

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Posgrados**

**Análisis de Ciclo de Vida para el Sector Construcción: Estudio de Caso de  
un Terminal Aeroportuario**

**Mecanismo de Titulación (Trabajo de titulación)**

**Estefanía Mercedes Haro Viteri**

**Maestría en Ingeniería Circular**

**Andrea Landázuri, PhD  
Director de Trabajo de Titulación**

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito  
para la obtención del título de Máster en Ingeniería Circular

Quito, julio 2025

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

## **COLEGIO DE POSGRADOS**

### **HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Análisis de Ciclo de Vida para el Sector Construcción: Estudio de Caso de  
un Terminal Aeroportuario**

**Estefanía Mercedes Haro Viteri**

Nombre del Director del Programa:	Frank Alexis
Título académico:	PhD
Director del programa de:	Maestría en Ingeniería Circular

Nombre del Decano del colegio Académico:	Eduardo Alba
Título académico:	PhD
Decano del Colegio:	Colegio de Ciencias e Ingenierías

Nombre del Decano del Colegio de Posgrados:	Dario Niebieskikwiat
Título académico:	PhD

**Quito, julio 2025**

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombre del estudiante: Estefanía Mercedes Haro Viteri

Código de estudiante: 342917

C.I.: 0504134164

Lugar y fecha: Quito, 22 de julio de 2025.

## ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

## UNPUBLISHED DOCUMENT

**Note:** The following graduation project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por dar sentido a cada paso. A mi familia, por su apoyo incondicional. A mi amor, por caminar conmigo. Y a mí, por atreverme y lograrlo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este documento fue escrito gracias a la gestión y participación constante de quienes me permitieron conocer de cerca los procesos de la constructora, así como colaborar en la recolección y el tratamiento de la información. A todas esas personas, reconozco su influencia, ya sea directa o indirecta, en el desarrollo de este trabajo.

## RESUMEN

Esta investigación presenta un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para construcción de terminales aeroportuarios con el objetivo de identificar puntos críticos que permitan implementar estrategias de ingeniería circular. El sector construcción representa el 41,1% del impacto ambiental de Ecuador, haciendo esencial esta evaluación.

La metodología siguió normas ISO 14040:2006 con software OpenLCA y método ReCiPe Midpoint, analizando un metro cuadrado como unidad funcional. Los materiales principales incluyeron cemento ( $0,72 \text{ kg/m}^2$ ), acero ( $7,34 \text{ kg/m}^2$ ), agua ( $27,00 \text{ kg/m}^2$ ) y electricidad ( $1,60 \text{ kWh/m}^2$ ).

Los resultados evidenciaron que el cemento es el principal contribuyente a los impactos ambientales: 84% de formación de partículas ( $0,855 \text{ kg PM}_{2.5} \text{ eq/m}^2$ ) y significativo potencial de calentamiento global ( $1203,08 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$ ). Los cementos puzolánicos ofrecen reducción sustancial de impactos manteniendo propiedades técnicas.

El estudio establece metodología para evaluación ambiental de construcción aeroportuaria y demuestra que las estrategias de ingeniería circular pueden reducir la huella ambiental sin comprometer la calidad. Las estrategias propuestas incluyen sustitución de cemento, optimización de transporte y evaluación de materiales alternativos.

**Palabras clave:** análisis de ciclo de vida; construcción aeroportuaria; ingeniería circular; impacto ambiental; cemento; sostenibilidad; puntos críticos.

## ABSTRACT

This research develops a Life Cycle Assessment (LCA) for airport terminal construction to identify critical points enabling circular engineering strategies. The construction sector represents 41,1% of Ecuador's environmental impact, making this evaluation essential. The methodology followed ISO 14040:2006 with OpenLCA software and ReCiPe Midpoint method, analyzing one square meter as functional unit. Key materials included cement (0,72 kg/m<sup>2</sup>), steel (7,34 kg/m<sup>2</sup>), water (27.00 kg/m<sup>2</sup>), and electricity (1,60 kWh/m<sup>2</sup>). The analysis demonstrated that cement is the primary contributor to environmental impacts: 84% of particulate matter formation (0,855 kg PM<sub>2.5</sub> eq/m<sup>2</sup>) and significant global warming potential (1203,08 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>). Pozzolanic cements offer substantial impact reduction while maintaining technical properties. The study establishes methodology for airport construction environmental assessment and demonstrates that circular engineering strategies can reduce environmental footprint without compromising quality. Proposed strategies include cement substitution, transport optimization, and alternative materials evaluation.

**Keywords:** life cycle assessment; airport construction; circular engineering; environmental impact; cement; sustainability; critical points.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Dedicatoria .....</b>	<b>5</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>6</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>7</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>8</b>
<b>Tabla de contenido.....</b>	<b>9</b>
<b>índice de TABLAS.....</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>13</b>
1.1 Antecedentes .....	13
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos .....	15
1.3.1 Objetivo general .....	15
1.3.2 Objetivos específicos .....	15
<b>2. Revisión de la literatura .....</b>	<b>16</b>
2.1 Marco Conceptual del ACV en Construcción.....	16
2.2 Impacto Ambiental del Sector Construcción: Contexto Global y Nacional .....	16
2.3 Evolución Histórica y Desarrollo de Materiales Cementantes .....	17
2.4 Herramientas Computacionales para ACV: Software y Bases de Datos .....	17
2.5 Métodos de Evaluación de Impactos: ReCiPe y Enfoque Midpoint.....	18
2.6 Materiales Cementantes Alternativos y Estrategias de Reducción de Impactos	18
2.7 ACV en Proyectos de Infraestructura: Casos de Estudio y Aplicaciones .....	19
2.8 Economía Circular e Ingeniería Circular en Construcción.....	20
2.9 Limitaciones Metodológicas y Consideraciones Regionales .....	20
2.10 Identificación de Brechas de Conocimiento y Justificación del Estudio .....	21
<b>3. Metodología y diseño de la investigación.....</b>	<b>22</b>
3.1 Enfoque metodológico .....	22
3.2 Análisis de ciclo de vida.....	22
3.3 Descripción del proceso .....	23
3.4 Descripción del modelo .....	25
3.5 Análisis de resultados .....	27
<b>4. Análisis de datos .....</b>	<b>28</b>
4.1 Resultados ACV .....	28
4.2 Análisis puntos críticos.....	28
4.3 Estrategia ingeniería circular.....	30
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>41</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>43</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>46</b>
<b>Anexo A: CAPTURAS SOFTWARE.....</b>	<b>47</b>

<b>Anexo B: GRÁFICAS RESULTADO DEL SISTEMA DE PRODUCTOS .....</b>	<b>51</b>
<b>Anexo C: RESULTADOS DEL SOFTWARE .....</b>	<b>60</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inputs base de datos utilizada en el software OpenLCA.....	25
Tabla 2. Resultado del sistema de producto mediante el árbol de contribución .....	29
Tabla 3. Comparación de la composición de cementos para reemplazar el utilizado actualmente .....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de la cuna a la tumba de una infraestructura aeroportuaria.....	24
Figura 2. Modelo Sankey Open LCA del proceso constructivo de una infraestructura aeroportuaria.....	26
Figura 3. Árbol de contribución datos OpenLCA .....	29

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

En la antigüedad, egipcios y romanos emplearon morteros de yeso y cal para unir bloques de piedra durante la construcción de infraestructuras y monumentos (Gagg, 2014). En los siglos posteriores, hasta el siglo XVIII, la experimentación llevó al desarrollo de los precursores del cemento y el concreto moderno, mediante la adición de materiales naturales extraídos y tratados, como la arena y la cal calcinada (Gagg, 2014). Como resultado de esta continua experimentación, a inicios del siglo XIX, en 1824, Joseph Aspdin inventaría el cemento Portland, y desde entonces las iterativas mejoras en su composición y propiedades mecánicas hicieron que tenga mayor potencial de uso, resultado que en el 2015 llegara a un nivel de producción de aproximadamente 4,6 billones de toneladas anuales de cemento a nivel mundial (Miguel Ángel Sanjuan Barbudo, 2014; Scrivener et al., 2018).

Históricamente, la humanidad ha necesitado trasladarse, ya sea para emigrar, explorar o promover el comercio. En la actualidad, la creciente necesidad de movilización internacional y el impulso del mercado global han dado lugar a la construcción de infraestructura aeroportuaria a gran escala. En este contexto, resulta fundamental destacar la importancia de un diseño adecuado y del uso de materiales de calidad. Existen antecedentes que evidencian las consecuencias de fallas en el diseño y montaje, como el colapso del Aeropuerto Internacional Charles de Gaulle, el 23 de mayo en el año 2004. Este incidente fue atribuido a múltiples factores: diseño estructural inadecuado, acero estructural insuficiente o mal ubicado, falta de atención a las tensiones dinámicas de la estructura, así como vigas de hormigón de baja resistencia y soportes metálicos mal integrados que comprometieron la integridad del hormigón estructural (Gagg, 2014).

Complementariamente al proceso de diseño, es posible cuantificar el impacto ambiental de los procesos constructivos y de montaje, lo que permite orientar las decisiones hacia soluciones más sostenibles y responsables. En Ecuador se estima que el sector de la construcción es responsable del 41,1% del impacto ambiental nacional total (Alvarado Palacios et al., 2025). Por lo tanto, considerando que este impacto ha sido identificado como negativo a nivel global, se decide emplear como metodología el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), definiendo el objetivo y el alcance en función de los intereses de la empresa constructora.

Este trabajo se basa en lo establecido en la normativa ISO 14040:2006, para establecer los aspectos e impactos ambientales potenciales, compilando datos de entrada, identificando las salidas y evaluando impactos e interpretando los resultados obtenidos (X. Zhang et al., 2013).

Existen varias herramientas que puedes utilizarse para un ACV disponibles, sin embargo, una de las principales características es la gratuidad. Se han realizado estudios para comparar los resultados y se tuvo que en muchos casos son idénticos o similares si se tienen las mismas consideraciones, supuestos y limitaciones (Aparecido Lopes Silva et al., 2017).

Por este motivo se utiliza el software OpenLCA para el procesamiento de la información considerando que es una herramienta de uso libre y que cuenta con bases de datos de acceso gratuito para modelar el proceso promoviendo la generación de información para las empresas (Aparecido Lopes Silva et al., 2017).

En la etapa de interpretación de resultados, el punto más importante es la identificación de los puntos críticos, ya que permite determinar qué flujos tienen mayor contribución a los impactos ambientales totales y así formular estrategias de ingeniería circular orientadas a la toma de decisiones y a la implementación de acciones a futuro en la fase de análisis.

## 1.2 Justificación

La construcción de infraestructura es una de las actividades que generan impacto ambiental y se encuentra presente en varias provincias del país, no sólo tienen un impacto ambiental asociado al uso de recursos naturales, también implica la generación de emisiones, descargas líquidas, residuos sólidos y líquidos. Uno de los tipos de infraestructura corresponde a la aeroportuaria la cual tiene un aporte no solo nacional, también internacional favoreciendo a la movilidad y comercio. Sin embargo, los requerimientos del material son más específicos donde se verifican su calidad, resistencia y durabilidad, las cuales son mayores frente a una infraestructura de vivienda. Por lo que es importante conocer cuáles son los procesos que generan un mayor impacto ambiental y a futuro reducir su impacto en los puntos críticos identificados.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Analizar los puntos críticos en los procesos constructivos de infraestructura aeroportuaria que permitan la implementación de estrategias de ingeniería circular, a través de la evaluación y cuantificación de los impactos ambientales mediante el Análisis de Ciclo de Vida.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar el proceso de construcción de infraestructura aeroportuaria.
- Determinar los procesos que generan mayor impacto ambiental en la construcción de infraestructura aeroportuaria.
- Plantear estrategias de ingeniería circular en función de los puntos críticos identificados en el proceso.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1 Marco Conceptual del ACV en Construcción

El ACV se ha consolidado como una herramienta fundamental para la evaluación sistemática de impactos ambientales en el sector construcción, proporcionando un enfoque científico y objetivo para cuantificar las cargas ambientales asociadas a procesos constructivos complejos. La metodología ACV permite analizar de forma integral el ciclo de vida completo de productos y procesos, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, evitando la transferencia de impactos entre diferentes etapas del sistema (Buyle et al., 2013).

Las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044 establecen el marco metodológico estándar para la aplicación del ACV, estructurado en cuatro fases principales: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impactos e interpretación de resultados (Haya, 2016). En el contexto del sector construcción, esta metodología adquiere particular relevancia debido a la complejidad de los procesos involucrados y la diversidad de materiales empleados (Asdrubali et al., 2013).

### 2.2 Impacto Ambiental del Sector Construcción: Contexto Global y Nacional

A nivel global, el sector de la construcción es reconocido como uno de los principales responsables del impacto ambiental, contribuyendo significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de recursos naturales y la generación de residuos sólidos. En el contexto ecuatoriano, estudios recientes han cuantificado que este sector representa el 41,1% del impacto ambiental nacional total (Alvarado Palacios et al., 2025), una cifra que refleja la urgente necesidad de implementar estrategias de mitigación y evaluación ambiental.

La construcción de infraestructura aeroportuaria presenta características particulares que intensifican estos impactos. Los requerimientos técnicos específicos de resistencia,

durabilidad y calidad en este tipo de infraestructura demandan el uso de materiales con especificaciones superiores a las de construcción residencial convencional, lo que se traduce en mayores cargas ambientales asociadas. Los antecedentes históricos de fallas estructurales, como el colapso del Aeropuerto Internacional Charles de Gaulle en 2004, subrayan la importancia crítica de un diseño adecuado y el uso de materiales de alta calidad (Gagg, 2014).

### **2.3 Evolución Histórica y Desarrollo de Materiales Cementantes**

La evolución histórica de los materiales cementantes ha sido determinante en el desarrollo de la industria constructiva moderna. Desde las primeras aplicaciones de morteros de yeso y cal por egipcios y romanos hasta la invención del cemento Portland por Joseph Aspdin en 1824, la experimentación continua ha resultado en mejoras iterativas que han llevado la producción mundial de cemento a aproximadamente 4.6 billones de toneladas anuales en 2015 (Miguel Ángel Sanjuan Barbudo, 2014; Scrivener et al., 2018).

Este crecimiento exponencial en la producción de cemento ha estado acompañado de una creciente preocupación por sus impactos ambientales. La producción de cemento Portland es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> (Purton, 2024), principalmente debido a dos procesos: la descarbonatación del carbonato de calcio durante la calcinación del clínker y la combustión de combustibles fósiles en los hornos rotativos (Scrivener et al., 2018).

### **2.4 Herramientas Computacionales para ACV: Software y Bases de Datos**

La implementación práctica del ACV en proyectos de construcción requiere herramientas computacionales especializadas que permitan el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos e inventarios complejos. Aparecido Lopes Silva et al., 2017 realizó estudios comparativos entre diferentes softwares de ACV (GaBi, openLCA, SimaPro y

Umberto), concluyendo que los resultados son idénticos o similares cuando se aplican las mismas consideraciones, supuestos y limitaciones. Sin embargo, la ventaja del software OpenLCA radica en que es una herramienta de uso libre con bases de datos de acceso gratuito, lo cual promueve la democratización del acceso a metodologías de evaluación ambiental para empresas y organizaciones con recursos limitados. En cuanto a las bases de datos, la European Reference Life Cycle Database (ELCD) ha sido escogida pues proporciona datos confiables y ampliamente validados que, aunque corresponden a condiciones europeas, pueden ser adaptados para contextos regionales mediante ajustes metodológicos apropiados.

## **2.5 Métodos de Evaluación de Impactos: ReCiPe y Enfoque Midpoint**

Los métodos de evaluación de impactos constituyen el núcleo técnico del ACV, traduciendo los inventarios de emisiones y consumos en indicadores de impacto ambiental cuantificables. El método ReCiPe Midpoint (H) se ha consolidado como uno de los más utilizados en estudios de construcción debido a su enfoque jerárquico que proporciona una perspectiva intermedia entre enfoques optimistas y precautorios (Goedkoop, 2008).

Este método permite evaluar múltiples categorías de impacto de manera simultánea, incluyendo cambio climático, acidificación, eutrofización, toxicidad humana, formación de ozono troposférico, agotamiento de recursos fósiles, entre otras (Garraín, 2009). La capacidad de analizar impactos múltiples es fundamental en proyectos de construcción, donde las decisiones de diseño pueden generar trade-offs entre diferentes categorías ambientales (Barbhuiya & Das, 2023).

## **2.6 Materiales Cementantes Alternativos y Estrategias de Reducción de Impactos**

El desarrollo de materiales cementantes alternativos se ha convertido en una línea de investigación estratégica para la reducción de impactos ambientales en construcción. Los

cementos con adiciones puzolónicas, incluyendo ceniza volante, escoria granulada de alto horno y materiales naturales como ceniza volcánica, han demostrado capacidad para reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> manteniendo propiedades mecánicas comparables al cemento Portland convencional (Scrivener et al., 2018).

Investigaciones recientes han explorado el potencial de materiales cementantes emergentes, como los cementos LC3 (Limestone Calcined Clay Cement), que incorporan hasta 50% de materiales alternativos manteniendo excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad (Scrivener et al., 2018). En el contexto ecuatoriano, estudios han evaluado el uso de ceniza volcánica andesítica como adición puzolánica, aprovechando la disponibilidad local de estos materiales (Naranjo-Herrera et al., 2022).

## **2.7 ACV en Proyectos de Infraestructura: Casos de Estudio y Aplicaciones**

Los estudios de ACV en infraestructura de gran escala han proporcionado insights valiosos sobre patrones de impacto y estrategias de mitigación. X. Zhang et al., 2013 desarrollaron un estudio de caso en Hong Kong enfocado en emisiones atmosféricas durante procesos constructivos, identificando que los procesos de producción de materiales representan típicamente entre 60-80% de los impactos totales en la fase constructiva.

En el contexto de infraestructura aeroportuaria específicamente, la literatura presenta limitaciones en cuanto a estudios comprehensivos de ACV. La mayoría de investigaciones se han centrado en edificaciones residenciales y comerciales, dejando una brecha de conocimiento en infraestructura especializada que requiere materiales de alta especificación técnica. Esta brecha justifica la necesidad de estudios específicos que aborden las particularidades técnicas y ambientales de la construcción aeroportuaria.

## 2.8 Economía Circular e Ingeniería Circular en Construcción

Los principios de economía circular han encontrado aplicación creciente en el sector construcción, promoviendo estrategias que maximizan el valor de los materiales y minimizan la generación de residuos. La ingeniería circular se fundamenta en tres principios básicos: diseñar sin residuos, mantener productos y materiales en uso, y regenerar sistemas naturales.

En el contexto de proyectos constructivos, las estrategias de ingeniería circular incluyen: selección de materiales con bajo impacto ambiental, optimización del transporte y logística, diseño para desmontaje y reutilización, y aprovechamiento de residuos como materias primas secundarias. La identificación de puntos críticos mediante ACV proporciona la base técnica para priorizar la implementación de estas estrategias de manera efectiva y con mayor impacto ambiental positivo.

## 2.9 Limitaciones Metodológicas y Consideraciones Regionales

La aplicación de ACV en contextos regionales específicos presenta desafíos metodológicos importantes. Las bases de datos internacionales, como ELCD, reflejan condiciones tecnológicas y energéticas europeas que pueden diferir significativamente de las condiciones locales en países en desarrollo. Esta limitación requiere ajustes metodológicos cuidadosos que consideren factores como mix energético local, tecnologías de producción regionales y distancias de transporte específicas.

Estudios como el de (Alvarado Palacios et al., 2025) han comenzado a abordar estas limitaciones mediante la adaptación de metodologías ACV a condiciones ecuatorianas específicas, proporcionando precedentes metodológicos valiosos. Sin embargo, la literatura carece de estudios comprehensivos que aborden específicamente infraestructura aeroportuaria en contextos latinoamericanos, representando una oportunidad significativa para contribución científica original.

## 2.10 Identificación de Brechas de Conocimiento y Justificación del Estudio

El análisis de la literatura revela varias brechas importantes que justifican la presente investigación:

- Escasez de estudios ACV específicos para infraestructura aeroportuaria: La mayoría de las investigaciones se enfocan en construcción residencial o comercial convencional.
- Limitaciones en la adaptación regional de metodologías ACV: Pocos estudios han abordado las particularidades del contexto constructivo ecuatoriano.
- Integración limitada entre ACV y estrategias de ingeniería circular: La literatura carece de enfoques sistemáticos que conecten resultados de ACV con estrategias específicas de economía circular.
- Evaluación insuficiente de materiales alternativos en aplicaciones de alta especificación: Los estudios de materiales cementantes alternativos se han centrado principalmente en aplicaciones convencionales.

Esta investigación busca contribuir al conocimiento científico abordando estas brechas mediante el desarrollo de una metodología específica para evaluación ambiental de infraestructura aeroportuaria, integrando resultados de ACV con estrategias prácticas de ingeniería circular y proporcionando referencias técnicas para futuras investigaciones en el contexto ecuatoriano y latinoamericano.

### 3. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Enfoque metodológico

En este trabajo se aprovechan las ventajas de emplear el ACV, ya que se pueden incluir datos de las fases de extracción, procesamiento, producción, uso y disposición final de materiales. Esta metodología permite determinar impactos ambientales como emisiones al aire, agua y suelo; generación de desechos; consumo de materias primas; y uso del suelo. Además, facilita la identificación de impactos críticos para la toma de decisiones (Asdrubali et al., 2013).

La metodología empleada sigue las recomendaciones establecidas por (Buyle et al., 2013) para la construcción de un modelo computacional que permita analizar las cargas ambientales de un proceso constructivo a lo largo de todo su ciclo de vida, definiendo límites claros para evitar la transferencia de impactos entre etapas (Haya, 2016). Cabe recalcar que este enfoque abarca el procesamiento de datos, información técnica y bibliográfica, alineándose a lo establecido en normas internacionales como las ISO 14040 e ISO 14044 en búsqueda de la mejora de la gestión ambiental.

#### 3.2 Análisis de ciclo de vida

El ACV es una herramienta que tiene como finalidad analizar de forma objetiva, sistemática y científica los impactos ambientales que fueron originados por el proceso constructivo. Este análisis puede cubrir total o parcialmente el ciclo de vida del proceso, es decir, de la cuna a la puerta o de la cuna a la tumba respectivamente. Estas características hacen de este análisis un instrumento atractivo para las empresas. Especialmente para la toma de decisiones al momento de implementar estrategias ambientales y disminuir el nivel de impacto de su proceso o producto (Haya, 2016).

Asdrubali et al., 2013 identifica cuatro pasos principales que se deben seguir para realizar el ACV:

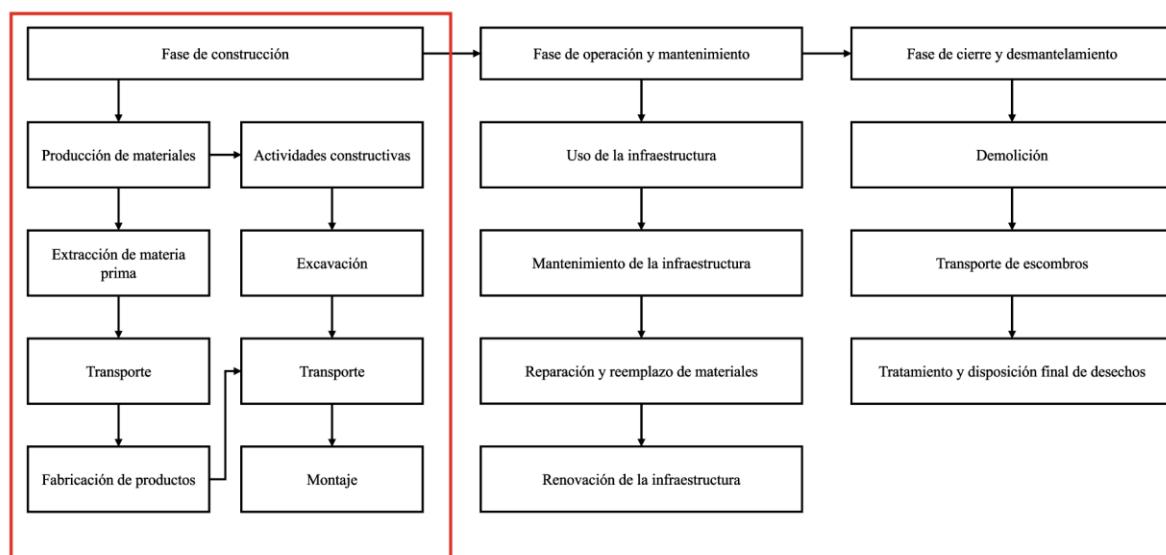
- 1) Definición del objetivo y el alcance: El objetivo es modelar la unidad funcional que corresponde a 1 m<sup>2</sup> construido de infraestructura aeroportuaria. El alcance por otro lado corresponde únicamente a la fase constructiva. Lo cual abarca desde los procesos de extracción y acondicionamiento de materias primas hasta el proceso productivo de la empresa (de la cuna a la puerta “cradle to gate”). Este alcance está limitado por la disponibilidad de información en el contexto ecuatoriano o latinoamericano.
- 2) Inventario del ciclo de vida: El inventario utilizado corresponde a la base de datos disponible y ajustada a las cantidades utilizadas en el proyecto y también a los materiales utilizados en la infraestructura aeroportuaria.
- 3) Análisis del impacto del ciclo de vida: Para medir los impactos se utilizó el método ReCiPe Midpoint H el cual está disponible en el software para aplicarlo; el método permite traducir el inventario a impactos ambientales en categorías específicas al ambiente hasta un punto medio con una perspectiva jerárquica (Goedkoop, 2008).
- 4) Interpretación de resultados: En este punto se identificaron los puntos críticos del proceso, lo que permitió reconocer los aspectos clave y formular recomendaciones orientadas a la mejora. Tomando en cuenta principalmente aquellos impactos mayores en los cuales se pueden implementar estrategias de ingeniería circular.

### **3.3 Descripción del proceso**

El presente trabajo se enfoca en evaluar el proceso de construcción de un metro cuadrado de infraestructura aeroportuaria (1 m<sup>2</sup>), el cual está diseñado para contar con materiales de alta resistencia y durabilidad. La infraestructura está proyectada para tener una

vida útil de 50 años, sin embargo, es importante destacar que este valor podría incrementar en función de la operación, inspecciones y mantenimientos oportunos que reciba la infraestructura.

El ACV que se realizará en el presente trabajo es “cradle to gate” y se seleccionó la fase constructiva como se visualiza a continuación:



*Figura 1. Proceso de la cuna a la tumba de una infraestructura aeroportuaria.*

Tomando en consideración que la parte interesada corresponde a la empresa constructora, únicamente se dispone de datos relacionados con la fase de construcción. Esto favorece el análisis, ya que dicha etapa adquiere mayor relevancia al concentrar el uso más intensivo de materiales como acero, cemento, agua, energía eléctrica, diésel, pintura, agregados y medios de transporte. En consecuencia, se generan cargas ambientales significativas que evidencian oportunidades para establecer estrategias de ingeniería circular.

Por ejemplo, en este proyecto se evalúan los impactos asociados a la producción del cemento hidráulico fabricado en Ecuador, el cual presenta características físicas y químicas distintas a las del cemento empleado en viviendas, lo que repercute en su transporte y procesamiento.

El proceso constructivo de este edificio consiste en la producción, transporte y uso de materiales hasta el montaje de toda la infraestructura aeroportuaria, previa a su entrega para su operación normal. Todos los inputs/outputs fueron calculados para 1 m<sup>2</sup> de construcción considerando que las bases de datos de la empresa constructora corresponden a 17600 m<sup>2</sup> construidos, los valores ingresados se detallan en la Tabla 1 para las variables cemento, acero, pintura, distancia transporte de material, agua y energía eléctrica.

*Tabla 1. Inputs base de datos utilizada en el software OpenLCA*

Dato	Cantidad	Unidad
Cemento	0,72	kg
Acero	7,34	kg
Pintura	0,29	kg
Distancia transporte	4,96	Km*kg
Agua	27,00	kg
Energía eléctrica	1,60	kWh

### 3.4 Descripción del modelo

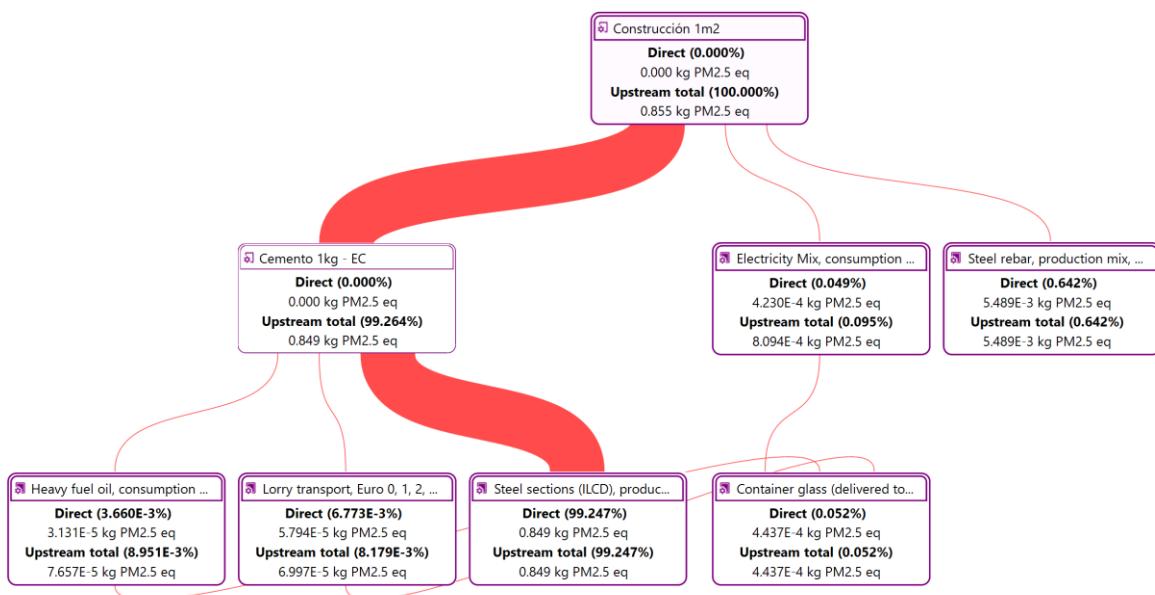
El modelo se estructuró y realizó en el software OpenLCA 2.4.1 con licencia libre obtenido de la página web oficial de openLCA.org. El alcance de este sistema corresponde a “cradle to gate” por lo que se ha tomado en cuenta en el sistema el origen de los materiales y su transporte hasta su montaje.

Se utilizó la base de datos European Reference Life Cycle Database con sus siglas en inglés ELCD, la versión corresponde a elcd\_3\_2\_greendelta\_v2\_18\_correction\_20220908 (openLCA Nexus, 2015), obtenido de la página web oficial y se modeló el proceso con los flujos existentes, sin embargo, para contar con las condiciones más cercanas al proyecto se han ajustado los flujos: arena, cemento, clinker, grava, pintura, puzolana. Esto representa una limitación adicional al proceso que estamos modelando por dos razones claves, primero la base de datos ELCD corresponde a datos de condiciones europeas, por lo que no puede ser ajustado 100% a Ecuador y segundo se crearon flujos en el que se colocaron las cantidades

correspondientes a las bases de datos. Esta base de datos fue seleccionada porque ofrece datos libres y confiables, altamente utilizada en estudios académicos y que permite la comparación de resultados.

Se seleccionaron 17 categorías de impacto del método ReCiPe Midpoint (H), entre ellas: cambio climático, acidificación, toxicidad humana, formación de ozono, escasez de recursos, entre otras. El método de evaluación de impactos fue elegido porque permite contar de forma clara los procesos que generan impacto ambiental y la H corresponde a la posición intermedia entre optimista y precautorio (Goedkoop, 2008).

En la Figura 1 se pude visualizar el modelo Sankey Open LCA del proceso constructivo de una infraestructura aeroportuaria, considerando 1 m<sup>2</sup> como la unidad funcional. Este modelo fue estructurado para el ACV del proceso constructivo y en él se muestran los flujos de materiales en el proceso y se resalta dónde se tiene mayor impacto ambiental o consumo de recursos. Mas detalles sobre la carga de datos al sistema se muestra en el Anexo A.



*Figura 2. Modelo Sankey Open LCA del proceso constructivo de una infraestructura aeroportuaria*

### **3.5 Análisis de resultados**

El ACV para la presente investigación corresponde a un enfoque atribucional el cual se define por su enfoque en la descripción de los flujos ambientalmente relevantes y tiene como objeto identificar puntos críticos de las cargas ambientales como base para mejoras (Buyle et al., 2013).

Para ello, el modelo se complementó con herramientas gráficas como árboles de contribución, diagramas de barras generados por el software los cuales facilitan la visualización y localización de los puntos críticos.

## 4. ANÁLISIS DE DATOS

### **4.1 Resultados ACV**

Entre los hallazgos más relevantes se encontró que el cemento tipo Campeón, a pesar de incorporar adiciones minerales, sigue siendo el principal contribuyente en categorías como cambio climático, formación de partículas y escasez de recursos fósiles (Barbhuiya & Das, 2023). También se presentaron contribuciones relevantes por parte del transporte de materiales, en especial en impactos relacionados con el uso de combustibles fósiles y la generación de emisiones atmosféricas.

Los resultados fueron organizados en tablas y gráficos obtenidos mediante el modelo desarrollado en el software de OpenLCA, lo cual permitió tener una interpretación más clara y efectiva. Adicionalmente se estableció cuál es el punto crítico en la fase constructiva, lo que constituye la base para formular propuestas de mejora desde la ingeniería circular.

Este análisis cuantitativo y visual contribuye directamente al objetivo de la investigación, ya que no solo identifica los procesos que generan impacto ambiental, sino que también proporciona información sobre aquellos procesos que generan mayor o menor impacto y así permite priorizar estrategias de mitigación ambiental en futuros proyectos constructivos, brindando un gran aporte a la empresa constructora.

### **4.2 Análisis puntos críticos**

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos mediante el árbol de contribución que permite visualizar los procesos que contribuyen mayoritariamente a una categoría de impacto ambiental. Aquellos procesos con más impacto están resaltados en la Figura 3. En este estudio se han analizado dos categorías relevantes: Fine Particulate Matter Formation y Global Warming Potential.

Tabla 2. Resultado del sistema de producto mediante el árbol de contribución

Proceso	Resultado [mg PM 2.5 eq]
Cemento	849175,631
Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO	849029,093
Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15	76,5704
Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	69,9674
Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO	5488,968
Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK	809,397

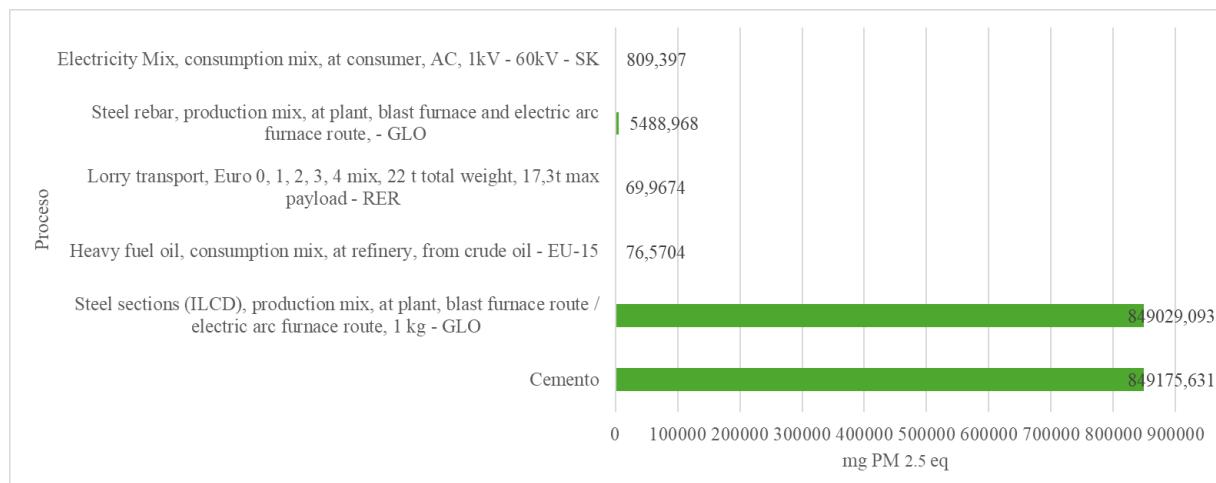


Figura 3. Árbol de contribución datos OpenLCA

En la categoría Fine Particulate Matter Formation, se cuantificó un impacto total de 0,855 kg PM 2.5 eq por metro cuadrado construido. De acuerdo con el árbol de contribución generado en OpenLCA, el proceso “Cemento 1 kg – EC” es responsable de aproximadamente el 84% del impacto en esta categoría (Figura 3). Esto se debe a las emisiones de polvo y

partículas asociadas a la molienda, calcinación y manipulación de materiales particulados durante la producción del clínker y el cemento.

Este resultado evidencia que el uso del cemento, incluso con adiciones como la puzolana (en el caso del cemento Campeón), sigue siendo un punto crítico en la construcción de infraestructura aeroportuaria, especialmente por la emisión de partículas finas, las cuales pueden desencadenar problemas respiratorios y enfermedades cardiovasculares en la población aledaña.

En la categoría de Global Warming Potential (Cambio Climático) el impacto asociado alcanza un total de 1203,08 kg CO<sub>2</sub> eq por m<sup>2</sup> de construcción. Este resultado está fuertemente influenciado por la producción del cemento, debido a dos factores principales: la descarbonatación del carbonato de calcio durante la calcinación del clínker, y la combustión de combustibles fósiles en el horno rotatorio (Scrivener et al., 2018).

Por lo tanto, considerando que el uso del cemento Campeón es responsable de la mayor proporción de impactos con un 0,84 kg PM<sub>2.5</sub> eq, se puede definir que es un material con alto potencial de mejora ambiental en estrategias que incluyan un diseño sostenible y la inclusión de construcción circular.

En el Anexo B se puede visualizar las gráficas de cada uno de los impactos detectados en el proceso constructivo de la infraestructura aeroportuaria. En el Anexo C se muestran las tablas de resultados del software con los resultados de los impactos por categoría.

#### **4.3 Estrategia ingeniería circular**

Al determinar que la producción del cemento es uno de los puntos críticos en la investigación se ha realizado una tabla comparativa entre el cemento utilizado en el proyecto y cementos amigables con el medio ambiente de tal forma que se pueda proponer una prueba con cemento con menor impacto ambiental, evitando que por factores como el transporte y

fabricación se tenga un efecto rebote en el sistema y se pueda garantizar la durabilidad y resistencia que se requiere en este tipo de infraestructura. Adicional, se sugiere optimizar el diseño estructural para disminuir la demanda del cemento, adicional buscar proveedores o establecer mejoras en la logística del material para minimizar impactos.

*Tabla 3. Comparación de la composición de cementos para reemplazar el utilizado actualmente*

Propiedad	Cemento Campeón (Ecuador)	Cemento con escoria GGBFS (50% escoria)	Cemento con ceniza volante (30% fly ash)	Cemento LC3 (Calcined Clay Limestone)
Color	Gris estándar	Gris muy claro/blanquecino	Gris	Gris claro a ligeramente pardo
Finura del cemento (aprox.)	~4200 cm <sup>2</sup> /g (alta finura, hormigón más compacto) <sup>1</sup>	~3200 cm <sup>2</sup> /g (molido fino para reactividad del 50% escoria) <sup>4</sup>	~3020–4950 cm <sup>2</sup> /g (dependiendo de la característica de la ceniza volante) <sup>10</sup>	~3476 - 4309 cm <sup>2</sup> /g (requerido para desarrollar resistencia con 50% clinker) <sup>14</sup>
Densidad específica	~2,94 g/cm <sup>3</sup> <sup>2</sup>	~2,8 g/cm <sup>3</sup> <sup>5</sup>	~2,08 g/cm <sup>3</sup> <sup>10</sup>	~2.67 - 2,88 g/cm <sup>3</sup> <sup>15,18</sup>
Composición	Tipo HS (sulfato resistente) con ~54% clínker y ~46% puzolana natural (ceniza volcánica andesítica) + yeso (<5%) <sup>2</sup>	Cemento Portland con ~46% clínker + 50% escoria GGBFS (ejemplo tipo CEM III) + 4% yeso <sup>6</sup>	Cemento Portland con ~70% clínker + 30% ceniza volante (principalmente ceniza volante clasificada) <sup>10</sup>	LC3: Clinker 50%, gypsum 5%, Calcined clay 30%, limestone powder 15% <sup>16</sup>

Propiedad	Cemento Campeón (Ecuador)	Cemento con escoria GGBFS (50% escoria)	Cemento con ceniza volante (30% fly ash)	Cemento LC3 (Calcined Clay Limestone)
Óxidos principales	CaO ~426%; SiO <sub>2</sub> ~34,6%; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ~9,5%; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ~4,0% (por la adición puzolánica se reduce CaO vs OPC puro) <sup>2</sup>	CaO ~38,7%; SiO <sub>2</sub> ~34,5%; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ~13,160%; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,74% (escoria rica en vidrio silico-aluminoso) <sup>7</sup>	CaO 2,48% (depende de CaO de la ceniza); SiO <sub>2</sub> 59,21%, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 28,11%; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3,68% <sup>10</sup>	CaO ~39,65%; SiO <sub>2</sub> ~33,28%; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ~14,48%; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ~4,30% (valores combinados de clínker + arcilla calcinada + caliza) <sup>18</sup>
Resistencia a compresión 7 días	~25 MPa (mortero estándar; cemento de alta finura alcanza ~24–25 MPa a 7d) <sup>3</sup>	~22–25 MPa (ligera reducción inicial; a 7 días el 50% escoria rinde similar a OPC) <sup>8</sup>	~14,60 – 18.81 MPa <sup>11</sup>	~33,7 MPa <sup>15</sup>
Resistencia a compresión 28 días	~32 MPa (alcanzada o superada; sigue ganando después de 28d).	~32–35 MPa (a 28d iguala o supera al OPC; la	~16,81 – 28,59 MPa <sup>11</sup>	~35,5, - 36,3 MPa <sup>17</sup>

<b>Propiedad</b>	<b>Cemento Campeón (Ecuador)</b>	<b>Cemento con escoria GGBFS (50% escoria)</b>	<b>Cemento con ceniza volante (30% fly ash)</b>	<b>Cemento LC3 (Calcined Clay Limestone)</b>
	Cemento HS Campeón cumple >30 MPa a 28d (clase equivalente ~42.5) <sup>3</sup>	sustitución GGBFS logra resistencia comparable) <sup>8</sup>		
Resistencia a sulfatos	Alta – Cemento tipo HS (expansión <0,03% a 6 meses en Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ). Bajo C <sub>3</sub> A y matriz densa por la puzolana confieren excelente durabilidad a sulfatos <sup>3</sup>	Alta – Escoria mejora notablemente la resistencia sulfatada. 50–65% GGBFS convierte el cemento en “sulfato-resistente”. Con 75–85% escoria, concretos exhiben mínimo deterioro por	Moderada - Alta (Clase F) – Ceniza volante mostró expansiones muy bajas, su presencia mejora la resistencia. 12	Muy Alta – Destaca por resistencia sobresaliente a la erosión por sulfatos, superior al OPC convencional. Estudios muestran LC3 sin daños en medios sulfatados severos, gracias a su matriz refinada y fase

<b>Propiedad</b>	<b>Cemento Campeón (Ecuador)</b>	<b>Cemento con escoria GGBFS (50% escoria)</b>	<b>Cemento con ceniza volante (30% fly ash)</b>	<b>Cemento LC3 (Calcined Clay Limestone)</b>
		sulfatos (equiparable a cemento HS) <sup>8</sup>		carboaluminato protectora <sup>19</sup>
Resistencia a carbonatación	Moderada – Similar a un OPC puzolánico. La presencia de ceniza volcánica reduce algo el Ca(OH) <sub>2</sub> disponible, pudiendo acelerar ligeramente la carbonatación si no se cura bien (comportamiento típico de cementos añadidos) <sup>3</sup>	El uso de escoria en la industria del hormigón puede reducir las emisiones de CO <sub>2</sub> , aumentar la profundidad de carbonatación del hormigón y absorber más CO <sub>2</sub> del entorno circundante <sup>9</sup>	Moderada- El hormigón de cenizas volantes con un 50% mostró una carbonatación similar a la del hormigón Portland <sup>13</sup>	Alta – Estudios recientes indican que LC3 presenta menor carbonatación que OPC dependiendo de su concentración <sup>17</sup>

<b>Propiedad</b>	<b>Cemento Campeón (Ecuador)</b>	<b>Cemento con escoria GGBFS (50% escoria)</b>	<b>Cemento con ceniza volante (30% fly ash)</b>	<b>Cemento LC3 (Calcined Clay Limestone)</b>
Disponibilidad en Ecuador	Sí	No, sólo importado	Sí, común en mezclas	No, en pruebas piloto

<sup>1</sup>(UNACEM, n.d.), <sup>2</sup> (Naranjo-Herrera et al., 2022) <sup>4</sup> (Heikal & Radwan Hassan Darweesh, 2008), <sup>5</sup> (Jozic et al., 2023), <sup>6</sup> (Osmanovic et al., 2018), <sup>7</sup>(Lizarazo et al., 2016), <sup>8</sup> (Chokkalingam & Rajakannu, 2018), <sup>9</sup> (Lee & Wang, 2016), <sup>10</sup>(Moghaddam et al., 2019), <sup>12</sup>(Chelberg, 2019), <sup>13</sup>(D. Zhang et al., 2020), <sup>14</sup> (R & Shaji, 2019), <sup>15</sup>(Canbek et al., 2022), <sup>16</sup>(Shao et al., 2025), <sup>17</sup>(Khan et al., 2018), <sup>18</sup> (Wali et al., 2018), <sup>19</sup>(Yu et al., 2023).

Una comparación técnica entre el cemento Campeón y los cementos con ceniza volante demuestra que existen similitudes en la composición, comportamiento mecánico y la durabilidad del material. En primer lugar, ambos corresponden a cementos puzolánicos, es decir, su adición principal no posee carácter hidráulico independiente como en el caso de la escoria granulada, sino que requiere la portlandita generada por la hidratación del clínker para desarrollar compuestos cementantes secundarios. Mientras que el cemento Campeón incorpora ceniza volcánica andesítica de origen natural, los cementos con fly ash emplean ceniza volante silícea, una de las principales fuentes de este producto es la combustión de carbón en centrales térmicas. Ambos materiales puzolánicos son ricos en dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y contienen bajos niveles de óxido de calcio (CaO), lo que los hace comparables en términos de reactividad química. Además, presentan una sustitución del clínker en rangos similares, lo que reduce la huella de carbono de manera significativa y mejora las propiedades de durabilidad y la resistencia a agentes agresivos.

En cuanto al desempeño mecánico, ambos tipos de cemento exhiben una resistencia a compresión moderada a los 7 días y un desarrollo progresivo en la resistencia a los 28 días, atribuible a la evolución de fases gel C-S-H derivadas de la reacción puzolánica. Esta matriz densificada también confiere una muy buena resistencia frente a sulfatos, que evita la pérdida de resistencia mecánica o disgregación del material. No obstante, ambos presentan limitaciones ante la carbonatación, especialmente bajo condiciones de exposición seca o con curado insuficiente, debido a una menor reserva alcalina (menor cantidad de portlandita), lo que requiere especial atención al diseño estructural y al recubrimiento del acero en elementos expuestos.

Sin embargo, el uso extendido de fly ash como adición suplementaria al cemento debe ser analizado críticamente, ya que, al ser un subproducto de la industria termoeléctrica basada en carbón, su disponibilidad futura está en declive debido a la descarbonización del sector

energético en el país, considerando que gran parte de la energía eléctrica proviene de hidroeléctricas o centrales eléctricas que usan como combustible crudo, HFO, entre otros. En este contexto, si bien se considera ambientalmente ventajosa por su contribución a la reducción del contenido de clínker, su uso generalizado podría derivar en un efecto rebote si se llegara a depender de fuentes no sostenibles, como el transporte internacional o la explotación secundaria artificial de residuos industriales. Este riesgo resalta la necesidad de evaluar no solo las propiedades técnicas del material, sino también la trazabilidad y el origen de la adición, a fin de evitar trasladar el impacto ambiental de una etapa a otra del sistema productivo.

Enfocando el análisis a Quito, Pichincha, Ecuador se recomienda establecer contacto con proveedores que se encuentran actualmente incursionando en la producción de cementos con mezcla en este caso de ceniza volante, también se tienen casos del uso de la mezcla puzolana volcánica o materiales reciclados con caliza, que tiene menor huella de carbono al utilizar menor proporción de clínker, sin embargo es importante cuidar el efecto rebote del transporte del cemento desde sus plantas de generación hasta el lugar de construcción tomando como consideración que la distancia del aeropuerto de Quito se encuentra distante a zonas industriales. Se resalta que el uso de cemento LC3 ofrece mejor desempeño, pero no es desarrollado o comercializado mayoritariamente en Ecuador, pero se requiere de mayores pruebas para garantizar su durabilidad y el cemento con escoria GGBFS requiere de exportación lo que incrementaría su impacto por el transporte.

En la actualidad, el desarrollo de cementos a partir de materiales alternativos (residuos naturales o agroindustriales) se ha convertido en una línea de investigación clave para lograr construcciones más sostenibles sin tener una alta degradación de la calidad del material (Castillo Piscoya et al., 2021). Diversos subproductos han mostrado potencial como adiciones cementantes: cenizas obtenidas de la combustión controlada de cáscara de arroz, bagazo de

caña de azúcar o residuos de palma, así como cenizas volantes de centrales térmicas y escorias, e incluso fibras vegetales (por ejemplo, fibras de plátano) empleadas como refuerzo en matrices de cemento. Estas materias primas suplementarias poseen actividad puzolánica similar al clínker Portland, con la ventaja de provenir de desechos abundantes y reducir la extracción de recursos vírgenes y las emisiones de CO<sub>2</sub> (Castillo Piscoya et al., 2021). Los estudios reportan que la sustitución parcial del cemento por cenizas reactivas puede mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón: por ejemplo, reemplazos del 30–40% de cemento por cenizas de biomasa (arroz, caña, palma) han incrementado significativamente la resistencia a compresión respecto a un cemento convencional, a la par de mejorar la durabilidad en ambientes (Tolosa, 2017). De igual manera, la incorporación de fibras naturales tratadas químicamente ha mostrado efectos benéficos; un caso particular es el de fibras de plátano recubiertas con óxido de manganeso, cuya adición al cemento aumentó la resistencia a flexión y la vida útil del material al mejorar la adherencia fibra-matriz y proteger la fibra en el medio altamente alcalino. En Ecuador, las investigaciones comienzan a reflejar estas tendencias: ensayos con ceniza de bagazo de caña de azúcar (residuo agroindustrial local) como reemplazo parcial del cemento revelaron que con un 5–10% de sustitución se logran aumentos de resistencia a la compresión frente a un hormigón de referencia, manteniéndose dicha resistencia dentro de rangos aceptables hasta un 15% de reemplazo (Quito et al., 2022). Además, estas mezclas mostraron una alta resistividad eléctrica superficial, indicador de baja permeabilidad y, por ende, de buena durabilidad ante la penetración de agentes agresivos como iones cloruro. A nivel internacional, ya se disponen de ejemplos que demuestran la viabilidad de estos cementos alternativos en estructuras de gran exigencia. Un caso emblemático es el del aeropuerto Brisbane West Wellcamp (Australia), cuya pista de 2,87 km fue construida enteramente con hormigón geopolimérico –un cemento alternativo sin clínker Portland, basado

en la activación alcalina de cenizas volantes– cumpliendo con las estrictas especificaciones mecánicas y de servicio de un pavimento aéreo pesado. Este proyecto empleó más de 30000 m<sup>3</sup> de concreto geopolimérico, logrando una reducción estimada de 6600 toneladas de CO<sub>2</sub> emitido en comparación con un diseño convencional (Huang & Sun, 2021). Adicionalmente, la combinación de alta resistencia mecánica, durabilidad superior en condiciones adversas y la posibilidad de disminuir los impactos ambientales por tonelada de cemento producido sostiene el estado actual de desarrollo de estos cementos alternativos (Frías-Gutiérrez et al., 2022), sin embargo es importante contar con una base de datos que permita realizar la comparación real mediante un ACV en el que se consideren todos los impactos, por ejemplo, en el software openLCA aún no se cuenta con bases de datos de materiales reciclados o inputs que permita generar la producción del material. Por lo tanto, es una brecha que se debe enfrentar con investigación, ensayos comparativos con materiales utilizados en industrias con altos requerimientos de calidad de material para aprovechar residuos agroindustriales en la producción de cementos que aporten a la sostenibilidad, esto puede ser utilizado como referencia para futuras investigaciones en Ecuador y el mundo.

## 5. CONCLUSIONES

El presente estudio estableció exitosamente una metodología robusta para la evaluación ambiental de proyectos de construcción aeroportuaria mediante análisis de ciclo de vida, demostrando la aplicabilidad práctica de herramientas de evaluación ambiental en infraestructura de alta especificación técnica. Los resultados obtenidos confirman que el cemento tipo Campeón HS constituye el principal punto crítico ambiental, siendo responsable del 84% de los impactos en formación de partículas finas ( $0,855 \text{ kg PM}_{2.5} \text{ eq/m}^2$ ) y contribuyendo significativamente al potencial de calentamiento global ( $1203,08 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$ ).

La identificación cuantitativa de estos puntos críticos proporciona una base sólida para la implementación de estrategias de ingeniería circular específicas y priorizadas. El análisis comparativo de materiales alternativos reveló que los cementos con adiciones puzolónicas presentan potencial significativo para reducir impactos ambientales manteniendo propiedades técnicas equivalentes, lo que representa una oportunidad concreta para la mejora ambiental de futuros proyectos.

La aplicación del software libre OpenLCA con la base de datos ELCD demostró ser una herramienta efectiva y accesible para organizaciones con recursos limitados, aunque las limitaciones asociadas a la adaptación regional de datos europeos requieren consideraciones metodológicas específicas en futuras aplicaciones. Esta experiencia proporciona un precedente valioso para la democratización de herramientas de evaluación ambiental en el contexto ecuatoriano.

Las estrategias de ingeniería circular propuestas incluyen la sustitución parcial del clínker por materiales cementantes suplementarios, la optimización del transporte de materiales y la evaluación de tecnologías emergentes como cementos LC3. Estas estrategias no solo abordan los impactos ambientales identificados, sino que también ofrecen oportunidades de

innovación tecnológica y ventajas competitivas para empresas constructoras comprometidas con la sostenibilidad.

La metodología desarrollada es replicable y escalable para otros tipos de infraestructura, proporcionando un marco de referencia para futuras investigaciones en el sector construcción ecuatoriano. Las limitaciones identificadas, particularmente en cuanto a disponibilidad de datos regionales y alcance temporal del estudio, establecen líneas claras de investigación futura que incluyen el desarrollo de bases de datos locales, evaluación de ciclo de vida completo (incluyendo fases operativas y de fin de vida) y análisis de costos ambientales externos.

En conclusión, este estudio demuestra que la integración de herramientas de evaluación ambiental con principios de ingeniería circular puede generar mejoras sustanciales en la sostenibilidad de proyectos constructivos sin comprometer la calidad técnica. Los resultados establecen un precedente científico y metodológico para futuras investigaciones y proporcionan herramientas prácticas para la toma de decisiones orientada hacia la sostenibilidad en el sector de infraestructura aeroportuaria y construcción en general.

## REFERENCIAS

- Alvarado Palacios, K., Vélez-Torres, G., Gabriela Peñafiel, A., Alvarado Palacios Citación, K., & Palacios, A. (2025). Life Cycle Assessment of material used in social housing in Ecuador. *Artículo Científico / 2025*, 16(1), 307–319.  
<https://doi.org/10.18537/mskn.16.02.19>
- Aparecido Lopes Silva, D., Oliveira Nunes, A., Aparecida da Silva Moris, V., Moro Piekarski, C., Diogo Aparecido Lopes Silva, U., & Oliveira Rodrigues, T. (2017). *How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto CILCA 2017.*  
<https://www.researchgate.net/publication/318217178>
- Asdrubali, F., Baldassarri, C., & Fthenakis, V. (2013). Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings*, 64, 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.018>
- Barbhuiya, S., & Das, B. B. (2023). Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02326>
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 26, pp. 379–388).  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>
- Canbek, O., Washburn, N. R., & Kurtis, K. E. (2022). Relating LC3 microstructure, surface resistivity and compressive strength development. *Cement and Concrete Research*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106920>
- Castillo Piscoya, G. E., Chavarry Koosi, J. C., Peralta Panta, J. K., & Muñoz Pérez, S. P. (2021). Uso de residuos agroindustriales en las propiedades mecánicas del concreto: Una revisión literaria. *Revista Ingeniería*, 5(13), 123–142.  
<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v5i13.86>
- Chelberg, M. (2019). *The Effect of Fly Ash Chemical Composition on Compressive Strength of Fly Ash Portland Cement.*
- Chokkalingam, R. B., & Rajakannu, M. (2018). Performance Evaluation of Ordinary Portland Cement with GGBFS and Portland Slag Cement at Same GGBFS Replacement Level in Concrete. *MATEC Web of Conferences*, 203.  
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201820306004>
- Gagg, C. R. (2014). Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, 40, 114–140.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- Garraín, D. (2009). *DESARROLLO Y APLICACIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL DE RUIDO Y DE USO DE SUELO EN LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.*  
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10382/garrain.pdf;jsessionid>
- Goedkoop, M. J. (2008). *ReCiPE 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level.*  
<https://www.researchgate.net/publication/302559709>
- Haya, E. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida*. <http://www.eoi.es>
- Heikal, M., & Radwan Hassan Darweesh, M. Y. (2008). *Physico-chemical and mechanical characteristics and durability of calcium aluminate blended cement PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DEL CEMENTO DE*

- ALUMINATO DE CALCIO COMPUESTO.**  
<https://www.researchgate.net/publication/260087197>
- Huang, T., & Sun, Z. (2021). Advances in multifunctional graphene-geopolymer composites. In *Construction and Building Materials* (Vol. 272). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121619>
- Jozic, D., Ljubičić, B., Petrović, A., Čović, A., & Juradin, S. (2023). The Influence of GGBFS as an Additive Replacement on the Kinetics of Cement Hydration and the Mechanical Properties of Cement Mortars. *Buildings*, 13(8).  
<https://doi.org/10.3390/buildings13081960>
- Khan, M. S. H., Nguyen, Q. D., & Castel, A. (2018). Carbonation of limestone calcined clay cement concrete. *RILEM Bookseries*, 16, 238–243. [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9\\_38](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_38)
- Lee, H. S., & Wang, X. Y. (2016). Evaluation of the carbon dioxide uptake of slag-blended concrete structures, considering the effect of carbonation. *Sustainability (Switzerland)*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/su8040312>
- Lizarazo, J. M., Salas, A., & Escobar, D. A. (2016). Efectos del curado en las propiedades de mezclas de concreto con altos contenidos de escoria de hierro. *Informacion Tecnologica*, 27(6), 163–174. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000600017>
- Miguel Ángel Sanjuan Barbudo, S. C. Yepes. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*.
- Moghaddam, F., Sirivivatnanon, V., & Vessalas, K. (2019). The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes. *Case Studies in Construction Materials*, 10.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00218>
- Naranjo-Herrera, L. F., Páez-Flor, N. M., & Rubio-Hernández, F. J. (2022). Using Natural Raw Materials and CEM Approach for the Design of Andean Volcanic Self-Compacting Concretes. *Processes*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/pr10091820>
- openLCA Nexus. (2015). *Machine Translated by Google*.  
<https://nexus.openlca.org/database/ELCD>
- Osmanovic, Z., Haračić, N., & Zelić, J. (2018). Properties of blastfurnace cements (CEM III/A, B, C) based on Portland cement clinker, blastfurnace slag and cement kiln dusts. *Cement and Concrete Composites*, 91, 189–197.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.006>
- Purton, M. (2024, September 12). *Cement is a big problem for the environment. Here's how to make it more sustainable*. <https://www.weforum.org/stories/2024/09/cement-production-sustainable-concrete-co2-emissions/#:~:text=Global%20cement%20manufacturing%20is%20responsible,Image:%20Statista>
- Quito, L., Macías, K., & Guerra, J. (2022). *CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR PARA MEJORAR LA RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA DEL HORMIGÓN SUGAR CANE BAGASSE ASH TO IMPROVE CONCRETE RESISTIVITY AND STRENGTH*. 5(10). <https://doi.org/10.46296/ig.v5i10edespsep.0070>
- R, A. K., & Shaji, P. (2019). PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT CLINKER WITH LIMESTONE AND LOW QUALITY CALCINED CLAY. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

- Shao, J., Guo, S., & Wang, H. (2025). A Review of the Performance, Sustainable Applications, and Research Challenges of Limestone-Calcined Clay-Cement (LC3) Systems. In *Coatings* (Vol. 15, Issue 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/coatings15050611>
- Tolosa, R. (2017). *Evaluación de fibras y cenizas provenientes de residuos agroindustriales como materias primas para la producción de materiales compuestos con cemento hidráulico*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62282>
- UNACEM. (n.d.). *FICHA TÉCNICA CEMENTO CAMPEÓN*. [www.unacem.com.ec](http://www.unacem.com.ec)
- Wali, S. K., Saxena, S. K., Kumar, M., Maity, S., & Bishnoi, S. (2018). Application of industrially produced LC3 to Pavements, AAC Blocks and Other Products. *RILEM Bookseries*, 16, 482–487. [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9\\_77](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_77)
- Yu, C., Li, Z., & Liu, J. (2023). Degradation of limestone calcined clay cement (LC3) mortars under sulfate attack. *Low-Carbon Materials and Green Construction*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44242-022-00003-1>
- Zhang, D., Yang, Q., Mao, M., & Li, J. (2020). Carbonation performance of concrete with fly ash as fine aggregate after stress damage and high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118125>
- Zhang, X., Shen, L., & Zhang, L. (2013). Life cycle assessment of the air emissions during building construction process: A case study in Hong Kong. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 17, pp. 160–169). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.024>

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ÍNDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>46</b>
<b>Anexo A: CAPTURAS SOFTWARE.....</b>	<b>47</b>
<b>Anexo B: GRÁFICAS RESULTADO DEL SISTEMA DE PRODUCTOS .....</b>	<b>51</b>
<b>Anexo C: RESULTADOS DEL SOFTWARE .....</b>	<b>60</b>

## ANEXO A: CAPTURAS SOFTWARE

openLCA 2.4.1 - elcd\_3\_2\_greendelta\_v2\_18\_correction\_20220908

File Database Tools Help

Navigation

- Product systems
  - PC Bottle Production
  - PET Bottle Production
  - Terminal
- Processes
  - Dummy processes
  - End-of-life treatment
  - Energy carriers and technologies
  - Materials production
  - Systems
  - Transport services
  - Water Bottle
  - Cemento 1kg - EC
  - Construcción 1m2
- Flows
  - Deposited goods
  - Elementary flows
  - Emissions
  - End-of-life treatment
  - Energy carriers and technologies
  - Materials production
  - Production residues in life cycle
  - Systems
  - Transport services
  - Wastes
  - Water Bottle
  - 1m2 construido
  - Arena
  - Cemento
  - Cemento 1kg
  - Clinker
  - Grava
  - Pintura
  - Puzolana

Inputs/Outputs - Cemento 1kg - EC

**Inputs**

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location	Description
Clinker		0.65000	= kg		none					
electricity mix	Energy carriers and tec...	1.00000	= MJ		none					
Gypsum	Materials production/...	0.05000	= kg		none					
heavy fuel oil	Energy carriers and tec...	3.40000	= MJ		none					
Puzolana		0.30000	= kg		none					
transport in t*km	Transport services/Oth...	1.00000	= t*km		none		Lorry tr...			

**Outputs**

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location	Description
<b>Cemento 1kg</b>		<b>1.00000</b>	= kg		none					

General information Inputs/Outputs Documentation Parameters Allocation Social aspects Direct impacts

openLCA 2.4.1 - elcd\_3\_2\_greendelta\_v2\_18\_correction\_20220908

File Database Tools Help

Navigation

- Product systems
  - PC Bottle Production
  - PET Bottle Production
  - Terminal
- Processes
  - Dummy processes
  - End-of-life treatment
  - Energy carriers and technologies
  - Materials production
  - Systems
  - Transport services
  - Water Bottle
  - Cemento 1kg - EC
  - Construcción 1m2
- Flows
  - Deposited goods
  - Elementary flows
  - Emissions
  - End-of-life treatment
  - Energy carriers and technologies
  - Materials production
  - Production residues in life cycle
  - Systems
  - Transport services
  - Wastes
  - Water Bottle
  - 1m2 construido
  - Arena
  - Cemento
  - Cemento 1kg
  - Clinker
  - Grava
  - Pintura
  - Puzolana

Inputs/Outputs - Construcción 1m2

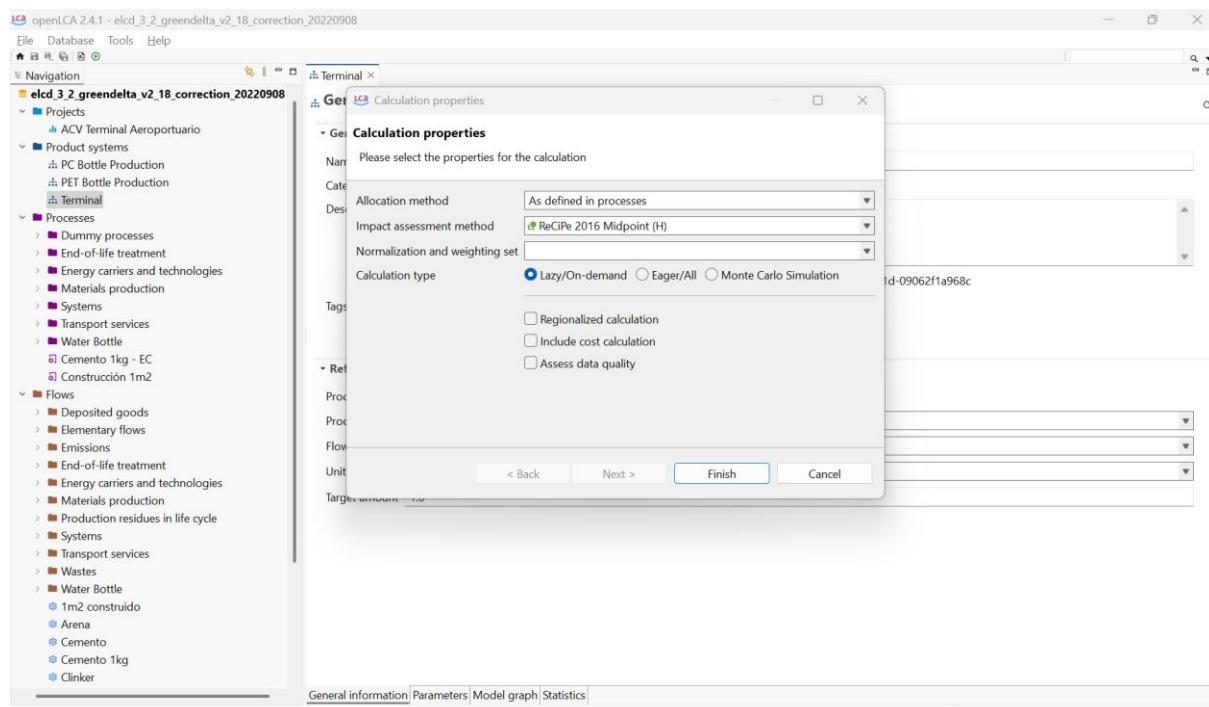
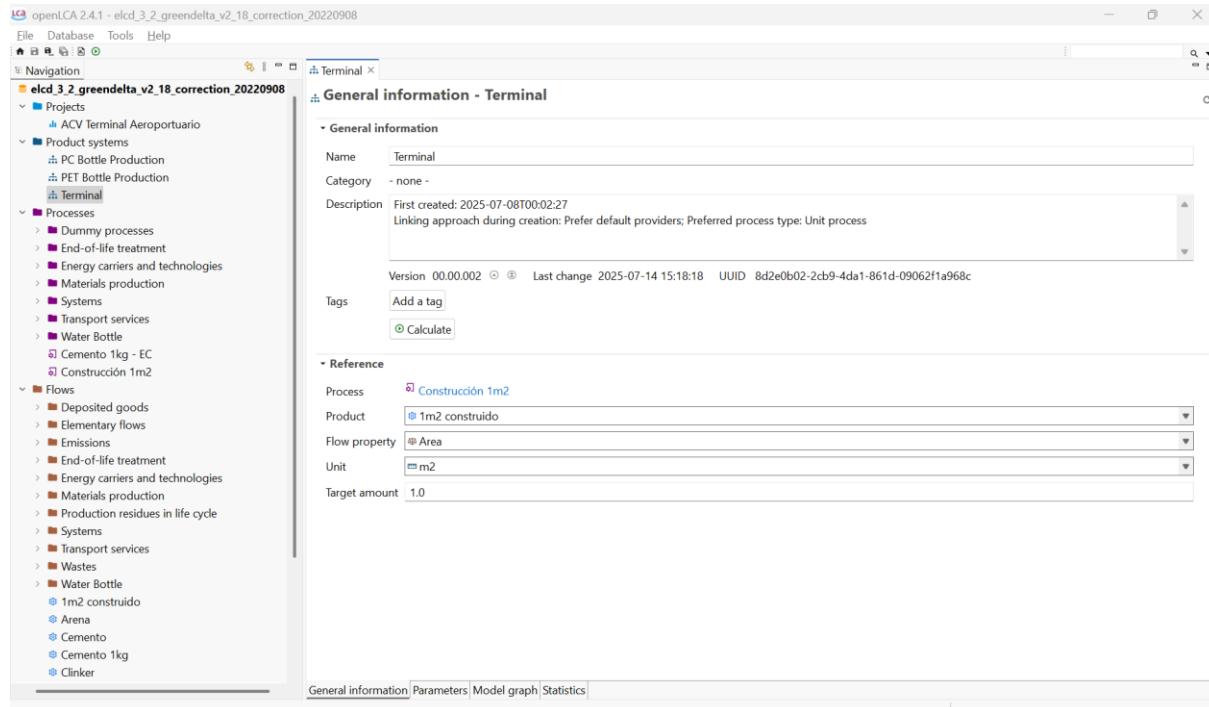
**Inputs**

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location	Description
Arena		90.00000	= kg		none					
Cemento 1kg		0.72000	= kg		none		Cement...			
Diesel	Energy carriers and tec...	0.24000	= kg		none		Diesel ...			
electricity mix	Energy carriers and tec...	1.60000	= MJ		none					
Grava		90.00000	= kg		none					
Pintura		0.29000	= kg		none					
steel rebar	Materials production/...	7.34000	= kg		none					
transport in t*km	Transport services/Oth...	4.96000	= kg*km		none					
Water for industrial u...	Materials production/...	27.00000	= kg		none					

**Outputs**

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data qual...	Location	Description
<b>1m2 construido</b>		<b>1.00000</b>	= m <sup>2</sup>		none					

General information Inputs/Outputs Documentation Parameters Allocation Social aspects Direct impacts



openLCA 2.4.1 - elcd\_3\_2\_greendelta\_v2\_18\_correction\_20220908

File Database Tools Help

Navigation elcd\_3\_2\_greendelta\_v2\_18\_correction\_20220908

- Projects
  - ACV Terminal Aeropuerto
- Product systems
  - PC Bottle Production
  - PET Bottle Production
  - Terminal
- Processes
  - Dummy processes
  - End-of-life treatment
  - Energy carriers and technologies
  - Materials production
  - Systems
  - Transport services
  - Water Bottle
  - Cemento 1kg - EC
  - Construcción 1m2
- Flows
  - Deposited goods
  - Elementary flows
  - Emissions
  - End-of-life treatment
  - Energy carriers and technologies
  - Materials production
  - Production residues in life cycle
  - Systems
  - Transport services
  - Wastes
  - Water Bottle
  - 1m2 construido
  - Arena
  - Cemento
  - Cemento 1kg
  - Clinker

Terminal

General information

Product system: Terminal  
Allocation method: As defined in processes  
Target amount: 1.0 m2 1m2 construido  
Impact assessment method: ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Top 5 contributions to impact category results - overview

Impact category: Fine particulate matter formation

0.849 kg PM2.5 eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace

5.489E-3 kg PM2.5 eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and e

4.437E-4 kg PM2.5 eq: Container glass (delivered to the end user of the contain

4.230E-4 kg PM2.5 eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV -

5.794E-5 kg PM2.5 eq: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 1

3.131E-5 kg PM2.5 eq: Other

Top 5 contributions to flow results - overview

Flow: naphthalene - Emission to water/ocean

5.500E-10 kg: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-

General information | Inventory results | Impact analysis | Process results | Contribution tree | Grouping | Locations | Sankey diagram | LCIA Checks

openLCA 2.4.1 - elcd\_3\_2\_greendelta\_v2\_18\_correction\_20220908

File Database Tools Help

Navigation elcd\_3\_2\_greendelta\_v2\_18\_correction\_20220908

- Projects
  - ACV Terminal Aeropuerto
- Product systems
  - PC Bottle Production
  - PET Bottle Production
  - Terminal
- Processes
  - Dummy processes
  - End-of-life treatment
  - Energy carriers and technologies
  - Materials production
  - Systems
  - Transport services
  - Water Bottle
  - Cemento 1kg - EC
  - Construcción 1m2
- Flows
  - Deposited goods
  - Elementary flows
  - Emissions
  - End-of-life treatment
  - Energy carriers and technologies
  - Materials production
  - Production residues in life cycle
  - Systems
  - Transport services
  - Wastes
  - Water Bottle
  - 1m2 construido
  - Arena
  - Cemento
  - Cemento 1kg
  - Clinker

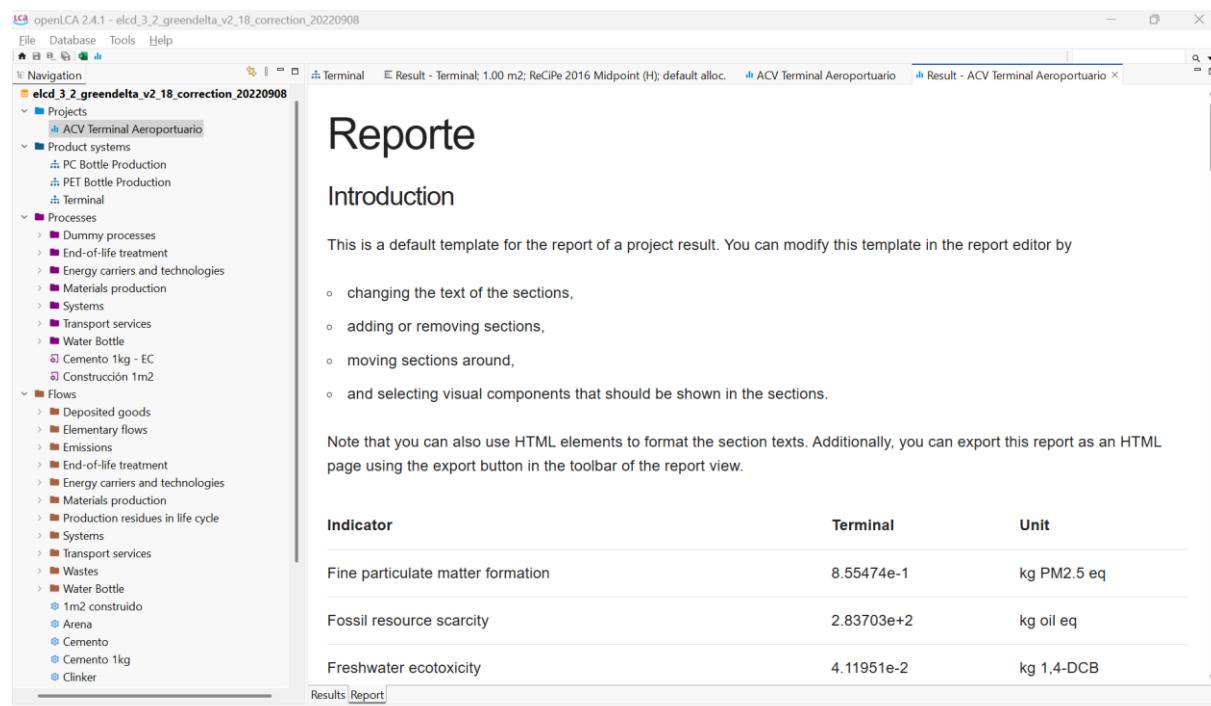
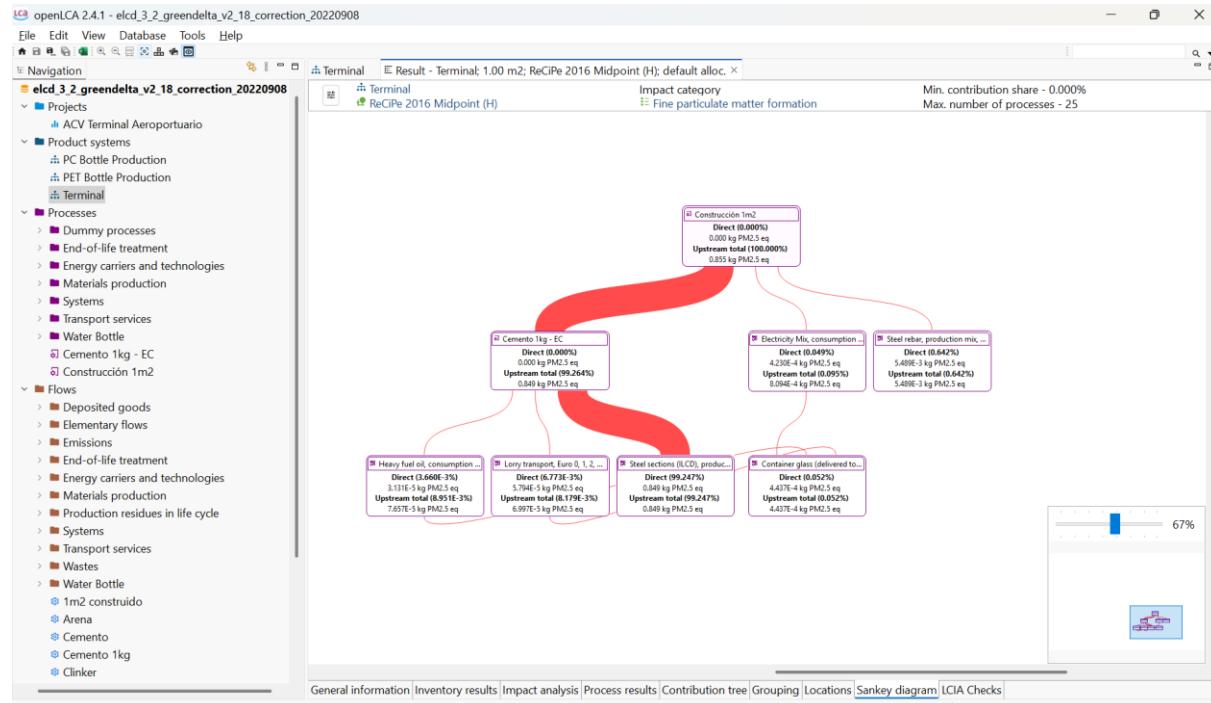
Terminal

Flow: naphthalene - Emission to water/ocean

Impact category: Fine particulate matter formation

Contri... Process	Required amount	Total result [kg PM2...]	Direct contributio...
100.0 Construcción 1m2	1.00000 m2	0.85547	
> 99 Cemento 1kg - EC	0.72000 kg	0.84918	
> 00 Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO	7.34000 kg	0.00549	0.00549
> 00 Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK	1.60000 MJ	0.00081	0.00042
> 00 Dummy_Water for industrial use	27.00000 kg	0.00000	

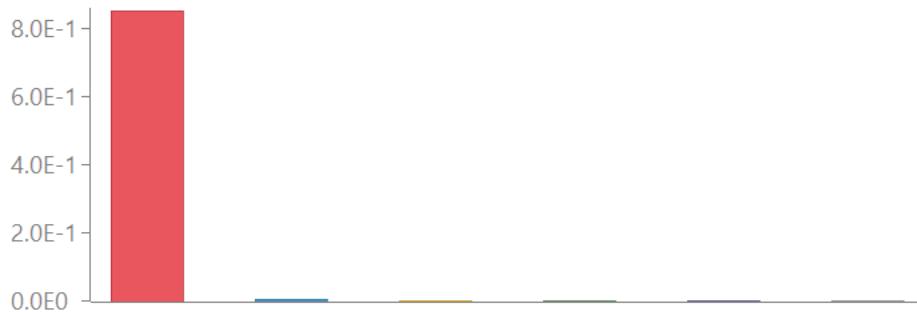
General information | Inventory results | Impact analysis | Process results | Contribution tree | Grouping | Locations | Sankey diagram | LCIA Checks



## ANEXO B: GRÁFICAS RESULTADO DEL SISTEMA DE PRODUCTOS

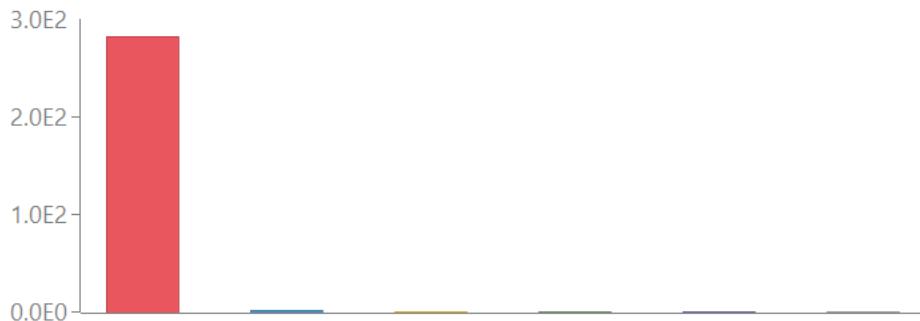
### Top 5 contributions to impact category results - overview

Impact category Fine particulate matter formation ▾



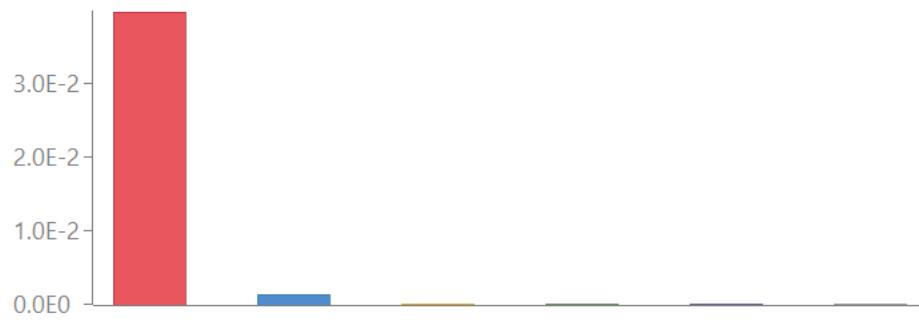
- 0.849 kg PM2.5 eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 5.489E-3 kg PM2.5 eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 4.437E-4 kg PM2.5 eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 4.230E-4 kg PM2.5 eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 5.794E-5 kg PM2.5 eq: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
- 3.131E-5 kg PM2.5 eq: Other

Impact category Fossil resource scarcity ▾



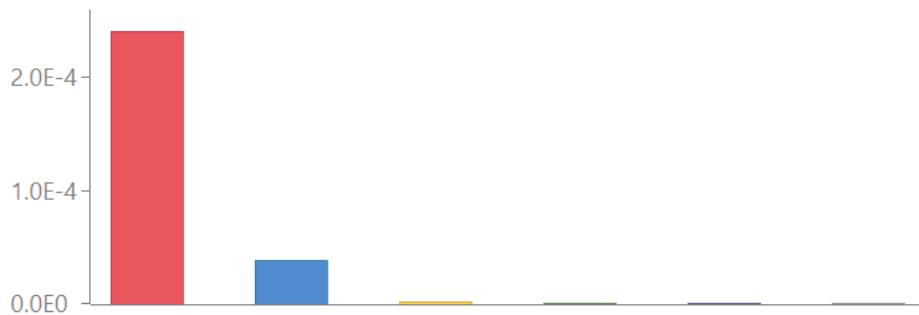
- 2.818E2 kg oil eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 1.713 kg oil eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 0.092 kg oil eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 0.055 kg oil eq: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 0.025 kg oil eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 0.014 kg oil eq: Other

Impact category Freshwater ecotoxicity ▾



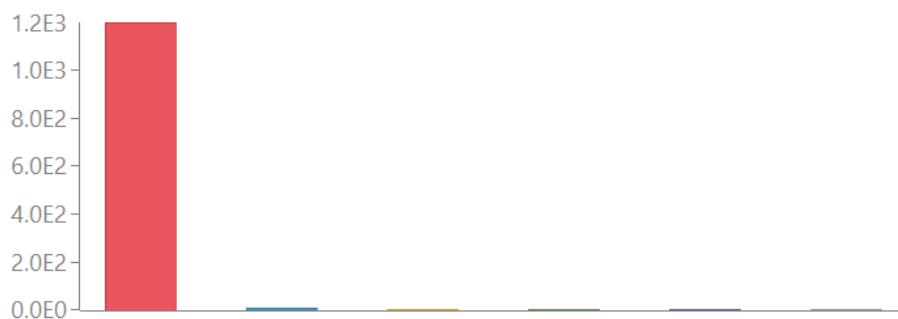
- 0.040 kg 1,4-DCB: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 1.372E-3 kg 1,4-DCB: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 2.071E-5 kg 1,4-DCB: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 1.624E-5 kg 1,4-DCB: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 5.937E-6 kg 1,4-DCB: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 1.560E-6 kg 1,4-DCB: Other

Impact category Freshwater eutrophication ▾



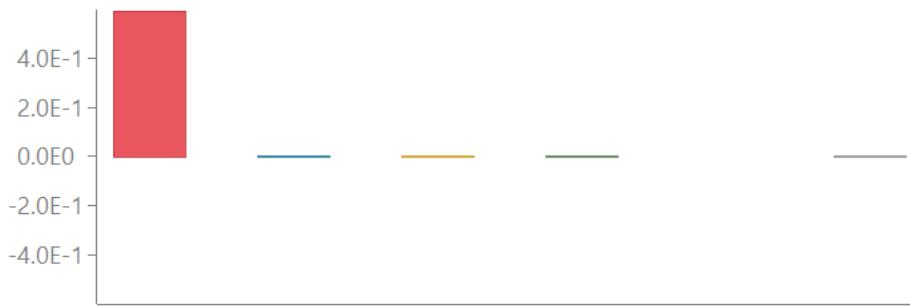
- 2.406E-4 kg P eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 3.812E-5 kg P eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 1.436E-6 kg P eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 9.580E-8 kg P eq: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 7.518E-8 kg P eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 2.516E-8 kg P eq: Other

Impact category Global warming ▾



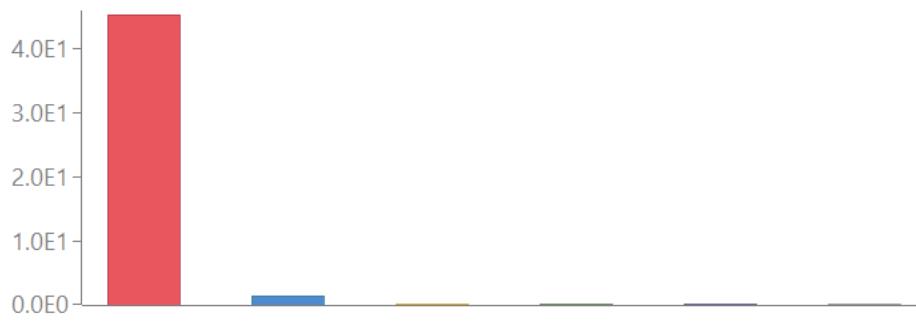
- 1.195E3 kg CO<sub>2</sub> eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 7.587 kg CO<sub>2</sub> eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 0.369 kg CO<sub>2</sub> eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 0.159 kg CO<sub>2</sub> eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 0.048 kg CO<sub>2</sub> eq: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
- 0.021 kg CO<sub>2</sub> eq: Other

Impact category Human carcinogenic toxicity ▾



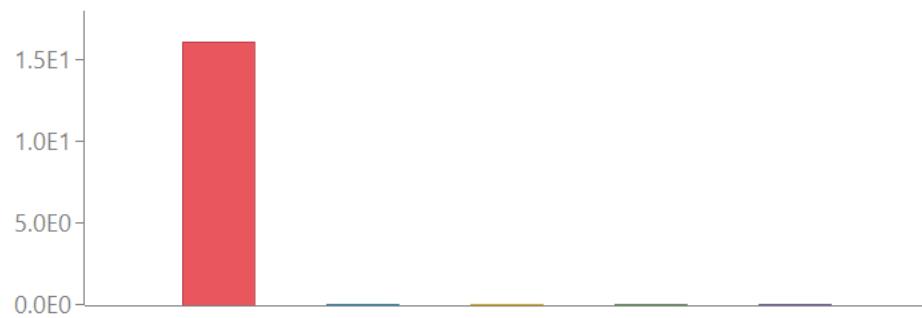
- 0.592 kg 1,4-DCB: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 1.960E-4 kg 1,4-DCB: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 5.207E-5 kg 1,4-DCB: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 8.846E-6 kg 1,4-DCB: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- -2.637E-5 kg 1,4-DCB: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 2.799E-6 kg 1,4-DCB: Other

Impact category Human non-carcinogenic toxicity ▾



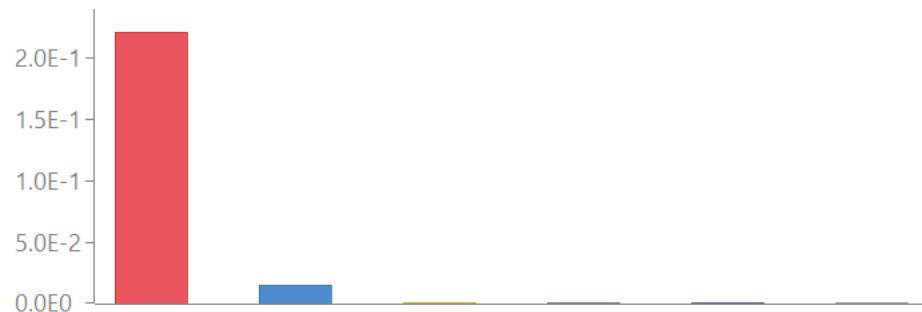
- 45.276 kg 1,4-DCB: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 1.349 kg 1,4-DCB: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 0.037 kg 1,4-DCB: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 2.722E-3 kg 1,4-DCB: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 1.164E-3 kg 1,4-DCB: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 3.074E-4 kg 1,4-DCB: Other

Impact category Ionizing radiation ▾



- 16.039 kBq Co-60 eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 0.061 kBq Co-60 eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 0.014 kBq Co-60 eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 1.995E-4 kBq Co-60 eq: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 5.745E-5 kBq Co-60 eq: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER

Impact category Marine ecotoxicity ▼



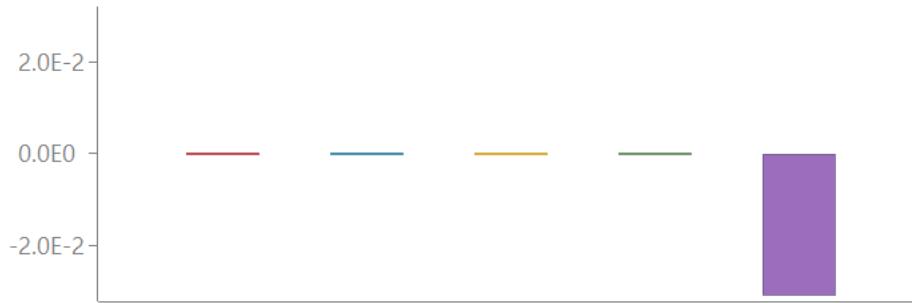
- 0.221 kg 1,4-DCB: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 0.015 kg 1,4-DCB: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 1.666E-4 kg 1,4-DCB: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RE
- 1.526E-4 kg 1,4-DCB: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 6.331E-5 kg 1,4-DCB: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 4.032E-5 kg 1,4-DCB: Other

Impact category Marine eutrophication ▼



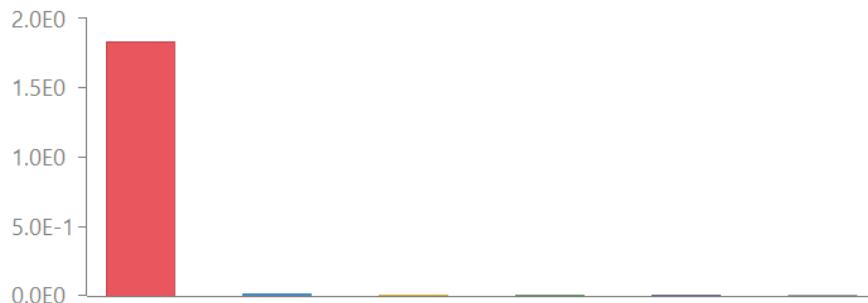
- 0.023 kg N eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 1.610E-4 kg N eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 6.979E-6 kg N eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 5.780E-7 kg N eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 2.449E-7 kg N eq: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 6.221E-8 kg N eq: Other

Impact category Mineral resource scarcity ▾



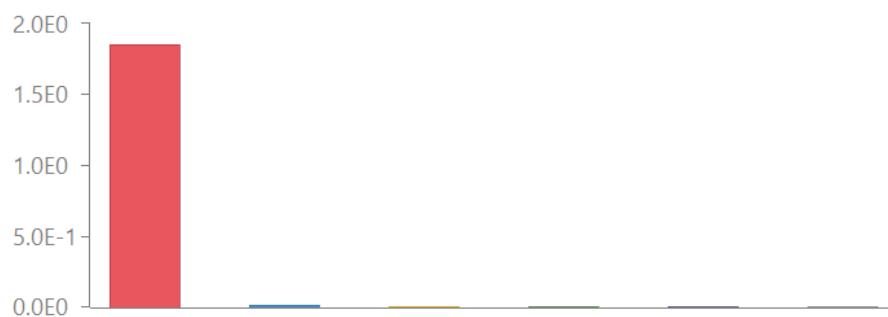
- 6.359E-5 kg Cu eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 3.568E-6 kg Cu eq: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 2.724E-6 kg Cu eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 9.459E-7 kg Cu eq: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload - RER
- -0.031 kg Cu eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO

Impact category Ozone formation, Human health ▾



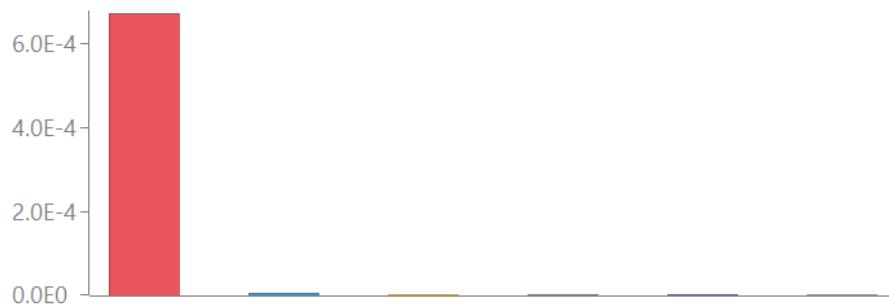
- 1.825 kg NOx eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 9.160E-3 kg NOx eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 5.079E-4 kg NOx eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - REI
- 3.924E-4 kg NOx eq: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload - RER
- 3.255E-4 kg NOx eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 4.825E-5 kg NOx eq: Other

Impact category zone formation, Terrestrial ecosystems ▾



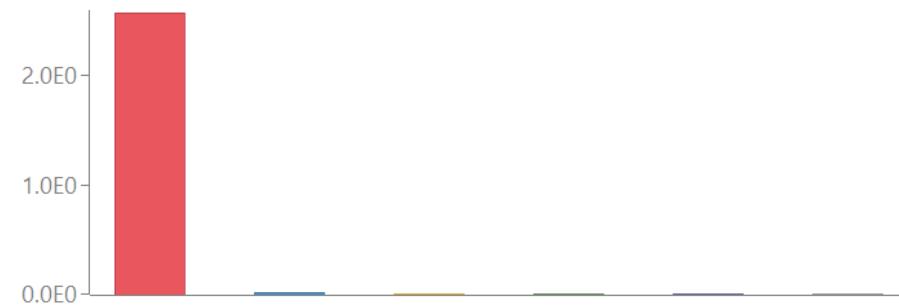
- 1.839 kg NOx eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 9.276E-3 kg NOx eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 5.121E-4 kg NOx eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - REI
- 3.953E-4 kg NOx eq: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload - RER
- 3.267E-4 kg NOx eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 5.078E-5 kg NOx eq: Other

Impact category Stratospheric ozone depletion ▾



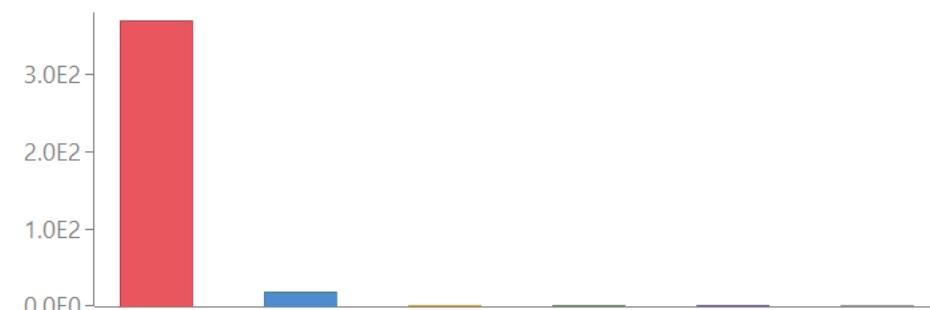
- 6.713E-4 kg CFC11 eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 3.288E-6 kg CFC11 eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 8.427E-8 kg CFC11 eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 5.230E-8 kg CFC11 eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - REI
- 5.859E-9 kg CFC11 eq: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17.3t max payload - RER
- 4.116E-9 kg CFC11 eq: Other

Impact category Terrestrial acidification ▾



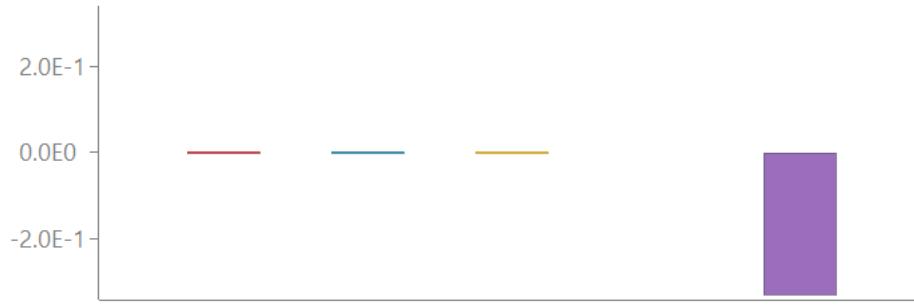
- 2.567 kg SO<sub>2</sub> eq: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 0.019 kg SO<sub>2</sub> eq: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 1.528E-3 kg SO<sub>2</sub> eq: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - REI
- 1.378E-3 kg SO<sub>2</sub> eq: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 1.648E-4 kg SO<sub>2</sub> eq: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
- 1.051E-4 kg SO<sub>2</sub> eq: Other

Impact category Terrestrial ecotoxicity ▾



- 3.689E2 kg 1,4-DCB: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO
- 17.829 kg 1,4-DCB: Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO
- 0.216 kg 1,4-DCB: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- 0.063 kg 1,4-DCB: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 0.017 kg 1,4-DCB: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 4.265E-3 kg 1,4-DCB: Other

Impact category Water consumption ▾



- 3.895E-4 m<sup>3</sup>: Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - SK
- 1.363E-5 m<sup>3</sup>: Heavy fuel oil, consumption mix, at refinery, from crude oil - EU-15
- 3.812E-6 m<sup>3</sup>: Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
- -5.344E-4 m<sup>3</sup>: Container glass (delivered to the end user of the contained product, reuse rate: 7%), production mix at plant, technology mix - RER
- -0.330 m<sup>3</sup>: Steel sections (ILCD), production mix, at plant, blast furnace route / electric arc furnace route, 1 kg - GLO

## ANEXO C: RESULTADOS DEL SOFTWARE

<b>Impact category UUID</b>	<b>Impact category</b>	<b>Reference unit</b>	<b>Result</b>
b4315ae1-5cb2-3f70-ad17-1a35a58823ef	Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0.855474
80e0b1a4-16b9-3aeb-9136-e544aca7a1e3	Fossil resource scarcity	kg oil eq	283.7028
d7bce000-07a4-37d7-9cb6-0d11062b6baa	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.041195
7f771819-2b75-30a4-b1d2-9a5846590d6d	Freshwater eutrophication	kg P eq	0.00028
b39a745e-4f3d-35b0-9797-10ebc40b24ad	Global warming	kg CO2 eq	1203.259
2d8e76c1-c7a5-3289-9657-0256edbeea41	Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0.592152
e84559f5-8f11-36cb-b978-a41f0ef9780c	Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	46.66566
09a73c78-b3ba-3369-81ba-cf1bb9f0f54d	Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	16.11411
f7c097c5-71c7-322c-a610-5dee0a39fd6b	Land use	m2a crop eq	0
d9ff50c2-00ab-3901-8970-569f9b7c8041	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.23579
5e7d91a6-531c-3132-98ba-41b48d6e96f3	Marine eutrophication	kg N eq	0.022774
f9e7dd9d-f3a3-318e-b458-6452fbdcdb8f	Mineral resource scarcity	kg Cu eq	-0.03073
23d3e9af-9a16-31f1-a58d-81ece82ac0a	Ozone formation, Human health	kg NOx eq	1.835327
6d056b44-9f90-3821-95c5-8594b5a6819c	Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	1.849804
e2b13de9-397c-3b6f-9dcf-4e206404db3b	Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.000675
0d4ca54a-eeee-3564-93a5-03906d763cdb	Terrestrial acidification	kg SO2 eq	2.588498
f93a8dda-aa59-3e8c-9344-1e0f6e4db224	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	386.9869
95d88b64-0767-321b-8f02-9e3e7c65a527	Water consumption	m3	-0.33052