

ALTERNATIVES FOR REDUCING CARBON DIOXIDE (CO<sub>2</sub>) EMISSIONS IN CEMENT PRODUCTION. PROPOSAL FOR AN EVALUATION MODEL

**ABSTRACT:** The optimal combination of available measures for setting emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) looking to reconcile production objectives with environmental criteria, requires of planning approaches in industrial production that incorporate new parameters and variables to assess the impact of operational decisions on such emissions, according to limitations established on the Kyoto Protocol. After conducting a detailed analysis of the potential for improving the alternatives available in order to reduce CO<sub>2</sub> emissions from cement production, this paper addresses optimization decisions with an integrated approach, using a linear programming model that jointly includes the viable alternatives for reducing emissions and considering those derived from the application of the flexibility mechanisms of the Kyoto Protocol, as well as those aimed at improving products and production processes. The implementation of such model will improve the decision-making process by making possible to consider different scenarios and obtain relevant information through the post-optimal analysis. It includes, among other alternatives, the maximum amount payable by the facilities in the market for the rights to emit an additional ton of CO<sub>2</sub>, or possible changes in the production mix to increase profitability, both relative to type of product as to the manufacturing quantity thereof.

**KEYWORDS:** CO<sub>2</sub> emissions, cement industry, environmental management, production planning, Kyoto Protocol, integrated-preventive approach.

ALTERNATIVAS DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) NA PRODUÇÃO DE CIMENTO. PROPOSTA DE UM MODELO DE AVALIAÇÃO

**RESUMO:** A combinação ideal das medidas disponíveis de ajuste de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para compatibilizar os objetivos de produção com as exigências ambientais requer explicações no planejamento da produção industrial, com incorporação de novos parâmetros e variáveis que permitam avaliar o impacto das decisões operativas sobre essas emissões, sujeitas a limitações do Protocolo de Kyoto. Depois de realizar uma análise detalhada do potencial de melhora das alternativas disponíveis para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> derivadas da produção de cimento, abordamos neste trabalho as decisões de otimização com um enfoque integrado, empregando um modelo de programação linear que contempla conjuntamente as alternativas viáveis para reduzir as emissões e considerando tanto as derivadas da aplicação dos mecanismos de flexibilidade do Protocolo de Kyoto quanto as destinadas a melhorar os produtos e os processos produtivos. Sua aplicação permitirá melhorar o processo de tomada de decisões, ao permitir considerar diferentes cenários e obter informação relevante por meio da análise pós-ideal. Inclui-se, entre outras alternativas, a quantidade máxima a pagar pelas instalações no mercado de direitos para emitir uma tonelada adicional de CO<sub>2</sub>, ou possíveis mudanças no mix de produção para aumentar a rentabilidade, tanto relativos ao tipo de produtos quanto à quantidade a fabricar deles.

**PALAVRAS-CHAVE:** Emissões de CO<sub>2</sub>, indústria de cimento, gestão ambiental, planejamento da produção, Protocolo de Kyoto, enfoque integrado preventivo.

ALTERNATIVES POUR LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE (CO<sub>2</sub>) DANS LA PRODUCTION DE CIMENT. PROPOSITION D'UN MODÈLE D'ÉVALUATION

**RÉSUMÉ :** La combinaison optimale des mesures disponibles du réglage des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) pour concilier les objectifs de production aux exigences environnementales nécessite d'une approche en matière de planification de la production industrielle qui incorpore des nouveaux paramètres et variables pour évaluer l'impact des décisions opérationnelles sur lesdites émissions, soumis aux limitations du protocole de Kyoto. Après l'analyse détaillée du potentiel d'amélioration des alternatives possibles pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la production de ciment, on aborde dans ce travail les décisions d'optimisation avec une approche intégrée, en utilisant un modèle de programmation linéaire qui tient compte, de manière conjointe, les alternatives viables pour réduire les émissions, tout en considérant non seulement celles qui découlent de l'application des mécanismes de flexibilité du Protocole de Kyoto, mais aussi celles qui visent à améliorer les produits et les processus de production. Leur mise en œuvre permettra d'améliorer le processus de prise de décisions, tout en permettant d'envisager les différents scénarios et d'obtenir des informations pertinentes au moyen de l'analyse post-optimale. Cela comprend, entre autres possibilités, le montant maximal payable par les installations dans le marché des droits pour l'émission d'une tonne supplémentaire de CO<sub>2</sub>, ou les possibles changements dans la composition de la production pour augmenter la rentabilité, par rapport tant au type des produits comme à la quantité de produits fabriqués.

**MOTS-CLÉ :** Émissions de CO<sub>2</sub>, industrie du ciment, gestion de l'environnement, planification de la production, Protocole de Kyoto, approche préventive intégrée.

**CORRESPONDENCIA:** Prof. Ana Gessa Perera. Facultad Ciencias Empresariales. Universidad de Huelva. Plaza de la Merced, 11. 21071 Huelva, España.

**CITACIÓN:** Gessa Perera, A., & Sancha Dionisio, M. (2016). Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación. *Innovar*, 26(60), 51-66. doi: 10.15446/innovar.v26n60.55532.

**ENLACE DOI:** <http://dx.doi.org/10.15446/innovar.v26n60.55532>.

**CLASIFICACIÓN JEL:** M11, L61, C61.

**RECIBIDO:** Abril 2013, **APROBADO:** Abril 2014.

# Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación<sup>1</sup>

Ana Gessa Perera

Ph.D. en Ciencias Económicas y Empresariales

Universidad de Huelva

Huelva, España

Correo electrónico: gessa@uhu.es

Enlace ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0477-1297>

M<sup>a</sup> del Pilar Sancha Dionisio

Ph.D. en Ciencias Económicas y Empresariales

Universidad de Huelva

Huelva, España

Correo electrónico: mpsancha@uhu.es

Enlace ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3221-0892>

**RESUMEN:** La combinación óptima de las medidas disponibles de ajuste de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para compatibilizar los objetivos de producción con las exigencias medioambientales requiere planteamientos en la planificación de la producción industrial, con incorporación de nuevos parámetros y variables que permitan evaluar el impacto de las decisiones operativas sobre dichas emisiones, sujetas a las limitaciones del Protocolo de Kyoto. Tras realizar un análisis detallado del potencial de mejora de las alternativas disponibles para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la producción de cemento, abordamos en este trabajo las decisiones de optimización con un enfoque integrado, empleando un modelo de programación lineal que contempla conjuntamente las alternativas viables para reducir las emisiones y considerando tanto las derivadas de la aplicación de los mecanismos de flexibilidad del Protocolo de Kyoto como las destinadas a mejorar los productos y los procesos productivos. Su aplicación permitirá mejorar el proceso de toma de decisiones, al permitir considerar diferentes escenarios y obtener información relevante a través del análisis postoptimal. Se incluye, entre otras alternativas, la cantidad máxima a pagar por las instalaciones en el mercado de derechos para emitir una tonelada adicional de CO<sub>2</sub> o posibles cambios en el mix de producción para aumentar la rentabilidad, tanto relativos a tipo de productos como a cantidad a fabricar de los mismos.

**PALABRAS CLAVE:** Emisiones de CO<sub>2</sub>, industria de cemento, gestión medioambiental, planificación de la producción, Protocolo de Kyoto, enfoque integrado preventivo.

## Introducción

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

<sup>1</sup> El presente artículo es resultado de la tesis *Nuevo enfoque de la planificación de la producción sostenible del cemento: propuesta de un modelo de optimización para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>*, realizada por M<sup>a</sup> del Pilar Sancha Dionisio y dirigida por Ana Gessa Perera.

de efecto invernadero (GEI) del Protocolo de Kyoto (PK). Este compromiso constituye un verdadero desafío para las empresas comprendidas en el ámbito de aplicación de la Directiva 2003/87/CE, entre las que se incluye la industria de cemento.

El PK obliga a las instalaciones de cemento incluidas en la citada Directiva a controlar sus emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de manera que aquellas no superen a las emisiones autorizadas. Estas dependerán de las cantidades que les sean asignadas (según sector y método de cálculo) 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 proyectos de Aplicación Conjunta y Mecanismo de Desarrollo Limpio).

Los objetivos de reducción acordados para la etapa post Kyoto (2013-2020), o la posibilidad de abandono del mecanismo de asignación gratuita de permisos a ciertas industrias a partir de 2013 son, entre otros, retos que introducen nuevas incertidumbres en una industria que aún no se ha recuperado de los efectos de la crisis económica. Es precisamente en este marco donde se encuadra la necesidad de evaluar el potencial de las medidas de reducción de emisiones y el impacto económico que estas implican para la industria del cemento.

Para contribuir a paliar ese déficit, en este trabajo se propone un modelo de optimización para valorar el impacto de las limitaciones de emisiones de CO<sub>2</sub> en la planificación de la producción de la industria responsabilizada por el aumento de GEI. Su aplicación permitirá determinar el plan de producción que maximice el beneficio, presentando los posibles escenarios en los que pueden desarrollar su producción las plantas cementeras, en función de las posibilidades y limitaciones de las opciones de mejora analizadas y propuestas en este trabajo. Esto permitirá tomar, anticipadamente, decisiones para compatibilizar los objetivos económicos con los ambientales. Además, este nuevo enfoque permitirá a las empresas abordar las cuestiones medioambientales de una forma proactiva, y no de manera reactiva.

El interés de centrar nuestro estudio en el sector del cemento es justificado por las consecuencias que la normativa medioambiental (principalmente las derivadas del PK) tiene para el mismo. El escaso margen de maniobra para responder a las exigencias medioambientales, así como el alto nivel de riesgo de fuga y de pérdida de competitividad al que se encuentra expuesto este sector condicionan el escenario donde tendrá que desarrollar su actividad en los próximos años; así se pone de manifiesto en la bibliografía consultada que sustenta el marco teórico de este trabajo,

donde se refleja la preocupación de la comunidad científica y los responsables del sector por una gestión eficiente del carbono.

Para alcanzar nuestro propósito, hemos estructurado el trabajo en varios apartados. Comenzamos con una revisión de las prácticas, disponibles y emergentes, para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción del cemento, que marcan en la última década una etapa de transición hacia la producción de cemento de bajo carbono; a continuación, realizamos la propuesta a través de un modelo de optimización que permita obtener el plan de producción que proporcione un resultado óptimo compatible con la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, para finalizar presentando las principales conclusiones derivadas del trabajo.

### Transición hacia una producción de cemento de bajo carbono: revisión de las prácticas medioambientales

La producción de cemento se encuentra entre las mayores fuentes de emisiones antropogénicas de GEI, aproximadamente el 5% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (Worrell, Price, Martin, Hendriks y Meida, 2001). La producción de clínker (producto intermedio obtenido en el proceso de fabricación del cemento) es la responsable del total de las emisiones directas de CO<sub>2</sub> en esta industria. Aproximadamente el 60% de estas emisiones se deben a las reacciones químicas que sufren las materias primas en el horno, y el 40% restante son debidas a la combustión. El resto de las emisiones de dicho GEI (6-10%) proviene del consumo energético (tanto térmico como eléctrico) de las diferentes fases del proceso, que comprende desde la extracción de la materia prima hasta la expedición de los productos fabricados (EIPPCB, 2010) (ver Figura 1).

Según el modelo de producción de cemento propuesto por Ammenberg, Feiz, Helgstrand, Eklund y Baas (2011), las alternativas con distinto potencial de reducción de la huella de carbono de la industria del cemento se pueden integrar, bajo un adecuado marco de gestión medioambiental, en diferentes grupos de estrategias (ver Figura 2).

Se trata de las medidas destinadas a mejorar la eficiencia productiva, de las encaminadas a introducir recursos alternativos menos contaminantes en la producción y cambios en los productos fabricados (mejoras y nuevos productos) y, por último, de las propuestas para crear sinergias externas de colaboración para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. La Tabla 1 recoge las categorías y subcategorías que se incluyen en cada una de las estrategias de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> identificadas.


**TABLA 1. Estrategias de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción del cemento**

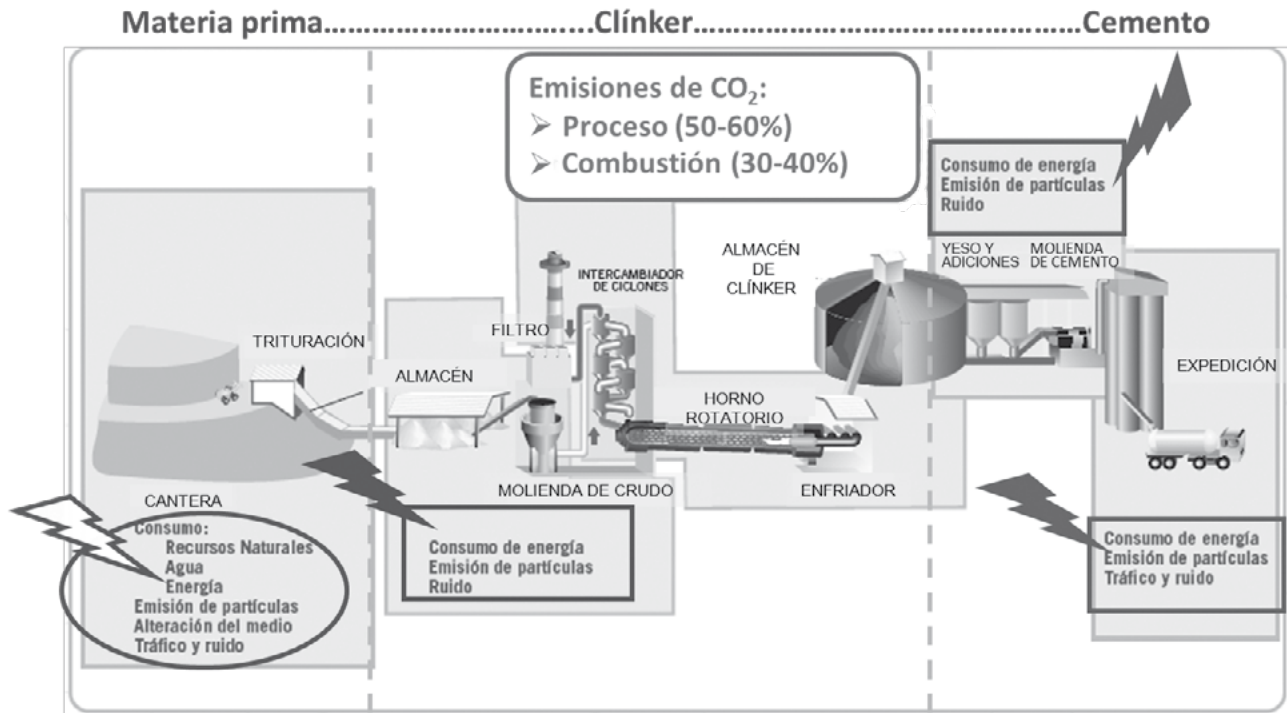
Eficiencia productiva	Eficiencia energética	Eficiencia eléctrica
		Eficiencia térmica
	Recuperación de recursos	Utilización de parte de la energía térmica del gas de escape en el secado o precalentamiento de la materia prima o combustibles
		Cogeneración (calor y electricidad)
		Reciclado
Recursos alternativos	Materia prima	Producción de clínker a baja temperatura
		Consumo de materias primas alternativas en la producción de clínker
	Recursos energéticos	Utilización de combustibles alternativos
		Energía renovable
Cambios en productos	Mejora de los productos actuales	Sustitución de clínker (con materias primas alternativas)
	Desarrollo de nuevos productos	Mejora de las propiedades de los cementos
		Con una menor proporción de clínker y nuevos tipos de cementos "ecológicos"
Sinergias externas	CO <sub>2</sub> y aprovechamiento del calor residual	Captura y almacenamiento de carbono
		Producción biológica <sup>(1)</sup>
		Calefacción sinérgica <sup>(2)</sup>
	Procesos de integración e iniciativas industriales	Integración con plantas de energía
		Integración con empresas de tratamiento de residuos
		Sinergias con otras empresas
Gestión	Estrategia medioambiental y nuevos enfoques de gestión	
	Marketing, educación y relaciones públicas	
	Normas y especificaciones	

(1) 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.

(2) Por ejemplo, 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.

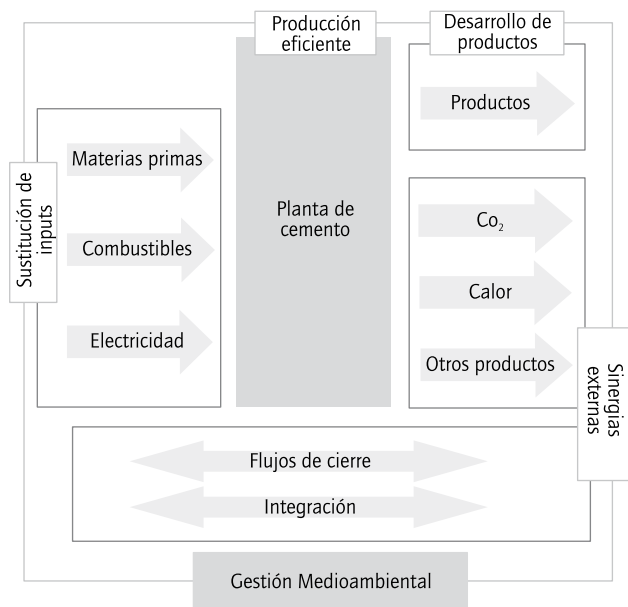
Fuente: Elaboración propia a partir de Feiz (2011, p. 36) y Ammenberg *et al.* (2011, p. 83).

FIGURA 1. Aspectos medioambientales del proceso de producción del cemento



Fuente: Adaptado de FLACEMA (2009, p. 26).

FIGURA 2. Integración de las medidas de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de cemento



Fuente: Adaptado de Ammenberg et al. (2011, p. 82).

Entre las medidas destinadas a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, el uso de recursos materiales y energéticos alternativos se convierte en pieza clave de la gestión del CO<sub>2</sub> en la producción del cemento. Entre estas, la valorización de residuos se contempla como una de las alternativas con mayor potencial de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, tal y como se desprende de la revisión bibliográfica realizada en este ámbito (Kawai y Osako, 2012; Irassar, Violini, Rahhal, Milanesi, Trezza y Bonavetti, 2011; Borralleras, 2010; Lam, Barford y McKay, 2010; Bauer y Hoening, 2009; Nadal, Schuhmacher y Domingo, 2009; Murray y Price, 2008; Zabaniotou y Theofilou, 2008; Navia, Rivelab, Sorber y Menéndez, 2006; etc.). El objetivo final de la valorización de los residuos es que estos:

... 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).

Dicha valorización incluye tanto la recuperación material o reciclado como la recuperación energética, denominada también esta última *valorización energética o incineración*.

La utilización progresiva de residuos en la producción de cemento, en el marco legal correspondiente (relativo tanto a la normativa reguladora de las especificaciones y exigencias para su fabricación como a la relativa al uso y consumo de residuos en el sector analizado), permite fabricar clínker sin disminuir la calidad ni las prestaciones de los productos fabricados y, a la vez, reducir su impacto sobre la atmósfera. Aunque las posibilidades de aplicación en este campo son muchas y variadas, el nivel de aplicación de la valorización de residuos en la producción del cemento difiere en cuanto al margen de mejora, según la localización de las instalaciones. Además de las limitaciones derivadas de las propiedades físicas y químicas de los residuos empleados (como el bajo poder calorífico, alto contenido en humedad, alta concentración de trazas de cloro para el caso de los combustibles y contenido mínimo de óxidos de calcio y magnesio para el caso de la materia prima), hay que añadirle las condiciones económicas, legales, técnicas, comerciales y sociales requeridas para su uso (Hoenig y Twigg, 2009; CEMBUREAU, 2009; WBCSD/IEA, 2009; Van Oss y Padovani, 2003). Tales condiciones marcan el margen de mejora vía valorización para cada instalación de manera que la tasa óptima de sustitución de los recursos tradicionales por alternativos 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; MMA, 2004).

Para evaluar y comparar las oportunidades de mejora que ofrece esta alternativa de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción del cemento, trabajos como los de Valderrama, Granados, Cortina, Gasol, Guillem y Josa (2013), Korínek, Tusil, Kocí y Tichá (2012), Boesch y Hellweg (2010) y Navia *et al.* (2006) utilizan el análisis de ciclo de vida. Esta metodología proporciona información relevante para seleccionar alternativas o soluciones de bajo carbono con criterios objetivos. Además, este análisis permite detectar de forma eficaz las oportunidades de mejora de todo el sistema, no limitándose únicamente a la instalación objeto de estudio, sino permitiendo la cuantificación de todas las consecuencias para el medio ambiente (desde la cuna hasta la tumba) que lleva consigo la producción y uso de los residuos.

En relación con otra de las vías de ajuste disponibles para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción del cemento procedente del consumo energético, se proponen diferentes medidas para reducir el consumo de energía

eléctrica, cuya aplicación y valoración han sido abordadas en diferentes trabajos (Conesa, Rey, Egea y Rey, 2011; Hasanbeigi, Menke y Therdyothin, 2011; Moya, Pardo y Mercier, 2010, 2011; Hasanbeigi, Price, Lu y Lan, 2010; US EPA, 2010; Liu y Li, 2009; Bauer y Hoening, 2009; Worrel, Galitsky y Price, 2008; Szabó, Hidalgo, Ciscar, Soria y Russ, 2003; etc.). El consumo de energía eléctrica está condicionado por la 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.

Las anteriores actuaciones, acompañadas de la implantación de medidas destinadas a aprovechar diferentes residuos generados en la propia producción del cemento (cogeneración, reciclado, uso de la energía térmica de los gases de escape, etc.) y de mecanismos de prevención y control de la contaminación, redundarán en una mejora de la eficiencia productiva de las instalaciones de cemento. Trabajos como los de Moya *et al.* (2011), Al-Hinti, Al-Ghandoor, Al-Naji, Abu-Khashabeh, Joudeh y Al-Hattab (2008), Engin y Ari (2005) y Khurana, Banerjee y Gaitonde (2002) analizan la viabilidad técnica y/o económica de algunas de las medidas propuestas.

Otra de las medidas viables para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, en relación también con la composición química y propiedades del cemento, 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 de clínker o mejorando las propiedades de los cementos mezclados) o desarrollando nuevos productos con menor proporción de clínker y de material calcáreo, y que requieran menos tiempo de procesamiento. Investigaciones como las de Irassar *et al.* (2011), Nochaiya, Wongkeo y Chaipanich (2010), O'Rourke, McNally y Richardson (2009), Yi, Sun, Wan y Li (2009), Lin y Zhao (2009), García, Vigil, Vegas, Frías y Sánchez (2008), Gartner y Quillin (2007), Sun, Li, Wang y Zhao (2007) y Antiohos, Chouliara y Tsimas (2006), muestran las posibilidades y limitaciones de la aplicación de tales medidas, bajo determinadas condiciones de producción.

En la misma línea anterior de actuación, e integrando varias de las alternativas ya presentadas, la industria analizada 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 en marcha y que

han obtenido sus primeros resultados. Una muestra de ellos es la nueva técnica de producción desarrollada por el grupo de Nanomateriales en Construcción (NANOC) de Tecnia Corporación Tecnológica, que sustituye la piedra caliza como materia prima por residuos sólidos de las centrales térmicas (principalmente cenizas volantes); también el nuevo tipo de cemento desarrollado por la empresa británica Novacem que se compone principalmente de silicato de magnesio que permite absorber CO<sub>2</sub> durante la producción en mayor cantidad que la producida (de ahí que le llamen Cemento Carbono Negativo<sup>2</sup>) y la desarrollada por Cementos Calera que utiliza un proceso denominado *mineralización de carbonatos por precipitación acuosa* para fabricar otro tipo de cemento ecológico.

En otro ámbito de actuación (sinergias externas), y en línea con otras actividades industriales, hay que destacar el potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> que ofrece la tecnología de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CAC), 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. Esta tecnología, que se vislumbra como una prometedora oportunidad en este campo, consiste en un proceso de separación del CO<sub>2</sub> emitido en algunos procesos industriales y fuentes relacionadas con la energía, su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo. Algunos de los resultados de las investigaciones realizadas en este campo se pueden encontrar en Naranjo, Brownlow y Garza (2011), Romeo, Catalina, Lisbona, Lara y Martínez (2011), Barker, Turner, Napier-Moore, Clarck y Davison (2009), Bosoaga, Masek y Oakey (2009), Frank (2009), Zeman (2009), Rodríguez, Alonso, Grasa y Abanades (2008), Hegerland, Pande, Haugen, Eldrup, Tokheim y Hatlevik (2006), Grönkvist, Bryngelsson y Westermarck (2006) y Metz, Davidson, De Coninck, Loos y Meyer (2005). Aunque las tres posibles alternativas de las técnicas CAC (poscombustión, oxcombustión y precombustión) son viables técnicamente en la industria del cemento, la tecnología de precombustión tiene una aplicación más limitada por las características del proceso de producción y por los requerimientos de inversión superiores a las otras dos alternativas.

No obstante, aunque la tecnología de CAC en el sector de cemento es una atractiva solución potencial para reducir

el CO<sub>2</sub> 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 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 CAC no estaría disponible antes de 2020.

Otra alternativa de sinergia externa es la integración de procesos industriales que permita crear soluciones económica y ecológicamente racionales. Entre estas medidas se incluyen la producción combinada de energía y de cemento (Romeo *et al.*, 2011; Bosoaga *et al.*, 2009; Weimer, Berger, Hawthorne y Abanades, 2008), la integración de las plantas de conversión de residuos en energía y de las de producción del cemento (Nadal *et al.*, 2009; Weiland, 2009; Golush, 2008; Giugliano, Grosso y Rigamonti, 2008; Koukouzas, Katsiadakis, Karlopoulos y Kakaras, 2008; Zabaniotou y Theofilou, 2008). Asimismo, se pueden incluir los trabajos de Ammenberg *et al.* (2011) y de Hashimoto, Fujita, Geng y Nagasawa (2010).

### Plan de producción de cemento y las emisiones de CO<sub>2</sub>: nuevo enfoque sostenible en el marco del Protocolo de Kyoto

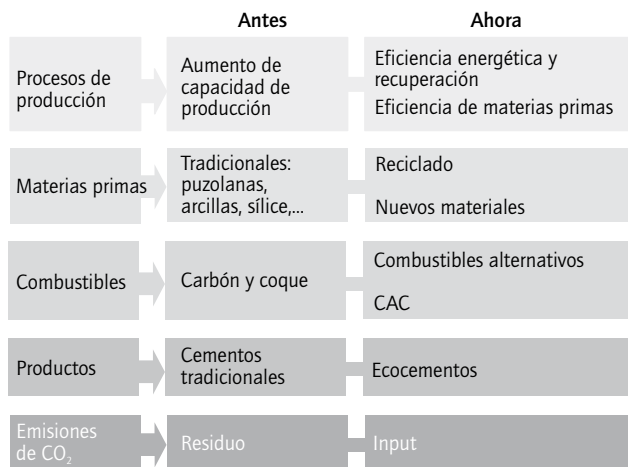
El marco de actuación descrito en el apartado anterior refleja la necesidad de un cambio de modelo de producción en el sector cementero (ver Figura 3) que requiere, por tanto, de nuevos planteamientos de la planificación de la producción que incorpore criterios de sostenibilidad, incluyendo nuevas variables y parámetros.

Así pues, en este contexto, el compromiso de Kyoto asumido por la comunidad internacional obliga a las instalaciones de cemento incluidas en la Directiva 2003/87/CE a controlar sus emisiones de CO<sub>2</sub>, de manera que no superen las emisiones autorizadas. El cumplimiento de dicha obligación dependerá de las medidas de ajuste adoptadas por la industria que, tal y como se recoge en la Figura 4, podrán agruparse en dos bloques según se actúe sobre las emisiones verificadas o sobre las autorizadas.

- 1) Los ajustes sobre *las emisiones autorizadas* de CO<sub>2</sub> dependen de la cantidad asignada a cada instalación anualmente (según sector y método de cálculo) y del nivel de utilización de los mecanismos disponibles en el PK (mercado de derechos, aplicación conjunta y/o

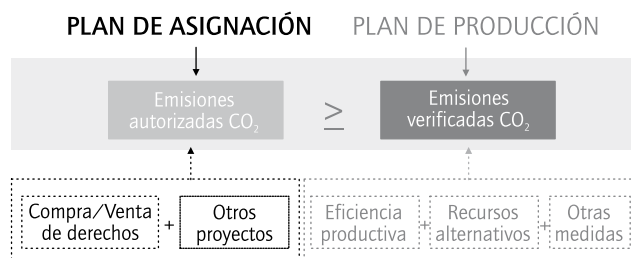
<sup>2</sup> Las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducen a la mitad (0,5 toneladas por tonelada de cemento fabricado), y se absorben cuando se endurece alrededor de 1,1 toneladas de CO<sub>2</sub>. Su huella de carbono es negativa, pues elimina 0,6 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada producida. Sin embargo, el silicato de magnesio está asociado a enfermedades pulmonares y algunos tipos de cáncer, por ello algunas organizaciones no aconsejan su utilización.

**FIGURA 3. Nuevo modelo de producción del cemento**



Fuente: Adaptado de [http://www.recuperaresiduosencementeras.org/Uploads/docs/Pedro\\_Mora.pdf](http://www.recuperaresiduosencementeras.org/Uploads/docs/Pedro_Mora.pdf).

**FIGURA 4. Emisiones autorizadas vs. emisiones verificadas de CO<sub>2</sub>**



Fuente: Elaboración propia.

desarrollo limpio), 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. Por tanto, el coste de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> 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, en el caso de no cumplir (si las emisiones verificadas son superiores a las emisiones autorizadas), se verá incrementado por el coste de penalización.

Por otro lado, los instrumentos contemplados en el PK también constituyen una posible fuente de ingresos para aquellas empresas con superávit de derechos,

bien porque hayan invertido en mejoras medioambientales que reduzcan las emisiones de CO<sub>2</sub> a niveles inferiores a los inicialmente autorizados o bien porque la producción se haya reducido, entre otras razones, por la caída generalizada de la producción industrial por la crisis económica en los últimos años. 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 estos 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.

- La otra alternativa es realizar ajustes sobre *las emisiones reales* de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> por unidad producida) y otras fuentes de emisión (como el transporte y el consumo de energía eléctrica). Se trataría de algunas de las estrategias de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> analizadas en el apartado anterior (ver Tabla 1).

Así las cosas, la selección de una u otra de las alternativas propuestas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> dependerá del valor que tomen diferentes variables, a considerar en la propuesta de modelización de la producción del cemento que realizamos. Se trata de:

- La cantidad permitida de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera que vendrá dada por la suma de las emisiones autorizadas inicialmente y de los permisos obtenidos a través de los diferentes mecanismos de flexibilidad regulados en el PK.
- La cantidad de CO<sub>2</sub> 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 de clínker y de la eficiencia energética de los equipos e instalaciones de la planta de producción.
- El impacto económico de las alternativas utilizadas que dependerá, en el caso de los ajustes sobre las emisiones autorizadas, de variables tales como la cotización de los diferentes permisos de emisión regulados en el PK, 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 correspondiente. Y en el caso de las medidas de ajuste directas sobre la producción para la consecución de los objetivos de reducción de

las emisiones de CO<sub>2</sub> dependerá del tipo de práctica y, por tanto, 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 existen 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 su proceso de producción, las normativas reguladoras sobre diferentes aspectos e impactos medioambientales, la asignación de derechos de emisión y las posibilidades y limitaciones del uso de los mecanismos de flexibilidad, etc.

**Propuesta de valoración: aplicación de un modelo de optimización**

Con el fin de determinar anticipadamente decisiones que permitan optimizar el uso de los recursos productivos y que reflejen los cambios que ocasionan las limitaciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la planificación de la producción del cemento, presentamos una propuesta de valoración, mediante un modelo de programación lineal, modelo matemático ampliamente aceptado (en sus diferentes versiones) y validado para integrar los criterios medioambientales en la planificación de la producción. Algunas citas que se destacan corresponden a los trabajos de Radulescu, Radulescu y Radulescu (2009), Elkamel, Ba-Shammakh,

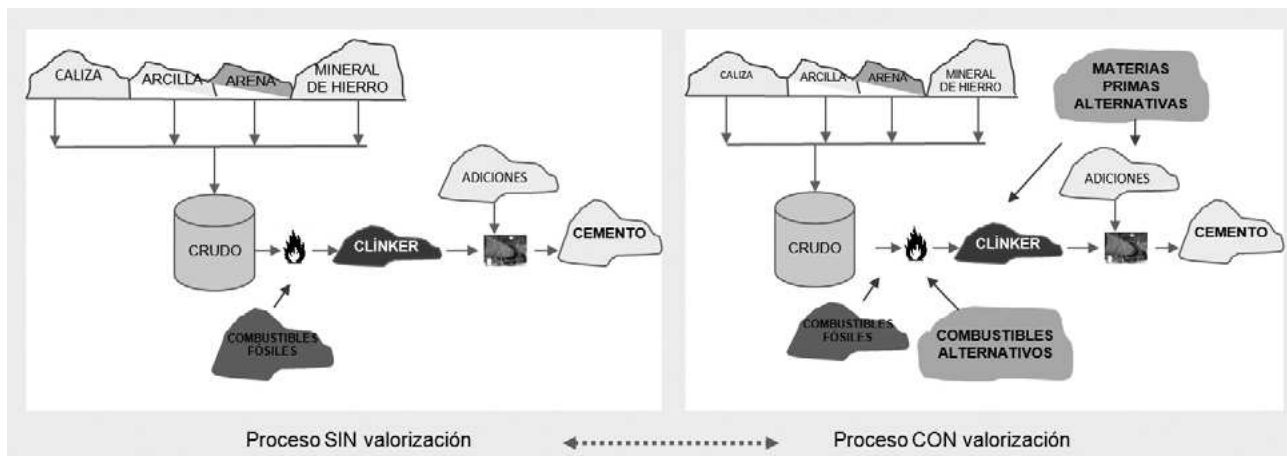
Douglas y Croiset (2008), Subai, Baptiste y Niel (2006), Letmathe y Balakrishnan (2005), Wu y Chang (2004) y Tan, Liu, Cao y Zhang (2002).

Para ello, además de asumir los supuestos de cualquier aplicación de programación lineal<sup>3</sup>, presentamos los que consideramos en la propuesta que realizamos:

- 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<sup>4</sup>, tipo de proceso empleado –vía seca<sup>5</sup>–, planta integral de cemento –obtención de clínker y molienda–, etc.) para alcanzar una situación objetivo, marcada por la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a conseguir y las medidas propuestas para su consecución. Por los argumentos ya expuestos, consideramos, el incremento del porcentaje de sustitución de combustibles y materias primas alternativos como la principal (ver Figura 5), y como vía complementaria, la fabricación de cementos adicionados.

<sup>3</sup> Se trata de certidumbre, divisibilidad, proporcionalidad, aditividad y no negatividad (Faulín y Juan, 2012).  
<sup>4</sup> Aunque no es una práctica consolidada en España, en los últimos años, el uso de combustibles alternativos ha experimentado un ligero incremento, representando en 2010 el 23,22% de los combustibles empleados en la producción nacional (diez años atrás solo alcanzaba el 1,2%) (OFICEMEN, 2011, p. 105).  
<sup>5</sup> En 2008, aproximadamente el 90% de la producción europea del cemento procedía de hornos secos, que requieren menor consumo de agua y tienen un menor impacto medioambiental (EIPPCB, 2010, p. 4).

FIGURA 5. Situación de partida vs. situación objetivo



Fuente: Adaptado de <http://www.cportland.es/es/portal.do?IDM=100&NM=2>.

- b) En relación a la sustitución parcial de los recursos consideramos, como alternativa principal, la valorización de residuos tanto energética como material. 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; MMA, 2004).
- c) Por las mismas razones expuestas en el apartado anterior, en consecuencia adoptamos un enfoque parcial, centrando básicamente el estudio en el impacto de la producción de clínker sobre el medio atmosférico<sup>6</sup>. 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 CO<sub>2</sub>), como es el consumo de energía

eléctrica y otros aspectos e impactos medioambientales de la producción del cemento.

- d) Además, según el caso, se añadiría aquellos otros supuestos que se consideren necesarios.

### Definición del problema y formulación: parámetros y variables de decisión

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 en la Tabla 2.

#### 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 que fabrique la empresa, incluida la cantidad a fabricar de 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 CO<sub>2</sub>) y en el tipo de aditivos

<sup>6</sup> Supuesto que se refuerza por el criterio de asignación de derechos de emisión de CO<sub>2</sub> finalmente adoptado por la Unión Europea, según un benchmark sectorial por tn de clínker (766 kg CO<sub>2</sub>/tn clínker), y no por tn de producto final terminado.

**TABLA 2. Variables de decisión y parámetros del modelo de producción sostenible del cemento**

X <sub>j</sub> : Cantidad a fabricar de los diferentes tipos de producto (tipos de cementos y clínker) j = 1, ..., n	
A <sub>i</sub> : Cantidad disponible de los factores productivos limitados <sup>(1)</sup> i = 1, ..., m	i = 1 → emisiones de CO <sub>2</sub> i = 2 → capacidad de producción de clínker i = 3 → demanda de los productos i = 4 → consumo de combustibles alternativos i = 5 → consumo de materias primas alternativas i = 6 → otras restricciones
A <sub>1</sub> = EA = Emisiones autorizadas de CO <sub>2</sub> A <sub>2</sub> = CP <sub>c</sub> = Capacidad de producción de clínker A <sub>3</sub> = D <sub>j</sub> = Demanda del producto j A <sub>4</sub> = LIM <sub>comb</sub> = Limitación de consumo de combustible alternativo A <sub>5</sub> = LIM <sub>mp</sub> = Limitación de consumo de materia prima alternativa A <sub>6</sub> = Otra limitación	
a <sub>ij</sub> : Cantidad necesaria del factor i para obtener una unidad del producto j (coeficientes tecnológicos) <sup>(2)</sup>	
Cu <sub>j</sub> : Coste unitario de producción del producto j	
lu <sub>j</sub> : Ingreso unitario del producto j	
C <sub>j</sub> : Beneficio unitario del producto j (lu <sub>j</sub> -Cu <sub>j</sub> ) (rendimiento directo)	

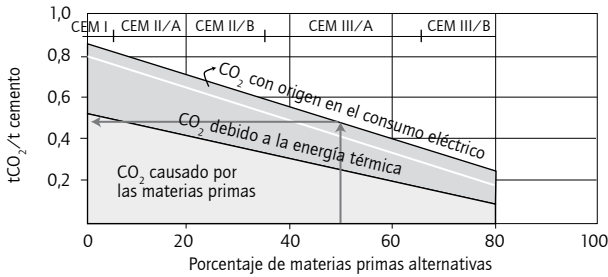
(1) Puede representar también la cantidad total de un requerimiento o condición i establecida, según la restricción represente un requerimiento o una condición respectivamente.

(2) Cuando la limitación es de un requerimiento o condición i, los a<sub>ij</sub> representan la cantidad del requerimiento o condición i limitada, que aporta cada unidad de la variable j, al requerimiento o condición total establecida.

Fuente: Elaboración propia.

empleados en la obtención del producto final. Esto condicionará, junto con las características técnicas de las instalaciones, el consumo energético asociado a cada tipo de cemento y la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida a la atmósfera (ver Figura 6).

FIGURA 6. Emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción por tipos de cementos



Fuente: European Concrete Paving Association (2009, p. 9).

**Parámetros**

Los parámetros a considerar son los siguientes:

- 1) Coste unitario de cada tipo de producto fabricado ( $Cu_j$ )  
El coste de producción de cada uno de los productos fabricados por la instalación vendría dado por la siguiente expresión:

$$\sum CVu + \sum CFu \quad (1)$$

donde:

$CVu$ : coste variable unitario de producción (aproximadamente el 30-40% de esta partida corresponde al consumo de combustibles).

$CFu$ : costes fijos de producción/volumen de producción.

- 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. Este vendrá dado por:

$$\sum C_j X_j \quad (2)$$

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.

Si se tienen en cuenta las limitaciones de las medidas de ajuste de las emisiones de CO<sub>2</sub> analizadas y el objetivo de nuestro estudio, consideramos las siguientes:

- la capacidad de producción de 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 CO<sub>2</sub> (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 ( $j$ ).

En nuestro caso, los factores productivos limitados considerados son las materias primas y los combustibles alternativos empleados en la obtención de clínker, cuyo uso está sujeto, por un lado, a las limitaciones de carácter técnico, legal, comercial y/o económico, y, por otro, por la de las emisiones de CO<sub>2</sub>, derivadas del compromiso del 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, los balances de masa y de energía de los diferentes productos, donde se incluya también la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida por cada tipo de cemento considerado, se convierten en una fuente básica de información.

Para el caso que nos ocupa, tendríamos que obtener el balance de masa, contemplando la medida de mejora propuesta para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> igual a la propuesta como objetivo (factor de emisión de 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.

La combinación óptima de materias primas y combustibles seleccionada determinará la composición de clínker y, por tanto, la cantidad de CO<sub>2</sub> 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). Esas cantidades determinarán los coeficientes de la restricción de las emisiones de CO<sub>2</sub> del modelo propuesto para la obtención del programa óptimo de producción.

El resto de restricciones del modelo recogidas en el apartado anterior requerirá del cálculo de los diferentes coeficientes ( $a_{ij}$ ). Para la capacidad de clínker, los coeficientes vendrán dados por el porcentaje de este subproducto que cada tipo de cemento considerado incorpora. Y, para la demanda de cada tipo de producto, se considerará la previsión de la misma para cada uno de estos 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.

## Planteamiento del modelo

Si se tiene 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 determinando la función objetivo y las restricciones a las que está sujeta.

### Restricciones del modelo de PL

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:

#### 1) Emisiones de CO<sub>2</sub>

Conocida la cantidad emitida de CO<sub>2</sub> por tonelada de producto fabricado ( $a_{ij}$ ), el total de las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la fabricación del cemento para el horizonte temporal considerado no podrá superar las emisiones autorizadas (EA). Así pues, la restricción

relativa a las emisiones de CO<sub>2</sub> quedaría de la siguiente manera:

$$\sum a_{ij} X_j \leq EA \text{ (tn CO}_2\text{)} \quad (3)$$

donde  $a_{ij}$  = % clínker que incorpora el producto  $j$  \* cantidad emitida de CO<sub>2</sub> por tn de clínker fabricado, bajo las consideraciones realizadas.

EA = emisiones asignadas + excedente de permisos de periodos anteriores + permisos de emisión obtenidos a través de los mecanismos de flexibilidad del PK.

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 solo en la producción de clínker) consistiría en desglosar la restricción anterior en tantas ecuaciones como fuentes de emisión consideremos, según el origen de las emisiones de CO<sub>2</sub> (combustión, proceso y consumo de energía eléctrica), así como de la proporción que representa cada una de ellas sobre el total.

Asimismo, a pesar de que la posibilidad de introducir las técnicas de captura y almacenamiento en el sector analizado no es viable a  $c/p$ , en el caso de contemplarse, la ecuación (3) se transformaría en la siguiente desigualdad:

$$\sum a_{ij} X_j - CAC \leq EA \text{ (tn CO}_2\text{)}, \quad (4)$$

donde CAC = ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> (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 de 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:

$$\sum a_{ij} X_j \leq LIM_{comb} \text{ (tn combustible/tn clínker o GJ/tn clínker)} \quad (5)$$

donde:  $a_{ij}$  = cantidad de combustible alternativo para fabricar una tonelada del producto  $j$  o cantidad de energía térmica del combustible para obtener una tonelada del producto  $j$ , y  $LIM_{comb}$  = limitación del uso del combustible alternativo = mínimo limitación (legal, operativa, comercial).

#### 3) Consumo de materias primas alternativas

De acuerdo con el *mix* óptimo de materia prima obtenido para la fabricación de clínker en condiciones óptimas (con un determinado porcentaje de materia prima alternativa y para unas emisiones de CO<sub>2</sub>

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:

$$\sum \alpha_{ij} X_j \leq LIM_{mp} \text{ (tn materia prima alternativa)} \quad (6)$$

donde:  $\alpha_{ij}$  = 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, operativa, comercial).

4) Capacidad de producción

Por el enfoque adoptado en nuestro caso, la capacidad de producción vendrá marcada por la capacidad de clínker que puede ser vendido también como un producto final. De esta manera, y teniendo en cuenta la proporción de clínker que cada tipo de producto incorpora<sup>7</sup> ( $pc_j$ ), el total de la producción no puede superar la capacidad disponible de la instalación ( $CP_c$ ):

$$\sum pc_j X_j \leq CP_c \text{ (tn clínker/año)} \quad (7)$$

5) Demanda de los productos (mix de ventas)

Para aquellos productos que tengan una demanda limitada, tendríamos:

$$X_j \leq \text{Demanda del producto } j \text{ (unidades de } j) \quad (8)$$

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 como consecuencia de la crisis. 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 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, podrían incluirse otras restricciones más al planteamiento del modelo, tanto las relacionadas directamente con las emisiones de CO<sub>2</sub> como cualquier otro tipo de limitación de la producción industrial (mano de obra, otros requisitos legales, limitaciones de exportación, capacidad de almacenaje, etc.).

**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:

$$Z \text{ (max)} = \sum C_j X_j \quad (9)$$

donde  $C_j$  es el beneficio unitario del producto  $j$ .

Bajo las consideraciones anteriores, dicho modelo quedaría planteado analíticamente en el Cuadro 1, donde se contemplan, tanto las limitaciones de las emisiones de CO<sub>2</sub>, como las derivadas de las alternativas consideradas para reducirlas (valorización de residuos y producción de ecocementos).

**CUADRO 1. Planteamiento del modelo de PL para la producción del cemento**

$Z \text{ (max)} = \sum C_j X_j$ s. a.: $\sum \alpha_{ij} X_j \leq EA \text{ (tn CO}_2)$ $\sum \alpha_{ij} X_j \leq LIM_{comb} \text{ (tn combustible/tn clínker o GJ/tn clínker)}$ $\sum \alpha_{ij} X_j \leq LIM_{mp} \text{ (tn materia prima)}$ $\sum pc_j X_j \leq CP_c \text{ (tn clínker/año)}$ $\sum X_j \leq \text{Demanda}_j \text{ (tn productos)}$ $X_j \geq 0$
--

Fuente: Elaboración propia.

La resolución del modelo permitirá analizar la compatibilidad de las alternativas propuestas para minimizar las emisiones de carbono en el ámbito del cumplimiento del PK y maximizar el rendimiento del programa de producción. A través del análisis de los resultados se podrán identificar las medidas de mayor potencial de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> del proceso de producción del cemento, así como la viabilidad de las alternativas contempladas en el PK.

Respecto a estas últimas medidas, cabe resaltar que el enfoque adoptado por la empresa repercutirá en los resultados derivados del modelo planteado, dependiendo de que la empresa considere o no la venta de derechos de emisión como fuente de beneficio equiparable a la producción de los distintos tipos de cementos. De esta manera, nos podemos encontrar ante dos escenarios diferentes, que dependerán del rendimiento directo ( $C_j$ ) que se asigne a los derechos sobrantes en la función objetivo del programa de producción:

- a) Cuando el objetivo principal de la empresa es la producción de bienes, pudiéndose dedicar los recursos sobrantes del proceso productivo a la consecución de mayores beneficios, sin considerar inicialmente la venta de derechos como fuente alternativa de

<sup>7</sup> En el caso de clínker para vender  $pc_j = 1$ .

beneficio, el valor del rendimiento directo del derecho es 0. Esta opción es más conveniente en estrategias a largo plazo, donde la producción ayuda a mantener las cuotas de mercado. Además, esta actitud puede beneficiar a las futuras asignaciones de derechos de emisiones, ya que, dependiendo del sector, los permisos se pueden otorgar en función de la producción de periodos anteriores, por lo que una reducción de la producción originaría una disminución del total de derechos que recibirán en los periodos siguientes.

- b) Cuando el objetivo principal de la empresa es estrictamente la consecución del máximo beneficio, repartiendo los recursos entre las distintas fuentes de beneficios (producción y venta de derechos), de acuerdo a su rentabilidad, el valor del rendimiento directo del derecho será igual al beneficio que se podría obtener de la venta de dichos títulos en el mercado de carbono. En este caso, los derechos de emisión son una variable de decisión del modelo propuesto, junto con las consideradas inicialmente (tipos de productos). La elección de esta opción será más habitual o aconsejable en decisiones a corto plazo y en aquellos casos en los que la situación económica provoque altos riesgos de pérdidas y la empresa luche por la supervivencia, buscando alternativas de beneficio que compensen la bajada de las ventas

Asimismo, como en cualquier aplicación de programación lineal, el análisis de sensibilidad correspondiente a un caso concreto, podrá determinar la sensibilidad de los resultados a variaciones de los parámetros y variables consideradas en el modelo.

### Consideraciones finales

A pesar de las limitaciones de la programación lineal, su aplicación, en una primera aproximación, nos ha permitido realizar una propuesta que permite optimizar la producción de cemento, incluyendo criterios medioambientales en la planificación de la producción. Esta propuesta 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> derivadas del PK, que desde su entrada de vigor se convierten en un *input* más de los procesos productivos de la industria del cemento. Su aplicación permitirá determinar,

anticipadamente, decisiones que permitan optimizar el uso de los recursos productivos, considerando, por un lado, las cantidades de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera y, por otro lado, las alternativas para reducirlas a mínimos legales.

Entre las ventajas de utilizar la propuesta realizada, podemos destacar la posibilidad de:

- Abordar las decisiones de optimización a través de un enfoque integrado, que contemple conjuntamente las posibles alternativas para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, tanto las derivadas del nivel de aplicación de los mecanismos regulados en el PK, como las destinadas a introducir mejoras en la producción del cemento.
- Mejorar el proceso de toma de decisiones, al permitir analizar diferentes escenarios (como, por ejemplo, consumo total o parcial de las emisiones autorizadas) y obtener información (cuantitativa y cualitativa) relevante a través del análisis postoptimal; en esta *última se incluye* la cantidad máxima a pagar en el mercado de derechos para emitir una tonelada adicional de CO<sub>2</sub> o posibles cambios en el *mix* de producción para aumentar la rentabilidad, tanto relativos a tipo de productos como a cantidad a fabricar de los mismos.
- Orientar actuaciones futuras encaminadas a reducir su impacto medioambiental, estableciendo la relevancia que las alternativas contempladas en el PK puede tener sobre la planificación de la producción y, por ende, sobre los resultados de la industria. Asimismo, profundizar en el potencial de aplicación de prácticas emergentes industriales como la simbiosis industrial.
- Extrapolar la propuesta realizada a otras actividades industriales contaminantes.

Por todo lo expuesto, consideramos que este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones con el hilo común de la preocupación por la sostenibilidad medioambiental en los procesos de planificación de la producción industrial.

### Referencias bibliográficas

- Al-Hinti, I., Al-Ghandoor, A., Al-Naji, A., Abu-Khashabeh, M., Joudeh, M., & Al-Hattab, M. (2008). Energy saving opportunities through heat recovery from cement processing kilns: a case study. *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environment. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)*, Stevens Point, Wisconsin, USA, 79-83.
- Ammenberg, J., Feiz, R., Helgstrand, A., Eklund, M., & Baas, L. (2011). *Industrial symbiosis for improving the CO<sub>2</sub>-performance of cement* (Final report of the CEMEX-Linköping University industrial ecology project).
- Antiohos, S. K., Chouliara, E., & Tsimas, S. (2006). Re-use of spent catalyst from oil-cracking refineries as supplementary cementing material. *China Particology*, 4, 73-76.

- Barker, D. J., Turner, S. A., Napier-Moore, P. A., Clarck, M., & Davison, J. E. (2009). CO<sub>2</sub> capture in the cement industry. *Energy Procedia*, 1, 87-94.
- Bauer, K., & Hoenig, V. (2009). Energy efficiency of cement plants. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International VDZ Congress, Process Technology of Cement Manufacturing*, Düsseldorf.
- Boesch, M. E., & Hellweg, S. (2010). Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment. *Environmental Science Technology*, 44(23), 9143-9149.
- Borralleras, P. (2010). Reutilización & recuperación de residuos en Europa en el sector del cemento & del hormigón. *Revista Técnica Cemento-Hormigón*, 938, 4-7.
- Bosoaga, A., Masek, O., & Oakey, J. E. (2009). CO<sub>2</sub> Capture Technologies for Cement Industry. *Energy Procedia*, 1, 133-140.
- CEMBUREAU (2009). *Activity report 2008*. Disponible en: [http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/Activity\\_Report\\_2008.pdf](http://www.cembureau.be/sites/default/files/documents/Activity_Report_2008.pdf). Consultado el 3 de febrero de 2012.
- Conesa, J. A., Rey, L., Egea, S., & Rey, M. D. (2011). Pollutant Formation and Emissions from Cement Kiln Stack Using a Solid Recovered Fuel from Municipal Solid Waste. *Environmental Science & Technology*, 45, 5878-5884.
- 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 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- Elkamel, A., Ba-Shammakh, M., Douglas, P. L., & Croiset, E. (2008). An optimization approach for integrating planning and CO<sub>2</sub> emission reduction in the petroleum refining industry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47, 760-776.
- Engin, T., & Ari, V. (2005). Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems - A case study. *Energy Conversion and Management*, 46, 551-562.
- European Concrete Paving Association (EUPAVE) (2009). *Pavimentos de hormigón: una alternativa inteligente y sostenible*. Madrid: OFICEMEN, IECA.
- European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB) (2010). *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide manufacturing Industries*. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/data/images/BREF-cemento-revisado-aprobado-por-Comisi%C3%B3n-mayo-2010-.pdf>. Consultado el 20 de diciembre de 2012.
- Faulín, J., & Juan, A. A. (2012). *Introducción a la investigación operativa* (Proyecto e- Math financiado por la Secretaría de Estado de Educación & Universidades (MECD)). Disponible en: [http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Intro\\_IO.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Intro_IO.pdf). Consultado el 14 de mayo de 2012.
- 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). Suecia: Linköping University.
- Frank, Z. (2009). Oxygen combustion in cement production. *Energy Procedia*, 1, 187-194.
- Fundación laboral andaluza del cemento y el medio ambiente (FLACEMA) (2009). *Memoria de sostenibilidad del sector cementero andaluz*. Sevilla: FLACEMA.
- García, R., Vigil de la Villa, R., Vegas, I., Frías, M., & Sánchez de Rojas, M. I. (2008). The pozzolanic properties of paper sludge waste. *Construction and Building Materials*, 22, 1484-1490.
- Gartner, E., & Quillin, K. (2007). Low-CO<sub>2</sub> cements based on calcium sulfoaluminates. *Sustainability in the Cement and Concrete Industry*, 16, 95-105.
- Giugliano, M., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2008). Energy recovery from municipal waste: a case study for a middle-sized Italian district. *Waste Management*, 28, 39-50.
- Golush, T. V. (2008). *Waste Management Research Trends*. New York: Nova Publishers.
- Grönkvist, S., Bryngelsson, M., & Westermark, M. (2006). Oxygen efficiency with regard to carbon capture. *Energy*, 31, 3220-3226.
- Hasanbeigi, A., Menke, C., & Therdyothin, A. (2011). Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in Thai cement industry. *Energy Efficiency*, 4(1), 93-113. doi: 10.1007/s12053-010-9079-1.
- Hasanbeigi, A., Price, L., Lu, H., & Lan, W. (2010). Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China. A case study of 16 cement plants. *Energy*, 35(8), 3461-3473.
- Hashimoto, S., Fujita, T., Geng, Y., & Nagasawa, E. (2010). Realizing CO<sub>2</sub> emission reduction through industrial symbiosis. A cement production case study for Kawasaki. *Conservation and Recycling*, 54(10), 704-710. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.11.013.
- Hegerland, G., Pande, J. O., Haugen, H. A., Eldrup, N., Tokheim, L. A., & Hatlevik, L. M. (2006). Capture of CO<sub>2</sub> from a cement plant. Technical possibilities and economic estimates. *8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, June, Trondheim, Norway.
- Hoenig, V., & Twigg, C. (2009). Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: trying to look ahead. *World Business Council for Sustainable Development/Cement Sustainability Initiative- European Cement Research Academy*, 4<sup>th</sup> June, Düsseldorf, Geneva.
- Irassar, E. F., Violini, D., Rahhal, V. F., Milanese, C., Trezza, M. A., Milanese, C., Trezza, M. A., & 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*, 33, 192-200.
- Kawai, K., & Osako, M. (2012). Reduction of natural resource consumption in cement production in Japan by waste utilization. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 14(2), 94-101. doi: 10.1007/s10163-012-0042-4.
- Khurana, S., Banerjee, R., & Gaitonde, U. (2002). Energy balance and cogeneration for a cement plant. *Applied Thermal Engineering*, 22, 485-494.
- Kořinek, R., Tušil, P., Kočí, V., & Tichá, M. (2012). Evaluation of the Life Cycle and Comparison of the Waste Management Treatment with Tyre by Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2, 236-249.
- Koukouzas, N., Katsiadakis, A., Karlopoulos, E., & Kakaras, E. (2008). Co-gasification of solid waste and lignite - A case study for Western Macedonia. *Waste Management*, 28, 1263-1275.
- Lam, C. H., Barford, J. P., & McKay, G. (2010). Utilization of Incineration Waste Ash Residues in Portland Cement Clinker. *Chemical Engineering*, 21, 757-762.
- Letmathe, P., & Balakrishnan, N. (2005). Environmental considerations on the optimal product mix. *European Journal of Operational Research*, 167(2), 398-412.

- Lin, Z., & Zhao, Q. (2009). Strength of limestone-based non-calcined cement and its properties. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science*, 24, 471-475.
- Liu, N. C., & Li, Z. F. (2009). One High Efficiency Production Line of Clinker and Slag Grinding Separately by Roller Mill in Cement Industry. *Advanced Materials Research*, 58, 83-89. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.58.83.
- Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H., Loos, M., & Meyer, L. (2005). *Carbon dioxide capture and storage* (IPCC). Cambridge University Press: England.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (2004). *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España de fabricación de cemento*. Centro de Publicaciones-Secretaría General Técnica- Ministerio de Medio Ambiente.
- Moya, J. A., Pardo, N., & Mercier (2010). *Energy efficiency and CO<sub>2</sub> 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, J. A., Pardo, N., & Mercier, A. (2011). The potential for improvements in energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the EU27 cement industry and the relationship with the capital budgeting decision criteria. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1207-1215.
- Murray, A., & 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*, 525, Berkeley, California. Disponible en: <http://china.lbl.gov/publications/use-alternative-fuels-cement-manufacture-analysis-fuel-characteristics-and-feasibility>. Consultado el 7 de octubre de 2012.
- Nadal, M., Schuhmacher, M., & 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*, 16, 322-328.
- Naranjo, M., Brownlow, D. T., & Garza, A. (2011). CO<sub>2</sub> capture and sequestration in the cement industry. *Energy Procedia*, 4, 2716-2723.
- Navia, R., Rivelab, B., Sorber, K. E., & Menéndez, C. R. (2006). Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 48(4), 339-356. doi: 10.1016/j.resconrec.2006.01.007.
- Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete. *Fuel*, 89, 768-774.
- OFICEMEN (Agrupación de Fabricantes de Cemento en España) (2011). *Memoria Oficemen 2010*. Madrid: OFICEMEN.
- O'Rourke, B., McNally, C., & Richardson, M. G. (2009). Development of calcium sulfate-ggbs-Portland cement binders. *Construction and Building Materials*, 23, 340-346.
- Radulescu, M., Radulescu, S., & Radulescu, C. Z. (2009). Sustainable production technologies which take into account environmental constraints. *European Journal of Operational Research*, 193(3), 730-740.
- Rodríguez, N., Alonso, M., Grasa, G., & Abanades, J. C. (2008). Process for Capturing CO<sub>2</sub> Arising from the Calcination of the CaCO<sub>3</sub> used in Cement Manufacture. *Environmental Science & Technology*, 42, 6980-6984.
- Romeo, L. M., Catalina, D., Lisbona, P., Lara, Y., & Martínez, A. (2011). Reduction of greenhouse gas emissions by integration of cement plants, power plants, and CO<sub>2</sub> capture systems. *Greenhouse Gases. Science and Technology*, 1(1), 72-82. doi: 10.1002/ghg3.5.
- Subai, C., Baptiste, P., & Niel, E. (2006). Scheduling issues for environmentally responsible manufacturing. The case of hoist scheduling in an electroplating line. *International Journal of Production Economics*, 99(1), 74-87.
- Sun, H. H., Li, Y., Wang, N., & Zhao, Y. H. (2007). Sialite Technology and Cycle Economy. *Key Engineering Materials*, 336-338, 1895-1897.
- Szabó, L., Hidalgo, I., Ciscar, J. C., Soria, A., & Russ, P. (2003). *Energy Consumptions and CO<sub>2</sub> Emissions from the World Cement Industry*. JRC-IPTS, EUR20769 European Commission.
- Tan, X. C., Liu, F., Cao, H. J., & Zhang, H. (2002). A decision-making framework model of cutting fluid selection for green manufacturing and a case study. *Journal of Materials Processing Technology*, 129, 467-470.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2010). *Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Portland Cement Industry*, Research Triangle Park, North Carolina 27711. Disponible en: <http://www.epa.gov/nsr/ghg-docs/cement.pdf>. Consultado el 19 de junio de 2012.
- Valderrama, C., Granados, R., Cortina, J. L., Gasol, C. M., Guillem, M., & Josa, A. (2013). Comparative LCA of sewage sludge valorisation as both fuel and raw material substitute in clinker production. *Journal of Cleaner Production*, 51, 205-213.
- Van Oss, H. G., & Padovani, A. C. (2003). Cement Manufacture and the Environment - Part II. Environmental Challenges and Opportunities. *Journal of Industrial Ecology*, 7(1), 93-126.
- Weiland, P. (2009). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849-860.
- Weimer, T., Berger, R., Hawthorne, C., & Abanades, J. C. (2008). Lime enhanced gasification of solid fuels. Examination of a process for simultaneous hydrogen production and CO<sub>2</sub> capture. *Fuel*, 87, 1678-1686.
- World Business Council for Sustainable Development/International Energy Agency (WBCSD/IEA) (2009). *Cement Technology Roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050*. OECD/IEA and WBCSD.
- Worrell, E., Galitsky, C., & Price, L. (2008). *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making: an energy star*. Guide for Energy and Plant Managers. Disponible en: <http://www.energystar.gov/ia/business/industry/LBNL-54036.pdf>. Consultado el 12 de mayo de 2012.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review Energy Environmental*, 26, 303-329.
- Wu, C. C., & Chang, N. B. (2004). Corporate optimal production planning with varying environmental costs. A grey compromise programming approach. *European Journal of Operational Research*, 155(1), 68-95.
- Yi, Z. L., Sun, H. H., Wan, J. H., & Li, C. (2009). A New Process for Highly Effective Utilization of Industrial Solid Wastes-Sialite Technology. *Advanced Materials Research*, 66, 210-213.
- Zabaniotou, A., & Theofilou, C. (2008). Green energy at cement kiln in Cyprus. Use of sewage sludge as a conventional fuel substitute. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 531-541.
- Zeman, F. (2009). Oxygen combustion in cement production. *Energy Procedia*, 1, 187-194.

