

1. NUEVAS ALTERNATIVAS PARA PRODUCIR CEMENTO DE MANERA MÁS SOSTENIBLE



OFELIA RIVERA SASSO^{1,2}, JOSÉ ERNESTO LEDEZMA SILLAS¹, CALEB CARREÑO GALLARDO¹, ALBERTO DÍAZ DÍAZ¹, MIRNA GISELLE PEÑA LARA², VIANNEY MANCINAS VÁZQUEZ², DAVID MARTIN SOTO CASTILLO², OMAR FARID OJEDA FARIAS², CAROLINA PRIETO GÓMEZ² Y JOSE MARTIN HERRERA RAMÍREZ¹

1. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C. (CIMAV), AV. MIGUEL DE CERVANTES #120, COMPLEJO INDUSTRIAL CHIHUAHUA, CHIHUAHUA 31136, MÉXICO.
2. GCC, GERENCIA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO, VICENTE SUÁREZ Y SEXTA S/N, ZONA INDUSTRIAL DE DIOS, CHIHUAHUA 31105, MÉXICO

AUTOR DE CORRESPONDENCIA: JOSE MARTIN HERRERA RAMÍREZ, MARTIN.HERRERA@CIMAV.EDU.MX

DOI: <https://doi.org/10.59730/rer.v12n55a3>

RESUMEN

PALABRAS CLAVE: CEMENTO SOSTENIBLE; VALORIZACIÓN DE RESIDUOS; COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS; EMISIONES DE CARBONO.

»»» EL CEMENTO

es el material más utilizado en el mundo después del agua para beber y su principal uso es la producción de concreto. El cemento es parte fundamental de nuestro entorno: está presente en casas, edificios, carreteras y puentes.

➤➤➤ ES IMPORTANTE DESTACAR...

Sin embargo, es importante destacar que los hornos en los que se produce el cemento deben operar entre 1400°C y 1500°C, lo que requiere una cantidad significativa de energía y esto a su vez tiene un impacto ambiental por la emisión de gases que se generan durante su producción. Conscientes de esta situación, las empresas cementeras están explorando formas más sustentables de fabricar este material esencial para el ser humano.

EL CEMENTO: UN MATERIAL ESENCIAL CON UN COSTO AMBIENTAL

➤➤➤ ESTA INVESTIGACIÓN...

Una solución con gran potencial es el aprovechamiento de diferentes tipos de residuos como combustibles alternativos en lugar de usar combustibles tradicionales más contaminantes. Esta investigación analiza a fondo alternativas más sostenibles, explicando qué residuos son más adecuados y por qué, así como las ventajas y desafíos de cada opción. El objetivo es analizar el uso potencial de diferentes residuos como combustibles alternativos, con la finalidad de producir cemento de una manera más sostenible.



INTRODUCCIÓN

EL CEMENTO: UN MATERIAL ESENCIAL CON UN COSTO AMBIENTAL

El cemento es un material fundamental en nuestras vidas al ser clave en la producción de concreto. Este desempeña un papel esencial en el mundo moderno, ya que el crecimiento poblacional aumenta la demanda global de vivienda e infraestructura, incrementando la presión sobre el planeta y sus recursos naturales (Figura 1). De hecho, el cemento se ha convertido en el segundo material más utilizado en el mundo, solo después del agua potable [1]. La producción de cemento involucra varios procesos clave, tales como (Figura 2) [3]:

»»» EXTRACCIÓN DE LA CALIZA:

El proceso comienza con la extracción de piedra caliza de las canteras, que son grandes minas a cielo abierto. Debido a su alto contenido de este compuesto, la caliza es el principal material utilizado en la fabricación de cemento.

»»» TRITURACIÓN DE LA CALIZA:

En esta etapa, la piedra caliza extraída de las canteras se tritura para reducir su tamaño y facilitar su manejo. El objetivo es obtener trozos más pequeños que puedan ser fácilmente transportados y procesados en las siguientes fases.

»»» HOMOGENEIZACIÓN Y MOLIENDA:

La caliza triturada, que constituye entre el 70% y el 80% de la mezcla, se mezcla con arcillas, que representan entre el 20% y el 30%. Las arcillas contienen óxidos de aluminio (Al_2O_3), hierro (Fe_2O_3) y silicio (SiO_2).

Esta mezcla se muele hasta obtener un polvo fino, conocido como "harina cruda", que es la base para la producción del cemento.

LA CALIZA

Es una roca sedimentaria compuesta principalmente de carbonato de calcio ($CaCO_3$).

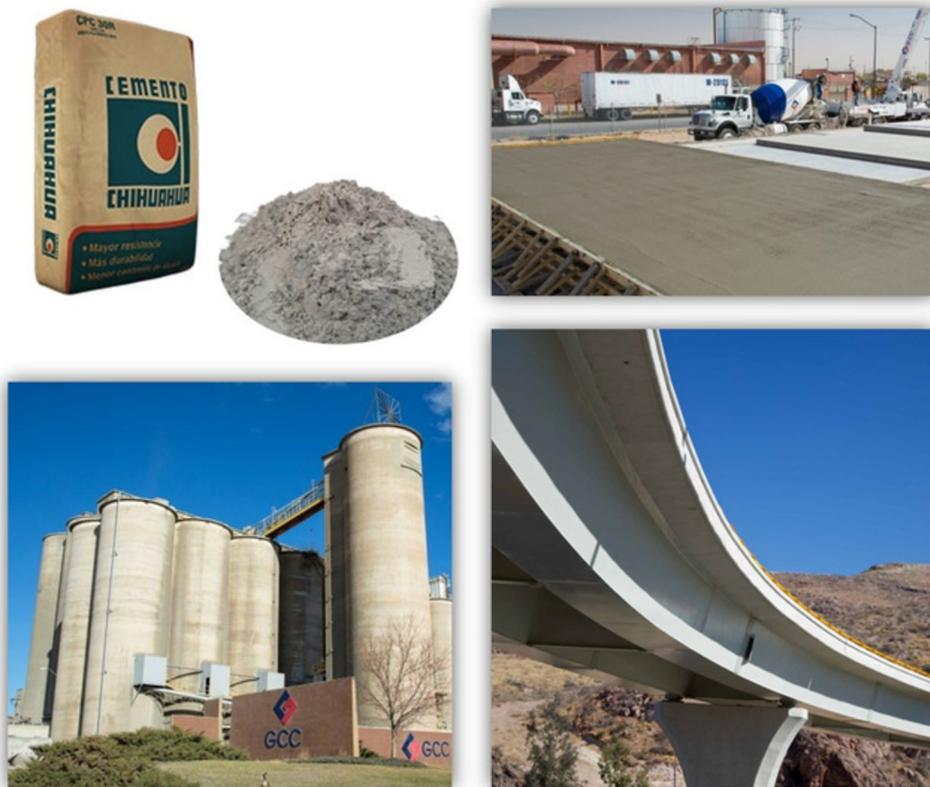


FIGURA 1. EL CEMENTO TIENE DIVERSAS APLICACIONES EN LA VIDA DIARIA [2].

➤➤➤ PRECALENTAMIENTO Y PRECALCINACIÓN DE LA HARINA CRUDA:

La harina cruda se somete a un proceso de calentamiento en un precalentador, alcanzando temperaturas de aproximadamente 850°C. En este rango de temperatura, la piedra caliza se descompone en dióxido de carbono (CO_2) y óxido de calcio (CaO), también conocido como cal. Este óxido de calcio es esencial, ya que reaccionará posteriormente con las arcillas para formar el clínker.

➤➤➤ PRODUCCIÓN DEL CLÍNKER EN EL HORNO ROTATORIO Y ENFRIAMIENTO:

La harina cruda se envía a un horno rotatorio, donde se somete a temperaturas muy altas, alrededor de 1450°C. En estas condiciones extremas, la cal reacciona con los óxidos de las arcillas, formando rocas esféricas llamadas clínker. Este clínker es el componente básico del cemento. Luego, el clínker se enfría rápidamente para detener las reacciones químicas y se almacena para su posterior procesamiento.

MOLIENDA DEL CEMENTO

Finalmente, el clínker se muele junto con una pequeña cantidad de yeso. Este polvo resultante, que tiene un color gris característico, es lo que conocemos como cemento Portland, el cual es utilizado para la fabricación de concreto y otras aplicaciones de la construcción.

EL DESAFÍO AMBIENTAL

La industria del cemento se encuentra entre las que más emisiones de dióxido de carbono genera en la atmósfera, lo que constituye un significativo desafío medioambiental. Estas emisiones tienen dos orígenes principales:

1. El uso de combustibles fósiles en los hornos cementeros representa una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ en la producción de cemento. La quema de estos combustibles libera grandes cantidades de este gas, contribuyendo con aproximadamente el 40% de las emisiones totales de la industria cementera. Los combustibles más comúnmente empleados en este proceso son el carbón, el gas natural, el coque de petróleo y el combustóleo que se queman para alcanzar las altas temperaturas necesarias para la calcinación de la caliza [4].
2. El proceso químico de transformación de la caliza, que se utiliza en la producción de cemento, consiste en la descomposición del carbonato de calcio en óxido de calcio y dióxido de carbono. Este proceso es responsable del 60% restante de las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento [4].

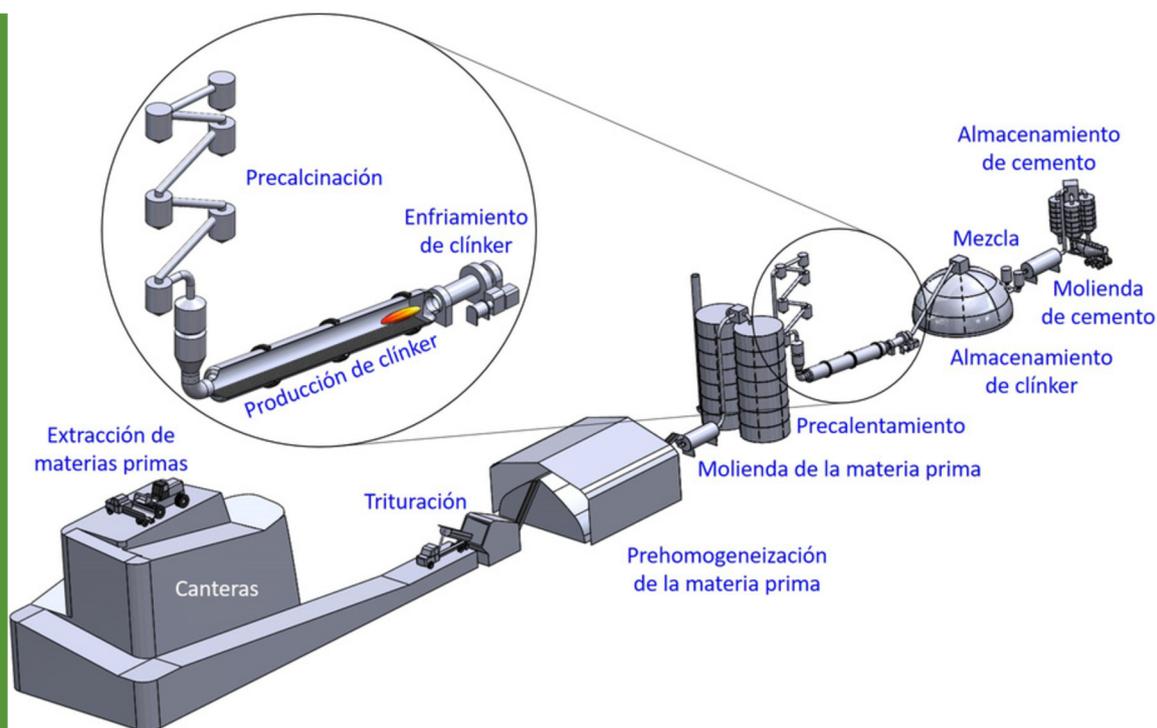


FIGURA 2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CEMENTO.

COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS COMO UNA OPCIÓN SOSTENIBLE

Una estrategia para reducir las emisiones de CO₂ consiste en sustituir combustibles fósiles por combustibles alternativos, como residuos industriales y biomasa, en la producción de cemento [5,6]. Este enfoque, denominado coprocesamiento, aprovecha residuos que normalmente terminarían en rellenos sanitarios, transformándolos en fuente de energía para los hornos cementeros. Esto es positivo, ya que simultáneamente disminuye la acumulación de desechos y las emisiones de CO₂ asociadas al proceso productivo.

Las plantas de cemento alrededor del mundo están utilizando diversos residuos, tales como llantas usadas, ciertos tipos de plásticos, desechos agrícolas e industriales, entre otros, como combustibles alternativos al carbón. Sin embargo, surgen cuestionamientos sobre su uso:

- ¿Cómo influyen en el proceso dentro del horno cementero?
- ¿Qué impacto tienen en el medio ambiente?
- ¿Qué impacto tienen en la calidad del cemento?

Para responder estas preguntas, es necesario estudiar a fondo estos combustibles alternativos.

Resulta fundamental comprender sus características físicas y químicas, su capacidad para generar calor y otros atributos relevantes.

Por esta razón, esta investigación se centra en evaluar sistemáticamente diversos residuos como combustibles alternativos en la industria cementera, identificando las propiedades que podrían influir tanto en la calidad del producto final como en su impacto ambiental.

Este estudio se fundamenta en investigaciones previas; para más detalles, consulte la referencia [5].

METODOLOGÍA

Se analizaron diversos tipos de residuos recolectados por la empresa GCC [5].

Es importante resaltar que estos residuos están ampliamente disponibles en el estado de Chihuahua.

La Tabla 1 presenta los residuos utilizados en esta investigación junto con su descripción.



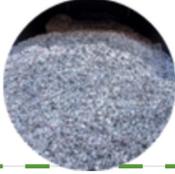
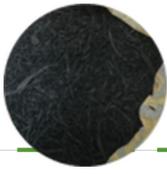
Residuo	Descripción	Imagen
Aserrín	Residuos provenientes del serrado de la madera	
Cáscara de nuez	Residuos cortados en piezas irregulares	
Plástico	Mezcla de diferentes tipos de plásticos provenientes de la industria	
Mangueras industriales	Mezcla de diferentes mangueras industriales	
Llanta	Residuos de llantas trituradas	
Residuos automotrices	Residuos de plásticos y metales provenientes de la industria automotriz	
Turbinas eólicas	Residuos de aspas de turbinas eólicas	
Carbón bituminoso	Combustible fósil utilizado comúnmente en la industria cementera	

Tabla 1. Descripción de residuos analizados como potenciales combustibles alternativos en la industria cementera [5].

PROPIEDADES CLAVE DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA

No todos los residuos resultan apropiados como combustibles alternativos ni pueden emplearse indistintamente, ya que sus características específicas afectan directamente la eficiencia de combustión, la calidad del cemento producido y el impacto ambiental del proceso.

Por lo tanto, es fundamental evaluar los siguientes aspectos clave [4,6]:

»»» CAPACIDAD PARA GENERAR ENERGÍA:

Cada tipo de combustible tiene diferentes propiedades para generar calor. Para garantizar la eficiencia del proceso, es importante que estos materiales sean capaces de proporcionar la energía requerida.

»»» CONTENIDO DE HUMEDAD Y CENIZAS:

Si un combustible tiene demasiada humedad, se necesita más energía para evaporarla antes de que pueda arder. Además, si deja muchas cenizas después de quemarse, puede afectar el funcionamiento del horno.

»»» CONTENIDO DE CLORUROS:

Algunos residuos contienen cloruros que pueden complicar el funcionamiento del horno y afectar la calidad del cemento.

»»» CONTENIDO DE ÓXIDOS METÁLICOS:

Algunos residuos contienen metales como zinc y cromo, que, al quemarse, reaccionan con el oxígeno formando óxidos que podrían influir negativamente en la calidad del cemento.

»»» CONTENIDO DE CARBONO, NITRÓGENO Y AZUFRE:

Cuantificar el contenido de estos elementos químicos es clave para estimar las posibles emisiones de gases de efecto invernadero, tales como dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_x) durante su combustión.



EVALUACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

A continuación, se presentan y describen brevemente las características de los distintos residuos evaluados como potenciales combustibles alternativos [5]:

1. Residuos de aserrín y cáscara de nuez.

Estos residuos naturales son una buena alternativa para utilizarse como combustible alternativo. Si bien no producen tanto calor como otros residuos, superan el mínimo recomendado para este propósito.

Además, tienen varias ventajas a considerar, tales como que producen una cantidad mínima de cenizas, emiten menos gases contaminantes y no contienen metales que puedan perjudicar la calidad del cemento.

El único aspecto para considerar es que su contenido de humedad podría afectar ligeramente la eficiencia del proceso.

2. Residuos de plásticos y mangueras industriales.

Estos materiales son excelentes para generar calor, ya que generan más energía que el carbón y tienen un bajo contenido de humedad, lo que optimiza su combustión.

Además, producen mínimas cantidades de cenizas y no contienen metales dañinos.

Su principal inconveniente es que, al tener mucho carbono, liberan más CO_2 al quemarse, aunque emiten bajas cantidades de otros gases contaminantes como NO_x y SO_x .

3. Residuos de llantas.

Las llantas, por lo general, se encuentran secas y producen una cantidad mínima de cenizas.

Son el residuo con mayor potencial energético entre los analizados, pero su combustión produce mucho CO_2 y su alto contenido de zinc requiere un control más exhaustivo.

4. Residuos automotrices.

Estos residuos son buenos generadores de calor, similares al carbón, y su bajo contenido de humedad contribuye a una buena eficiencia energética.

Además, producen menos gases contaminantes que otros materiales; sin embargo, generan más cenizas y contienen metales como zinc y cromo, lo que implica un control más cuidadoso en la operación del horno.

5. Residuos de turbinas eólicas.

Estos residuos son los más complejos de los que fueron examinados. Si bien emiten una cantidad baja en gases, su capacidad para generar calor es inferior al mínimo recomendado. Además, generan una cantidad considerable de cenizas y superan los niveles recomendables de cloro, lo que podría afectar los equipos.

También contienen materiales como fibra de vidrio y resinas, que presentan dificultades en su combustión. Debido a estas particularidades, no son la opción más adecuada como combustible, por lo que su uso se limitaría a pequeñas cantidades.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mezclas de combustibles alternativos



Mezclas de combustibles alternativos

Al analizar los distintos residuos que pueden ser utilizados como combustibles alternativos en la industria del cemento, se ha observado que ninguno es idóneo por sí solo.

Cada tipo de residuo presenta características particulares que pueden ofrecer ciertas ventajas en algunos aspectos, pero también implican limitantes en otros.

Por ejemplo, algunos residuos destacan por su alto poder calorífico, lo que les otorga una eficiencia notable en la generación de energía, aunque su uso podría generar mayores emisiones de gases. Por el contrario, existen residuos que pueden generar menos emisiones, pero tienen una baja capacidad para generar calor.

Además, hay residuos cuya composición química podría afectar la calidad del cemento si se utilizan en grandes cantidades.



La solución más efectiva es realizar mezclas de diferentes residuos, aprovechando sus propiedades complementarias, lo cual permite [5-7]:

- Optimizar la eficiencia energética del proceso.
- Controlar mejor las emisiones contaminantes.
- Minimizar los posibles efectos en la calidad del cemento.
- Mantener la estabilidad del proceso de producción.

El utilizar mezclas de residuos como combustibles alternativos ofrece un doble beneficio: no solo hace más sostenible el proceso de producción de cemento, sino que también permite aprovechar materiales que, de otro modo, terminarían en rellenos sanitarios.

Este enfoque refleja cómo la industria puede avanzar hacia un modelo de economía circular, en el que los residuos se transforman en recursos valiosos.



IMPACTO AMBIENTAL, ECONÓMICO Y SOCIAL

Reducción de emisiones >>>

Un hallazgo relevante del estudio es que los residuos evaluados producen menos CO₂ por unidad de calor generado en comparación con el carbón. Esto implica que, al generar energía, se libera una menor cantidad de CO₂ a la atmósfera, lo que puede contribuir de manera significativa a reducir la huella de carbono en la producción de cemento. Esta reducción de emisiones no solo favorece al proceso de producción, sino que también contribuye al cumplimiento de los compromisos globales en la reducción de gases de efecto invernadero, alineándose con las metas de sostenibilidad y mitigación del cambio climático de la empresa [5,8].

Economía circular >>>

El uso de estos residuos como combustibles alternativos favorece la economía circular al optimizar la gestión de residuos, reducir la extracción de recursos y generar empleos. También contribuye a disminuir la cantidad de desechos que terminarían en rellenos sanitarios, transformando residuos en recursos valiosos y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles, minimizando así el impacto ambiental. Además, impulsa nuevas oportunidades económicas en el manejo, procesamiento y valorización de residuos, fomentando la generación de empleo y el desarrollo de industrias sostenibles dentro de la economía verde. En conjunto, este enfoque fortalece un modelo productivo más eficiente, sostenible y alineado con los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) [4,9].

Beneficios para la sociedad

El empleo de combustibles alternativos para la producción de cemento genera importantes beneficios que impactan de manera positiva en diversos ámbitos de la sociedad. Más allá de la innovación industrial, estas tecnologías limpias aportan ventajas significativas en tres ámbitos fundamentales: ambiental, económico y social, creando un efecto multiplicador que potencia el valor de estos avances para las comunidades y el planeta.

Ventajas ambientales

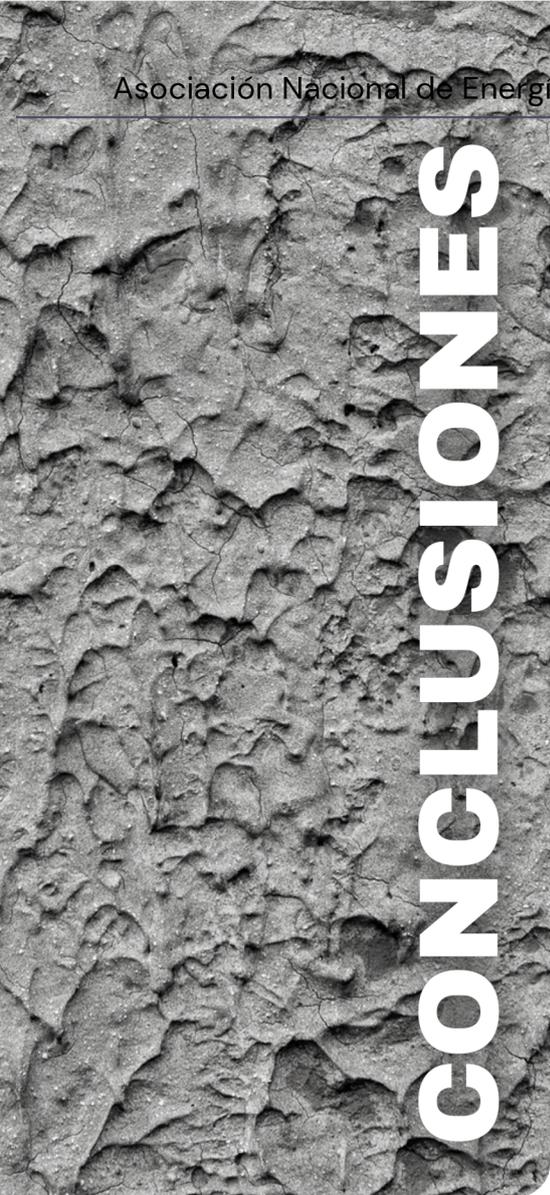
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Disminución en la acumulación de residuos en basureros y vertederos.
- Conservación de recursos naturales.
- Mejora en la calidad del aire.

Beneficios económicos

- Reducción en costos de combustible para las empresas.
- Creación de nuevos empleos en el manejo de residuos.
- Desarrollo de nuevas oportunidades de negocio.
- Ahorro en costos de disposición de residuos.

Impacto social

- Mejora en la gestión de residuos locales.
- Reducción de la contaminación en comunidades cercanas.
- Contribución al desarrollo sostenible.
- Ejemplo de innovación en el sector de la industria.



CONCLUSIONES

La producción de cemento es una actividad fundamental para el desarrollo de la sociedad, pero su impacto ambiental no debe ser ignorado.

Esta investigación representa un avance clave hacia una producción más sostenible, demostrando que es posible equilibrar la manufactura de cemento con la responsabilidad ambiental mediante el aprovechamiento de residuos para los que su disposición final era en un relleno sanitario.

Los resultados de este estudio no solo ofrecen una solución práctica para reducir las emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes en la producción de cemento, sino que también abren nuevas oportunidades para optimizar la gestión de residuos y fortalecer la economía circular.

Al emplear residuos como combustibles alternativos, la industria cementera puede disminuir su dependencia de combustibles fósiles, reducir la generación de desechos y promover un uso más eficiente y sostenible de los recursos.

Este enfoque no solo beneficia al medio ambiente, sino que también impulsa oportunidades económicas al generar nuevos mercados y empleos en el tratamiento y valorización de residuos.

Así, se refuerza la idea de que el desarrollo industrial y la sostenibilidad pueden avanzar de manera conjunta.

El éxito de este estudio demuestra que, al combinar el conocimiento científico con la urgencia de proteger el planeta, es posible encontrar soluciones innovadoras a los desafíos ambientales.

A medida que esta tecnología se implemente y perfeccione, podrá transformar significativamente una de las industrias más relevantes y de importancia económica en el mundo.

REFERENCIAS >>>

1. GCCA Futuro del hormigón. 2021, Global Cement and Concrete Association (GCCA): London, UK.
2. GCC. Concretos y Morteros. 2025 [cited 2025; Available from: <https://www.gcc.com/es/inicio/>].
3. Alsop, P.A., Cement plant operations handbook: for dry process plants. 2007, Luxembourg: Tradeship Publications Ltd.
4. GCCA. Cement Industry Net Zero Progress Report. 2023, Global Cement and Concrete Association (GCCA): London, UK.
5. Rivera Sasso, O., et al. Valorization of Biomass and Industrial Wastes as Alternative Fuels for Sustainable Cement Production. Clean Technologies, 2024. 6, 814-825 DOI: 10.3390/cleantechnol6020042.
6. Zieri, W. and I. Ismail, Alternative fuels from waste products in cement industry. Handbook of Ecomaterials 2018, Cham, Switzerland: Springer Nature.
7. GCCA Sustainability Guidelines for co-processing fuels and raw materials in cement manufacturing. 2019, Global Cement and Concrete Association (GCCA): London, UK.
8. Guidelines for Co-processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing. 2014, World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) - Cement Sustainability Initiative (CSI): London, UK. p. 1-37.
9. GCCA Sustainability Framework Guidelines. 2022, Global Cement and Concrete Association (GCCA): London, UK.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación por el financiamiento para realizar esta investigación (FECTI-2024-CV-INFRA-044). ORS agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca otorgada (SECIHTI 874347).