

## Análisis del ciclo de vida (ACV): De un cemento producido con reemplazo de cáscara de huevo y cáscara de arroz<sup>1</sup>

Steven Frías-Gutiérrez<sup>2</sup>, Mauricio Revuelta-Muñoz<sup>3</sup>, Carlos Pacheco-Bustos<sup>4</sup>

### Resumen

**Introducción.** La industria cementera es una de las causantes del cambio climático, por lo que las investigaciones actualmente están enfocadas en utilizar materiales de desecho que puedan reducir la cantidad de materia prima que se extraiga para su fabricación. Así como también es necesario evaluar los daños ambientales asociados a estos nuevos productos que garanticen la reducción de los efectos negativos. **Objetivo.** Evaluar los impactos ambientales, utilizando el análisis del ciclo de vida (ACV) basado en la norma ISO 14040, ocasionados por una cadena de producción de cemento Portland con un reemplazo de 14 % de cáscara de huevo y 5 % de cáscara de arroz, manteniendo los procesos actuales como molienda e incineración

con el mismo consumo energético. **Materiales y métodos.** Para el análisis del inventario se tuvo en cuenta la base de datos de Agribalyse v3.0.1, la cual es un repositorio francés para el análisis de ACV del sector agrícola y alimentario, estas inmersas en el software a usar como es OpenLCA. Para esto el cemento con porcentaje de reemplazo de cáscara de huevo (14 %) y cascarilla de arroz (5 %) se requiere:

- Cáscara de huevo y cascarilla de arroz.
- Insumos energéticos de sistemas externos como el carbón y la electricidad.
- Piedra Caliza, Arena y Yeso.
- Transporte de materiales

<sup>1</sup> Artículo original derivado del proyecto de investigación “Uso de la cáscara de huevo y cascarilla de arroz como reemplazo total o parcial de material cementante” adscrito a la Facultad de Ingeniería Civil, financiado por la Universidad del Norte, y realizado entre febrero y diciembre de 2021.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería civil, Universidad del Norte, Barranquilla–Colombia. Código ORCID 0000-0002-5049-9634.

<sup>3</sup> Ingeniero Ambiental, Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería civil, Universidad del Norte, Barranquilla–Colombia. Código ORCID 0000-0002-0665-7383

<sup>4</sup> Doctor en Ingeniería Ambiental, Magíster Waste Master in Air Quality Control, Solid Waste and Waste Water Process Engineering, Ingeniero Civil. Docente e Investigador. Facultad de Ingeniería Civil Universidad del Norte, Barranquilla–Colombia. Código ORCID 0000-0002-5198-8122

**Autor para Correspondencia:** Steven Frías-Gutiérrez, correo: [sfrias@uninorte.edu.co](mailto:sfrias@uninorte.edu.co)

Recibido: 16/06/2021 Aceptado: 16/03/2022

\*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

Y generan ambos como salidas un cemento Portland con reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA (para 1 tonelada de cemento). **Resultados.** Es posible observar que la industria con mayor aporte al cambio climático es la relacionada con la producción de energía en forma de combustión, la cual aporta un total de 398,10 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por cada tonelada de cemento con reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA, este proceso es relacionado durante la etapa de producción en los procesos de incineración. Así mismo, la segunda industria con más aporte al cambio climático es la industria minera, la cual es responsable de la liberación 200,10 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por cada tonelada de este tipo de cemento. **Conclusiones.** Mediante

este estudio se pudo constatar que el uso de reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA en un cemento Portland y su incorporación en el proceso actual, implica una disminución en todos los impactos ambientales asociados. Ya que, a pesar de se generen nuevos efectos asociados a la producción del arroz, estos siempre estarán presentes debido a que es un producto alimentario de primera necesidad que genera gran cantidad de residuos al no disponer adecuada su cáscara, por lo que adicionarla junto a otro desecho como las cáscara de huevo implica una mejora encaminada a la economía circular.

**Palabras clave:** cáscara de huevo, cemento, ceniza de arroz, impactos ambientales.

---

### **Life Cycle Analysis (LCA): From a cement produced with eggshell and rice husk replacement.**

#### **Abstract**

**Introduction.** The cement industry is one of the causes of climate change, so research is currently focused on using waste materials that can reduce the amount of raw material that is extracted for manufacturing. As well as it is necessary to evaluate the environmental damage associated with these new products that guarantee in reducing negative effects. **Objective.** evaluate environmental impacts, using life cycle analysis (LCA) based on ISO 14040, caused by a Portland cement production chain with a replacement of 14 % eggshell and 5 % rice husk, maintaining current processes such as grinding and incineration with the

same energy consumption. **Materials and methods.** For inventory analysis, account was taken of Agribalyse database v3.0.1, which is the French repository for the analysis of ACV in the agricultural and food sector, these are immersed in the software to be used, which is OpenLCA. For this the cement with percentage of replacement of eggshell (14 %) and rice husk (5 %) is required:

- Eggshell and rice husk.
- Energy inputs from external systems such as coal and electricity.
- Limestone, Sand and Gypsum.
- Transport of materials

And they both generate as outputs a Portland cement with replacement of 14 % ESP and 5 % RH (for 1 ton of cement). **Results.** It can be observed that the industry with the

greatest contribution to climate change is related to energy production in the form of combustion, which provides a total of 398.10 kg of CO<sub>2</sub> equivalent for each ton of cement with replacement of 14 % CH and 5 % AC, this process is related during the production stage in incineration processes. Similarly, the second industry with the most contribution to climate change is the mining industry, which is responsible for the release of 200.10 kg of CO<sub>2</sub> equivalent for each ton of this type of cement. **Conclusions.** This study found that the use of replacement of 14 % ESP and 5 %

RH in a Portland cement and its incorporation into the current process implies a decrease in all associated environmental impacts. Since, despite new effects associated with rice production, these will always be present because it is a food product of great need that generates a lot of waste by not adequately providing its shell, so adding it together with another waste such as eggshells implies an improvement aimed at the circular economy.

**Keywords:** Egg-shell powder, cement, rice Husk, environmental impacts.

---

### Análise do Ciclo de Vida (ACV): A partir de um cimento produzido com casca de ovo e substituição de casca de arroz.

#### Resumo

**Introdução.** A indústria cimenteira é uma das causas das mudanças climáticas, por isso a pesquisa está focada no uso de materiais residuais que podem reduzir a quantidade de matéria-prima extraída para a fabricação. Além disso, é necessário avaliar os danos ambientais associados a esses novos produtos que garantem a redução de efeitos negativos. **Objetivo.** Esta pesquisa tem como objetivo avaliar os impactos ambientais, utilizando a análise do ciclo de vida (ACV) com base na ISO 14040, causada por uma cadeia produtiva de cimento portland com uma substituição de 14 % de casca de ovo e 5 % de casca de arroz, mantendo processos atuais como moagem e incineração com o mesmo consumo de energia. **Materiais e Métodos:** Para o análise do inventário,

foi levado em conta ao banco de dados Agribalyse v3.0.1, que é um banco de dados, um repositório francês para análise da LCA no setor agrícola e alimentício, estes estão imersos no software a ser utilizado, como o OpenLCA. Para este cimento com percentual de substituição de casca de ovo (14 %) e casca de arroz (5 %) é necessário:

- Casca de ovo e casca de arroz.
- Insumos energéticos de sistemas externos, como carvão e eletricidade.
- Calcário, Areia e Gesso.
- Transporte de materiais

e ambos geram como saídas um cimento Portland com substituição de 14 % ch e 5 % AC (para 1 tonelada de cimento). **Resultados.** Observa-se que a indústria com maior contribuição para as mudanças climáticas está relacionada à produção de energia sob a forma de combustão, que fornece um total de 398,10 kg de CO<sub>2</sub> equivalente para cada

tonelada de cemento con substituição de 14 % de CH e 5 % de AC, esse processo está relacionado durante a fase de produção em processos de incineração. Da mesma forma, a segunda indústria com maior contribuição para as mudanças climáticas é a indústria mineira, responsável pela liberação de 200,10 kg de CO<sub>2</sub> equivalente a cada tonelada desse tipo de cemento. **Conclusões.** Este estudo constatou que o uso de substituição de 14 % de AC ch e 5 % em um cemento Portland e sua incorporação no processo atual implica uma

diminuição em todos os impactos ambientais associados. Uma vez que, apesar dos novos efeitos associados à produção de arroz, esses estarão sempre presentes por ser um produto alimentício de grande necessidade que gera muito desperdício por não fornecer adequadamente sua casca, por isso adicioná-la junto com outros resíduos, como cascas de ovos, implica uma melhoria voltada para a economia circular.

**Palavras-chave:** casca de ovo, cemento, cinzas de Arroz, impactos mbientais.

---

## Introducción

El cambio de los procesos industriales durante la revolución industrial desencadenó un incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>. Anteriormente, la concentración de este gas oscilaba entre 200 y 280 partes por millón, pero en noviembre de 2014 llegó a un tope de 398 partes por millón y se espera que alcance las 800 partes por millón a finales de siglo. (Salas et al., 2016). Una de las causas del alza de esta concentración es la expansión del número de estructuras construidas a partir del concreto, el conglomerado de empresas dedicadas a la construcción mueve aproximadamente el 10 % de la economía mundial y consume cerca del 40 % de la energía que es generada en todo el planeta (Cardim De Carvalho Filho, 2001). A su vez, esta requiere de la industria del cemento. El cemento es un aglutinante muy antiguo que ha servido en la construcción desde el imperio romano. Sin embargo, no fue sino después de la Segunda Guerra Mundial que

la producción de este material cementante tuvo un auge de producción global (Andrew, 2018), este material tiene beneficios como la facilidad de manejo, su alta resistencia a la compresión y un bajo costo en contraste con otros materiales. Aun así, y con todas las ventajas que ofrece, la industria concretera es causante de entre el 7 y el 8 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. (Andrew, 2018)(Al-Safy, 2015). Debido a que se requiere el aprovechamiento de toneladas de roca y arena para la producción del concreto, como resultado, se requieren entre 1,1 a 1,5 toneladas de recursos naturales para producir 1 tonelada de este producto (Al-Safy, 2015)(Alfocea Roig, 2020). De igual forma, se necesitan procesos de incineración para la producción del cemento Portland, los cuales demandan grandes montos de energía., aproximadamente el 2 % de la energía que se produce en el planeta se consume en la producción del cemento (Alfocea Roig, 2020).

Como resultado, debido al uso de cemento Portland, se generó a nivel global cerca de 36 Gt de CO<sub>2</sub> en 2013, un aumento de alrededor del 2,3 por ciento si se compara con el año 2012, y un aumento del 61 por ciento comparándolo con la generación de CO<sub>2</sub> en 1990. (Salas et al., 2016). A su vez, en el 2018 las cementeras fueron la segunda industria en producir mayores emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo, y fue la tercera industria en mayor consumo energético en el mismo año (Alfocea Roig, 2020). A pesar de esto, el CO<sub>2</sub> no es el único problema causado por las empresas productoras de cemento; el procesamiento industrial y la minería son unas de las fuentes causantes de contaminación por metales en el medio ambiente. La industria del cemento también es responsable de un incremento de los factores causantes de cáncer, que en su mayoría son originados en los procesos de producción de energía y en el uso de combustibles fósiles. Asimismo, la mala gestión de los residuos generados en esta industria, así como el excesivo aprovechamiento de las canteras, repercute negativamente en la calidad del suelo, imposibilitando su aprovechamiento por décadas. (Salas et al., 2016).

A su vez, el hormigón elaborado con cemento Portland es el material de construcción más utilizado a nivel global. Aunque existen muchos otros tipos de cemento, el conocido como Portland es el más utilizado de todos ellos, este fue inventado por

Joseph Aspdin en 1824 y lleva el nombre de los acantilados de caliza de la isla de Portland en Inglaterra. (Mamlouk & Zaniewski, 2009) La producción de este cemento comienza con dos ingredientes básicos que son un material calcáreo y otro arcilloso. El material compuesto de calcio está formado por un óxido de calcio al igual que la piedra caliza, conchas de ostras y caracoles o como el yeso, por otro lado, el material compuesto de arcillas es una mezcla de silicio y aluminio extraíbles a partir de suelos arcillosos, escorias de alto horno o esquistos. Los materiales deben ser molidos y guardados antes de ser enviados a un horno principal donde serán horneados a temperaturas entre 1400°C y 1650°C donde se funden (Viandy et al., 2018), esto es lo que convierte estos materiales en Clínter de cemento. Paso siguiente, el Clínter se muele para obtener un fino polvo, al que se le agrega un pequeño porcentaje de yeso con el fin de controlar el tiempo de fraguado del cemento. (Mamlouk & Zaniewski, 2009) (Hewlett & Liska, 2019).

Cal, sílice, óxido de aluminio y óxido de hierro, son los principales compuestos químicos que conforman el cemento tipo Portland. Durante la calcinación se reestructura la composición molecular, por lo que los materiales bases generan productos químicos de alta complejidad, dichos productos se muestran en la **Tabla 1** (Viandy et al., 2018).

**Tabla 1.** Principales compuestos químicos del cemento tipo Portland.

Compuesto	Fórmula química	Fórmula común	Rango usual en peso (%)
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO$ — $Al_2O_3$ — $Fe_2O_3$	$C_4AF$	6-8
Aluminato tricálcico	$3CaO$ — $Al_2O_3$	$C_3A$	6-12
Silicato dicálcico	$2CaO$ — $SiO_2$	$C_2S$	15-30
Silicato tetracálcico	$3CaO$ — $SiO_2$	$C_3S$	45-60

Fuente: Tomada de Mamlouk y Zaniewski, 2009

Las empresas dedicadas a la construcción han evolucionado de tal manera que ahora se enfrentan a nuevos desafíos de ingeniería donde ven necesario nuevos materiales con diferentes características, lo que ha llevado a

los fabricantes de cemento a desarrollar una variedad de tipos de cemento para producir concreto con diversas especificaciones. La **Tabla 2** resume los principales tipos de cementos y sus aplicaciones.

**Tabla 2.** Tipos de cementos existentes.

Tipo	Nombre	Aplicación
I	Normal	Se utiliza cuando no se requieren propiedades específicas en el concreto; es el más ampliamente usado.
II	Resistencia media a sulfatos	Protección media a sulfatos, entre 0.1-0.2 por ciento de peso de sulfatos solubles en agua, en suelos o 1500-10800 partes por millón de sulfatos en agua; utilizado en la construcción de muelles y muros de contención.
III	Elevada resistencia inicial	Se usa cuando se deben retirar rápidamente los encofrados o se debe poner en funcionamiento la estructura lo antes posible, se utiliza en construcción rápida.
IV	Bajo calor de hidratación	Es requerido para construcciones con grandes dimensiones, en donde debido al tamaño el calor de hidratación es considerable y conlleva a problemas en el fraguado y curado del concreto
V	Elevada resistencia a sulfatos	Protege en casos de exposición alta a sulfatos, entre 0.1-2 por ciento de peso de sulfatos solubles en agua, en suelos o 1500-10800 partes por millón de sulfatos en agua

Fuente: Tomada de Mamlouk y Zaniewski, 2009

Desde el año de 1970, el conglomerado de la construcción ha utilizado una variedad de subproductos de otras industrias como aditivos en el cemento, con el fin de mejorar una o más propiedades del concreto. Entre ellos, se encuentran las escorias de horno alto molidas, el humo de sílice, el polvo de ceniza y las puzolanas naturales; estas adiciones producen principalmente un cemento hidráulico no metálico compuesto básicamente de silicatos y aluminosilicatos de calcio, estos reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas normales para formar compuestos que presentan propiedades cementosas (Hewlett & Liska, 2019). El futuro de las investigaciones se visiona en la utilización de residuos sólidos urbanos, industriales y agroindustriales, ya que el enfoque de la ciencia hoy en día está basado en sustituir la materia prima para la elaboración del cemento con residuos de otras industrias, de esta forma se busca reducir el costo necesario para la elaboración de dicho producto requerido en la construcción, y a su vez reincorporar dentro de la cadena de producción sobrantes considerados como desechos (Viandy et al., 2018). Las recientes investigaciones han demostrado que desechos tales como fibras naturales o de acero, cenizas volantes, sílica, humo de sílice, vidrio, caucho triturado, y desechos de ciertas industrias. Tal como es el objeto de este estudio, la cáscara de huevo y la cascarilla de arroz. La primera ha despertado el interés de países productores de huevos, como India y Malasia, donde este desecho se ha convertido en una preocupación ya que puede convertirse en un alérgeno para muchas personas cuando pasan mucho tiempo en los botaderos. (Akhil

& Kumar, 2015), Todo esto combinado, los malos olores que producen este tipo de desechos, la cáscara de huevo se convierte en un material deseable para la fabricación de materiales compuestos ya que resuelve una variedad de problemas y además es un material sencillo y, en muchos casos, gratuito de obtener. Por otro lado, la cáscara de arroz es considerado un subproducto del mercado global del arroz, el cual tuvo, según la FAO, una producción mundial calculada de 756.7 millones de toneladas durante el 2017 (FAO, 2017). Adicionalmente, al calcinar este desecho se obtiene un material Puzolánico que es usado ampliamente en procesos industriales para la fabricación de concreto, cerámicas, aislantes, etc. (Vidal et al., 2018).

En el caso de la cáscara de huevo (CH), y su producto de consumo (el huevo), es considerado un alimento básico en la canasta familiar de cualquier colombiano y ciudadano del mundo, es un producto rico en proteínas y minerales que es ampliamente utilizado en la industria alimenticia, incluyendo restaurantes, pastelerías y panaderías, entre otros lugares. Según FENAVI, el colombiano promedio se alimenta de alrededor de 252 huevos por año, lo que genera más de 13 millones de cáscaras de huevo en Colombia. (Valencia, 2016), estas son desechadas sin generar un valor agregado y son depositadas en botaderos donde su descomposición genera malos olores y lixiviados difíciles de tratar.

Una cáscara de huevo de buena calidad contiene alrededor de 2,2 gramos de calcio en forma de carbonato de calcio, este compuesto ronda entre el 94 y el 97 % de la composición de la cáscara, mientras que el restante 3 % es normalmente materia orgánica y pigmentos

como fósforo, magnesio, potasio, zinc, manganeso, hierro y cobre. En la **Tabla 3** se puede apreciar la composición de la cáscara de huevo. El color, la forma y la estructura de la cáscara de huevo determinan la calidad del producto. Los colores pueden variar de blanco a marrón oscuro, y la forma del huevo también puede cambiar. (Hassan, 2014).

**Tabla 3.** Composición química de la cáscara de huevo. Tomada de Hassan, 2009

Composición química de la CH	Contenido (%)
$CaCO_3$	94
$MgCO_3$	1
$Ca_3(PO_4)_2$	1
Materia Orgánica	4

Investigadores (Cree & Rutter, 2015) se han focalizado en el uso de la CH incineradas porque producen un compuesto químico conocido como óxido de calcio o más comúnmente conocido como cal viva, que fue ampliamente utilizado en el pasado. (Cree & Rutter, 2015); a la hora de hidratar, este elemento actúa como aglutinante, transformándose en una pasta de hidróxido de calcio que une los elementos a su alrededor.. Esta información se muestra en la **Tabla 4** con la composición de la cáscara de huevo químicamente luego de un proceso de incineración a 500°C (CCH), lo cual reduciría gastos energéticos en la producción del cemento, ya que para la producción del cemento tipo Portland, requiere temperaturas superiores a los 1000°C (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

**Tabla 4.** Composición química de la cáscara de huevo incinerada a 500°.

Composición Química de la CCH	Porcentaje en peso
$CaO$	50.7
$SiO_2$	0.09
$Al_2O_3$	0.03
$Fe_2O_3$	0.02
$MgO$	0.01
$Na_2O$	0.19
$SrO$	0.13
$NiO$	0.001
$P_2O_5$	0.24
$SO_3$	0.57
$Cl$	0.08
Pérdidas por incineración	47.8

Fuente: Tomada de Hassan, 2009.

Estudios llevados a cabo en India y Malasia sobre el uso de la cáscara de huevo como material de reemplazo del cemento Portland muestran que los morteros de hormigón con porcentajes de reemplazo bajos (menos del 5 %) se comportan de manera similar a los morteros de hormigón sin reemplazo en pruebas de compresión y flexión (Al-Safy, 2015; Karthick et al., 2014; Yerramala, 2014). Por lo que existe una viabilidad comercial limitada debido a los bajos porcentajes de reemplazo, lo que se traduce en pocos costos reducidos.

Por otro lado, la cascarilla de arroz es un residuo generado durante la obtención del arroz, existen actualmente 22 especies del género *Oryza* en el mundo, de las cuales solo

dos son cultivadas para el consumo humano, *Oryza sativa* y *Oryza glaberrima* (Jhatial et al., 2019). Actualmente el arroz es cultivado en todos los continentes exceptuando la Antártida. Según un informe de la FAO, durante el año 2017 la producción de arroz alcanzó una cifra récord de 759,6 millones de toneladas producidas y en Colombia en ese mismo año la producción alcanzó la cifra de 2.7 millones de toneladas.

Diferentes autores han analizado la composición química de la cascarilla de arroz con el fin de identificar opciones de aprovechamiento, la **Tabla 5** presenta los valores de dicha composición obtenida en los estudios más recientes.

**Tabla 5.** Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA).

Compuesto De la CCA	(Rego et al., 2015)	(Swaminathen & Ravi, 2016)	(Mahmud et al., 2016)
$SiO_2$	87.08%	87.2%	85.76%
$Al_2O_3$	0.01%	0.15%	0.25%
$Fe_2O_3$	0.11%	0.16%	1.15%
$CaO$	0.70%	0.55%	0.74%
$MgO$	0.42%	0.35%	0.81%
$Na_2O$	0.18%	—	—
$(SO_3)$	—	0.24%	0.31%
$P_2O_5$	—	—	—
$K_2O$	1.40%	—	—

Fuente: Tomada de A. Jhatial, W. Goh, K. Mo, et al. 2019.

Así mismo, diversos autores han utilizado ambos componentes, la cáscara de huevo (CH) y la cascarilla de arroz (CA) en conjunto como

reemplazo de material cementante (Asman et al., 2017; Jhatial et al., 2019; Siddiq & Tay, n.d.; Soumyan & Viswanath, n.d.). Estas

combinaciones se dan debido a que la CH posee un gran porcentaje de calcio, lo que se asemeja a la composición del cemento. Sin embargo, esta no permite alcanzar las resistencias a compresión obtenidas por un cemento Portland tradicional (Asman et al., 2017), por lo que es necesario agregar otro componente que logre aportar el óxido de sílice que le brinda parte de la resistencia del material, como es el caso de la cascarilla de arroz. Además de aportar el beneficio ya mencionado, la CA mejora la reactividad de la hidratación, al proveer una superficie más grande para la reacción. De igual forma, esta puede aportar a la resistencia a la flexión y a la durabilidad del concreto (Soumyan & Viswanath, n.d.). Por lo que analizando los resultados obtenidos por las diferentes investigaciones, se evidencia que un porcentaje de reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA es la combinación óptima para estos materiales, ya que estos porcentajes mostraron los mejores resultados de los estudios realizados (Siddiq & Tay, n.d.).

Debido a estos beneficios ofrecidos, se decide combinar tanto la cáscara de huevo como la cáscara de arroz para obtener un nuevo material cementante que busca combinar los beneficios del carbonato de calcio obtenido del primero y la sílice obtenida del segundo. De igual forma, para determinar la viabilidad ambiental de este nuevo material, se debe evaluar su impacto al medio ambiente ocasionado al fabricar un cemento Portland con reemplazo de CH y de CA, y compararlo con el impacto ambiental generado por la fabricación de un cemento Portland tradicional. Para esto existen diferentes metodologías que permiten

evaluar la nueva alternativa de reemplazo de material cementante, en este caso se utilizará el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), ya que es una metodología que ha demostrado su eficacia para valorar los impactos potenciales sobre el medio ambiente. Esta ofrece la ventaja de ser una herramienta “desde la cuna hasta la tumba”, lo que permite analizar todas las consecuencias medioambientales durante toda la etapa de un material (Cardim De Carvalho Filho, 2001). Con la finalidad de incorporar residuos nuevamente a la cadena productiva y disminuir la contaminación generada por la industria cementera, esta investigación tiene como objetivo realizar el análisis del ciclo de vida (ACV) de un cemento creado con un reemplazo de 14 % de cáscara de huevo y 5 % de cáscara de arroz, estas serán integradas como parte del proceso productivo actual, por lo que los procesos como molienda e incineración se mantendrán acorde a lo que existe actualmente. Esto con el fin de no generar traumas en los procesos actuales y que permitan generar una disminución en la cantidad de materiales provenientes de la minería y generar un rehusó a los residuos agroindustriales. De esta forma, se verificará las disminuciones de dióxido de carbono, así como todos los impactos generados por este nuevo producto.

## **Materiales y Métodos**

### **Metodología.**

El análisis del ciclo de vida (ACV) basado en la norma ISO 14040, es una herramienta fundamental para identificar y evaluar los impactos potenciales sobre el medio ambiente durante la vida útil de un producto,

en este caso el cemento Portland con un reemplazo de 14 % de ceniza de cáscara de huevo y 5 % de cascarilla de arroz. El ACV es un proceso desde la cuna hasta la tumba, donde se analiza desde su producción, uso y desecho o rehusó (Song et al., 2016). Para esto la ISO 14040 define cuatro elementos:

- Definir objetivos y el alcance, así como los límites del sistema.
- Realizar el análisis del inventario
- Evaluar los impactos del producto o tecnología.
- Interpretar y analizar los resultados.

De esta forma y siguiendo la metodología usada por D. Song, J. Yang, B. Chen et al. Se definen los elementos anteriormente mencionados.

### **Definición de objetivo y alcance**

Esta investigación tiene como objetivo el evaluar los impactos ambientales ocasionados por una cadena de producción de cemento Portland con un reemplazo de 14 % de cáscara de huevo y 5 % de cascarilla de arroz, de acuerdo con lo estipulado como viable en investigaciones anteriores (Viandy et al., 2018), manteniendo los procesos actuales de una planta tradicional de cemento Portland, como molienda e incineración con el mismo consumo energético, esto con el fin de facilitar la incorporación de estas adiciones sin cambiar los procesos tradicionales. La cantidad por evaluar es la producción de 1 tonelada de cemento. Cabe resaltar que para este análisis se debe realizar desde el punto de vista de la cuna

hasta la tumba, entendiendo su nacimiento como el momento de su desecho. Ya que, con el reemplazo de cáscara de huevo y de cascarilla de arroz, su principal materia prima son materiales de desecho. Para el análisis completo se decidió utilizar 6 procesos como una simplificación de todos los procesos inmersos, estos son transporte, preparación de materias primas, calcinación, molienda, envasado y otros (ver Fig. 1).

### **Análisis del Inventario**

Para el análisis del inventario se tuvieron en cuenta publicaciones similares (Cardim De Carvalho Filho, 2001) y bases de datos como la base de datos de Agribalyse v3.0.1, la cual es la base de datos francesa para el análisis de ACV del sector agrícola y alimentario, estas inmersas en el software a usar como es OpenLCA. Para esto el cemento con porcentaje de reemplazo de cáscara de huevo (14 % de reemplazo) y cascarilla de arroz (5 % de reemplazo) se requiere:

- Cáscara de huevo y cascarilla de arroz.
- Insumos energéticos de sistemas externos como el carbón y la electricidad.
- Piedra Caliza, Arena y Yeso.
- Transporte de materiales

Y generan ambos como salidas un cemento Portland con reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA (para 1 tonelada de cemento).

### **Transporte**

Para la fabricación del cemento Portland con reemplazos de CH y CA, se utilizan

camiones diésel pesados con una capacidad de transporte de 30 toneladas para el transporte de las materias primas. Para la obtención de la distancia, el análisis se realizó para una planta ubicada en la ciudad

de Cartagena de indias, Colombia. En el caso de la cantidad transportada, se tuvo en cuenta un porcentaje de desperdicio de 1% para todas las materias primas. La cantidad transportada se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 6** Transporte de materias primas.

Transporte de materias Primas			
Materias primas	Procedencia	Cantidad (Kg)	Distancia (Km)
Piedra Caliza	Arroyo de Piedra, Atlántico	1296	62.5
CH	Relleno sanitario	150	15.7
CA	Magangué, Bolívar	60	220
Arena	Arroyo de Piedra, Atlántico	218.7	62.5
Yeso	Arroyo de Piedra, Atlántico	60	62.5

Fuente: elaborado por autores

### Preparación de materias primas

Para la etapa de preparación de materias primas se tienen en cuenta procesos como la trituración, el premezclado y la molienda. En esta etapa, la electricidad se utiliza para conducir equipos de trituradora, transportador de cinta, apilador-recuperador, sistema de molino vertical y pulverizador de bolas. La electricidad consumida en esta etapa es de 196 MJ por tonelada de cemento (Cardim De Carvalho Filho, 2001).

### Calcinación

En el proceso de calcinación del cemento Portland, la materia prima es preparada y se calienta en un precalcinador donde se inicia la oxidación de  $\text{CaCO}_3$  al óxido de calcio ( $\text{CaO}$ )

y como producto residual se obtiene  $\text{CO}_2$ . Después de esto, lo resultante se ingresa en un horno rotativo para continuar la reacción entre el  $\text{CaO}$  y otros elementos para formar silicatos de calcio y aluminio. La salida del proceso es el clinker, el cual es entregado para que repose hasta temperatura ambiente. La energía consumida en este proceso es de 3380 MJ por tonelada de cemento (Cardim De Carvalho Filho, 2001).

### Empaquetado

Después de pasar por los procesos anteriores, el clinker se mezcla con yeso para molienda. Posteriormente esta mezcla conocida como cemento se entrega a una máquina de embalar, la cual consume un total de 846 MJ por tonelada de cemento.

## Otros

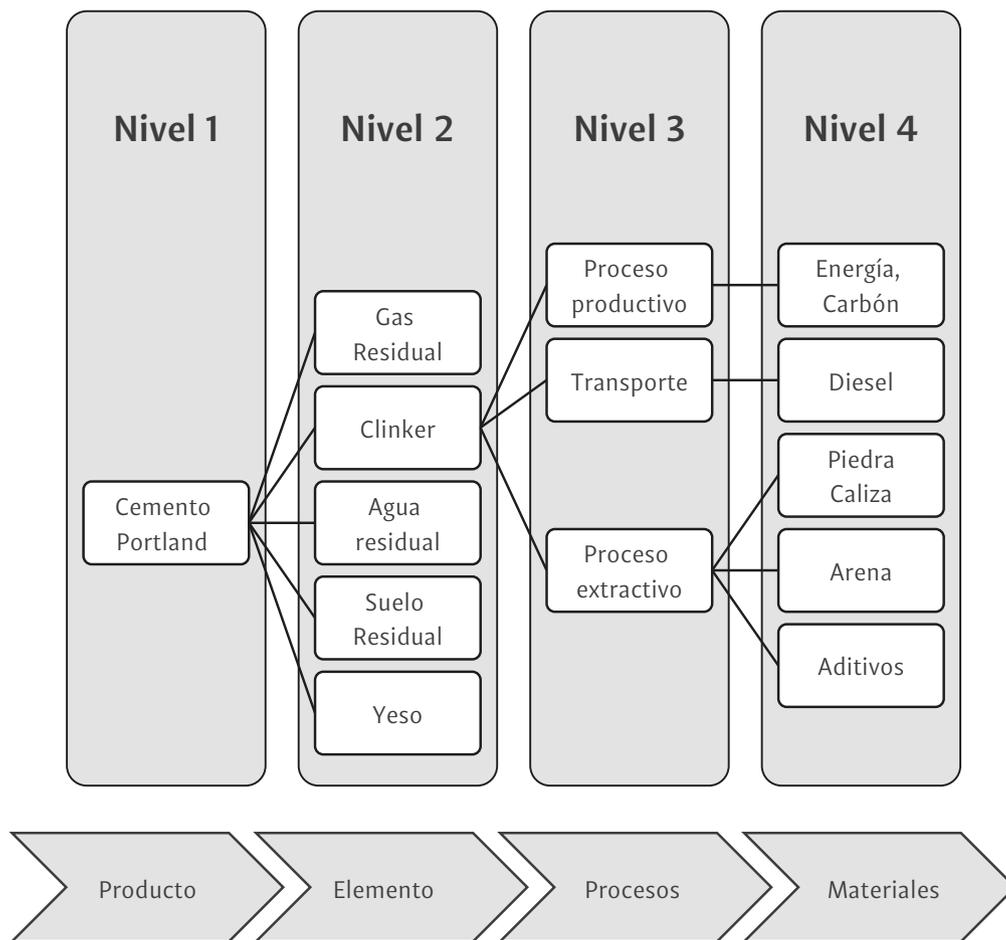
En cuanto a otros se concentra el consumo energético requerido para la operación de la planta y su área administrativa, exceptuando los procesos anteriores, lo que genera un consumo de 122 MJ por tonelada de cemento producido.

## Resultados

Usando un análisis de sistemas y subsistemas, se puede atribuir una etapa o

fase durante el ciclo de vida de un producto, en este caso el cemento portland y revisarlo durante su ciclo de vida para así analizar el impacto que generan sobre el medio ambiente, para ello Cardim de Carvalho propone analizarlo en 4 niveles e identificar en cada uno de ellos sus impactos potenciales. (Cardim De Carvalho Filho, 2001).

De esta forma podemos identificar los niveles aplicables para la producción de Cemento Portland con aditivos (**Figura 1**) y sus impactos potenciales (**Tabla 7**) (Cardim De Carvalho Filho, 2001).



**Figura 1.** Niveles aplicables para la elaboración del cemento Portland

Fuente: elaborada por los autores.

**Tabla 7.** Impactos ambientales producidos en la generación del cemento tipo Portland.

Producto de la producción del cemento	Impacto sobre el medio ambiente		
	Producción	Uso y mantenimiento	Reuso
<b>Materiales (Nivel 4)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumo energético y de recursos naturales derivados de los procesos de transporte y extracción.</li> <li>Generación de contaminación en el aire, el suelo y el agua (Transfronteriza y locales).</li> <li>Generación de ruido y vibraciones.</li> <li>Impacto visual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impactos potenciales derivados del producto intermedio o final que lo utiliza.</li> <li>Consumo energético y de recursos naturales en los procesos de mantenimiento.</li> <li>Generación de residuos o sustancias tóxicas, derivados de los procesos de mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impactos potenciales en el producto intermedio o final que se utiliza.</li> </ul>
<b>Componente o elemento (Niveles 2 o 3)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumo energético y de recursos naturales derivados de los procesos de transporte y producción.</li> <li>Generación de contaminación en el aire, el suelo y el agua (Transfronteriza y locales).</li> <li>Generación de ruido y vibraciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumo energético y de recursos naturales en los procesos de mantenimiento.</li> <li>Generación de residuos o sustancias tóxicas, derivados de los procesos de mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impactos potenciales en el producto intermedio o final que se utiliza.</li> </ul>
<b>Cemento Portland (Nivel 1)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumo energético y de recursos naturales derivados de los procesos de extractivos y productivos.</li> <li>Generación de ruido y vibraciones.</li> <li>Producción de residuos por excedentes de procesos de embalajes.</li> <li>Generación de contaminación en el aire, el suelo y el agua (Transfronteriza y locales).</li> <li>Impacto visual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumo energético y de recursos naturales, en los procesos de mantenimiento.</li> <li>Generación de ruido y vibraciones, en función de la naturaleza de uso y su vida útil.</li> <li>Generación de residuos (desechos, aguas residuales y sustancias tóxicas), derivados del mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumo de energía en los procesos de demolición de estructuras.</li> <li>Generación de ruido y vibraciones.</li> <li>Emisiones de partículas al aire.</li> <li>Producción de residuos por demolición descontrolada o selección para reciclado.</li> <li>Consumo de energía en los procesos de transportes, selección y machaqueo (reciclado).</li> <li>Impacto visual.</li> </ul>

Fuente: Adaptado de (Cardim De Carvalho Filho, 2001).

Los impactos ambientales de las 6 etapas (transporte, preparación de materias primas, calcinación, molienda, envasado y otros) fueron simuladas mediante el programa OpenLCA, para una unidad funcional de 1 tonelada, obteniendo las emisiones y contaminantes reflejados en la **Tabla 8**.

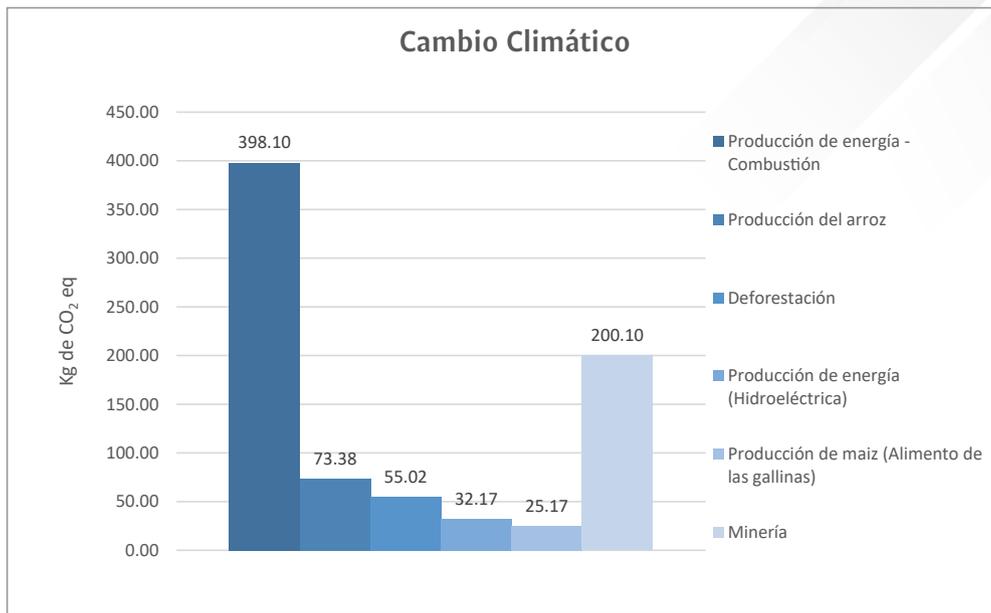
**Tabla 8.** Resultados totales de las categorías de impactos de un cemento tipo Portland con reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA.

Categoría de impacto	Resultado	Unidad de referencia
Acidificación	1.40E+01	mol H <sup>+</sup> equivalente
Agotamiento de Ozono	6.08E-05	kg CFC-11 equivalente
Cambio climático	7.84E+02	kg CO <sub>2</sub> equivalente
Consumo de agua	1.41E+03	m <sup>3</sup> equivalente
Ecotoxicidad en agua dulce	1.67E+04	CTUe
Eutrofización en agua dulce	5.76E-01	kg P equivalente
Eutrofización en agua de mar	2.82E+00	kg N equivalente
Eutrofización terrestre	5.46E+01	mol N equivalente
Formación de Ozono fotoquímico	2.20E+00	kg COVDM equivalente
Toxicidad en Humanos (cancerígena)	4.43E-07	CTUh
Toxicidad en Humanos (no-cancerígena)	2.24E-05	CTUh

**Fuente:** elaborada por los autores

De igual forma, se realiza un análisis detallado de la contribución de las industrias directas o indirectas con las cuales se genera una correlación de productos y servicios para la producción de una tonelada de cemento con reemplazo de CH y CA. En la **Figura 2** se puede apreciar la cantidad emanada por las industrias que más aportan CO<sub>2</sub> dentro de la cadena productiva de este cemento. En ella se es posible observar que la industria con mayor aporte al cambio climático es la relacionada con la producción de energía en forma de combustión, la cual aporta un total de 398,10 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por cada tonelada de cemento con reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA, es decir representa cerca del 50 %

de las emisiones generadas, este proceso es relacionado durante la etapa de producción en los procesos de incineración. De igual forma, la segunda industria con más aporte al cambio climático es la industria minera, la cual es responsable de la liberación 200,10 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por cada tonelada de este tipo de cemento. Mientras que el resto de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente corresponden a la producción del arroz (73,38 kg de CO<sub>2</sub> eq), la deforestación (55,02 kg de CO<sub>2</sub> eq), la producción energética de las hidroeléctricas (32,17 kg de CO<sub>2</sub> eq) y la producción de maíz (25,17 kg de CO<sub>2</sub> eq), el cual es requerido como alimento de las gallinas.

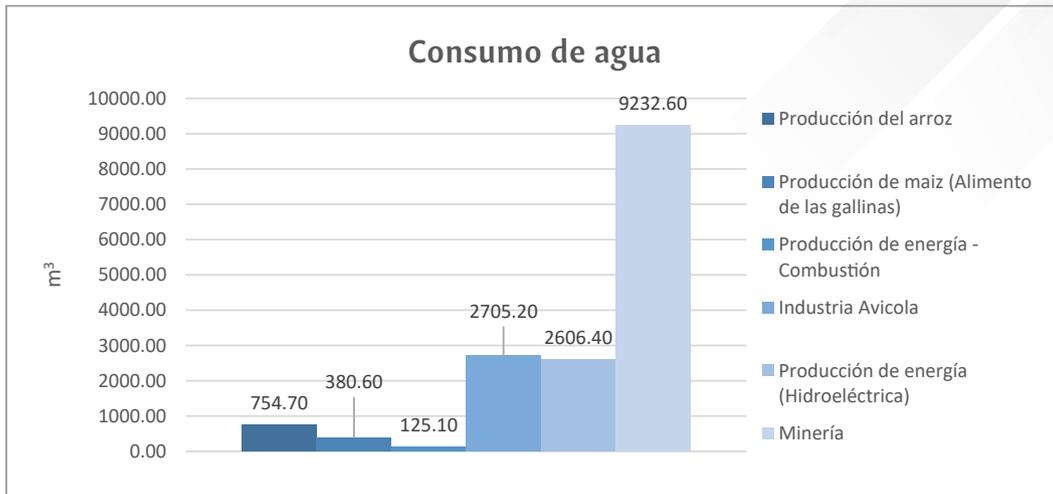


**Figura 2.** kg de CO<sub>2</sub> equivalente aportado al cambio climático por las industrias dentro de la cadena de producción del cemento con reemplazo de CH y CA

**Fuente:** elaborada por los autores.

Por otro lado, una de las problemáticas que genera gran impacto mundial es el uso del agua, esta problemática surge debido a la urbanización y agricultura extensiva, y se prevé que para 2030 en un escenario de cambio climático haya un déficit del 40 % del agua dulce disponible, y si a esto sumamos que el 20 % de los acuíferos del mundo están actualmente sobreexplotados (UNESCO & WWAP, 2015), genera una gran preocupación y pone en foco a la comunidad internacional frente a la cantidad de agua consumida por cada industria. De esta manera, en la **Figura 3** se puede apreciar el consumo de agua

requerido en la producción y mantenimiento de una tonelada de cemento con reemplazo de CH y CA. En ella se observa, que el mayor consumo de agua es requerido en la actividad minera, la cual consume 9232,60 m<sup>3</sup> por cada tonelada de cemento con reemplazo producido, esta industria es requerida para la extracción de la materia prima base del cemento tradicional, así como el cemento con reemplazo, donde a pesar de requerir menor cantidad, sigue siendo uno de los principales elementos que componen su producción como lo son la piedra caliza y la arena extraídas por esta industria.

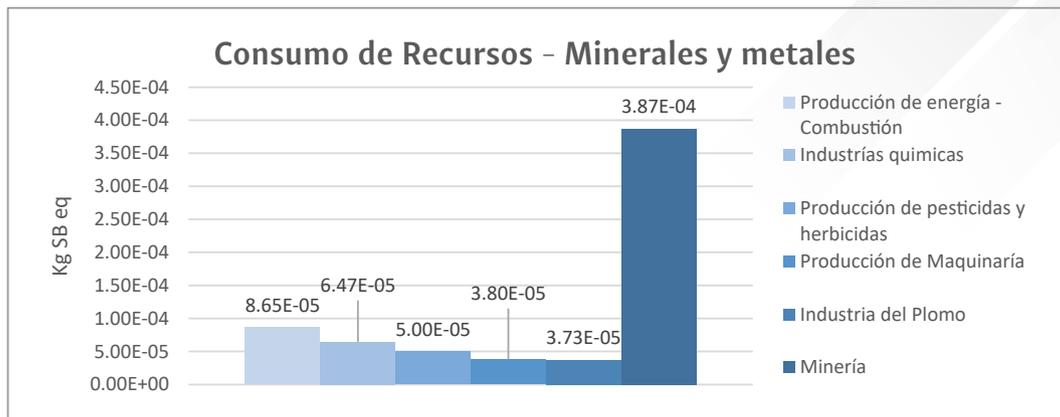


**Figura 3.** Cantidad de agua consumida por las industrias dentro de la cadena de producción del cemento con reemplazo de CH y CA

Fuente: elaborada por los autores.

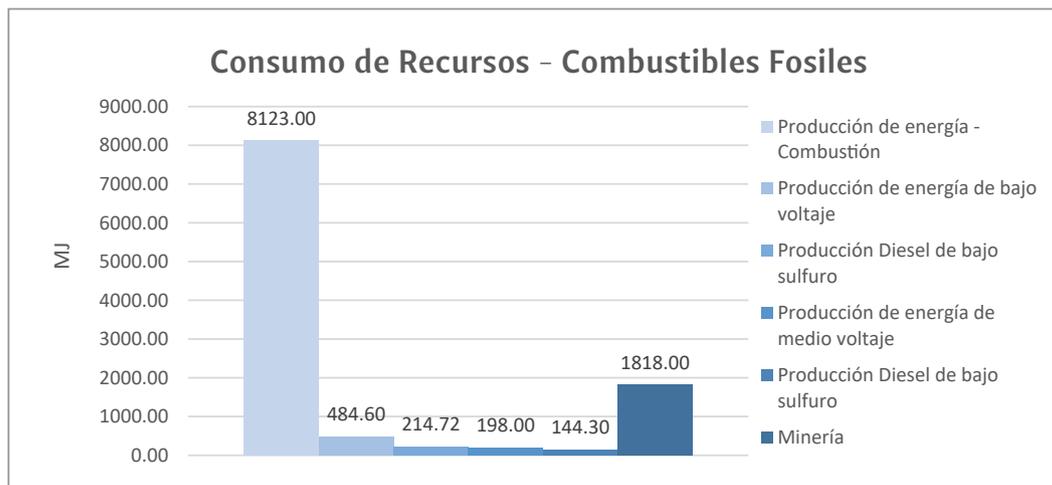
Siguiendo con el análisis de los impactos por industrias, es igualmente pertinente analizar el consumo de recursos. Ya que estos representan la continuidad y subsistencia del sistema productivo actual donde poseemos recursos finitos y dependiendo de la cantidad usada en cada industria implica la supervivencia de su sistema productivo actual. Además, el consumo de recursos está asociado a los impactos anteriormente estudiados y generan consecuencias tanto en las emisiones de contaminantes en el aire, suelo y agua, así como en la calidad de vida de las personas. En la **Figura 4** se observa el consumo de recursos requeridos para la obtención de minerales y metales, esto reflejado en Kg de Sb (Antimonio) equivalente, estos resultados están en orden

de magnitud de  $10^{-4} - 10^{-5}$ , lo que implica que este elemento no es relevante en el sistema productivo de este tipo de cemento. Sin embargo, en el caso de la **Figura 5** en la cual se aprecia el consumo de recurso por combustibles fósiles en MJ, si es relevante y el mayor consumidor, como es de esperarse, es la producción energética por combustión con un requerimiento de 8123 MJ para producir una tonelada de cemento de reemplazo de CH y CA, mientras que lo sigue la industria minera con un requerimiento de 1818 MJ por tonelada de cemento producido, esto se explicaría debido a la gran cantidad de maquinaria Diesel que es usada día a día para la extracción de materia prima como la piedra caliza y la arena.



**Figura 4.** Niveles aplicables para la elaboración del cemento Portland

Fuente: elaborada por los autores.



**Figura 5.** Niveles aplicables para la elaboración del cemento Portland

Fuente: elaborada por los autores.

## Discusión

El análisis del ciclo de vida ha sido útil para determinar los impactos ambientales asociados a todas las etapas de la producción de un cemento con reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA, ya que es un proceso que permite evaluar desde el inicio del huevo proveniente de las gallinas, el arroz que se cultiva en los

campos y la piedra caliza extraída de las minas. Así como todo su recorrido hasta llegar a formar parte del aglutinante conocido como cemento. Mediante este análisis fue posible identificar cada una de las industrias que hacen parte fundamental del proceso y que probablemente mediante otro tipo de análisis podrían pasar desapercibidas. De esta forma, se pudo identificar que la industria minera,

así como la producción de energía asociada a la combustión son los que más peso tienen en la generación de impactos. Teniendo en cuenta que por medio de esta investigación se busca evaluar y comparar las ventajas y desventajas que ofrece añadir un material de desecho como lo son la CH y la CA a la cadena de producción actual sin generar cambios en los procesos de incineración o molienda. Se puede entender entonces, que por medio de este nuevo cementante no se podrá disminuir los impactos asociados a la generación de energía por medio de combustión. Sin embargo, si se disminuye el impacto asociado a la minería extractiva al reducir la cantidad de piedra caliza y arena utilizados para la fabricación del cemento. Por otro lado, entendiendo que las investigaciones anteriores han encontrado que las CA y CH sólo requieren temperaturas

de entre 500°C – 900 °C para cumplir con las propiedades de resistencia esperadas (Akhil & Kumar, 2015; Jhatial et al., 2019; Vidal et al., 2018), se encuentra un nicho de mejora en el proceso actual e implicaría una reducción significativa del impacto asociado a la generación de energía por combustión. Ya que el proceso estudiado se realizó teniendo en cuenta una incineración a una temperatura superior a los 1400 °C (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Por otro lado, los resultados obtenidos deben ser comparados con estudios similares. Por lo cual los valores presentados en este estudio son comparados con los obtenidos por Song et al., 2016., como se observa en la **Tabla 9**. Donde en dicha investigación se realiza el análisis de ciclo de vida para un cemento tradicional.

**Tabla 9.** Comparación de impactos de un cemento tipo Portland con reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA y un cemento típico tradicional.

categoria de impacto	Unidad de referencia	Resultado Cemento con reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA	Resultado de un cemento típico (Song et al., 2016)
Acidificación	mol H <sup>+</sup> equivalente	1.40E+01	2.51E+00
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 equivalente	6.08E-05	6.15E-07
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> equivalente	7.84E+02	6.78E+02
Consumo de agua	m <sup>3</sup> equivalente	1.41E+03	1.00E+04
Ecotoxicidad en agua dulce	CTUe	1.67E+04	5.14E-01
Eutrofización en agua dulce	kg P equivalente	5.76E-01	1.59E-01
Eutrofización en agua de mar	kg N equivalente	2.82E+00	4.45E+02
Eutrofización terrestre	mol N equivalente	5.46E+01	1.32E-02
Formación de Ozono fotoquímico	kg COVDM equivalente	2.20E+00	1.28E-01
Toxicidad en Humanos	CTUh	2.29E-05	8.83E-01

Fuente: elaborada por los autores y Song et al., 2016.

Por medio de la **Tabla 9** podemos identificar que hay una disminución en los impactos asociados al consumo de agua, la toxicidad en humanos y a la eutrofización en agua dulce. Estas reducciones están asociadas principalmente a la disminución de la minería, ya que como se observa en la **Figura 3**, esta industria es la que más contribuye al consumo de agua. A pesar de esto se denota un aumento en los kg de  $\text{CO}_2$  equivalentes asociados al cambio climático; siendo consecuentes es un resultado que no se espera dado que una disminución de los recursos extraídos mediante minería se vería reflejado en una disminución en las emisiones de  $\text{CO}_2$ . Por lo que al revisar la investigación realizada por Cardim De Carvalho Filho, 2001., se puede evidenciar en los resultados que al comparar dos métodos para realizar el ACV se identifica una disminución en la cantidad de kg de  $\text{CO}_2$  equivalentes asociados al cambio climático, como es el caso de la investigación de Song et al., 2016, donde se omiten procesos fundamentales del proceso de producción, lo que genera una reducción en las emisiones de este gas. De esta forma si se compara el valor obtenido en el presente estudio, con el de Cardim De Carvalho Filho, 2001., el cual fue de 841,71 kg de  $\text{CO}_2$  para la producción de una tonelada de cemento Portland tipo I (Cardim De Carvalho Filho, 2001), se puede apreciar una disminución significativa del impacto asociado al cambio climático, sustentando lo esperado en la presente investigación.

Así mismo, se denota un aumento en los impactos ambientales asociados a la acidificación, el agotamiento de Ozono, la Ecotoxicidad y la Eutrofización. Sin embargo, cabe resaltar que estos impactos están

asociados a la producción agrícola, en este caso la producción del arroz, por lo cual, si el proceso estudiado no se llevara a cabo, estos impactos se mantendrían de igual forma e incluso aumentarían al disponer las cascarillas de arroz en un relleno sanitario. Por lo que al introducir este desecho no se estará evitando las consecuencias de su producción, pero sí se evitará el aumento de los impactos asociados a la disposición en un relleno sanitario.

Por último y como se menciona anteriormente, los procesos de producción de energía por combustión y la minería son los mayores contribuyentes al cambio climático asociados a la producción del cemento, por lo que un aumento de los porcentajes de reemplazo de CH y CA, combinado con una disminución de la temperatura requerida para su incineración pueden hacer un cambio significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera, más aún teniendo en cuenta que la producción de cemento es la segunda industria que más le aporta al planeta gases de efecto invernadero (Alfocea Roig, 2020).

## Conclusiones

El uso del análisis del ciclo de vida (ACV) es un método eficaz para evaluar los impactos ambientales asociados a la producción de cemento. Así como todos los nuevos cementantes o aditivos que deseen analizar su impacto ambiental frente al proceso tradicional de elaboración. Además, permite identificar cada uno de los impactos asociados desde la materia prima, el transporte y su transformación al producto final.

De igual forma, se pudo constatar que el uso de reemplazo de 14 % de CH y 5 % de CA en un cemento Portland y su incorporación en el proceso actual, implica una disminución en todos los impactos ambientales asociados. Ya que, a pesar de se generen nuevos impactos asociados a la producción del arroz, estos impactos siempre estarán presentes debido a que es un producto alimentario de primera necesidad que genera gran cantidad de residuos al no disponer de forma adecuada su cáscara, por lo que adicionarla junto a otro desecho como las cáscara de huevo implica una mejora encaminada a la economía circular.

Por otro lado, se debe evaluar e identificar nuevas formas para mejorar la resistencia de los cementos creados con base a porcentajes de reemplazo de material cementante con CH y CA, que permitan eliminar el uso de cemento Portland tradicional, y generar cementos a base únicamente de desechos. Esto con el fin de generar un producto que disminuya sustancialmente los impactos ambientales que contribuyen al cambio climático y que a su vez reincorporan materiales de desecho a la cadena productiva.

## Referencias

- Akhil, S. M., & Kumar, V. R. (2015). Experimental study on concrete by partial replacement of fine aggregate with fly ash and egg shell powder. *International Journal and Magazine of Engineering, Technology, Management and Research*, 2(2), 214–220.
- Al-Safy, R. A. (2015). EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON PROPERTIES OF CEMENT MORTAR INCORPORATING EGG SHELL POWDER. *Journal of Engineering and Development Vol*, 19(06).
- Alfocea Roig, A. (2020). *Life cycle assessment of alkali-activated cement compared to ordinary Portland cement*.
- Andrew, R. (2018). *Global Co2 Emissions From Cement Production*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.831454>
- Asman, N. S. A., Dullah, S., Ayog, J. L., Amaludin, A., Amaludin, H., Lim, C. H., & Baharum, A. (2017). Mechanical properties of concrete using eggshell ash and rice husk ash as partial replacement of cement. *MATEC Web of Conferences*, 103, 1002.
- Cardim De Carvalho Filho, A. (2001). *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento—Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento*. (A. Aguado, A. Josa Garcia-Tornel, & C. I. P. D. B. Universitat Politècnica De Catalunya. Escola Tècnica Superior D'Enginyers De Camins (eds.)).
- Cree, D., & Rutter, A. (2015). Sustainable bio-inspired limestone eggshell powder for potential industrialized applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(5), 941–949.
- FAO. (2017). *Seguimiento del Mercado del Arroz de la FAO*. [www.fao.org/economic/RMM/es](http://www.fao.org/economic/RMM/es)
- Hassan, H. H. (2014). *Eggshell as an Additive in Concrete Mix*. UMP.

- Hewlett, P., & Liska, M. (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Butterworth-Heinemann.
- Jhatial, A. A., Goh, W. I., Mo, K. H., Sohu, S., & Bhatti, I. A. (2019). Green and sustainable concrete—the potential utilization of rice husk ash and egg shells. *Civil Engineering Journal*, 5(1), 74–81.
- Karthick, J., Jeyanthi, R., & Petchiyammal, M. (2014). Experimental study on usage of egg shell as partial replacement for sand in concrete. *International Journal of Advanced Research in Education Technology*, 1(1), 7–10.
- Mahmud, H. B., Bahri, S., Yee, Y. W., & Yeap, Y. Y. (2016). Effect of rice husk ash on the strength and durability of high strength performance concrete. *World Acad. Sci. Eng. Technol*, 10(3), 375–380.
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2009). *Materiales para ingeniería civil*. Pearson Educación.
- Rego, J. H. S., Nepomuceno, A. A., Figueiredo, E. P., Hasparyk, N. P., & Borges, L. D. (2015). Effect of particle size of residual rice-husk ash in consumption of Ca (OH) 2. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(6), 4014178.
- Salas, D. A., Ramirez, A. D., Rodriguez, C. R., Petroche, D. M., Boero, A. J., & Duque-Rivera, J. (2016). Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 113, 114–122.
- Siddiq, A. G., & Tay, V. X. (n.d.). *THE UTILISATION OF RICE HUSK ASH AND EGG SHELLS IN MAKING CONCRETE*.
- Song, D., Yang, J., Chen, B., Hayat, T., & Alsaedi, A. (2016). Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain. *Applied Energy*, 164, 916–923.
- Soumyan, K., & Viswanath, A. (n.d.). Experimental Study to Check the Effect of Egg Shell Powder and Rice Husk Ash on the Property of Concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*.
- Swaminathen, A. N., & Ravi, S. R. (2016). Use of rice husk ash and metakaolin as pozzolonas for concrete: a review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(1), 656–664.
- UNESCO, & WWAP. (2015). Agua para un mundo sostenible datos y cifras. *Informe de Las Naciones Unidas Sobre Los Recursos Hídricos En El Mundo 2015*.
- Valencia, A. (2016). Colombianos consumen en promedio 252 huevos y 30 Kg de pollo al año. *Semana, Sector Avícola*. <https://www.semana.com/economia/articulo/consumo-de-huevos-y-pollo-en-colombia-al-ano/232235/>
- Viandy, B., Steven, F., Francisco, G., & Carlos, P. (2018). Uso de cáscara de huevo como reemplazo parcial de material cementante en cubos mortero de

cemento hidráulico Francisco Gómez1  
Steven Frías2. *INVESTIGACIÓN  
FORMATIVA EN INGENIERÍA*, 158.

Vidal, A. V, Araujo, R. G. S., & Freitas, J. C.  
O. (2018). Sustainable cement  
slurry using rice husk ash for high  
temperature oil well. *Journal of Cleaner  
Production*, 204, 292–297. [https://doi.  
org/10.1016/j.jclepro.2018.09.058](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.058)

Yerramala, A. (2014). Properties of concrete  
with eggshell powder as cement  
replacement. *The Indian Concrete  
Journal*, 94–102.