zuckerman, J. (2009): "Sialite technology-sustainable alternative to Portland cement", *Clean Technology Environmental Policy*, Nº 12, pp. 503-516.
- [Szabó et al., 2003]** Szabó, L.; Hidalgo, I.; Ciscar, J.C.; Soria, A. y Russ, P. (2003): "Energy Consumptions and CO₂ Emissions from the World Cement Industry", JRC-IPTS, EUR20769 European Commission.
- [Szabó et al., 2006]** Szabó, L.; Hidalgo, I.; Ciscar, J.C. y Soria, A. (2006): "CO₂ emission trading within the European Union and Annex B countries: the cement industry case", *Energy Policy*, Nº 34, pp. 72- 87.
- [Tam y Van der Meer, 2009]** Tam, C. y Van der Meer, R. (2009): "IEA/CSI Technology Roadmap for the Cement Industry", *Proceedings of the 6th International VDZ Congress 2009. Process Technology of Cement Manufacturing*, Düsseldorf, 30 September to 2 October 2009.
- [Tan et al., 2002]** Tan, X.C.; Liu, F.; Cao, H.J. y Zhang, H. (2002): "A decision-making framework model of cutting fluid selection for green manufacturing and a case study", *Journal of Materials Processing Technology*, Nº 129, pp. 467-470.
- [Tanaka, 2012]** Tanaka, M. (2012): "Multi-Sector Model of Tradable Emission Permits," *Environmental and Resource Economics*, Vol. 51, Nº 1, pp. 61-77.
- [Taylor et al., 2006]** Taylor, M.; Tam, C. y Gielen, D. (2006): "Energy Efficiency and CO₂ Emissions from the Global Cement Industry", *Paper prepared for the IEA-WBCSD workshop: Energy Efficiency and CO₂*, Paris, 4-5 September 2006.
- [Tekniker-IK4, 2011]** Tekniker-IK4; Departamento de Industria, Innovación, Comercio y Turismo del Gobierno Vasco (2011): *Ecocem. Herramienta para la mejora de la sostenibilidad de la industria cementera*, Programa Gaitek.
- [Torres y Hernández, 2009]** Torres, P. y Hernández, M. (2009): "Reciclado y valorización de residuos en la industria cementera en España", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 930, pp. 44-86.
- [Traber y Kemfert, 2009]** Traber, T. y Kemfert, C. (2009): "Refunding ETS-proceeds to spur the diffusion of renewable energies: an analysis based on the dynamic oligopolistic electricity market model Emelie", *SSRN Working Paper Series*, Rochester. Disponible en web: <http://search.proquest.com/docview/189859148?accountid=14549/>.
- [Trezza y Scian, 2005]** Trezza, M.A. y Scian, A.N. (2005): "Waste fuels: their effect on Portland cement clínker", *Cement and Concrete Research*, Nº 35, pp. 438-444.
- [UNDP, 2011]** United Nations Development Programme (2011): *Summary and Analysis of UNFCCC Climate Change. Conferencie in Durban, South Africa, 28 Nov.-9 Dic.*
- [UNFCCC, 1998]** United Nations Framework Convention on Climate Change (1998): *Protocol de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, FCCC/INFORMAL/83* GE.05-61702 (S) 30605 130605.
- [Urcelay, 2006]** Urcelay-Gordóbil, C.(2006): "Utilización de combustibles alternativos en las fábricas de cemento", CONAMA 8. Disponible en web: <http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/CTs/CT120.pdf>.
- [US EPA, 2007]** US Environmental Protection Agency (2007): *Energy Trends in Selected Manufacturing Sectors: Opportunities and Challenges for Environmentally Preferable Energy Outcomes.*
- [US EPA, 2010]** U.S. Environmental Protection Agency (2010): *Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Portland Cement Industry*, Research Triangle Park, North Carolina 27711. Disponible en web:

<http://www.epa.gov/nsr/ghgdocs/cement.pdf>.

[Valderrama et al., 2012] Valderrama, C.; Granados, R.; Cortina, J.L.; Gasol, C.M.; Guillem, M.; Josa, A. (2012): "Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 25, pp. 60-67.

[Vallina, 2010] Vallina-García, D. (2010): "Valorización de residuos de biomasa en el sector cementero español: oportunidad para reducir las emisiones de CO₂", *6ª Jornada logística, preparación y suministro de biomasa para usos energéticos*, Valladolid.

[Van der Vleuten, 1994] Van der Vleuten, F.P. (1994): "Cement in Development", *Energy and Environment*, Petten, Netherlands: Netherlands Energy Res. Found.

[Van Oss y Padovani, 2002] Van Oss, H.G. y Padovani, A.C. (2002): "Cement manufacture and the environment-Part I: Chemistry and technology", *Journal of Industrial Ecology*, Nº 6, pp. 89-106.

[Van Oss y Padovani, 2003] Van Oss, H.G. y Padovani, A.C. (2003): "Cement Manufacture and the Environment - Part II: Environmental Challenges and Opportunities", *Journal of Industrial ecology*, Vol. 7, Nº 1, pp. 93-126.

[Vanderborght y Ruppert, 2008] Vanderborght, B. y Ruppert, J. (2008): "CO₂ savings from alternative fuels in the cement industry", *ECRA conference*, Prague, 16 May 2008. Disponible en web: http://www.voeb.at/media/FB%202008/07_vanderborght_c02_savings_from_alternative_fuels_in_the_cement.pdf.

[VDZ, 2006] VDZ (2006): "Environmental protection in cement manufacture" en *Activity Report 2003-2005*, pp. 40-61. Disponible en web: http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Activity_Report/AR_Kap_II_UK.pdf

[Vidal y Goetschalckx, 1997] Vidal, C.J. y Goetschalckx, M. (1997): "Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models", *European Journal of Operational Research*, Vol. 98, Nº 1, pp.1-18.

[Viveros y Salazar, 2010] Viveros, R. y Salazar, E. (2010): "Modelo de planificación de producción para un sistema multiproducto con múltiples líneas de producción", *Revista Ingeniera de Sistemas*, Vol. 24, pp. 89-102.

[Wang et al., 2009] Wang, J.; Dai, Y. y Gao, L. (2009): "Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry", *Applied Energy*, Nº 86, pp. 941-948.

[WBCSD, 2000] World Business Council for Sustainable Development (2000): *Eco-efficiency: creating more value with less impact*, WBCSD.

[WBCSD, 2003] World Business Council for Sustainable Development-Working Group Cement. (2003): "The Cement CO₂ Protocol: CO₂ Emissions Monitoring and Reporting Protocol from the European Emissions Reduction & Trading System", *Guide to the Protocol*, 22 de Mayo.

[WBCSD, 2010] World Business Council for Sustainable Development (2010): *Visión 2050. Una nueva agenda para los negocios*, WBCSD.

[WBCSD/CSI, 2005] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative (2005): *Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process*, WBCSD. Disponible en web: http://www.wbcSDcement.org/pdf/tf2_guidelines.pdf.

[WBCSD/CSI, 2009a] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative (2009): *A Sectorial Approach Greenhouse gas mitigation in the cement industry*, WBCSD.

[WBCSD/CSI, 2009b] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative (2009): *Cement Industry Energy and CO₂ Performance "Getting the Numbers Right"*, WBCSD.

[WBCSD/CSI, 2010] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative

(2010): Global Cement Database on CO₂ and Energy Information.

[WBCSD/CSI, 2011a] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative (2011): Cement CO₂ and Energy Protocol, Version 3.04, CO₂ Emissions and Energy Inventory.

[WBCSD/CSI, 2011b] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative (2011): *CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry*, Version 3.0., WBCSD.

[WBCSD/CSI, 2011c] World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative (2011): *Guía para la rehabilitación de canteras*. Disponible en web: <http://www.ficem.org/publicaciones-alianzas/Documentos-CSI/Documento-Recuperacio-de-canteras.pdf>.

[WBCSD/IEA, 2009] World Business Council for Sustainable Development/International Energy Agency (2009): *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050*, OECD/IEA and WBCSD.

[Weyant, 1999] Weyant, J.P. (1999): "The Costs of the Kyoto Protocol: a Multi-Model Evaluation", *The Energy Journal*, Nº 20, pp. 157-175.

[Wiedmann et al., 2006] Wiedmann, T.; Minx, J.; Barret, J. y Wackernagel, M. (2006): "Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis", *Ecological Economics*, Nº 56, pp. 28-48.

[Wiedmann y Minx, 2007] Wiedmann, T. y Minx, J. (2007): "A Definition of Carbon Footprint", *ISA Research Report*, Nº 7-1, pp. 1-9. Disponible en web: http://www.censa.org.uk/docs/ISA-UK_Report_07-01_carbon_footprint.pdf.

[Worrell et al., 2000] Worrell, E.; Martin, N. y Price, L. (2000): "Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry", *Energy*, Nº 25, pp. 1189-1214.

[Worrell et al., 2001] Worrell, E.; Price, L.; Martin, N.; Hendriks, C. y Meida, L.O. (2001): "Carbon dioxide emissions from the

global cement industry", *Annual Review Energy Environmental*, Nº 26, pp. 303-29.

[Worrell et al., 2008] Worrell, E.; Galitsky, C. y Price, L. (2008): *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making. An energy star*, Guide for Energy and Plant Managers. Disponible en web: <http://www.energystar.gov/ia/business/industry/LBNL-54036.pdf>.

[Wu y Chang, 2004] Wu, C.C. y Chang, N. B. (2004): "Corporate optimal production planning with varying environmental costs: A grey compromise programming approach", *European Journal of Operational Research*, Vol. 155, Nº 1, pp. 68-95.

[Wüstenhagen et al., 2007] Wüstenhagen, R.; Wolsink, M. y Bürer, M.J. (2007): "Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept", *Energy Policy*, vol. 35, pp. 2683-2691.

[Yellepeddi et al., 2008] Yellepeddi, R.; Dupayrat, M.; Bonvint, D. y Martínez, J. (2008): "Análisis de combustibles alternativos en la industria cementera con el uso de XRF", *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, Nº 917, pp. 48-53.

[Yi et al., 2009] Yi, Z.L.; Sun, H.H.; Wan, J.H. y Li, C. (2009): "A New Process for Highly Effective Utilization of Industrial Solid Wastes - Sialite Technology", *Advanced Materials Research*, Nº 66, pp. 210-213.

[Zabaniotou y Theofilou, 2008] Zabaniotou, A. y Theofilou, C. (2008): "Green energy at cement kiln in Cyprus. Use of sewage sludge as a conventional fuel substitute", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Nº 12, pp. 531-541.

[Zaragoza, 2007] Zaragoza-Ramírez, A. (2007): "Uso Sostenible de los Recursos en el Sector Cementero", OFICEMEN. Disponible en web: http://www.ciccp.es/biblio_digital/V_Congreso/congreso/pdf/020405.pdf/.

[Zaragoza, 2009] Zaragoza, A. (2009): "Retos y oportunidades ante el nuevo escenario mundial global o cómo hacer de la necesidad una virtud", *Combustibles alternativos en hornos de cemento: una contribución a la Sostenibilidad y al*

Protocolo de Kyoto, Barcelona, 5 de Noviembre de 2009.

[Zeman, 2009] Zeman, F. (2009): "Oxygen combustion in cement production", *Energy Procedia*, N° 1, pp. 187-194.

[Zetterberg et al., 2004] Zetterberg, L.; Nilsson, K.; Åhman, M.; Kumlin, A.S. y Birgersdotter, L. (2004): *Analysis of national allocation plans for the EU ETS*, IVL Report-IVL Swedish Environmental Research Institute.

[Zhou et al., 2012] Zhou, M.; Pan, C.; Chen, Z.; Yang, W. y Li, B. (2012): "Selection and evaluation of green production strategies: analytic and simulation models", *Journal of Cleaner Production*, N° 26, pp. 9-17.

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

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

<http://www.cemolins.es/>.

<http://www.ciemat.es/>.

<http://www.cimpor.es/>.

<http://www.cportland.es/>.

<http://www.etsimo.es/>.

<http://www.factorco2.com/>.

<http://www.fym.es/>.

<http://www.grupoag.es/>.

<http://www.holcim.es/>.

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

<http://www.lafarge.com.es/>.

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

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