

Análisis de ciclo de vida en bloques de hormigón: comparación del impacto producido entre bloques tradicionales y con subproductos

Life cycle analysis in concrete blocks: comparison of the impact produced between traditional blocks and blocks made with by-products

Maggi Madrid ^(*), Yokasta García Frómeta ^(**), Jesús Cuadrado ^(*), Jesús María Blanco ^(***)

RESUMEN

Reutilizar subproductos para el desarrollo de bloques de hormigón que sean más sostenibles y con mejores propiedades térmicas, para el sector de la edificación es una necesidad y buena alternativa a desarrollar en el sector construcción. Se realizó un análisis del ciclo de vida (ACV) a los bloques con y sin subproductos, a fin de cuantificar los beneficios medioambientales que conllevaría la incorporación de estos subproductos en los bloques. El ACV se realizó de acuerdo con lo establecido en la norma EN-ISO 15804, que establece las reglas de cálculo para el análisis de productos de construcción. Este análisis se ha realizado mediante la herramienta de software “Eco-it”, con un alcance de la cuna a la puerta. Con base a los resultados se puede concluir que, la sustitución parcial del árido fino por las virutas y del cemento por los lodos de cal en la mezcla, es una vía alternativa para obtener bloques más respetuosos con el medio ambiente y a su vez con mejores propiedades térmicas.

Palabras clave: análisis de ciclo de vida; bloques de hormigón; subproductos; inventario de ciclo de vida; de la cuna al sitio.

ABSTRACT

Reusing by-products for the development of concrete blocks that are more sustainable and with better thermal properties, for the building sector is a necessity and a good alternative to develop in the construction sector. A life cycle analysis (LCA) was performed on the blocks with and without by-products, in order to quantify the environmental benefits that the incorporation of these by-products in the blocks would entail. The LCA was carried out in accordance with the provisions of EN-ISO 15804, which establishes the calculation rules for the analysis of construction products. This analysis was performed using the “Eco-it” software tool, with a scope from cradle to gate. Based on the results, it can be concluded that the partial replacement of fine aggregate by shavings and cement by lime sludge in the mix is an alternative way to obtain blocks that are more respectful with the environment and in turn with better thermal properties.

Keywords: life cycle analysis; concrete blocks; by-products; life cycle inventory; cradle to site.

(*) Mechanical Engineering Department, School of Engineering, University of the Basque Country, UPV/EHU, Bilbao (Spain).

(**) Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PUCMM), Santo Domingo (Dominican Republic).

(***) Energy Engineering Department, School of Engineering, University of the Basque Country, UPV/EHU, Bilbao (Spain).

Persona de contacto/Corresponding author: yi.garcia@ce.pucmm.edu.do (Y. García Frómeta)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9442-6499> (M. Madrid); <http://orcid.org/0000-0002-1265-0487> (Y. García Frómeta); <http://orcid.org/0000-0001-9875-5118> (J. Cuadrado); <http://orcid.org/0000-0003-0191-2063> (J. M. Blanco)

Cómo citar este artículo/Citation: Maggi Madrid, Yokasta García Frómeta, Jesús Cuadrado, Jesús María Blanco (2022). Análisis de ciclo de vida en bloques de hormigón: comparación del impacto producido entre bloques tradicionales y con subproductos. *Informes de la Construcción*, 74(566): e438. <https://doi.org/10.3989/ic.88125>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 02/03/2021
Aceptado/Accepted: 23/09/2021
Publicado on-line/Published on-line: 19/05/2022

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas están afectando a las condiciones climáticas del planeta, principalmente mediante el aumento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GHG) en la atmósfera. Ejemplo de ello, es el incremento a través de los años de los niveles de dióxido de carbono (CO₂), el principal GHG. Hace más de 200 años, estos niveles se encontraban por debajo de las 300 partes por millón (ppm), actualmente están en 380 ppm (1), y se espera que las concentraciones de CO₂ aumenten a más de 800 ppm para finales de siglo (2).

Las emisiones de gases de efecto invernadero de la UE disminuyeron un 2% en 2018, después de un aumento del 0,6% en 2017. Estos resultados obtenidos en 2018, corresponden a una reducción del 23% con respecto a los niveles de 1990, que es más que el objetivo de reducción de la UE del 20% en 2020 (3). El consumo de combustibles para el transporte (incluida la aviación internacional) es el segundo sector fuente más importante, con una contribución del 23%; la agricultura contribuye con un 10%, los procesos industriales y el uso de productos con un 8% y la gestión de residuos con un 3% (4).

El sector industrial, comprende entre otros subsectores, el del hormigón, siendo este último un gran contribuyente a las emisiones anuales de GHG; tan solo en emisiones de CO₂ genera anualmente entre un 8-9% (5). Esto se debe a que el hormigón es uno de los materiales más consumidos en el sector de la construcción y su fabricación requiere de una cantidad importante de cemento, cuya generación supone un gran impacto por la cantidad de CO₂ producida en el proceso de descarbonización (conversión de la caliza en cal viva), al que hay que añadir el elevado consumo de energía necesario. A diciembre de 2019, la producción anual de hormigón alcanzó los 24.8 millones de metros cúbicos, frente a los 22.2 millones de 2018, lo que representó un aumento del 11.6% (6).

La fabricación de cemento Portland contribuye en gran medida a las altas emisiones de CO₂ generadas en la producción de hormigón, alrededor de un 5% (7). Por cada tonelada de cemento producido, se emiten entre 0.62 y 0.97 toneladas de CO₂ (4). En consecuencia, la industria del hormigón requiere una reestructuración fundamental, que permita disminuir estas emisiones.

En este contexto, se siguen abordando investigaciones con un enfoque sostenible, dirigidas a obtener vías que permitan reducir el alto impacto ambiental del hormigón, mediante la sustitución parcial de algunos de sus componentes, como el cemento o los áridos, por residuos o subproductos industriales tales como: cenizas de cáscara de arroz, desechos de cantera de caliza, cenizas de mazorca de maíz, cenizas de combustible, vidrio, polvo de neumático, cenizas de palma de aceite y escoria siderúrgica (8-10). Empleando esta técnica, se lograría valorizar estos subproductos, y a su vez, sería más sostenible la producción del hormigón. Además, se podría reducir el consumo de grandes cantidades de materia prima, teniendo en cuenta la gran escala de producción de hormigón a nivel mundial.

Otra problemática que afecta a la sociedad actual a nivel mundial es la pobreza energética (10). Básicamente, es una situación en la que las personas no son capaces de pagar los servicios básicos de energía en sus hogares, generados principalmente por el consumo de calefacción o refrigeración;

debido a los bajos ingresos familiares, a los altos costos de energía y a la baja eficiencia energética de las viviendas.

Una forma de abordar el problema de la pobreza energética es llevar a cabo una renovación energética profunda de las viviendas para reducir la demanda térmica. Para ello, se deben llevar a cabo medidas de restauración aplicables a la envolvente del edificio, que involucren el uso de materiales con buenas propiedades térmicas. Por todo esto, actualmente hay una búsqueda continua de la mejora de las propiedades térmicas de los materiales que componen la envolvente de los edificios. Sin embargo, estos esfuerzos deben ir acompañados de un enfoque sostenible.

Uno de los elementos más empleados en la construcción de la fachada de los edificios y sus particiones interiores son los bloques de hormigón. Su uso presenta muchas ventajas tales como: economía, durabilidad, gran flexibilidad de planificación y composición espacial. Además, la construcción de muros de fábrica puede cumplir diversas funciones, incluidas la estructural, como el aislamiento acústico y la protección contra incendios (11, 12). Sin embargo, estos elementos presentan algunas debilidades en comparación con otros materiales de fachadas, tales como un alto impacto ambiental y baja resistencia térmica.

Una vía para reducir parcialmente las emisiones de GHG generadas por el sector del hormigón es el empleo de los bloques de hormigón con subproductos, analizados en la presente investigación (13, 14), ya que su composición está basada en los principios de la economía circular. Así mismo, su puesta en obra permitiría abarcar los tres aspectos de la sostenibilidad ya que, por un lado, se reduciría el impacto ambiental que se genera al extraer y procesar la materia prima destinada a la fabricación de estas piezas (aspecto ambiental). Y, por otro lado, se obtendría una reducción en el coste del material destinado a la fabricación de los bloques de hormigón (aspecto económico) y ello también conduciría a una reducción en el precio final del bloque, lo cual además permite mejorar las condiciones térmicas en el interior de los edificios, logrando que los ocupantes obtengan un mejor confort y bienestar interior (aspecto social).

Es por ello, por lo que en esta investigación se realiza un análisis y cuantificación de los impactos ambientales globales de la producción de bloques de hormigón con y sin subproductos, mediante un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de la cuna al sitio (15-19). Varios estudios, han realizado el ACV para cuantificar el impacto ambiental del hormigón como material y han realizado análisis en bloques (20-25).

Por otro lado, para cuantificar el ahorro que supondría emplear estos subproductos, se analizan los costes involucrados en la producción de los bloques con y sin subproductos. Al final de este estudio, se incluyen las conclusiones derivadas del análisis de los resultados.

2. OBJETIVO Y METODOLOGÍA

El objetivo principal de esta investigación es, cuantificar mediante un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de la cuna al sitio, la reducción del impacto ambiental que se obtiene al sustituir parcialmente algunos de los componentes tradicionales del bloque de hormigón por subproductos.

2.1. Metodología para el análisis del ciclo de vida en los bloques de hormigón

El ACV se realizó empleando la herramienta de software “ECO-it” (26), de origen holandés y desarrollada para IHOBE, la cual es una Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco. “ECO-it” se emplea principalmente para el ecodiseño de productos y presenta su propia base de datos, la cual no puede ser editada o ampliada.

Un análisis de “ECO-it” consta de cuatro etapas en las que el usuario introduce sus propios criterios:

- Ciclo de vida: se describe el ciclo de vida del producto que se analiza.
- Producción: se introduce la estructura jerárquica del producto y se especifican los materiales y los procesos de producción de cada pieza (parte), a partir de un amplio grupo de materiales y procesos disponibles.
- Uso: se especifica la demanda de electricidad, transporte y material en la fase de uso.
- Fin de vida: permite especificar cuál es el destino final del producto, o las distintas piezas o materiales, tras finalizar su vida útil.

Este software emplea el sistema de puntos “eco indicador” basado en el método de evaluación de impacto “ReCiPe” y el CO₂-equivalente del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), para evaluar el impacto ambiental del proceso o ciclo de vida de un producto. La unidad empleada para expresar los eco indicadores son los milipuntos (mPt), siendo un punto la representación de la centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano medio europeo; mientras que para expresar el CO₂-equivalente se emplea el CO₂-eq.

La metodología “ReCiPe” fue creada por RIVM, CML, PRé-Consultants, RadboudUniversiteit, Nijmegen y CE Delft (27). Se desarrolló para combinar las ventajas de los métodos CML2001 y Eco-Indicator 99. La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicador 99 es su facilidad de interpretación. Se trata de una metodología internacionalmente aceptada que integra el enfoque orientado al problema ambiental y al daño. Actualmente, esta metodología está considerada como la sucesora de las metodologías anteriores.

Esta metodología traduce las emisiones y extracciones de recursos, en un número limitado de puntuaciones de impacto ambiental, por medio de los llamados factores de caracterización, los cuales representan la contribución relativa de un recurso a una categoría de impacto. Existen dos formas principales para obtener los factores de caracterización, a nivel de punto medio y a nivel de punto final. “ReCiPe” calcula 18 indicadores de punto medio y 3 indicadores de punto final.

Los indicadores punto medio se centran en problemas ambientales únicos, siendo estos: el cambio climático, la disminución de la capa de ozono, la toxicidad humana, la formación de oxidantes fotoquímicos, la formación de materia particulada, la radiación ionizante, la acidificación terrestre, la eutrofización de agua dulce, la eutrofización marina, la ecotoxicidad terrestre, la ecotoxicidad de agua dulce, la ecotoxicidad marina, la ocupación de terreno agrícola, la ocupación

de terreno urbano, la transformación de terreno natural, la disminución de cantidad de agua dulce, la disminución de recursos minerales y la disminución de combustibles fósiles.

Los indicadores de punto final muestran el impacto ambiental en tres niveles de adición más altos, siendo estos, el efecto sobre la salud humana, la biodiversidad y la escasez de recursos. La conversión de puntos medios a puntos finales simplifica la interpretación de los resultados de Evaluación del Inventario del Ciclo de Vida (LCIA). Sin embargo, con cada paso de adición, aumenta la incertidumbre en los resultados. La Figura 1 muestra las relaciones entre el parámetro del Inventario del Ciclo de Vida (LCI), en el lado izquierdo, el indicador de punto medio, que está en el centro, y el indicador de punto final a la derecha.

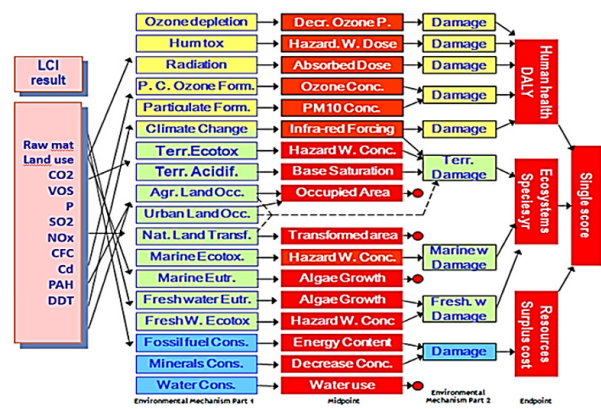


Figura 1. Descripción general de la estructura de “ReCiPe”.

Por otra parte, la metodología IPCC, cuya definición comenzó en 1988, fue establecida por dos organizaciones de las Naciones Unidas, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y posteriormente, fue ratificada por la Asamblea General de las Naciones Unidas mediante la Resolución 43/53 (28). Esta metodología recoge los factores de caracterización para el potencial del calentamiento global directo debido a emisiones al aire.

El alcance general de este estudio es de la cuna a la puerta, incluye las tres primeras etapas de la fase de fabricación de pro-

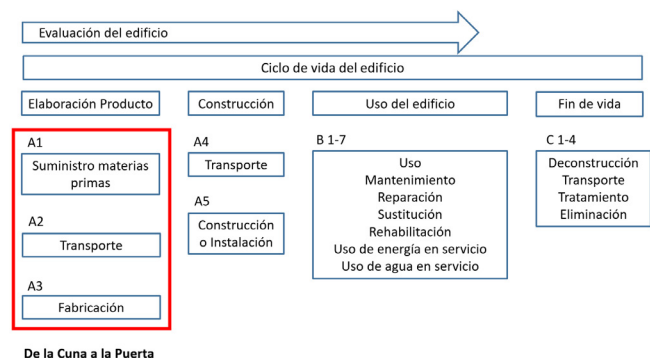


Figura 2. Límite del sistema: de la cuna a la puerta.

ducto descritas en la Figura 2. La primera etapa, comprende el suministro de las materias primas necesarias, el transporte y la fabricación del producto, y los procesos asociados al mismo como su empaquetado. En este estudio, se excluyen la fase de construcción (formada por el transporte a obra, que sí, que se ha evaluado y su instalación) la fase de uso y fase de fin de vida, ya que se asume que los tres tipos de bloques bajo estudio tienen el mismo procesos de construcción en obra, uso y final de vida.

Para garantizar que todas las entradas y salidas del ACV de los bloques estén relacionadas, el análisis se realizó sobre la base de una unidad de referencia con respecto a la cuantificación de los resultados ambientales. Con lo cual, la unidad funcional de un bloque se usó para la comparación de los tres sistemas de producción.

3. IMPACTO AMBIENTAL DEL HORMIGÓN

A continuación, se describe el impacto ambiental asociado al ciclo de vida del hormigón.

3.1. Componentes del hormigón

Cemento: El proceso de fabricación consta de 6 etapas: obtención de las materias primas, preparación de las materias primas, molienda del crudo, cocción en el horno rotativo, molienda del clínker, almacenamiento y expedición (29). El diagrama de flujo del proceso general de fabricación de cemento y las entradas y emisiones asociadas durante las diferentes etapas de producción se muestran en la Figura 3.

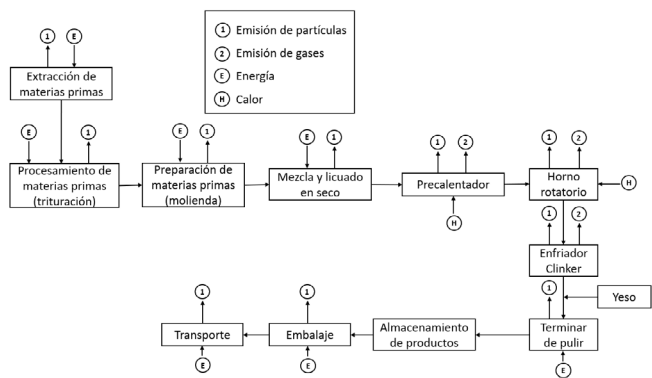


Figura 3. Diagrama de flujo de proceso para la fabricación de cemento (30).

Los impactos ambientales de la fabricación de cemento pueden ocurrir a escala global, regional o local (31); éstos se detallan a continuación:

La escala global, consiste en la suma del CO₂ emitido durante el proceso de calcinación de la materia prima (siendo esta una de las principales aportaciones en las emisiones de CO₂) y el CO₂ asociado al uso de energía. Este último, puede ser CO₂ de energía directa o indirecta. Las emisiones indirectas de energía comprenden las emisiones de CO₂ asociadas con la generación de energía eléctrica para operar la planta de cemento, mientras que las emisiones de energía directa se asocian con la combustión de combustible en el horno de cemento.

La Figura 4 muestra las emisiones de CO₂ en porcentajes generadas por el consumo de energías en la producción del cemento Portland, determinado a partir de un Análisis del Ciclo de Vida de la Cuna a la puerta. Como se puede observar, la mayor aportación de CO₂ debido al consumo de energías se produce en la etapa de cocción en el horno rotativo.

En esta escala, el mayor potencial para reducir las emisiones de CO₂ generadas por el uso de combustibles convencionales basados en el carbono, radica en reemplazarlo por combustibles alternativos con bajos contenidos de carbono. Los tipos más comunes son la biomasa de carbono neutral y los neumáticos fuera de uso (32).

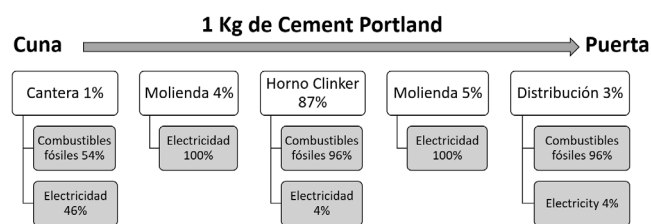


Figura 4. Energía consumida de la producción de Cemento Portland, fuentes de emisión de CO₂, (Límite: de la cuna a la puerta) (33).

Otra vía para reducir las emisiones de la fabricación de cemento es el reemplazo parcial del clínker del cemento Portland por puzolanas (cenizas volantes, humo de sílice, entre otras) o materiales cementantes suplementarios (escorias). En la actualidad, es una práctica común, el reemplazo parcial del clínker por estas adiciones. En Europa, los CEM II, III, IV y V se realizan de este modo. Como las adiciones están presentes en el rango de 5-30% (por peso) del cemento, sus impactos en comparación con CEM I (que consiste en 95-100% de clínker) son menores. La incorporación de estos materiales al cemento reduce el agotamiento de los recursos primarios, el consumo de energía, la gestión de los residuos (en el caso de que se traten de subproductos), las emisiones generadas en la transformación de las materias primas en Clínter, así como todos sus impactos asociados.

En cuanto a los impactos ambientales regionales, se incluyen las emisiones de SO₂ y NO_x, los cuales contribuyen a la lluvia ácida. La mayoría del SO₂ emitido se deriva de la combustión de los combustibles fósiles y del procesamiento de las materias primas en los hornos. Estos se originan debido al uso de combustible fósil durante la producción de clínker y al consumo de energía en toda la cadena del proceso.

Con respecto a la escala local, las emisiones de polvo del horno de cemento son las que más contribuyen al impacto local. El tamaño de este polvo (0.05-5 μm) se encuentra dentro del rango de tamaño de partículas respirables (menor a 10μ) (34, 35). De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (36), estas partículas finas de materia prima, no quemadas y parcialmente quemadas, presentes en los gases de combustión del horno de cemento, están clasificadas como un posible residuo peligroso, debido a los peligros ambientales y para la salud humana.

Áridos: Los áridos generalmente se obtienen mediante técnicas de minería, pueden presentar formas redondeadas, cuando se trata de materiales aluviales o formas angulosas en el resto de los casos y donde existe machaqueo. Por lo general, se separan en varias fracciones por su tamaño, en algunos casos es necesario un proceso de lavado y secado, por lo que una modesta cantidad de energía está involucrada en todos estos procesos.

En muchas zonas del planeta, los depósitos de áridos virgen ya se han agotado, y transportar áridos a largas distancias puede ser insostenible. Una vía alternativa, es el empleo de una fuente gratuita o de bajo costo, tales como son los subproductos o áridos reciclados que se obtienen en el entorno local.

La caliza, que es el árido bajo estudio, presenta una serie de problemas ambientales asociados con la producción, tales como: ruidos y vibraciones generados en el procesamiento de la piedra de cantera, gran consumo de energía asociada al proceso de obtención de los áridos gruesos y finos (37), y la contaminación del agua superficial por el arrastre por escorrentía de los sólidos en suspensión.

Agua: La industria del hormigón también emplea grandes cantidades de agua dulce, tan solo el requerimiento anual de agua para la mezcla es de aproximadamente 1 billón de litros (38, 39). El agua utilizada para la fabricación de hormigón suele ser agua corriente, sin procesamiento posterior. Esto se debe al hecho de que ésta no contiene sustancias orgánicas, cloruros o álcalis, que puedan generar inconvenientes en la durabilidad del hormigón.

Las demandas de agua dulce a nivel mundial están provocando el agotamiento de los recursos hídricos, siendo estos frecuentemente extraídos de tal forma que comprometen el bienestar de los ecosistemas de agua dulce (40, 41). Esta problemática se acentúa en zonas donde el agua ya no es suficiente para las necesidades básicas. Una vía para disminuir la demanda de agua en la producción de hormigón es sustituir el agua de la red de abastecimiento por aguas residuales industriales o agua no potable, siempre que su calidad se verifique previamente mediante ensayos de laboratorio. Otra alternativa, puede ser emplear una baja relación agua-cemento (w/c), ya que de esta manera será menor el contenido de agua empleada.

Aditivos: A diferencia de otros componentes del hormigón, las sustancias químicas de los aditivos son una preocupación por sus propiedades tóxicas. De los diferentes tipos de aditivos, los plastificantes y superplastificantes son los más comúnmente utilizados, representando aproximadamente el 80% del consumo de aditivos europeos (42).

Se requieren aproximadamente 3.24 kg de superplastificante para 1m³ de hormigón de 35 MPa (densidad de 2370 kg/m³), lo que representa aproximadamente 0.33 toneladas de uso de plastificante al año en Europa, con impactos ambientales potencialmente considerables (32).

Según Van den Heede, la cantidad de CO₂ (7.20E-01 kg-CO₂-eq) emitida para la producción de 1 kg de superplastificante es solo un poco menor que las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento (8.42E-01 kgCO₂-eq) (31). Sin embargo, como la cantidad de superplastificante utiliza-

do en el hormigón es casi insignificante (aproximadamente un 1%), en comparación con su contenido de cemento, estas emisiones apenas contribuyen al impacto ambiental general.

3.2. Transporte

Las operaciones de transporte en la industria del hormigón involucran la movilización de grandes cantidades de materia prima para su producción, y una vez fabricado el hormigón, tanto si está en estado fresco o endurecido (como elemento prefabricado), se transporta a la obra. Ambos recorridos, consumen cantidades considerables de combustible, generando un gran impacto ambiental.

3.3. Fase operacional

En la fabricación del hormigón, la calidad del agua superficial se puede ver afectada, debido a la red de arrastre por escorrentía de sólidos en suspensión. Esta circunstancia, podría ser particularmente significativa durante la fase operativa, ya que si la escorrentía arrastra partículas de cemento u hormigón puede traer como consecuencia un fuerte aumento en el pH de las aguas receptoras. A fin de prevenir que esto ocurra, se recomienda adaptar una zona en donde se desarrollen todas las operaciones que puedan generar derrames accidentales. En esta zona la superficie debe ser impermeable y deben existir conducciones de drenaje que permitan canalizar estos derrames.

Desde el punto de vista de la contaminación del aire, existen emisiones difusas de polvo generadas como resultado del trabajo llevado a cabo en planta. Incluso si las tolvas de áridos y cementos generalmente están cubiertas, se recomienda la implementación de diversas medidas destinadas a la prevención y minimización de las emisiones de polvo, tales como la colocación de filtros de mangas o humedecido de viales y soleras, entre otros.

La producción de hormigón también genera un aumento en el nivel de ruido del área donde se produce. En la fase operativa, las acciones que pueden tener impacto se derivan, por un lado, del tráfico de vehículos pesados (camiones para el transporte de los materiales que componen la mezcla y del hormigón una vez fabricado) y, por otro lado, del funcionamiento de la planta de hormigón y sus elementos asociados (carga y descarga de áridos, cintas transportadoras, vibradores neumáticos, amasadoras, etc.). Según un estudio medioambiental llevado a cabo por una empresa de prefabricados (43) el nivel de ruido generado por la actividad de fabricación de hormigón en una planta es de alrededor de 67dB, medido a 10m de la planta. Se debe llevar a cabo un buen mantenimiento del equipo y mediciones sonométricas periódicas, para continuar cumpliendo a lo largo del tiempo, los límites de emisión de ruido establecidos por las reglamentaciones aplicables.

3.4. Residuos producidos

Entre los residuos generados en el proceso de fabricación de hormigón se encuentran: el hormigón residual que se queda en la mezcladora, moldes y sistemas de transporte; los lodos generados en la limpieza de la amasadora y que no pueden reducirse, ya que el proceso de limpieza no puede ser reemplazado, y las probetas ensayadas en laboratorio para el control de calidad del hormigón, que tampoco pueden reducirse, ya que el número de probetas a ensayar está establecido por la normativa. Por otro

lado, el uso de componentes prefabricados de hormigón en lugar de hormigón vertido, ofrece las mayores ventajas en términos de generación de residuos (44), debido al seguimiento continuo del proceso productivo en fábrica, con el que se busca entre otras cosas, generar la menor cantidad de residuos.

3.5. Durabilidad y predicción de la vida útil

Obviamente, se pueden disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) que genera la fabricación y puesta en obra de los productos de hormigón, si estos fuesen mucho más duraderos, p. ej., la eficiencia de los recursos de la industria del hormigón aumentaría, si la vida útil de la mayoría de las estructuras construidas, de hoy en día, fueran de más de 100 años. Algunos de los casos más comunes de degradación del hormigón están asociados con la corrosión del acero de refuerzo, la carbonatación y el ataque por sulfatos. A fin de evitar estos inconvenientes, es esencial analizar los materiales de la mezcla, conocer el uso previsto del hormigón y cumplir con los requisitos de las normativas vigentes (la EHE en España), para realizar un diseño eficiente de la mezcla.

4. DESARROLLO DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (LCI)

Esta sección proporciona información sobre los datos correspondientes a las entradas y salidas de todos los procesos involucrados dentro del sistema elegido “De la cuna a la puerta”, y las suposiciones que se consideraron para este estudio.

Los resultados de LCI comparan los estudios seleccionados en términos de consumos ambientales (materiales, agua y consumo de energía) y productos (impacto ambiental y emisiones) cuantificados dentro del límite del sistema ACV. Un diagrama con las entradas, límite operacional y salidas del ACV se muestra en la Figura 5.

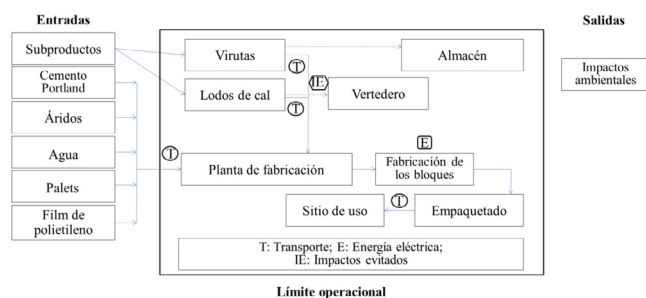


Figura 5. Entradas y salidas del ACV.

Los datos de entrada utilizados para el propósito de este estudio, se obtuvieron de la empresa de prefabricados, donde se realizaron los bloques. El proceso de LCI incluye los materiales y la energía requerida para:

- Adquirir las materias primas y los subproductos utilizados en la producción de bloques,
- Mezclar las materias primas y fabricar los bloques,
- El transporte de las materias primas y los subproductos, al sitio de producción y de los bloques al sitio de construcción.
- Coste del embalaje.

Los resultados de la producción de bloques, en el contexto del LCI, incluye el impacto ambiental resultante de todos los procesos mencionados.

4.1. Materias primas y subproductos utilizados

De las proporciones de cada tipo de bloque, se determinaron las cantidades necesarias de materia prima y subproductos para la preparación de un bloque. Los materiales fueron seleccionados de la base de datos del programa. No encontrando, el plastificante empleado, por lo que no se consideró como dato de entrada en el inventario.

Varias investigaciones (31) tampoco han considerado el impacto del plastificante, argumentando que éste no contribuye significativamente al impacto ambiental total del hormigón, debido a las insignificantes cantidades que se incorporan a las mezclas (menos de un 1% en masa del hormigón). Teniendo en cuenta que, los tipos de hormigón analizados en estas investigaciones eran de alta resistencia (>25 MPa) y por ende empleaban cantidades altas de cementos (entre un 250 y 350 kg/m³) y de aditivo (entre un 2.5 y 3.5 kg/m³); cabe pensar que, para el caso bajo estudio, en el que el tipo de hormigón es de baja resistencia (<8MPa), con bajos contenidos de cemento (≤180 kg/m³) y por tanto bajos contenidos de plastificante (≤1.8 kg/m³), la contribución de este último al impacto ambiental total del hormigón será mucho menor.

Por otro lado, se supuso que las virutas de madera y los lodos de cal tienen un impacto nulo, ya que son subproductos industriales y no contienen ningún tipo de sustancias peligrosas para las personas o el medio ambiente. Esta suposición también se ha establecido en otros estudios similares (45, 46).

4.2. Mezclado de las materias primas y fabricación de los bloques

La electricidad consumida en la fabricación de los bloques se estimó sumando la energía requerida durante todo el proceso de fabricación y dividiéndolo de forma proporcional entre el número de bloques fabricados, con el fin de simplificar el análisis y los cálculos. Para esto, se consideró el consumo de amasadoras, skip, cintas pesadoras, sinfines trasportadores, robot manipulador y robot enfardador. Siendo el total de la electricidad consumida de aproximadamente 0.556 kWh por bloque fabricado. Esta información fue proporcionada por la empresa de prefabricados.

Una vez fabricados los bloques, estos se secan en condiciones ambientales. Por lo tanto, se supuso que la energía solar cubría la demanda de energía del proceso de acondicionamiento de los bloques. Todos los siguientes procesos, tales como la limpieza de los moldes, se realizan manualmente y en seco, empleando cepillos, por lo que su impacto ambiental es tan reducido que se ha despreciado.

4.3. Transporte de las materias primas y los subproductos

En este estudio, se consideraron los impactos ambientales generados al transportar los componentes convencionales de los bloques y los subproductos, desde el sitio de producción de los mismos hasta la empresa de prefabricados Alberdi. Así mismo, se consideró el impacto del transporte de los bloques al sitio de construcción.

Por otra parte, el impacto ambiental generado al transportar los lodos de cal al vertedero se consideró como impacto evitado. Esta consideración también puede ser respaldada por las declaraciones de Turk et al. y Hossain et al. (45, 46). Por el contrario, el transporte de las virutas no se consideró como impacto evitado, ya que no se llevan a vertederos. Este subproducto, como ya se ha comentado anteriormente, se almacena en el mismo lugar donde se produce hasta su reutilización, habitualmente utilizado como biomasa, aunque puede tener otras aplicaciones.

La distancia recorrida al transportar los bloques a la obra, se calculó sobre la base de la distancia media de recorrido de los bloques desde la Empresa de prefabricados Alberdi hasta los clientes habituales. Por lo tanto, el estudio supone que la distancia del transporte de los bloques es de media unos 100 km alrededor de la ubicación de la planta. Adicionalmente, se asumió que el tipo de combustible empleado para el transporte era Diésel. De acuerdo con algunas investigaciones, la inclusión de los impactos del transporte es un paso esencial en los cálculos del LCI, ya que ocurre en las fases principales del ciclo de vida y la carga ambiental asociada puede ser considerable (31). En este caso se va a evaluar el impacto del transporte del producto final a obra con relación al impacto total de la fabricación del producto para poder identificar su influencia.

Los lugares de salida, tipo de transporte y las distancias que recorren los materiales estudiados, desde los puntos de salida hasta la empresa de Prefabricados Alberdi, se presentan en la Tabla 1. De igual forma, los lugares de salida, el tipo de transporte utilizado y la distancia que habitualmente recorren los lodos de cal al vertedero, se muestra en la Tabla 2. Las distancias se midieron sobre mapa.

Tabla 1. Distancias recorridas por los materiales hasta la empresa de prefabricados.

Material	Lugar de salida	Tipo de transporte	Distancia (Km)
CEM	Valderribas, Arraialka-tea, 48330 Lemona, Bizkaia.	Camión 16-32T	13.2
AG	Hijos de León Aman-tegui, Lugar Barrio Aldebarrena, o S/N, 48212 Mañaria, Bilbao, Bizkaia.	Camión 16-32T	5.9
AF	Hijos de León Aman-tegui, Lugar Barrio Aldebarrena, o S/N, 48212 Mañaria, Bilbao, Bizkaia.	Camión 16-32T	5.9
S	Barrio Arriandi, s/n, 48215 Yurreta, Bizkaia.	Camión 16-32T	2
LM	Barrio Arriandi, s/n, 48215 Yurreta, Bizkaia.	Camión 16-32T	2
Palets	Ebaki, Barrio de Ugarte, 48392 Ugarte, Bizkaia.	Camión 3.5-7.5T	19.7
Film	Calle B, Parcela 1-A (Polígono Industrial, Las Casas, 42005 Soria.	Camión <3.5T	219

CEM = Cemento; AF = Árido fino; AG = Árido Grueso; LM = Lodos de cal y S = Virutas.

Tabla 2. Distancias recorridas por los lodos de cal hasta el vertedero.

Material	Lugar de salida	Tipo de transporte	Distancia (Km)
LM	Barrio Arriandi, s/n, 48215 Yurreta, Bizkaia.	Camión 16-32T	14.9

LM = Lodos de cal.

4.4. Embalaje

Para calcular cuánto embalaje se emplea para un bloque, se partió de la base de que los bloques se transportan en palets de madera de tipo europalet (dimensiones de 800mm x 1200mm) y se envuelven en un film de poliuretano. Cada palet pesa 27kg y está diseñado para soportar una carga dinámica máxima de 1000kg. Se determinó el número máximo de bloques que pueden almacenarse (ya que los bloques en estudio varían en peso) y la cantidad de palet y de film necesaria para almacenar 1 bloque.

Los materiales, el transporte, el embalaje y la energía necesarios para 1 bloque MREF, MS y MSLM se muestran en la Tabla 3 (47).

Tabla 3. Datos de entrada para el ACV.

Ecoindicador	Tipo de bloque		
	MREF	MS	MSLM
Cemento Portland II (kg)	1.0000000	1.0000000	0.8500000
Transporte del Portland cemento II (T.km)	0.0132000	0.0132000	0.0112200
Caliza (kg)	13.3333333	12.8055556	12.8055555
Transporte de la caliza (T.km)	0.0786667	0.0755528	0.0755528
Agua (kg)	0.4000000	0.4000000	0.4000000
Palets (kg)	0.3698630	0.3417720	0.3552630
Transporte del palet (T.km)	0.0072863	0.0067329	0.0069980
Film de poliuretano (kg)	0.0033383	0.0030847	0.0032060
Transporte del film de poliuretano (T.km)	0.0007310	0.0006756	0.0007020
Electricidad, España (kW.h)	0.5555556	0.5555556	0.5555555
Transporte del bloque (T.km)	1.3600000	1.2700000	1.3100000
Virutas (kg)	-	0.1110000	0.1110000
Transporte de las virutas (T.km)	-	0.0002220	0.0002220
Lodos de cal (kg)	-	-	0.0408333
Transporte de lodos de cal (T.km)	-	-	0.0000810
Transporte de lodos a vertedero (T.km)	-	-	-0.0006100

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El índice de impacto ambiental y las emisiones de CO₂ asociadas a la producción y puesta en obra de un bloque de MREF (Ver Tabla 4), MS y MSML se presentan en la Tabla 5. De los resultados, se puede apreciar que el bloque MREF es el que mayor índice de impacto ambiental presenta, seguido por el bloque MS, mientras que el que posee menor índice de impacto ambiental es el bloque MSML.

De acuerdo con los resultados del ACV, se generan 1.61kg de emisiones de CO₂-eq al producir y transportar a obra un bloque MREF; de los cuales, alrededor del 47.34% están asociadas con el cemento Portland, un 20.50% con la electricidad utilizada en el proceso de fabricación, 15.78% con la caliza, 15.49% con el transporte, 0.88% con el embalaje y 0.01% con el agua. En el apartado del transporte hay que resaltar que un 14.16% del mismo se corresponde con el transporte del producto final a la obra.

Según la base de datos Eco-it, un kilogramo de bloque convencional es equivalente a 0.122 kgCO₂-eq y 8.4mPt. Si se comparan estos valores, con los resultados obtenidos para un kilogramo del bloque MREF (1.61 kgCO₂-eq/13.6 kg= 0.118kgCO₂-eq y 148 mPt/13.6kg= 10.9mPt), se puede apreciar que los resultados obtenidos son cercanos a los valores de la base de datos del software empleado.

Tabla 4. Índice de impacto ambiental y kg de emisiones de CO₂ para un bloque MREF.

Ecoindicador	Tipo de bloque	
	MREF	
	kg CO ₂ -eq	mPt
Cemento Portland II	0.76200	45.00000
Transporte del cemento	0.00220	0.22000
Caliza	0.25400	47.00000
Transporte de la caliza	0.01300	1.30000
Agua	0.00013	0.01200
Electricidad, España	0.33000	30.00000
Palets	0.00510	0.55000
Transporte del palet	0.00480	0.47000
Film	0.00900	1.10000
Transporte del film	0.00140	0.14000
Transporte del bloque	0.22800	23.00000
Virutas		
Transporte de las virutas		
Lodos de cal		
Transporte de lodos de cal		
Transporte de lodos de cal al vertedero		
Total	1.61	148

Tabla 5. Índice de impacto ambiental y kg de emisiones de CO₂ para un bloque MS y MSML.

Ecoindicador	Tipo de bloque			
	MS		MSLM	
	kg CO ₂ -eq	mPt	kg CO ₂ -eq	mPt
Cemento Portland II	0.76200	45.00000	0.64700	38.00000
Transporte cemento	0.00220	0.22000	0.00190	0.19000
Caliza	0.24400	45.00000	0.24400	45.00000
Transporte de la caliza	0.01300	1.30000	0.01300	1.30000
Agua	0.00013	0.01200	0.00013	0.01200
Electricidad, España	0.33000	30.00000	0.33000	30.00000
Palets	0.00470	0.50000	0.00470	0.50000
Transporte del palet	0.00440	0.43000	0.00440	0.43000
Film	0.00830	1.10000	0.00860	1.10000
Transporte del film	0.00130	0.13000	0.00140	0.13000
Transporte del bloque	0.21300	21.00000	0.22000	22.00000
Virutas	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Transporte de virutas	0.00004	0.00370	0.00004	0.00370
Lodos de cal			0.00000	0.00000
Transporte de los lodos de cal			0.00001	0.00140
Transporte de lodos de cal al vertedero			-0.00009	-0.0100
Total	1.58	144	1.47	138

En referencia a las emisiones de CO₂-eq relacionadas con la producción de un bloque MS se puede observar que un bloque de MS genera 1.58kg de emisiones de CO₂-eq; de los cuales, 48.13% de las emisiones totales de CO₂-eq están asociadas con el cemento Portland, 20.85% con la electricidad empleada en el proceso de fabricación, 15.41% con la caliza, 14.78% con el transporte, 0.82% con el embalaje y 0.01% con el agua. Así pues, se puede decir que el reemplazo en volumen del 5% de caliza por virutas, es decir 530g de caliza por bloque producido, puede minimizar la extracción de caliza, reduciendo las emisiones de CO₂-eq asociadas a la fabricación y puesta en obra en un 1.9%.

Con respecto al bloque MSML, se puede apreciar que la producción y puesta en obra de éste genera 1.47kg de CO₂-eq, de los cuales, 43.86% de las emisiones totales están asociadas con el cemento Portland, un 22.37% con la electricidad, 16.54% con la caliza, 16.31% con el transporte, 0.90% con el embalaje y 0.01% con el agua. En este caso, como en el caso anterior, la sustitución parcial de la arena caliza por virutas contribuyó a la reducción del CO₂-eq. Sin embargo, es la sustitución del 15% de cemento por los lodos de cal, que se traducen en un ahorro de 150g de cemento por bloque producido, lo que contribuye en mayor medida a dicha reducción. Con esta adición, no solo se evitan las emisiones de CO₂ relacionadas con el vertido, sino que también, se reducen las asociadas

con la producción del cemento. Se puede afirmar, por tanto, que un bloque de MSML puede ofrecer una importante reducción en los kg de CO₂-eq, siendo esta de 8.7%.

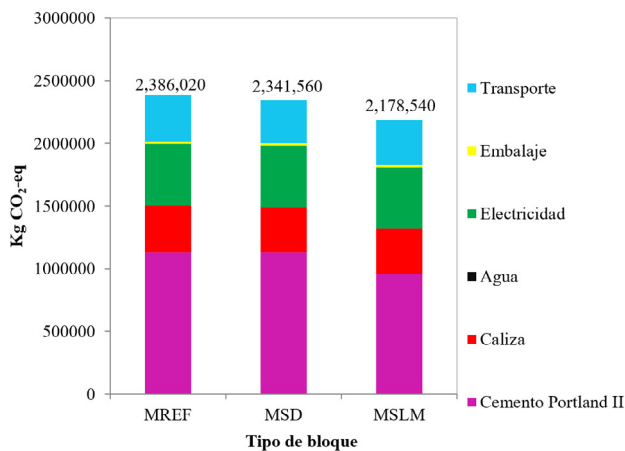


Figura 6. kg de emisiones de CO₂ anuales de una empresa de prefabricados por la producción de bloques MREF, MS y MSML.

Adicionalmente, si consideramos que en promedio, una empresa de prefabricados puede producir 6,000 bloques en un día laboral de 8h, y que por tanto, en 247 días laborales que tiene un año, se fabrican un total de 1,482,000 unidades, se puede decir que la reducción anual del impacto ambiental anual, por la producción de bloques MS y MSML, de una empresa de prefabricados puede llegar a ser significativa (véase la Figura 6), de aproximadamente 44,460 kg de CO₂-eq para el caso de los bloques MS y de 207,480kg de CO₂-eq para el caso de los bloques MSML.

6. CONCLUSIONES

Se ha comparado el impacto ambiental de los bloques fabricados con y sin subproductos, a través de un Análisis

de Ciclo de Vida (ACV) denominado “de la cuna a la puerta”.

Tras la investigación desarrollada, se ha demostrado que en un bloque de hormigón, el mayor responsable del impacto generado es el cemento, que aporta en torno a un 48% de las emisiones de CO₂-eq.

Tras su fabricación el transporte a obra teniendo en cuenta que una distancia competitiva económicamente de un máximo de 100km, supone una incidencia en el impacto ambiental de un 14% de las emisiones de CO₂-eq.

El reemplazo de la arena caliza por serrín en un 5%, reduce la resistencia a compresión, pero mejora el comportamiento térmico, esto se traduce en una reducción del impacto ambiental en alrededor de un 2% de las emisiones de CO₂-eq.

Por el contrario, la mayor reducción en el impacto ambiental ocurrió cuando las virutas y los lodos de cal se incorporaron en los bloques como sustitutos de la caliza y el cemento Portland respectivamente, siendo esta reducción de 8.7% para las emisiones de CO₂-eq y de 6.3% para el índice de impacto ambiental.

Finalmente se puede concluir cómo en el caso de los bloques de hormigón para su uso en la envolvente de los edificios, permite reducir su impacto ambiental, por medio de la adición de subproductos industriales en la medida que sigan manteniendo los requerimientos prestacionales para los que fueron diseñados originalmente. Así, aquellas adiciones que permitan reducir la cantidad de cemento utilizada, serán las que obtengan mejores resultados en el impacto ambiental final.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a los grupos de investigación del Gobierno Vasco IT1619-22 y UPV/EHU GIU19/029, así como a las empresas que han colaborado en la realización de este trabajo de investigación: Prefabricados Alberdi, Smurfit Kappa Nervión, Ebaki XXI y Proyecto de Investigación FONDOCYT-TERFACU (2018-2019-2E3-072).

8. REFERENCIAS

- (1) Cetin, M., and Sevik, H. (2016). Change of air quality in Kastamonu city in terms of particulate matter and CO₂ amount. *Oxidation Communications*, 39(4), 3394–3401.
- (2) Chalmers, P. (2014). Climate Change: Implications for Buildings. Key Findings from the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report. *World Business Council for Sustainable Development, University of Cambridge's Judge Business School, Institute for Sustainability Leadership*.
- (3) European Environment Agency (2019). *Trends and projections in Europe 2019: Tracking progress towards Europe's climate and energy targets*. Publications Office of the European Union, Ed. N.15. Luxembourg.
- (4) Eurostat EEA (2017). Greenhouse gas emission statistics - emission inventories.
- (5) Miller, S.A. (2018). Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete: can there be too much of a good thing?. *Journal of Cleaner Production*, 178, 587–598. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.008>.
- (6) Peraita, C. (2020). Así evolucionó la producción de hormigón preparado en 2019. *Cemento Hormigón*, 999, 13.
- (7) Miller, S.A., John, V.M., Pacca, S.A., and Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115–124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>.
- (8) Cabrera, S., González, A., and Rotondaro, R. (2020). Resistencia a compresión en bloques de tierra comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo. *Informes de la Construcción*, 72(560), e360. doi: <https://doi.org/10.3989/ic.70462>.
- (9) Pešta, J., Pavlů, T., Fořtová, K., and Kočí, V. (2020). Sustainable Masonry Made from Recycled Aggregates: LCA Case Study. *Sustainability*, 12(4), 1581. doi: <https://doi.org/10.3390/su12041581>.

- (10) Martín-Consuegra, F., Hernández-Aja, A., Oteiza, I., and Alonso, C. (2019). Distribución de la pobreza energética en la ciudad de Madrid (España). *EURE (Santiago)*, 45 (135), 133–152. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612019000200133>
- (11) Hendry, E.A.W. (2001). Masonry walls: materials and construction. *Construction and Building Materials*, 15(8), 323–330. doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00019-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00019-8).
- (12) Como, M. (2017). *Statics of historic masonry constructions*. Springer, Cham.
- (13) Madrid, M., Orbe, A., Carré, H., and García, Y. (2018). Thermal performance of sawdust and lime-mud concrete masonry units. *Construction and Building Materials*, 169, 113–123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.193>.
- (14) Madrid, M., Orbe, A., Rojí, E., and Cuadrado, J. (2017). The effects of by-products incorporated in low-strength concrete for concrete masonry units. *Construction and Building Materials*, 153, 117–128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.086>.
- (15) Marceau, M., Nisbet, M.A., and Van Geem, M.G. (2006). *Life cycle inventory of portland cement manufacture*.
- (16) Herranz García, S., and García Navarro, J. (2017). Análisis de ciclo de vida de los paneles de lana mineral de vidrio para la construcción de conductos de climatización. Verificación externa. *Informes de la Construcción*, 69(548), e232. doi: <https://doi.org/10.3989/id.55602>.
- (17) Ros García, J.M., and Sanglier Contreras, G. (2017). Análisis del ciclo de vida de una unidad prototipo de vivienda de emergencia. La búsqueda del impacto nulo. *Informes de la Construcción*, 69(547), e211. doi: <https://doi.org/10.3989/ic.16.035>.
- (18) Vidal, R., Sánchez-Pantoja, N., and Martínez, G. (2019). Análisis del ciclo de vida de un edificio con estructura de madera contralaminada en Granada-España. *Informes de la Construcción*, 71(554), e289. doi: <https://doi.org/10.3989/ic.60982>.
- (19) Calama-González, C.M., and Cañas Palop, C. (2019). Evaluación comparativa del ciclo de vida de cuatro soluciones constructivas diferentes para la rehabilitación de pisos de viguetas de madera con valor patrimonial. *Informes de la Construcción*, 71(556), e316. doi: <https://doi.org/10.3989/ic.66752>.
- (20) Xia, B., Ding, T., and Xiao, J. (2020). Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study. *Waste Management*, 105: 268–278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.015>.
- (21) Zhang, Y., Luo, W., Wang, J., Wang, Y., Xu, Y., and Xiao, J. (2019). A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 115–125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078>.
- (22) Kurda, R., Silvestre, J.D., and de Brito, J. (2018). Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 407–417. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.004>.
- (23) Salgado, R.A., Apul, D., and Guner, S. (2020). Life cycle assessment of seismic retrofit alternatives for reinforced concrete frame buildings. *Journal of Building Engineering*, 28, 101064. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101064>.
- (24) Visintin, P., Xie, T., and Bennett, B. (2020). A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119243>.
- (25) Huang, H., Wang, T., Kolosz, B., Andresen, J., Garcia, S., Fang, M., and Maroto-Valer, M.M. (2019). Life-cycle assessment of emerging CO₂ mineral carbonation-cured concrete blocks: Comparative analysis of CO₂ reduction potential and optimization of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118359. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118359>.
- (26) ECO-it 1.4. (2001) Guía de utilización de ECO-it 1.4.
- (27) Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., and Van Zelm, R. (2009). A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. *The Hague, Ministry of VROM. ReCiPe*.
- (28) Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., and Troxler, T.G. (2014). 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. *IPCC, Switzerland*.
- (29) Bhatti, J.I., Miller, F.M., Kosmatka, S.H., and Bohan, R. (2004). *Innovations in Portland cement manufacturing*. Portland Cement Association Washington eDC DC.
- (30) Huntzinger, D.N., and Eatmon, T.D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17(7), 668–675. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>.
- (31) Van den Heede, P., and De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431–442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>.
- (32) Petek Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A., and Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51, 38–48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>.
- (33) 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*. Universitat Politècnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2117/93218>
- (34) Prusty, J.K., Patro, S.K., and Basarkar, S.S. (2016). Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 312–333. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.06.003>.
- (35) Adebakin, I.H., Adeyemi, A.A., Adu, J.T., Ajayi, F.A., Lawal, A.A., and Ogunrinola, O.B. (2012). Uses of sawdust as admixture in production of low-cost and lightweight hollow sandcrete blocks. *American journal of scientific and industrial research*, 3(6), 458–463. <https://doi.org/10.5251/ajsir.2012.3.6.458.463>

- (36) United States Environmental Protection Agency (EPA). (1994). *Emission factor documentation for AP-42, section 11.6: Portland cement manufacturing, final report, EPA Contract 68-D2-0159, MRI Project No. 4601-01.*
- (37) Kenny, M., and Oates, T. (2007). Lime and limestone. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. doi: https://doi.org/10.1002/14356007.a15_317.pub2.
- (38) Blankendaal, T., Schuur, P., and Voordijk, H. (2014). Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. *Journal of Cleaner Production*, 66, 27–36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.012>.
- (39) Habert, G., Arribe, D., Dehove, T., Espinasse, L., and Le Roy, R. (2012). Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges. *Journal of Cleaner Production*, 35, 250–262. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.028>.
- (40) Molle, F., Wester, P., and Hirsch, P. (2010). River basin closure: Processes, implications and responses. *Agricultural Water Management*, 97(4), 569–577. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.01.004>.
- (41) Smakhtin, V. (2008). Basin closure and environmental flow requirements. *International Journal of Water Resources Development*, 24(2), 227–233. <https://doi.org/10.1080/07900620701723729>
- (42) INTRON, onmental C. (2006). Environmental declaration Superplasticizing admixtures.
- (43) El Reguil S.L. (2008). *Impacto ambiental de una planta de hormigón.*
- (44) Babor, D., Plian, D., and Judele, L. (2009). Environmental impact of concrete. *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 55(4), 27.
- (45) Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A., and Šajna, A. (2015). Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Management*, 45, 194–205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>.
- (46) Hossain, M.U., Poon, C.S., Lo, I.M.C., and Cheng, J.C.P. (2016). Evaluation of environmental friendliness of concrete paving eco-blocks using LCA approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(1), 70–84. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0988-2>
- (47) Blanco, J. M., García Frómeta, Y., Madrid, M., and Cuadrado, J. (2021). Thermal performance assessment of walls made of three types of sustainable concrete blocks by means of FEM and validated through an extensive measurement campaign. *Sustainability*, 13(1). doi: <https://doi.org/10.3390/su13010386>.