

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CICLO DE VIDA ENTRE  
ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA PRODUCIDOS EN LA  
CIUDAD DE LIMA**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil**

**AUTORA:**

Lucia Elizabeth Rucoba Hernández

**ASESOR:**

Ramzy Kahhat Abedrabbo, PhD

Lima, Julio, 2023

## Informe de Similitud

Yo, *Ramzy Francis Kahhat Abedrabbo*, docente de la Facultad de *Ciencias e Ingeniería* de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis de investigación titulado:

*ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CICLO DE VIDA ENTRE ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA PRODUCIDOS EN LA CIUDAD DE LIMA*

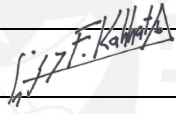
de la autora

***Lucía Elizabeth Rucoba Hernández***

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 20%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 6/06/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio. El resultado de *Turnitin* es una suma de similitudes de menos de 1%, salvo un documento con similitud de menos de 3%.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 18 de julio del 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Kahhat Abedrabbo, Ramzy Francis</u>	
DNI: 08746262	Firma 
ORCID: 0000-0001-7321-2256	

## RESUMEN

El crecimiento de la construcción de edificaciones y la falta de información acerca del impacto ambiental que generan los insumos adquiridos para este sector, ha atraído el interés en investigar las emisiones relacionadas a los elementos empleados en la construcción. Por esto, el presente estudio ha realizado una evaluación ambiental de dos elementos de mampostería: bloque de concreto y bloque de concreto reciclado, con el fin de realizar el análisis de ciclo de vida de dichos productos. Asimismo, con los resultados obtenidos, esta investigación compara el valor de kg de CO<sub>2</sub>eq emitidos al construir un metro cuadrado de muro con distintos tipos de elementos de mampostería.

Los límites del estudio abarcan los procesos comprendidos entre la extracción de materias primas hasta el producto final, asumiendo una perspectiva de *cradle to gate* para ambos productos. La obtención de datos directos fue proporcionada por personal perteneciente a empresas productoras de dichos tipos de bloques a través de un cuestionario, mientras que los datos indirectos fueron tomados de la base de datos deecoinvent. El modelado del ciclo de vida fue realizado en el software SimaPro, en el cual se analizaron los distintos escenarios planteados en función al tipo de bloque y al tipo de cemento en el uso de la mezcla.

Los resultados de la evaluación de impacto ambiental de acuerdo a la metodología IPCC 2013 demuestran que un metro cuadrado de muro construido preparado para recibir la aplicación de la primera capa de pintura construido con bloques de concreto convencionales (BDCR) genera menos impactos ambientales que la misma cantidad de muro construido con bloques de concreto con agregado reciclado (BDCR), ladrillos pandereta lisa (PL) y ladrillos King Kong caravista (KKC). Adicionalmente, se ha identificado que el uso de mortero para

juntas o tarrajeo incide considerablemente en los resultados, contribuyendo en más del 22% a las emisiones de GEI generadas.

Respecto a los resultados de la producción de bloques, una tonelada de BDCR (163 kg de CO<sub>2</sub>eq) tienen un mayor impacto ambiental a una tonelada de BDC (90 kg CO<sub>2</sub>eq). Esta diferencia es explicada por dos principales razones. En primer lugar, la cantidad de cemento empleada en la mezcla de BDCR es el doble a la utilizada en la mezcla de los BDC. En segundo lugar, la fábrica de BDC tiene una mayor escala de producción y nivel de industrialización en comparación con la fábrica de BDCR. Asimismo, se identifica que las principales cargas ambientales provienen del consumo de cemento en ambos casos, con un aporte del 89% del total de emisiones del concreto reciclado y del 70% para la mezcla de concreto convencional. Por último, se evidencia los beneficios ambientales que conlleva la producción de agregado reciclado comparada con la obtención de agregado natural, ya que el proceso de obtención del AR representa el 10% de los impactos generados durante la obtención del AN, con valores de 7 kgCO<sub>2</sub>eq/ton y 82 kg CO<sub>2</sub>eq/ton respectivamente.

Finalmente, se recomienda la disminución del uso de cemento en ambas mezclas de concreto, así como la investigación y aplicación de otro tipo de cementantes como el cemento puzolánico, cuyo impacto ambiental sea menor. De la misma forma, se alienta el desarrollo de este tipo de investigaciones que sirvan para la identificación de procesos y productos clave en la construcción de edificaciones en términos de cargas ambientales, con el fin de obtener información clave que permita la elaboración de escenarios y alternativas que tengan como objetivo la reducción de los GEI generados en esta industria.

## ABSTRACT

The growth of building construction and the lack of information about the environmental impact generated by the inputs purchased for this sector, has attracted interest in investigating the emissions related to the elements used in construction. For this reason, the present study has conducted out an environmental evaluation of two masonry elements: concrete block and recycled concrete block, to perform the life cycle analysis of these products. In this sense, with the results obtained, this research compares the kg of CO<sub>2</sub>eq obtained from constructing one square meter of wall with different types of masonry elements.

The study boundaries encompass the processes from raw material extraction to the final product, assuming a cradle-to-gate perspective for both products. Direct data collection was provided by personnel from block manufacturing companies through a questionnaire, while indirect data was taken from the ecoinvent database. The life cycle modeling was performed using SimaPro software, in which different scenarios were analyzed based on block type and cement type used in the mix.

The results of the environmental impact assessment according to the IPCC 2013 methodology demonstrate that one square meter of wall constructed and prepared for the application of the first coat of paint using conventional concrete blocks (BDCR) generates fewer environmental impacts than the same amount of wall constructed with recycled aggregate concrete blocks (BDCR), smooth partition bricks (PL), and King Kong veneer bricks (KKC). Additionally, it has been identified that using mortar for joints significantly influences the results, contributing over 22% to the generated GHG emissions.

Regarding the results of block production, one ton of BDCR (163 kg CO<sub>2</sub>eq) has a greater environmental impact compared to one ton of BDC (90 kg CO<sub>2</sub>eq). This difference can be explained by two main reasons. Firstly, the amount of cement used in the BDCR mix

is twice as much as in the BDC mix. Secondly, the BDC factory has a larger production scale and level of industrialization compared to the BDCR factory. Additionally, it is identified that the main environmental burdens come from cement consumption in both cases, accounting for 89% of the total emissions for recycled concrete and 70% for conventional concrete mix. Lastly, the environmental benefits of producing recycled aggregate compared to obtaining natural aggregate are evident, as the process of obtaining recycled aggregate represents 10% of the impacts generated during the acquisition of natural aggregate, with values of 7 kg CO<sub>2</sub>eq/ton and 82 kg CO<sub>2</sub>eq/ton, respectively.

Finally, it is recommended to reduce the use of cement in both concrete mixes and to research and implement other cementitious materials, such as pozzolanic cement, which have a lower environmental impact. Similarly, developing such research is encouraged to identify key processes and products in building construction in terms of environmental burdens, to obtain crucial information that enables the development of scenarios and alternatives to reduce GHG emissions generated in this industry.

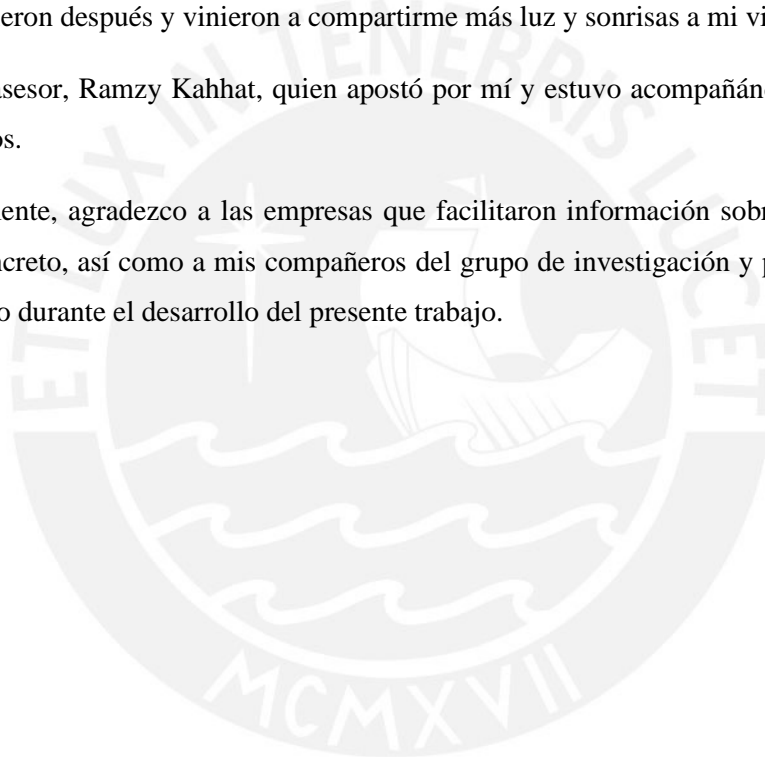
## **AGRADECIMIENTOS**

Al concluir formalmente una de las mejores etapas de mi vida, quiero extender un profundo agradecimiento a todas las personas que me acompañaron en este desafiante camino, porque fueron inspiración y fortaleza. A mis padres y hermano, por toda la comprensión, paciencia y amor que me brindan a diario. A mis abuelos, tías, tíos y primos, por motivarme a brillar y a no dejar de creer en mí, por siempre estar dispuestos a apoyarme. A Blacky, por acompañarme solemnemente en las noches de desvelo por estudio.

A los grandes amigos y amigas que hice en la universidad, porque todos estos años no hubiesen sido igual de llevaderos sin ustedes. A mis amigos del colegio, por siempre estar pendiente de mí, brindarme su cariño y seguir acompañándome durante tantos años. A quienes por cosas del destino aparecieron después y vinieron a compartirme más luz y sonrisas a mi vida.

A mi asesor, Ramzy Kahhat, quien apostó por mí y estuvo acompañándome como mentor todos estos años.

Finalmente, agradezco a las empresas que facilitaron información sobre la producción de bloques de concreto, así como a mis compañeros del grupo de investigación y profesionales por el apoyo realizado durante el desarrollo del presente trabajo.



## ÍNDICE

### CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto del sector construcción en Perú .....	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos e hipótesis.....	4
1.3.1. Objetivos.....	4
1.3.2. Hipótesis.....	5

### CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE

2.1. Evolución del ACV como herramienta ambiental.....	6
2.2. Aplicación del ACV en los materiales de construcción en el mundo.....	13
2.3. Aplicación de ACV en materiales de construcción en el Perú.....	19

### CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

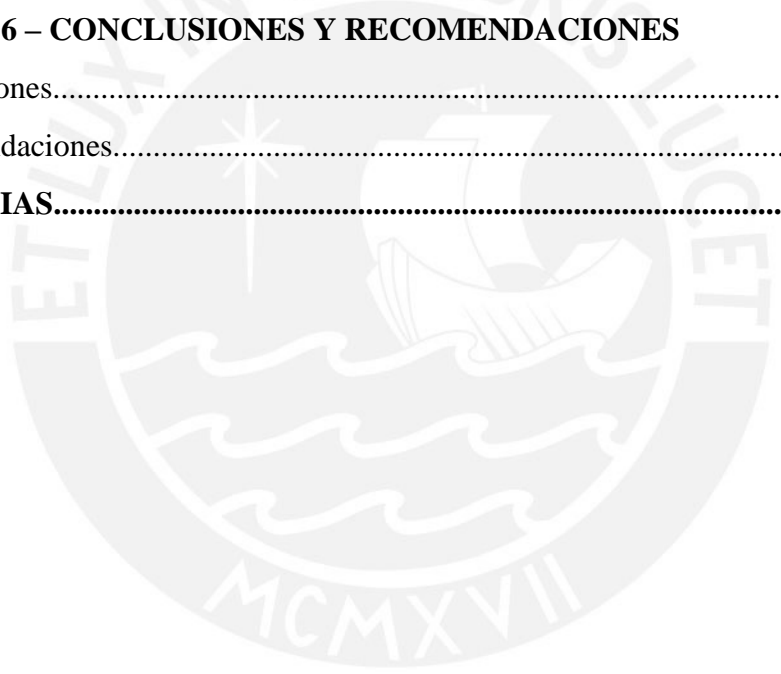
3.1. ACV según normativa ISO.....	24
3.2. Categoría de impacto: IPCC 2013 y ReCiPe.....	30
3.2.1. IPCC 2013.....	30
3.2.2. ReCiPe 2016.....	31
3.3. Software para el desarrollo del ACV.....	34
3.4 CASO DE ESTUDIO .....	35
3.4.1. Definición del alcance del estudio.....	35
3.4.1.1. Límites del sistema de estudio.....	35
3.4.1.2. Definición de la unidad funcional del estudio.....	38
3.4.1.3. Limitaciones y suposiciones del estudio.....	40
3.4.2. Recolección de datos para el inventario de ciclo de vida (ICV).....	41
3.4.2.1. Obtención de datos directos.....	41
3.4.2.2. Obtención de datos indirectos.....	47
3.4.2.3. Proceso de producción de bloques de concreto convencionales.....	51
3.4.2.4. Proceso de producción de bloques de concreto reciclado.....	59
3.4.3. Procesos unitarios del inventario.....	64
3.4.3.1. Bloque de concreto convencional.....	64
3.4.3.2. Bloque de concreto reciclado.....	68

### CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

4.1. Evaluación de impacto ambiental.....	73
4.1.1. Método IPCC 2013: Cambio climático.....	73



4.1.1.1. Análisis del bloque de concreto convencional.....	73
4.1.1.2. Análisis del bloque de concreto reciclado.....	75
4.1.2. Método ReCiPe 2008.....	77
4.1.2.1. Bloque de concreto convencional.....	77
4.1.2.2. Bloque de concreto reciclado.....	82
<b>CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS</b>	
5.1. Comparación por tonelada de bloques de concreto – Método ReCiPe.....	89
5.2. Comparación por metro cuadrado de muro construido – Método IPCC 2013.....	90
5.3. Medidas de mejora en el proceso de producción de bloques.....	92
5.3.1. Bloques de concreto convencionales.....	92
5.3.2. Bloques de concreto reciclado.....	93
<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1. Conclusiones.....	94
6.2. Recomendaciones.....	97
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>98</b>



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Categorías de nivel de punto medio con sus respectivos factores de caracterización según el método de evaluación ReCiPe 2016.</i> .....	<b>33</b>
<b>Tabla 2</b> <i>Características físicas y mecánicas principales de los bloques de concreto convencional bajo análisis</i> .....	<b>45</b>
<b>Tabla 3</b> <i>Diseño de mezcla para los distintos tipos de bloques elaborados con concreto convencional</i> .....	<b>46</b>
<b>Tabla 4</b> <i>Características físicas y mecánicas principales de los bloques de concreto reciclado bajo análisis</i> .....	<b>46</b>
<b>Tabla 5</b> <i>Diseño de mezcla para los distintos tipos de bloques elaborados con concreto convencional</i> .....	<b>46</b>
<b>Tabla 6</b> <i>Huella de carbono de 1 kWh de la matriz energética peruana en el año 2019</i> ...	<b>50</b>
<b>Tabla 7</b> <i>Distribución de los espacios de la fábrica de producción de concreto convencional por área (metro cuadrado).</i> .....	<b>53</b>
<b>Tabla 8</b> <i>Características del cuarto de curado en la fábrica de producción de concreto convencional</i> .....	<b>54</b>
<b>Tabla 9</b> <i>Características físicas y mecánicas de la primera faja transportadora empleada en el proceso de mezclado en la elaboración del concreto convencional</i> .....	<b>55</b>
<b>Tabla 10</b> <i>Características físicas y mecánicas de la segunda faja transportadora empleada en el transporte desde la mezcladora hacia la vibro-compactadora</i> .....	<b>56</b>
<b>Tabla 11</b> <i>Características físicas y mecánicas de la segunda faja transportadora empleada en el traslado de los bloques de concreto convencional hacia el montacargas</i> .....	<b>56</b>
<b>Tabla 12</b> <i>Características físicas y mecánicas de la mezcladora empleada en el proceso de fabricación de bloques de concreto convencional</i> .....	<b>57</b>
<b>Tabla 13</b> <i>Características físicas y mecánicas de la vibro-compactadora empleada en el proceso de fabricación de bloques de concreto convencional</i> .....	<b>57</b>
<b>Tabla 14</b> <i>Características físicas y mecánicas del montacargas empleado en el proceso de fabricación de bloques de concreto convencional</i> .....	<b>58</b>
<b>Tabla 15</b> <i>Características físicas y mecánicas de la bomba de agua empleada en el proceso de curado del concreto</i> .....	<b>58</b>
<b>Tabla 16</b> <i>Características físicas y mecánicas del minicargador frontal empleado en el recojo de RCD</i> .....	<b>59</b>

<b>Tabla 17</b> <i>Características físicas y mecánicas del transporte empleado del lugar de construcción demolición hasta la fábrica de producción de bloques de concreto reciclado.</i>	<b>59</b>
<b>Tabla 18</b> <i>Tipo y cantidad de los materiales descartados en el proceso de segregación ..</i>	<b>600</b>
<b>Tabla 19</b> <i>Características físicas y mecánicas de la trituradora empleada en el proceso de producción de bloques de concreto reciclado .....</i>	<b>61</b>
<b>Tabla 20</b> <i>Características físicas y mecánicas de la faja transportadora que transporta el RCD desde la trituradora hasta el tamiz.....</i>	<b>61</b>
<b>Tabla 21</b> <i>Número de malla y material empleados en la tamizadora.....</i>	<b>62</b>
<b>Tabla 22</b> <i>Características físicas y mecánicas de la zaranda vibratoria utilizada en el proceso de tamizado de RCD.....</i>	<b>62</b>
<b>Tabla 23</b> <i>Características físicas y mecánicas de la faja transportadora en la movilización del RCD desde la zaranda hacia la mezcladora .....</i>	<b>62</b>
<b>Tabla 24</b> <i>Características físicas y mecánicas de la mezcladora de concreta empleada en la elaboración de bloques de concreto con agregado reciclado.....</i>	<b>63</b>
<b>Tabla 25</b> <i>Características físicas y mecánicas de la máquina bloquera empleada para el moldeado del bloque de concreto reciclado .....</i>	<b>63</b>
<b>Tabla 26</b> <i>Proceso unitario de la etapa de obtención de materiales para la producción de una tonelada de bloques de concreto convencional. ....</i>	<b>65</b>
<b>Tabla 27</b> <i>Proceso unitario de la etapa de transporte de materiales para la producción de bloques de concreto convencional.....</i>	<b>66</b>
<b>Tabla 28</b> <i>Proceso unitario de la etapa de mezclado y moldeado interno para la producción de bloques de concreto convencionales .....</i>	<b>67</b>
<b>Tabla 29</b> <i>Proceso unitario de la etapa de curado de bloques de concreto convencionales .....</i>	<b>68</b>
<b>Tabla 30</b> <i>Proceso unitario de la etapa de obtención de agregado reciclado.....</i>	<b>68</b>
<b>Tabla 31</b> <i>Proceso unitario de la etapa de transporte de materiales para la producción de bloques de concreto reciclado.....</i>	<b>69</b>
<b>Tabla 32</b> <i>Entradas unitarias para el tratamiento de RCD con el fin de convertir estos residuos en agregado reciclado .....</i>	<b>70</b>
<b>Tabla 33</b> <i>Proceso unitario de la etapa de mezclado de materiales para la producción de una tonelada de bloques de concreto con agregado reciclados .....</i>	<b>71</b>
<b>Tabla 34</b> <i>Proceso unitario para la etapa de moldeado de bloque de concreto reciclado .</i>	<b>71</b>
<b>Tabla 35</b> <i>Proceso unitario para la infraestructura de bloque de concreto reciclado.....</i>	<b>722</b>

<b>Tabla 36</b> <i>Emisiones generadas en las etapas de producción de bloques de concreto convencional.....</i>	<b>74</b>
<b>Tabla 37</b> <i>Emisiones generadas en la construcción de un metro cuadrado de muro no portante con bloques de concreto.....</i>	<b>74</b>
<b>Tabla 38</b> <i>Emisiones generadas en las etapas de producción de bloques de concreto reciclado .....</i>	<b>75</b>
<b>Tabla 39</b> <i>Emisiones generadas en la construcción de un metro cuadrado de muro no portante con bloques de concreto reciclado.....</i>	<b>76</b>
<b>Tabla 40</b> <i>Resultados obtenidos de la producción de una tonelada de BDC en las categorías de impacto de la metodología ReCiPe 2016.....</i>	<b>80</b>
<b>Tabla 41</b> <i>Resultados obtenidos de un metro cuadrado de muro construido con BDC en las categorías de impacto de la metodología ReCiPe 2016. ....</i>	<b>81</b>
<b>Tabla 42</b> <i>Resultados obtenidos de la producción de una tonelada de BDCR en las categorías de impacto de la metodología ReCiPe 2016.....</i>	<b>84</b>
<b>Tabla 43</b> <i>Resultados obtenidos de un metro cuadrado de muro construido con BDCR en las categorías de impacto de la metodología ReCiPe 2016. ....</i>	<b>85</b>
<b>Tabla 44</b> <i>Comparación de los resultados obtenidos en estudios que analizan mezclas de concreto .....</i>	<b>88</b>
<b>Tabla 45</b> <i>Emisiones generadas en la construcción de un metro cuadrado de muro no portante elaborado con distintos tipos de bloques de concreto.....</i>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> eq para cada tipo de material en ambos escenarios.....	16
<b>Figura 2.</b> Aporte de de kgCO <sub>2</sub> eq para los tres escenarios.....	21
<b>Figura 3.</b> Fases del ACV.....	25
<b>Figura 4.</b> Límites del sistema del ACV.....	26
<b>Figura 5.</b> Esquema de elementos obligatorios y optativos.....	29
<b>Figura 6.</b> Categoría de impactos en ReCiPe 2016.....	32
<b>Figura 7.</b> Interfaz de creación de elemento de Sima Pro.....	34
<b>Figura 8.</b> Procesos involucrados en la elaboración de bloques de concreto reciclado.....	36
<b>Figura 9.</b> Procesos involucrados en la elaboración de bloques de concreto convencionales.....	37
<b>Figura 10.</b> Bloque de concreto convencional.....	38
<b>Figura 11.</b> Ejemplo de las preguntas extras enviadas M.P. RECICLA con el fin de absolver algunas dudas.....	43
<b>Figura 12.</b> Ejemplo de la hoja de cálculo utilizada para hallar el consumo eléctrico por etapas y según la maquinaria usada de acuerdo a las respuestas brindadas en el formulario.....	44
<b>Figura 13.</b> Maquinaria empleada en el proceso de mezclado, tamizado y moldeado en la fábrica de M.P. RECICLA. Foto tomada en la visita del equipo de investigación a la fábrica.....	44
<b>Figura 14.</b> Introducción de la materia prima para la elaboración de bloques de concreto convencionales.....	48
<b>Figura 15.</b> Modelado de la entrada de RCD en SimaPro.....	48
<b>Figura 16.</b> Modelado del proceso de obtención de materiales en SimaPro para la producción de bloques de concreto reciclado.....	49
<b>Figura 17.</b> Matriz energética peruana 2019-2020 al 100%.....	50
<b>Figura 18.</b> Esbozo de distribución de áreas dentro de la fábrica de concreto convencional.....	52
<b>Figura 19.</b> Distribución porcentual con mayor detalle de las emisiones generadas en el proceso de producción de bloques de concreto convencional.....	74
<b>Figura 20.</b> Distribución porcentual con mayor detalle de las emisiones generadas en el proceso de producción de bloques de concreto convencional.....	76

<b>Figura 21.</b> Resultados del concreto convencional para las categorías evaluadas en el método ReCiPe MidPoint (H).....	79
<b>Figura 22.</b> Resultados del concreto reciclado para las categorías evaluadas en el método ReCiPe MidPoint (H).....	83
<b>Figura 23.</b> Comparación de CO <sub>2</sub> eq generado por tonelada de producción de distintos tipos de agregados bajo la metodología IPCC 2013 (100a) .....	86
<b>Figura 24.</b> Comparación de CO <sub>2</sub> eq generado por tonelada de producción de distintos tipos de agregados bajo la metodología IPCC 2013 (100a) .....	90
<b>Figura 25.</b> Comparación de CO <sub>2</sub> eq generado por m <sup>2</sup> de muros empleando distintos tipos de elementos de mampostería bajo la metodología IPCC 2013 (100a) .....	92
<b>Figura 26.</b> Comparación de CO <sub>2</sub> eq generado por m <sup>2</sup> de muros de con distintos bloques de concreto bajo la metodología IPCC 2013 (100a) .....	92



## CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

### 1.1. Contexto del sector construcción en Perú

El aumento exponencial de la población mundial desde 1950 aunado al crecimiento de las urbes ha generado una mayor demanda de edificaciones unifamiliares y multifamiliares a nivel mundial (Moltesen & Bjørn, 2018). En Perú, el sector construcción ha mantenido un constante crecimiento, de manera que en el 2019 este aumentó en 1.9% respecto al año anterior y representó el 5.1% del total del PBI del país (INEI, 2020). Asimismo, tras la caída del PBI causado por las restricciones impuestas por la pandemia en el 2020, el aumento de este sector durante el año 2021 fue de 13.3% (INEI, 2023). Si bien es cierto, el crecimiento de este sector aporta en el desarrollo económico dentro del país y en la generación de empleos, su presencia también implica impactos ambientales negativos entre los que destacan la demanda energética y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

Según un reporte elaborado por la Agencia Internacional de Energía, la construcción de edificios y su posterior uso representan el 33% de la energía empleada mundialmente (IEA, 2018) mientras que el sector construcción y edificaciones aporta el 30% de emisiones de GEI generadas mundialmente (UNEP, 2009), por tanto, debido a las contribuciones energéticas y de emisiones, se considera a esta industria como una de las más contaminantes, por lo que es necesario la implementación de medidas que aminoren su carga ambiental.

De las distintas fases inmersas en el ciclo de vida de un edificio, el uso es aquel que genera los mayores impactos ambientales debido a la quema de combustible fósil para cubrir el consumo de energía proveniente de sistemas HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), iluminación, uso de aparatos eléctricos, entre otros. En tal sentido, se han desarrollado investigaciones con el fin de aminorar esta demanda a través de la

implementación de nuevas tecnologías ahorrativas que permiten obtener una disminución de hasta el 50% de energía en el uso del edificio (Arredondo et al., 2011) lo que ha conllevado a desarrollar una mayor eficiencia energética que logra la reducción del consumo de energía y recursos en esta etapa (Anand & Amor, 2017), generándose una redistribución que aumenta la relevancia de la etapa inicial del edificio, que abarca las etapas de obtención de materiales, transporte y construcción (Mao, Shen, Shen, & Tang, 2013).

Durante esta primera fase, se da lugar a un considerable consumo de recursos y energía. Tal es así, que la materia prima utilizada para la elaboración de productos del sector construcción consume a nivel mundial un aproximado de 40 billones de toneladas al año de recursos (UNEP, 2014), entre los cuales destacan el uso del concreto, cemento, acero y unidades de albañilería. En Perú, el uso de recursos para la industria de la construcción también es considerable. Por ejemplo, en el año 2015, la producción del hormigón alcanzó más 7 millones de toneladas, cantidad equivalente al 13% de la extracción no metálica nacional (MINEM, 2016). Esta alta tasa de producción se debe principalmente a la demanda del producto para su uso como material estructural y elemento de mampostería.

Los elementos de mampostería se encuentran conformados principalmente por ladrillos de arcilla, bloques de concreto y bloques sílico calcáreos. De acuerdo a un informe realizado por el INEI (2018) basado en el censo nacional del 2017, en el 56.4% de viviendas peruanas predominan la presencia de muros exteriores elaborados con alguno de esos tres materiales y se estima una tasa de crecimiento anual de 3.7%. Por tanto, la cuantificación de las cargas ambientales incorporadas en estos productos es relevante para el cálculo del impacto total de una edificación.

En consecuencia, la investigación acerca de los impactos ambientales generados por los elementos de mampostería es necesaria para la incorporación de prácticas y el



surgimiento de nuevos materiales que brinden la posibilidad de reducir la cantidad de energía y recursos empleados en esta partida, lo que, a su vez, disminuiría la contaminación asociada a los materiales empleados en la construcción de edificaciones. Asimismo, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) representa una metodología adecuada para la gestión de los aspectos medioambientales propios de este estudio debido a que evalúa los impactos ambientales considerando los insumos materiales y energéticos del sistema bajo estudio y sus consecuencias en el ámbito ecológico y en la salud humana en cada etapa de la vida útil (Rezaei et al., 2019).

## **1.2. Justificación**

Actualmente, el cambio climático es uno de los principales problemas ante los cuales se enfrentan los seres humanos (Roth, 2019). Por ello, todos los países se han sumado en una lucha que permita el control de este fenómeno creado por el hombre, a través del establecimiento de medidas como la reducción de GEI y la transición hacia una matriz energética donde predominen las energías renovables. Estas son algunas de las principales disposiciones pactadas en el Acuerdo de París y fueron instauradas con el fin para mantener el incremento de temperatura por debajo de 2°C (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2017). Perú, como país firmante de este acuerdo, mantiene el compromiso de cumplir con reducir en 30% las emisiones de GEI hasta el año 2030 más un 10% adicional condicionado a la cooperación internacional (MINAM, 2022).

Los elementos de mampostería componen una de las partidas, dentro de los materiales usados, más significantes en la construcción de edificaciones (Hendry, 2001). Su producción y uso se encuentran dentro de la industria de manufactura y construcción, la cual aportó el 8.23% del total de emisiones de GEI generadas durante el año 2014 (MINAM, 2019). Sin embargo, a pesar de la relevancia de los impactos ambientales generados por estos

elementos, la investigación en el país acerca del consumo energético y de recursos utilizados para su producción empleando la herramienta ACV es reciente. Por tal motivo y considerando el cumplimiento en la disminución de GEI pactada, la cuantificación de las cargas ambientales que representa el uso de estos elementos es una tarea importante para el planteamiento de mejoras dentro de su producción y la comparación de ventajas y desventajas ambientales que suponen el uso de los distintos elementos de mampostería.

Todo ello justifica la necesidad de profundizar en los conocimientos acerca de los impactos ambientales generados a lo largo del ciclo de vida de los principales elementos de mampostería, así como la búsqueda de nuevos materiales no convencionales que posean una menor carga ambiental, en aras de una reducción efectiva de las emisiones dentro de la industria de construcción y edificación.

### **1.3. Objetivos e hipótesis**

#### **1.3.1. Objetivos**

##### **Objetivo general**

Realizar un análisis comparativo, usando ACV, de 1 m<sup>2</sup> de muro no portante preparado para la aplicación de la primera capa de pintura construido con bloques de concreto convencionales (BDC), bloques de concreto con agregado reciclado (BDCR), ladrillos King Kong caravista (KKC) y ladrillos pandereta lisa (PL)

##### **Objetivos específicos**

- Evaluar los impactos ambientales generados en la elaboración de bloques de concreto y bloques de concreto reciclado bajo la metodología de ACV.

- Elaborar el inventario de ciclo de vida (ICV) del bloque de concreto convencional y el bloque de concreto reciclado para realizar la evaluación ambiental según las metodologías IPCC y ReCiPe.
- Identificar y evaluar las etapas de ciclo de vida que generen mayor impacto ambiental para cada uno de los bloques para el posterior planteamiento de mejoras.

### **1.3.2. Hipótesis**

#### **Hipótesis general**

La construcción de un metro cuadrado de muro no portante preparado para la aplicación de capas de pintura, elaborado con bloques de concreto reciclado genera menores impactos ambientales que la construcción de un metro cuadrado del mismo tipo de muro con otros elementos de mampostería.

#### **Hipótesis específicas**

- Los resultados de la evaluación ambiental bajo la aplicación de la herramienta de ACV demuestran que una tonelada de bloques de concreto con agregado reciclado genera menos impactos ambientales que los generados por una tonelada de bloques de concreto convencional.
- La obtención de cemento es la fase que aporta mayor contribución a los impactos ambientales generadas durante el ciclo de vida tanto de un bloque de concreto convencional como de un bloque de concreto reciclado.
- El transporte de materias primas y el consumo de energía en la producción de ambos tipos de bloques generan impactos ambientales relevantes en el estudio.

## CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Evolución del ACV como herramienta ambiental

El ACV es una metodología empleada para evaluar el impacto integrado que cuantifica las cargas ambientales asociadas al ciclo de vida de un producto (Sala et al., 2016). Para ello, se registra el consumo de energía y recursos utilizados durante la extracción de materias primas, el transporte, la manufactura, el uso y la disposición final del producto (Vieira et al., 2016). A partir de los resultados obtenidos a través de esta herramienta, se pueden identificar los materiales o procesos con mayor contribución de impactos, lo que habilita el planteamiento de escenarios de mejora bajo un enfoque ambiental que busque la disminución de los impactos (Rashid & Yusoff, 2015). Asimismo, permite la comparación del desempeño ambiental de distintos productos que desempeñan una misma función, atributo esencial para la toma de decisiones.

Los primeros precedentes del enfoque de ACV se remontan a 1960, cuando la investigación se centraba en cuestiones como los requisitos energéticos en la elaboración de productos y materiales (Ibrahim, 2011). Desde entonces, ha ido desarrollándose de acuerdo con el surgimiento de problemáticas mundiales como la escasez de fuentes de recursos y energía, la contaminación ambiental, la gestión de residuos y el cambio climático (Jacquemin et al., 2012). Por ello, se han ido adoptando progresivamente enfoques cada vez más globales y regionales que han permitido a la herramienta obtener una perspectiva más holística.

La primera publicación relacionada con esta herramienta se da en 1963, cuando se presenta una investigación sobre la demanda energética para la producción de químicos en la Conferencia Mundial de Energía (Hauschild et al., 2018). Posteriormente, en 1969, se presenta el estudio elaborado por The Coca Cola Company, que emplea un enfoque de ciclo

de vida para la comparación de distintos envases de bebidas de acuerdo a las emisiones que genera su producción (Scientific Applications International Corporation, 2006). Esta investigación fue la primera de su especie y sentó las bases para el desarrollo de los actuales análisis de inventarios de ciclo de vida.

En la década de los setenta, las investigaciones siguieron limitadas al estudio de la eficiencia y consumo de energía en la cadena de producción de bienes debido a la crisis del petróleo (Jensen et al., 2018) pues el principal objetivo era desarrollar alternativas de ahorro dentro de estos procesos que permitieran alivianar los efectos de la crisis. Posteriormente, en los años ochenta, cuando el problema generado por los residuos sólidos se convirtió en una preocupación mundial, el análisis de ciclo de vida fue empleado como herramienta para analizar los impactos ambientales asociados a estos desechos (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2006). Como consecuencia de las investigaciones, en este período se da un paso importante para la formación de la metodología ACV actual, ya que evoluciona y pasa de ser una herramienta enfocada en el desarrollo de inventario de emisiones ambientales a ser una herramienta que evalúa impactos ambientales en los procesos de producción (Vieira et al., 2016).

La época de los 90 resalta por la aparición de los hitos más relevantes en el desarrollo de la metodología tanto de forma tecnológica como conceptual. Para comenzar, en 1990 el SETAC (Sociedad de Toxicología Ambiental y Química), en cooperación con el gobierno estadounidense, definieron el término análisis de ciclo de vida como una metodología para la evaluación de los impactos ambientales generados por un bien o servicio (Fava et al., 2014). Esta es la primera referencia registrada acerca de su definición y fue publicada en el reporte “A Technical Framework for Life-Cycle Assessment” (SETAC, 1991), el cual también planteó una estructura general para el ACV, por lo que fue de utilidad en el proceso de coordinación de los métodos que surgían progresivamente.

Más adelante, la proliferación de métodos de evaluación de impacto y datos en el inventario de ciclo de vida, incitaron la creación de herramientas tecnológicas que puedan procesar toda la información. Por ello, entre 1990 y 1992, se da el lanzamiento de las primeras versiones de GaBi y SimaPro (M. Hauschild et al., 2018), dos de los softwares que permitieron el ordenamiento de la información durante esa década y que, actualmente, se posicionan como los más utilizados en el mundo.

Mientras tanto, en Europa la búsqueda de una metodología que imponga un ACV estándar en el continente impulsó la creación de un informe de evaluación ambiental del ciclo de vida de los productos liderado por el Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden en Países Bajos (CML, por sus siglas en neerlandés) en el año 1992. Este informe consta de dos partes; en la primera se establece la guía para la aplicación del ACV y, en la segunda, se justifica las elecciones tomadas para la elaboración de la guía (Guinée et al., 1992). El método de evaluación de impacto que se desarrolló en el informe es conocido como el CML 92, el cual ha sido señalado por expertos europeos como uno de los más relevantes para lograr un gran avance científico en el desarrollo del ACV para productos (Gabathuler, 1997), debido a que fue el primero en cubrir de forma completa una categoría de impactos, cualidad que se hizo extensiva a los demás métodos y que se mantiene hasta el día de hoy.

Por último, a finales de esta década se desarrolla el primer estándar internacional para la aplicación del ACV, paso que lo llevó a lograr mayor relevancia a nivel mundial y aceptación en la comunidad científica. La normativa fue publicada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) en 1997, como parte de un conjunto de normas bajo la serie 14000, la cual se enfocaba en sistemas de gestión ambiental. Dentro de esta, la norma ISO 14040 definió a la herramienta y estandarizó una estructura de trabajo sistematizada que proporcionaba orientación acerca de las fases que lo componen, su marco metodológico y

las revisiones críticas necesarias para su aplicación (You & Wang, 2019). No obstante, posteriormente, también se presentaron la ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043, en las cuales se explicaba detalladamente los aspectos a tomar en cuenta en cada una de las fases.

Posteriormente, en el año 2001, la Comisión Europea (EC, por sus siglas en inglés) desarrolló la Política Integrada de Producto (Sala et al., 2021). Esta fue una importante pieza para la posterior implementación de políticas basadas en el ACV, de modo que reconozcan a esta metodología como una herramienta que contribuye al desarrollo sostenible y la toma de decisiones basado en la ciencia. Asimismo, como respaldo se publicaron estudios acerca del estado del arte del diseño de productos sostenibles que han empleado el ACV como método para lograr una mayor eco-eficiencia. En paralelo, durante este mismo año se creó el Centro Americano para la Evaluación de Ciclo de Vida (ACLCA por sus siglas en inglés) para fortalecer la difusión del uso de esta herramienta (Chacón, 2008) a través de conferencias, talleres y proyectos, lo que generó el aumento de los estudios que aplicaban la metodología.

En vista de la popularización de la herramienta y su crecimiento desordenado, en el 2002, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) y el SETAC, crearon la Iniciativa de Ciclo de Vida. Su principal objetivo fue el de desarrollar y difundir herramientas que permitan evaluar las oportunidades, riesgos y beneficios asociados a un producto o servicio durante su ciclo de vida (Fava, 2002) que sirva para lograr patrones de consumo y producción más sostenibles. Para lograr esto, se planteó desarrollar un marco internacional de gestión del ciclo de vida que incluya las mejores bases de datos de los métodos de evaluación de ciclo de vida y de inventarios disponibles.

A medida que crecía el interés y uso por esta herramienta, se iba generando mayor demanda en la calidad, confianza y consistencia de la información disponible del ACV. Sin

embargo, eran pocos los inventarios que cumplían con estos requisitos y es por esta necesidad que se crea la primera base de datos de *ecoinvent* en el año 2003 (Althaus et al., 2007). El inventario fue evolucionando conforme al surgimiento de nuevos datos, por lo que fueron surgiendo versiones posteriores, como la segunda en el año 2007. Actualmente, *ecoinvent* se encuentra en su versión 3.9.1.

A mediados de la década de los 2000, la Comisión Europea desarrolló un manual, el Sistema Internacional de Datos de referencia del Ciclo de Vida (ILCD, por sus siglas en inglés) con el objetivo de proporcionar orientación y estándares para lograr una mayor coherencia y calidad en la aplicación del ACV (J. B. Guinée et al., 2011) a través de la publicación de bases de datos de inventarios de ciclo de vida y protocolos técnicos (Devaki & Shanmugapriya, 2022). En paralelo, la EC también logró establecer un marco de desarrollo para el Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA), el cual amplía el alcance principal del ACV para cubrir las tres dimensiones de la sostenibilidad; personas, planeta y prosperidad (J. B. Guinée et al., 2011).

En Latinoamérica, el principal precedente se remonta al año 2005 en Costa Rica, cuando se realiza la primera Conferencia Internacional de Ciclo de Vida en Latinoamérica (CILCA). Desde ese entonces, se ha repetido este evento de manera bianual y ha tenido como sedes distintos países, entre los cuales figura Perú como anfitrión en el 2015 y, Costa Rica como última sede de CILCA en formato presencial (Tecnológico de Costa Rica, 2019) y Argentina como la última sede de CILCA en modo virtual en el año 2021. La creación de este evento incentivó la divulgación de la metodología a lo largo de América Latina, lo que generó una mayor cantidad de estudios de ACV de productos o servicios, que permitieron incrementar la base de datos e inventario a nivel mundial. Dentro de los países con mayor cantidad de investigaciones realizadas en las cuales se emplea esta metodología, resaltan Colombia, Chile y Brasil. Una de las más destacadas es el estudio comparativo de los



impactos ambientales del cobre en las plantas de fundición de Chile y Brasil, investigación que logró determinar los principales parámetros al modelar un ACV en la producción de metales suramericana y crear un modelo de la evaluación de impacto de ciclo de vida en el sector minero (Chacón, 2008).

Investigaciones más recientes analizan el desempeño ambiental de infraestructuras privados y públicos. Tal es el caso de la investigación llevada a cabo por Hernández-Padilla et al. (2017) quienes, bajo la metodología de ACV, evalúan ambientalmente dos tecnologías implementadas en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): un tipo de planta con aireación extendida (EA) y una PTAR con un sistema de estanques (PS). Los resultados sirvieron para identificar que la instalación de PTAR con sistema de tanques es más favorable en países donde el mix energético está constituido en un rango de 43 a 80%, mientras que aquellos países cuya matriz está compuesta en un 60% por hidroeléctricas favorecen el uso de tratamientos de aguas residuales con EA. Por otro lado, Ferronato et al. (2021) realizaron una investigación referente a la variabilidad y confiabilidad de los resultados en estudios que apliquen ACV en países en desarrollo, por lo que se explora este tema a través del ACV de los residuos sólidos municipales en La Paz, Bolivia. Los resultados reportan que los parámetros más influyentes en los impactos ambientales son la eficiencia en la recolección de gases de vertedero, el uso de bolsas de plástico desechable, distancias de transporte y la tasa de reciclaje de materiales. Asimismo, se obtiene que la categoría de impacto más variable es la de cambio climático, sin embargo, se resalta la relevancia de la obtención de datos primarios debido a que incrementa la variabilidad de valores de los parámetros.

Durante el 2005, en Perú, se creó la Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN) en el Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú con el apoyo de la Iniciativa de Ciclo de Vida del UNEP y el SETAC, cuyo objetivo

es el de generar conocimiento en el área de ingeniería ambiental y la mejora de la docencia en temas ambientales y de desarrollo sostenible (Red Peruana Ciclo de Vida y Ecología Industrial, s/f). Desde entonces, la red de investigación ha desarrollado artículos que emplean la metodología ACV en distintos sectores. Por ejemplo, en el sector agricultura se han desarrollado investigaciones que analizan los potenciales impactos ambientales asociados al cultivo de espárragos (Vázquez-Rowe et al., 2016) o que evalúan determinados impactos ambientales y la huella hídrica del cultivo de uvas para la producción de bebidas alcohólicas (Vázquez-Rowe et al., 2017), ambos en la costa árida del Perú. Por otro lado, PELCAN ha participado en proyectos de investigación internacionales tales como NEPTUNUS, cuyo objetivo es promover el desarrollo sostenible del sector pesquero en el área atlántica (PELCAN, 2022a), así como el proyecto IKI (*International Climate Initiative*) impulsado por el gobierno alemán, que ha tenido como resultado la vinculación de la base de datos de Perú LCA a la data global de ACV, la elaboración de inventarios de ciclo de vida de productos como concha de abanico, lodos de harinera de pescado, ladrillos de arcilla, bloques de concreto con agregado reciclados, entre otros y la redacción de reportes de las diversas actividades de investigación realizados (PELCAN, 2022b).

En el año 2006, se generan cambios en la normativa ISO para el análisis de ciclo de vida. Estos consisten en la eliminación de los ISOS desde el 14041, 14042 hasta el 14043 para implementar un nuevo, el ISO 14044, que junto con el ISO 14040 establecen una guía y un marco metodológico sobre el cual aplicar el ACV. Este cambio se ha mantenido vigente hasta la actualidad, por lo que también es usado en la presente investigación.

En la última década, en los estudios de ACV dentro del sector construcción está surgiendo la integración de este método con las herramientas de *Building Information Modeling* (BIM), con el fin de obtener un enfoque más holístico y sostenible (Díaz &

Álvarez, 2014). Esto indica una nueva evolución que busca obtener una aplicación más eficiente y con mayor cantidad de información.

Actualmente, el desarrollo del ACV como herramienta de evaluación ambiental ha alcanzado un buen nivel tanto tecnológica como conceptualmente, sin embargo, la escasez de su aplicación en países en desarrollo hace que sea necesaria una mayor investigación que permita expandir la base de datos disponible a nivel mundial.

## **2.2. Aplicación del ACV en los materiales de construcción en el mundo**

Durante el ciclo de vida de una edificación el uso representa la etapa con mayor contribución de emisiones de GEI y consumo de energía, la implementación exitosa de estrategias que disminuyan los impactos ambientales en esta fase ha deslizado el enfoque hacia las contribuciones en otras etapas del ciclo de vida del edificio, la fase del pre-uso es una de ellas (Rezaei et al., 2019). Por tal motivo, a nivel global se han desarrollado estudios que evalúan el desempeño ambiental del edificio en su totalidad, integrando los sistemas y procesos que lo componen, dentro del cual resaltan los materiales empleados en su construcción.

Por un lado, existen estudios recientes que realizan el ACV de los materiales en sus sistemas de construcción para posteriormente identificar aquellos que tienen mayores impactos y comparar los impactos ambientales e identificar. Uno de ellos es el de Zhang et al. (2019), quienes estudiaron el consumo energético y las emisiones de carbono provenientes del sector construcción en China. Para los cálculos de energía y las emisiones de GEI generadas, la investigación analizó la demanda energética y las emisiones generadas en cuatro fases distintas del ciclo de vida de materiales; la extracción y transporte de la materia prima, la fabricación del material de construcción a partir de la materia prima, el transporte del material salido de la fábrica hasta el lugar de construcción y, por último, la

construcción del edificio. Los resultados demostraron que la fabricación de materiales consume la mayor parte de energía entre las cuatro fases analizadas. Adicionalmente, se evidenció que los elementos con una mayor demanda energética en su producción son el cemento y el acero con 51% y 33% del total de energía demanda por los materiales de construcción, respectivamente. Asimismo, el cemento resultó ser el material que genera más emisiones de GEI durante su producción dado que abarca el 53% del total generado en la manufactura de materiales de construcción.

En esa línea, un estudio iraní, elaborado por Pakdel et al. (2021), analiza la energía incorporada y las emisiones de GEI generados en la construcción de una vivienda rústica la cual empleó técnicas y materiales tradicionales propios del lugar con el objetivo de compararla con el desempeño ambiental de una edificación convencional

Para esto, se realiza el ACV de dos distintos tipos de estructuras. Uno de ellos es una edificación en Yazd, Irán, el cual es de un solo nivel y tiene una extensión de 66m<sup>2</sup> que ha sido construida con materiales nativos (i.e., adobe, barro y paja) sin sistemas de ventilación ni calefacción. La segunda es un colegio de dos pisos construido de forma convencional con estructuras de concreto armado y muros de ladrillos y vidrios aislantes.

El límite del sistema analiza la energía incorporada a los materiales y la etapa de operación y la unidad funcional adoptada en el estudio fue un metro cuadrado. Los resultados indican que la energía incorporada en las construcciones convencionales es de 5.09 GJ/m<sup>2</sup> mientras que el carbono incorporado es de 420 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>. Por su parte, la construcción del colegio obtiene valores de 2.86 GJ/m<sup>2</sup> y 220 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, respectivamente. Con estos resultados, se concluye que la energía consumida y las emisiones generadas en una vivienda tradicional es menor en comparación a una edificación construida de forma convencional. Además, en esta última edificación, los ladrillos, el agregado grueso y el cemento son los

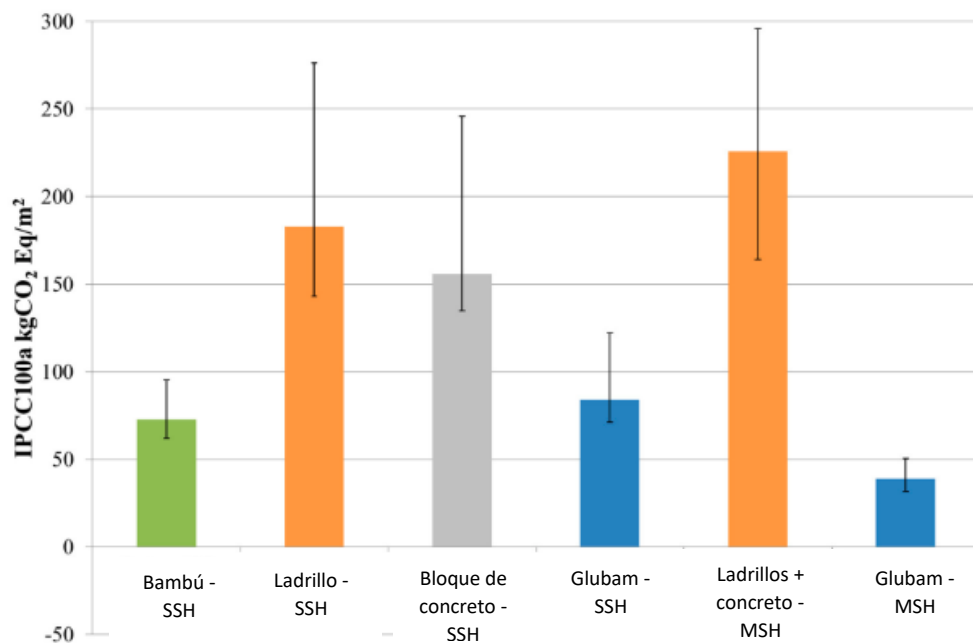
mayores consumidores de energía con porcentajes del 65%, 14% y 7% respectivamente. La investigación concluye que el impacto de la energía incorporada a través del uso de materiales representa aquella con mayor participación en el tipo de vivienda tradicional.

Como se menciona en estudios anteriores, los impactos ambientales ligados a la etapa de obtención de materiales y construcción corresponden en su mayoría a la producción del cemento. Por ello, el artículo desarrollado por Pierobon et al. (2019) busca analizar los impactos ambientales de materiales distintos al concreto, por lo que centra su investigación en el análisis ambiental de la madera laminada cruzada (CLT por sus siglas en inglés), un material alternativo de construcción que consta de varias capas de tablas de madera que se apilan y forman un panel sólido. Esta disposición genera un producto más isotrópico que la madera convencional, lo que lo posiciona como un componente estructural lineal en construcciones. El estudio compara el desempeño ambiental de edificios de oficina con un sistema estructural de CLT en la ciudad de Pacific Northwest, la cual fue la primera en Estados Unidos en adoptar este material en edificios de áreas urbanas como opción sostenible, con oficinas que poseen un sistema estructural de concreto armado. Respecto al desempeño ambiental de la estructura de concreto, los resultados coinciden con anteriores estudios en los cuales el sistema estructural de concreto reforzado representa el mayor contribuyente de emisiones con un 45% del total. En las categorías de contribución de smog y eutrofización, mantiene la tendencia con un aporte de 37% y 43% de su respectivo total. Asimismo, los resultados indican que el uso de CLT reduce en aproximadamente 26.5% el potencial de calentamiento global en comparación con una estructura que emplea concreto.

Por otro lado, en vista de la alta demanda de energía y recursos asociadas a la producción de materiales como el cemento, acero y agregados, se han realizado estudios que evalúan el desempeño ambiental de la producción de materiales alternativos que representen opción más sostenible en el proceso constructivo de una edificación.

Edwin Escamilla (2018) junto a un grupo de investigadores analizaron el bambú laminado con pegamento (glubam) como una alternativa baja en carbono que, con una gestión adecuada, pueden generar una producción menos contaminante por un período largo de tiempo. El estudio se centra en la evaluación de impacto ambiental bajo la metodología IPCC 2013 de cuatro materiales empleados en el sistema estructural de la construcción: el bambú, los ladrillos, bloques de hormigón y de glubam con el fin de determinar los potenciales beneficios de sus respectivos usos.

Para el análisis se emplearon dos modelos: el primero es una vivienda de un solo piso con un área de 18m<sup>2</sup> (aquí se analizarán cuatro materiales como elementos estructurales: ladrillo, bambú, bloques de concreto hueco y glubam), mientras que el segundo es una edificación de cinco pisos con 1100 m<sup>2</sup> de área, en la cual se modelaron los materiales a base de minerales (ladrillos, concreto y acero) y de glubam como material estructural.



**Figura 1.** Emisiones de CO<sub>2</sub>eq por metro cuadrado de muro. SSH: edificios de un solo piso. MSH: edificio de varios niveles de piso.

Fuente: Adaptado de Escamilla et al. (2018)

Los resultados, colocados en la Figura 1, muestran que el uso de concreto y bloques de hormigón son los mayores contribuyentes de emisiones en las construcciones estudiadas, lo que evidencia los beneficios ambientales del uso de glubam ya que genera 39 CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, cifra que representa el menor aporte en comparación con los otros materiales, incluyendo el bambú. Adicionalmente, los bloques, el acero de refuerzo y el transporte de materiales son los principales emisores de GEI en las edificaciones analizadas. En tal sentido, al examinar el desempeño ambiental de las construcciones, se observa que conforme aumenta la distancia de transporte de materiales, las emisiones generadas aumentan, por lo que el autor recomienda la compra de materiales locales.

Por su parte, la investigación liderada por Christoforou et al. (2016), se centra en realizar el análisis de vida de los bloques de adobe basados en los principios descritos en el ISO 14040 empleando el software GaBi para modelar el proceso de producción de adobe en Cyprus e investigar su comportamiento ambiental. Para esto, se define la unidad funcional como un kg de ladrillo de adobe y se considera la metodología CML para el análisis de impacto. El escenario en el cual se contempla una producción en sitio empleando tierra disponible en terreno local y el transporte de paja; la extracción de tierra demanda mayor cantidad de energía en el proceso producción seguido por el mezclado de materiales para la obtención del adoquín. En los escenarios donde se considera un lugar de producción más lejano, el transporte del producto hacia el lugar de demanda es la fase que consume mayor energía (más del 50% del total).

Los escenarios adicionales donde se utiliza aserrín en lugar de paja, la extracción de tierra tuvo la mayor demanda de energía, seguida por el proceso de mezclado. Sin embargo, si se compara el uso de paja y aserrín en términos de consumo de energía, el transporte de aserrín presenta mayor consumo al de la paja. Asimismo, al comparar la energía para la producción de un m<sup>3</sup> de bloque de adobe con paja con uno que utiliza aserrín, la energía

incorporada en el proceso de producción es de  $0.262 \text{ GJ/m}^3$  y  $0.265 \text{ GJ/m}^3$  respectivamente, lo que demuestra que el uso de adobes que emplearon paja en su producción representa una alternativa más sostenible.

En las dos últimas investigaciones se ha evidenciado de manera contundente el impacto ambiental considerable que surge del transporte de materiales a largas distancias durante su producción. A partir de estos hallazgos, se ha destacado que reducir esta actividad mediante el uso de materiales locales puede tener un efecto significativo en la disminución de los impactos ambientales.

Por último, un estudio realizado en Europa liderado por Farina et al. (2020) analiza el empleo de agregado proveniente de residuos de demolición y concreto (RCD) para la elaboración de concreto con el fin de obtener un material cementante con bajos impactos ambientales. Para esto, se emplea un enfoque ACV de la cuna a la tumba y se emplea una unidad funcional de  $1 \text{ m}^3$  concreto con un peso específico de  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Los límites del sistema incluyen la extracción, energía consumida en el proceso, transporte de materias primas, mezclado, transporte, la colocación de la mezcla y finalmente el transporte de residuos durante el fin de vida.

Lo notable del estudio es la consideración de distintos escenarios en la producción del concreto reciclado. En primer lugar, se manejan distintos porcentajes de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado (10%, 40%, 80% y 100%). En segundo lugar, el estudio se han incluido distintos escenarios de fin de vida, dentro del cual uno incluye la disposición en un vertedero mientras que las otras opciones consideran un porcentaje de reciclaje de 85%. Por último, se consideran distancias de transporte para la disposición final hacia vertederos de 30, 40, 50, 60 y 150 km. En suma, el estudio analiza 4 diferentes mezclas con 6 escenarios de fin de vida, lo que hace un total de 24 escenarios analizados, los cuales



serán analizados con eco – indicador de SimaPro y contempla 11 categorías de impacto dividido en 3 categorías de daños: la primera, de salud humana, la segunda, de agotamiento de recursos y la última, de calidad del ecosistema.

El escenario con mayor contaminación fue aquel con el material dispuesto totalmente en el vertedero. Por su parte, al comparar los resultados de las categorías analizadas, se obtuvo que el concreto que empleó agregado natural presenta mayores valores en todos los escenarios, mientras que para las mezclas de agregado reciclado se obtienen valores menores conforme aumenta la presencia de este material en la mezcla. Por último, en el caso de transporte, se establece una relación proporcional entre la distancia recorrida y la generación de emisiones, lo que mantiene la tendencia encontrada en anteriores estudios.

### **2.3. Aplicación de ACV en materiales de construcción en el Perú**

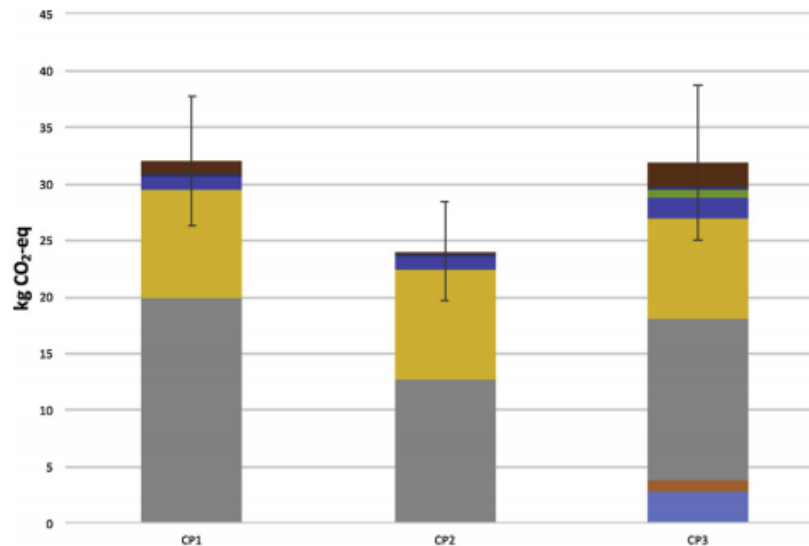
En el Perú, los estudios de aplicación de ACV en el sector construcción han ido en aumento, no obstante, las investigaciones acerca de materiales de construcción aún son escasas. Uno de ellos, es el estudio de San Jerónimo elaborado en el marco del “Programa de Eficiencia Energético en Ladrilleras Artesanales de América Latina para mitigar el cambio climático – EELA” desarrollado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) encargado a PELCAN (PUCP, 2013). Esta investigación tiene como objetivo cuantificar y evaluar las emisiones de GEI en el ciclo de vida de los ladrillos artesanales, ladrillos mecanizados, y bloques de concreto para que los resultados sean comparados. Se consideró como unidad funcional un metro cuadrado ( $1 \text{ m}^2$ ) de muro no portante, lo cual servirá para comparar 3 escenarios: la producción de ladrillos artesanales, la producción de ladrillos mecánicos y la producción de bloques de concreto.

Con relación a las emisiones de  $\text{CO}_2\text{eq}$ , la obtención de un ladrillo mecanizado genera un 36% más de emisiones que un ladrillo artesanal. Sin embargo, la producción de

un bloque de concreto impacta un 175% más que un ladrillo artesanal y 102% más que un ladrillo mecanizado debido al aumento en el consumo de cemento. Respecto a la comparación de unidades funcionales de los 3 productos, 1 m<sup>2</sup> de pared construida con ladrillo artesanal impacta el doble que 1 m<sup>2</sup> de pared construida con ladrillos mecanizados y un 50% más que 1 m<sup>2</sup> de pared construida con bloques de concreto. Entonces, gracias al estudio podemos observar los beneficios ambientales que genera la producción de materiales empleando una producción mecanizada.

A su vez, Vázquez et al. (2019), estudiaron los impactos ambientales en la producción del cemento Portland en las principales plantas productoras con el objetivo de identificar las principales fuentes de emisión de GEI durante el proceso de producción. Para ello, tres plantas cementeras participaron del estudio, dos situadas en Lima y una en Arequipa y se empleó como unidad funcional una bolsa de cemento de 42.5 kg de cemento. De los tres escenarios bajo análisis; el primero contempla el 70% del proceso de extracción de caliza localizado en la planta y el 30% restante en canteras situadas a 14 y 310 kilómetros, respectivamente. El segundo escenario contempla el uso de puzolanas mientras que en el tercer caso el clínker es importado de Corea del Sur y Japón.

Los resultados, mostrados en la Figura 2, muestran que el potencial de calentamiento global para una bolsa de cemento de 42.5 kg CO<sub>2</sub>eq es de 32kg CO<sub>2</sub>eq en el caso 1, 24 kg CO<sub>2</sub>eq per unidad funcional y de 32 kg CO<sub>2</sub>eq en el caso 3. Adicionalmente, se identifica la alta contribución que genera el uso de clínker en las tres mezclas. de la producción de clínker. En tal sentido, los valores obtenidos para la producción de un kilogramo de clínker son de 0.807 kg de CO<sub>2</sub>eq para el escenario uno, de 0.958 kg de CO<sub>2</sub>eq para el escenario dos y de 1.08 kg de CO<sub>2</sub>eq para el escenario tres. Asimismo, en el estudio se identifica que los resultados encontrados tanto para el cemento mezclado con puzolana como para el cemento Portland están en el rango más bajo de los valores encontrados en la literatura.



**Figura 2.** Aporte de de kgCO<sub>2</sub>eq para los tres escenarios.

Fuente: Adaptado de Vázquez et al. (2019)

Recientemente, Tocto (2020) evaluó el desempeño ambiental de adoquines de concreto reciclado a través del ACV establecido en las normas ISO 14040 considerando 3 categorías de impacto, IPCC 2013 v1.03, ReCiPe 2016 y Cumulative Energy Demand (CED v1.11) y eligiendo una unidad funcional 1m<sup>2</sup> de superficie pavimentada. Los límites del sistema en el estudio incluyen la fase de pre – uso y abarca la obtención de materiales (donde radica la diferencia entre el adoquín convencional y el adoquín reciclado), el proceso de producción y el proceso de instalación en el pavimento, donde la diferencia es la cama de arena.

La investigación obtuvo como resultado que las emisiones generadas en la producción para una tonelada de adoquines reciclados son de 0.22 kg CO<sub>2</sub>eq mientras que para una tonelada de adoquines convencionales son de 0.33 kg CO<sub>2</sub>eq. Por otro lado, para la instalación de 1 m<sup>2</sup> de superficie pavimentada los impactos relacionados son de 11.1 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> de adoquín reciclado instalado, mientras que para el adoquín convencional es de 17.2 kg CO<sub>2</sub>eq por metro cuadrado de superficie.

Al respecto, se concluye que la maquinaria empleada en los procesos de producción es aquella que genera mayor consumo de energía. Respecto al agregado reciclado obtenido de residuos de construcción y demolición, se indica que este no posee una carga ambiental asociada a las emisiones evitadas en la disposición final, sin embargo, se han encontrado investigaciones en las cuales se consideran los impactos ambientales eludidos provenientes del reciclaje de residuos (Suárez, Roca, & Calderón, 2022).

En tal sentido, Balmaceda (2021) analiza nuevamente el uso de agregado reciclado en las mezclas de concreto, sin embargo, la variante de este estudio consiste en el uso parcial del agregado reciclado como reemplazo del agregado natural con porcentajes de 10%, 15% y 20%. La producción de las mezclas de concretos es evaluada bajo el enfoque ACV a través de la metodología IPCC 2013 y ReCiPe 2016 y empleando una unidad funcional de 1 m<sup>3</sup>.

En los resultados para el indicador de potencial de calentamiento global, la mezcla de concreto convencional obtiene un valor de 201 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup>, en tanto la mezcla de concreto que emplea el 10% de agregado reciclado alcanza un valor 199 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup>. Según los valores obtenidos, se evidencia una disminución en los GEI emitidos de 2.1, 2.6 y 3.2 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> al comparar una mezcla de concreto convencional con una mezcla de agregado reciclado al 10%, 15% y 20% respectivamente.

Ambos estudios muestran beneficios ambientales incorporados en el uso de concreto reciclado en lugar del convencional en Perú, tales como la ligera disminución de emisiones de GEI, lo que abre un nuevo abanico de posibilidades para el mercado de materiales de construcción sostenibles.

Finalmente, uno de los estudios más recientes es el de Guerra (2021), quien realiza el ACV de una vivienda unifamiliar construida a partir de bambú. La unidad funcional adoptada es un metro cuadrado de muro y los límites del sistema contemplan las fases de

pre-uso, uso y fin de vida de la estructura, asumiendo dos escenarios de vida útil: 25 y 50 años. Los resultados obtenidos resaltan el impacto ambiental generados en las etapas de pre-uso y uso. La primera de ellas contempla las etapas de obtención de materias primas, transporte y construcción, las que generan de 123 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> y consumen 3.25 MJ/m<sup>2</sup>. Dentro de estos valores, el bambú contribuye con un 7% al total de emisiones y con 5% al consumo de energía,



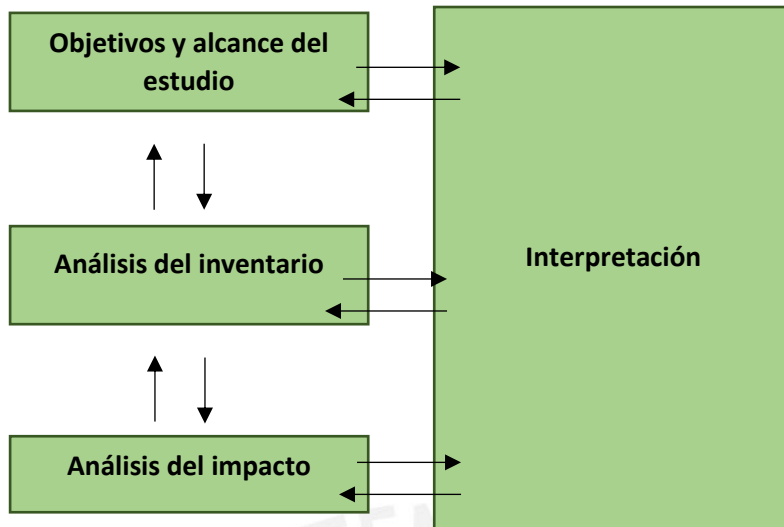
## CAPÍTULO 3 - METODOLOGÍA

### 3.1. ACV según normativa ISO

La aplicación del ACV como método para la obtención de impactos ambientales está regulado bajo las normativas ISO 14040 e ISO 14044, las cuales definen a la herramienta como una recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida (ISO, 2006a). Ambas normativas están interconectadas y establecen las pautas en los procedimientos y las consideraciones básicas para realizar un ACV.

Por un lado, la norma ISO 14040 hace su principal aporte al proporcionar una descripción de los principios y el marco de aplicación de un estudio de ACV (Finkbeiner et al., 2006). En primer lugar, se encuentra la fase de definición de objetivo y alcance; en segundo lugar, la fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV); en tercer lugar, la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV); y, por último, la fase de interpretación del ciclo de vida (ISO, 2006a). Estas fases se muestran interconectadas como señala la Figura 3.

Por otro lado, la norma ISO 14044 (ISO, 2006b) estipula las condiciones mínimas que se deben tener en cuenta para la realización del estudio, imponiendo los requisitos y consideraciones generales para todas las fases consideradas en la ISO 14040. En esta resaltan los requerimientos para la obtención de datos, donde se menciona el uso de hojas de datos o cuestionarios como directrices para la recopilación de información, las cuales serán empleadas en este caso para la adquisición de datos proveniente de las fábricas de bloques de concreto y ladrilleras.



**Figura 3.** Fases del ACV

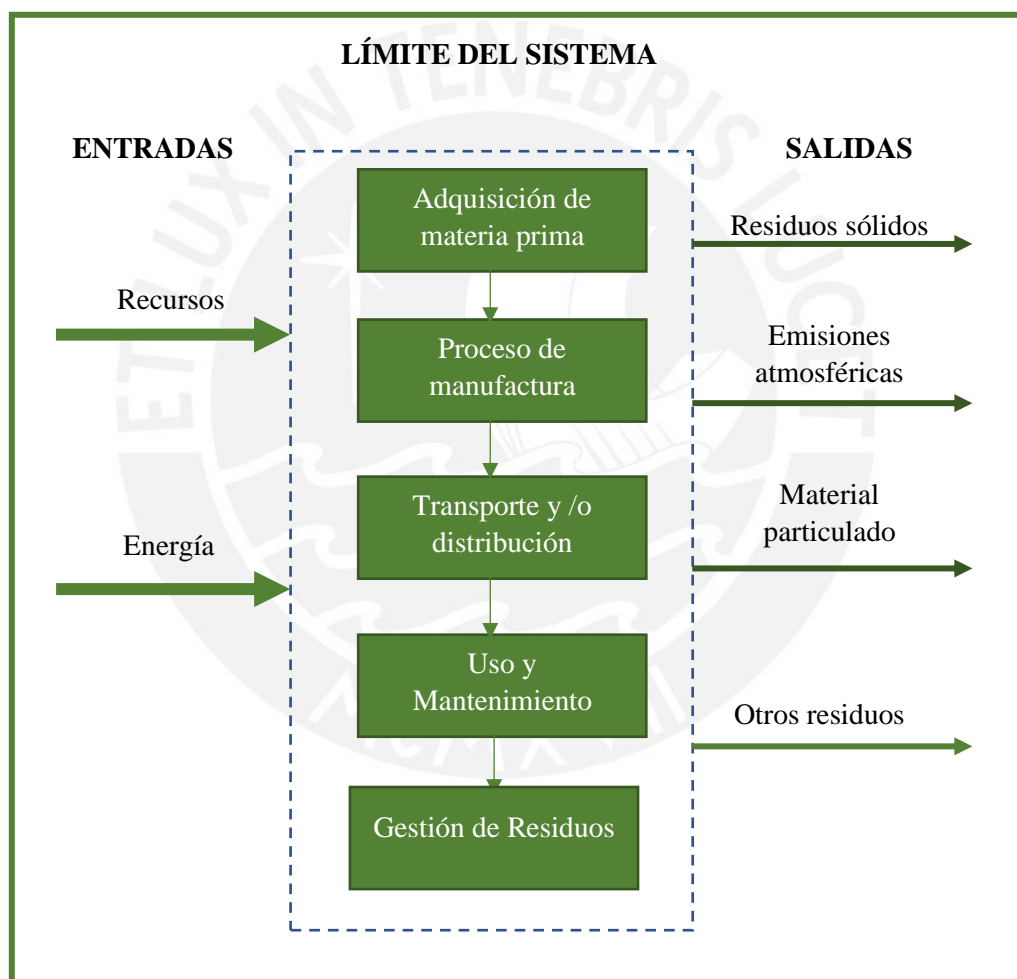
Fuente: Adaptado de la normativa ISO 14040

La ISO 14040 da una versión detallada de los elementos y procesos que componen cada fase considerada en el desarrollo de un ACV. Al respecto, explica que la fase de **definición de los objetivos y el alcance del estudio** indican el servicio o producto que será objeto del análisis, así como las razones del estudio, los resultados que se prevén obtener y la exactitud que estos deberán tener (UNIT, 2019).

Asimismo, precisa que dentro del alcance estudio se debe definir la unidad funcional, el sistema y sus límites, declarar las asunciones asumidas y las limitaciones que van a ser consideradas dentro del estudio, la información requerida para el desarrollo de la investigación, requisitos de calidad de los datos, así como las categorías de impacto y las metodologías de evaluación de impacto con las cuales se evaluarán los resultados (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2007).

En tanto a la unidad funcional, la norma la define como la medida del sistema que hace posible la estandarización de las entradas y salidas del sistema para los distintos

elementos que se encuentran bajo análisis con el fin de obtener resultados que puedan ser comparados (ISO, 2006a). Por otro lado, respecto a los límites del sistema, indica que este permite conocer cuáles elementos están inmersos en el proceso de producción del producto o servicio estudiado bajo la denominación de procesos unitarios (Universidad Politécnica de Cataluña, 2013). Estos pueden incluir la obtención de la materia prima, el transporte, la producción, el uso, la disposición final, entre otros, como se aprecia en la Figura 4.



**Figura 4.** Límites del sistema del ACV

En relación al **inventario de ciclo de vida**, la ISO 14040 la delimita como la etapa en donde se cuantifican las entradas y salidas del sistema en función de la unidad funcional del estudio, la cual incluye el uso de recursos como materias primas y energía, así como la



generación de emisiones y residuos (Vélez, 2014). Para ello, se realiza un diagrama de flujo que divide el sistema en procesos unitarios a fin de identificar las etapas con sus respectivas entradas y salidas.

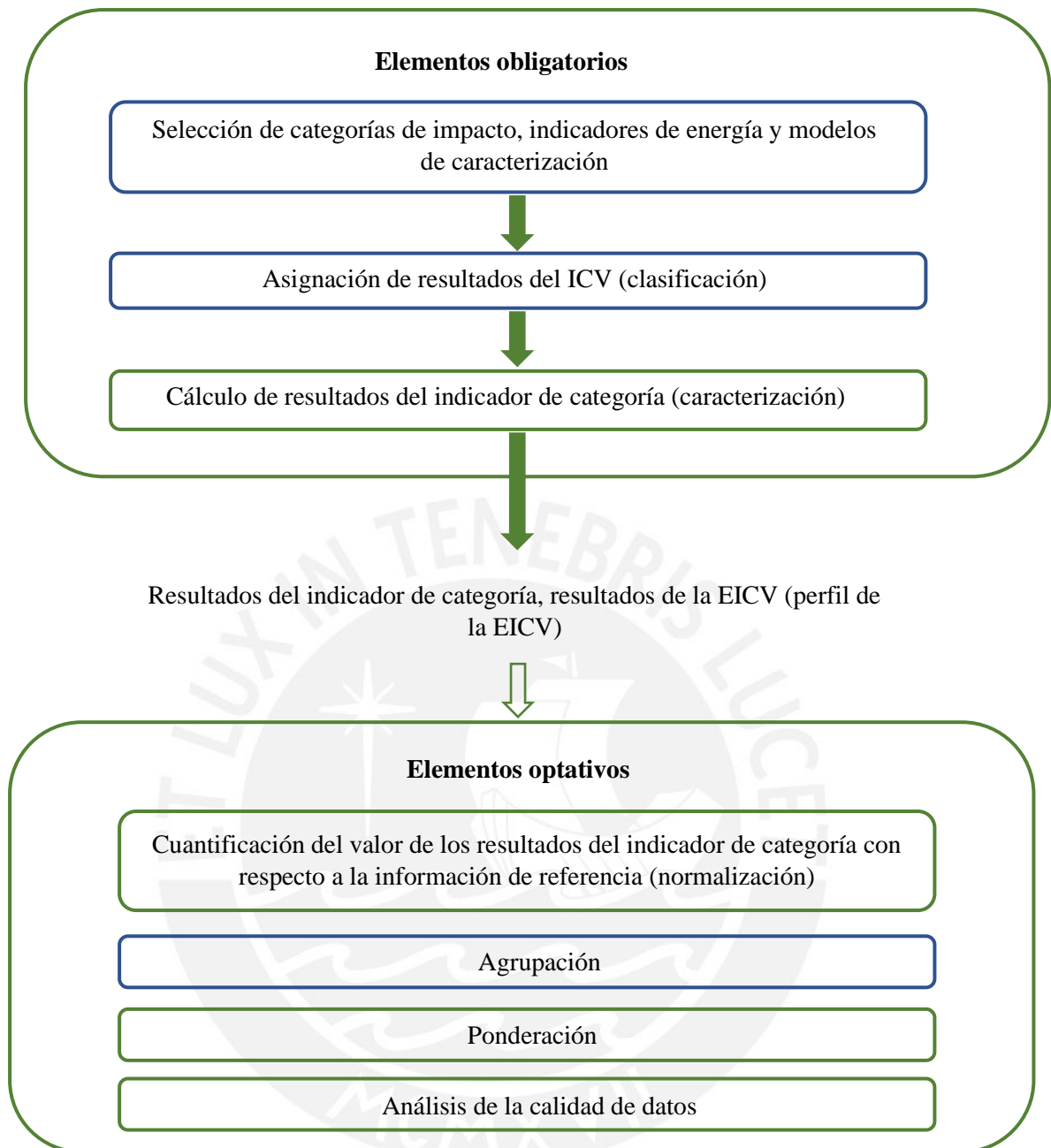
En este periodo del ACV, se realiza la recolección de datos y se desarrollan los cálculos correspondientes a partir de estos. La norma señala que ambos procesos son dos subetapas que se realizan continuamente pues, a través del procesamiento de la información recopilada, se puede ir reconociendo al sistema con mayor facilidad y se asegura un balance en el inventario.

**La evaluación del impacto del ciclo de vida o análisis de los impactos** es la fase en la cual se asocian los datos del inventario con los impactos ambientales relacionados a la salud humana y al medio ambiente. En esta etapa es necesario elegir una categoría de impacto, la cual sirve para puesto establecer una relación entre el sistema y las consecuencias ocasionadas hacia el medio ambiente y la salud humana.

Actualmente, existen una cantidad considerable de metodologías que evalúan distintos impactos. Por ejemplo, entre las metodologías que evalúan aspectos específicos figuran la *Cumulated Energy Demand* (CED, por sus siglas en inglés) que evalúa la cantidad de energía primaria requerida para la producción, uso y disposición final de un producto (Hischier et al., 2010), el método USEtox 2.01 que evalúa los impactos toxicológicos humanos y eco-toxicológicos en agua dulce de las emisiones químicas en la evaluación del ciclo de vida (USEtox, 2023) y la metodología TRACI 2.1. que proporciona factores de caracterización para la evaluación del impacto ambiental de ciclo de vida, la ecología industrial y las métricas de sostenibilidad (EPA, 2022).

Por otro lado, la metodología Eco-indicator 99 examina todas las categorías de emisiones y algunas categorías de uso de recursos naturales (Pre Sustainability, 2016), mientras que el método CML solo evalúa impactos de categorías específicas (Guinée, 2002). Ambas sentaron el precedente para el desarrollo de la metodología ReCiPe, la cual está basada en eco-indicator 99 y CML 2022, e integró la información de ambas para ofrecer una metodología que integra impactos de punto medio (*midpoint*) y punto final (*endpoint*) (PRé Sustainability, 2020). La principal diferencia entre estos indicadores de impactos yace en el enfoque de cada uno, pues mientras que el primero se centra en efectos ambientales singulares como los indicadores de cambio climático o acidificación, el enfoque *endpoint* muestra el impacto ambiental a nivel de efectos en la salud humana, biodiversidad y escasez de recurso (RIVM, 2018).

La norma ISO 14040 estipula elementos obligatorios y optativos en esta fase, cuya correcta aplicación determinará el correcto desarrollo del estudio, como se observa en la Figura 5. Los elementos obligatorios abarcan los procesos de selección de las categorías de impactos y los indicadores de cada una de estas, la clasificación de acuerdo al tipo de efecto ambiental esperado y la caracterización de los resultados que implica el modelado de los datos para cada categoría de impacto (Vallejo, 2004). A su vez, los elementos optativos abarcan procesos que son de ayuda para la estandarización, entre los cuales figuran el desarrollo de las actividades de agrupación, ponderación y normalización de resultados. No obstante, cabe resaltar que, dentro de estos elementos, el proceso de análisis de calidad de datos es obligatorio en ACV de carácter comparativo.



**Figura 5.** Esquema de elementos obligatorios y optativos

Fuente: Adaptación de Vallejo (2004)

Por último, la fase de **interpretación**, según la ISO 14040 tiene como objetivo el análisis de resultados, la extracción de conclusiones a partir de estos y las respectivas recomendaciones (ISO 2006a). Asimismo, permite la comparación de resultados y la identificación de escenarios con mejor desempeño ambiental, así como los aspectos que

deben mejorarse. En esta fase es clave un lenguaje claro y sencillo que permita el entendimiento de los resultados, conclusiones y reflexiones del estudio de ACV.

### **3.2. Metodologías de evaluación: IPCC 2013 y ReCiPe**

Las categorías de impacto ambiental forman parte del proceso para caracterizar y evaluar los resultados obtenidos que estén asociados en el inventario del ACV. En el presente estudio, para la evaluación ambiental del ACV de los elementos de mampostería seleccionados, se han empleado las metodologías del IPCC 2013, a fin de calcular cuantitativamente el impacto de los GEI generados en los procesos de manufactura sobre el efecto invernadero (Burchart-Korol, 2013) y ReCiPe 2016, debido a su amplio conjunto de categorías de impacto de punto medio con alcance global (Rashedi & Khanam, 2020).

#### **3.2.1 IPCC 2013 GWP 100a**

Esta metodología fue creada por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) como iniciativa para estandarizar los cálculos de emisiones de GEI y evalúa únicamente la categoría de cambio climático a través del indicador de potencial de calentamiento global (Rashedi & Khanam, 2020).

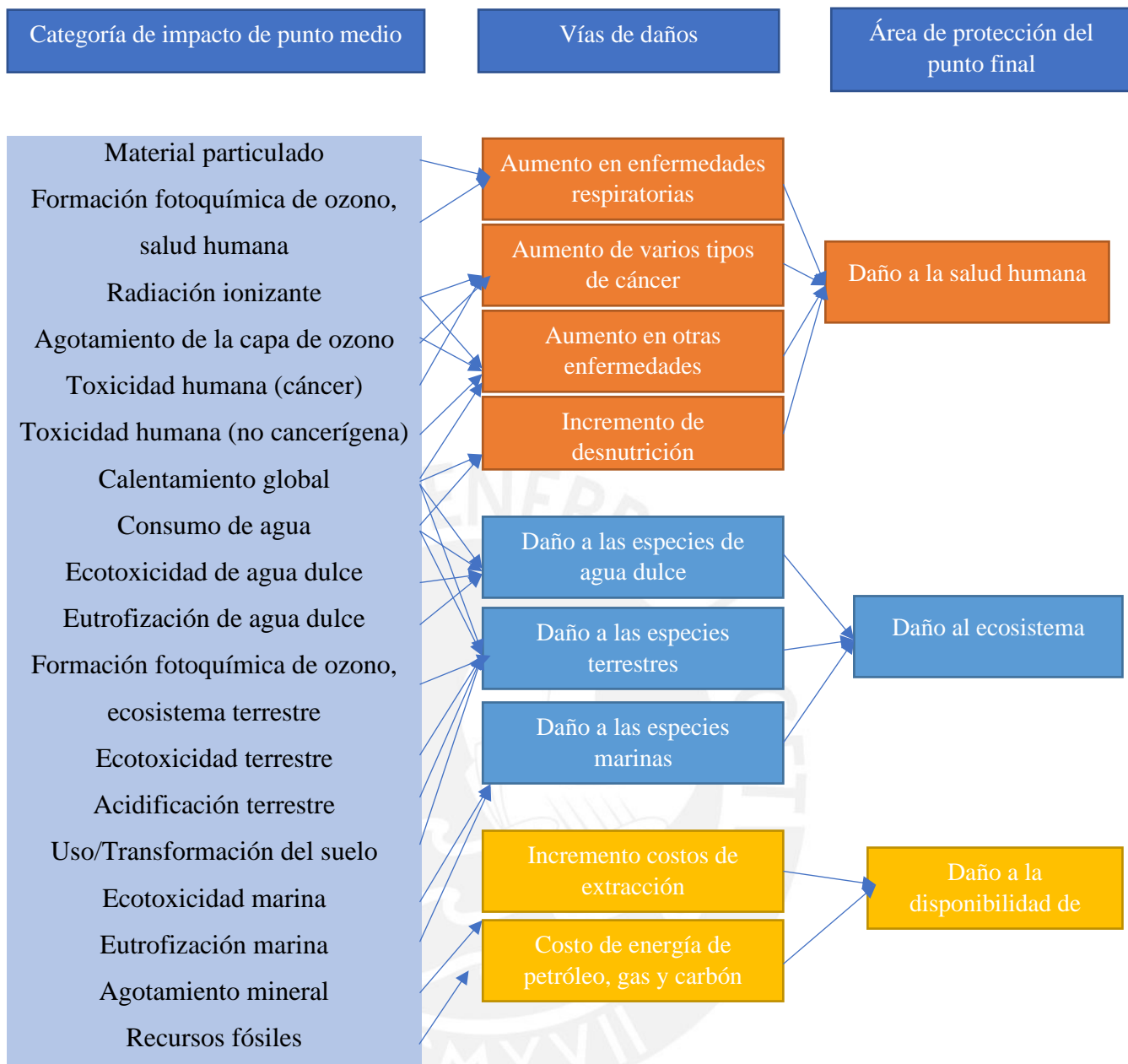
Este indicador analiza la contribución potencial de una sustancia al efecto invernadero y es calculado como la suma de emisiones de GEI, en términos de CO<sub>2</sub>eq, de los procesos pertenecientes al primer plano y aquellos procesos de fondo que sean significativos y se encuentren dentro de los límites del sistema. (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2018). Asimismo, para el método IPCC 2013, este valor puede ser calculado para una serie de sustancias durante horizontes de tiempo de 20, 100 y 500 años.

### 3.2.2. ReCiPe 2016 v1.1.

ReCiPe es un método para la evaluación de ACV desarrollada en el 2008 con el objetivo de transformar los resultados obtenidos del inventario en una lista limitada de puntajes de indicadores que permiten proveer información acerca de los efectos ambientales generados (National Institute for Public Health and the Environment, 2017) .

En tal sentido, el método caracteriza el impacto ambiental para niveles de análisis de punto medio o *midpoint*, orientado al problema y para niveles de punto final o *endpoint*, el orientado al daño final. Mientras que el nivel *midpoint*, considera dieciocho categorías de impacto que se presentarán a continuación, el nivel *endpoint* toma en cuenta tres áreas de protección establecidas: salud humana, calidad del ecosistema y escasez de recursos (Pré Sustainability, 2014). La relación entre las categorías de impacto y las áreas de protección se encuentran graficadas en la Figura 6, mientras que la descripción de cada una de ella está en la Tabla 1.

Adicionalmente, en esta metodología se distinguen tres perspectivas desde las cuales se puede realizar la evaluación ambiental; individualista (I), que está basada en un interés a corto plazo, la perspectiva jerárquica (H), la cual se basa en los principios más comunes de política respecto al marco del tiempo y otros temas y la perspectiva igualitaria, que se caracteriza por ser la más precautoria dado que elige el marco de tiempo más largo para el análisis de impacto (PRé Sustainability, 2020).



**Figura 6.** Categoría de impactos en ReCiPe 2016

Fuente: Adaptado de Pre Sustainability (2016)

**Tabla 1**

*Categorías de nivel de punto medio con sus respectivos factores de caracterización según el método de evaluación ReCiPe 2016.*

<b>Categoría de nivel de punto medio</b>	<b>Factor de caracterización</b>
Cambio climático	Potencial de cambio climático basado en el reporte del IPCC en el 2013. Se pueden usar horizontes de tiempo de 20, 100 y 500 años. Unidad: kg CO <sub>2</sub> eq
Agotamiento de la capa de ozono	Explica la destrucción de la capa de ozono por emisiones antropogénicas. Unidad: kg CFC-11eq
Radiación ionizante	Nivel de exposición para la población global. Unidad: kBq de cobalto – 60 al aire
Formación de partículas finas	Fracción de entrada de PM <sub>2.5</sub> . Unidad: kg de PM <sub>2.5</sub>
Formación fotoquímica de ozono, ecosistema terrestre	Cambio en la tasa de ingesta de ozono debido al cambio de emisión de NO <sub>x</sub> y COVNM. Unidad: kg de NO <sub>x</sub> eq
Formación fotoquímica de ozono, salud humana	Cambio en la tasa de ingesta de ozono debido al cambio en emisión de NO <sub>x</sub> COVNM. Unidad: kg de NO <sub>x</sub> eq
Acidificación terrestre	Potencial de acidificación (PA) derivado de la ponderación de emisiones mundiales de SO <sub>2</sub> . Unidad: kg de SO <sub>2</sub>
Eutrofización de agua dulce	Impacto ambiental debido a la emisión de nutrientes que contienen fósforo. Unidad: kg P en agua dulce equivalente
Eutrofización marina	Impacto ambiental debido a la emisión de nutrientes que contienen nitrógeno (N). Unidad: kg N a equivalentes marinos.
Toxicidad humana y ecotoxicidad	Explica la persistencia ambiental, acumulación en la cadena alimentaria humana y la toxicidad de un químico. Unidad: kg de 1.4 - DCB
Uso de suelo	Cantidad de tierra transformada u ocupada durante un tiempo determinado. Unidad: m <sup>2</sup> *año
Consumo del agua	Cantidad de consumo de agua dulce. Unidad: m <sup>3</sup>
Escasez de recursos minerales	Potencial excedente de material. Unidad: kg Cueq

Escasez de recursos fósiles

Potencial de combustibles fósiles empleados, basados en el poder calorífico. Unidad: kg de petróleo. kg combustible

*Nota:* Adaptado de Pre-Sustainability (2016)

### 3.3. Software para el desarrollo del ACV

En la presente tesis de investigación se optó el software SimaPro 9.2.0.2 como herramienta para realizar el ACV. Este programa brinda la posibilidad de emplear inventarios de distintas bases de datos, así como la creación de nuevos inventarios dentro de este, además de realizar la evaluación cuantitativa del impacto de ciclo de vida en las categorías seleccionadas.

#### SIMAPRO 9.2.0.2

SimaPro es una herramienta profesional que sirve para recolectar, analizar y monitorear el desempeño sostenible de productos y servicios (SimaPro, 2021a). Entre las bases de datos de este software figura *ecoinvent*, la cual es una de las más empleadas a nivel mundial para estudios de gestión de ciclo de vida, huella de carbono, huella hídrica, monitoreo de desempeño ambiental, para la producción y diseño eco amigables y para la declaración ambiental de productos (SimaPro, 2021b). La interfaz se puede apreciar en la Figura 7.

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría	
(Insertar línea aquí)	1	kg	Mass	100 %	no definido	Construction(C...Mar	

Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)							

Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								

Salidas								
Emisiones al aire	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Emisiones al agua	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Emisiones al suelo	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Flujos finales de residuos	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								

Figura 7. Interfaz de creación de elemento de Sima Pro



### **3.4. CASO DE ESTUDIO**

#### **3.4.1. Definición del alcance del estudio**

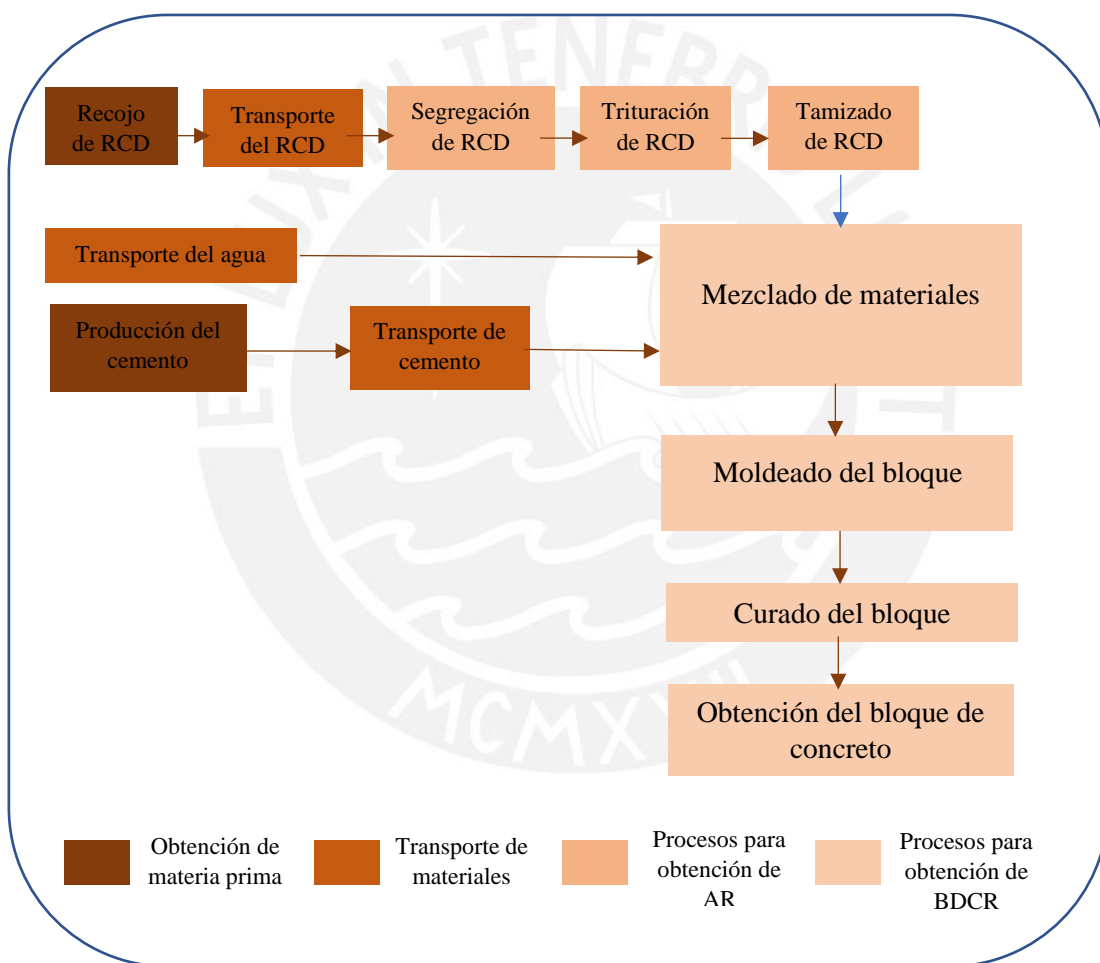
##### **3.4.1.1. Límites del sistema de estudio**

El presente estudio implica el análisis de ciclo de vida de producción de dos tipos de elementos de mampostería por separado; bloques de concreto convencional y bloques de concreto reciclado. Adicionalmente, con los resultados obtenidos, se realizará una comparación bajo una serie de indicadores y metodologías (IPCC 2013 y ReCiPe) que servirán para determinar las cargas ambientales que representa el uso de determinado tipo de bloque y permitirá la comparación de estos elementos con los resultados de la evaluación de impactos ambientales ladrillos de arcilla desarrollado en el Reporte IKI (Gutiérrez et al., 2022), estudio realizado por el equipo PELCAN.

Para dar lugar a un ACV comparativo, se deben sentar las bases del marco sobre el cual serán evaluados ambientalmente. En tal sentido, el alcance del proyecto varía de acuerdo al elemento en cuestión, por lo que el presente estudio emplea un enfoque de la cuna a la puerta, el cual abarca desde la extracción de la materia prima hasta la obtención del producto final.

En primer lugar, los límites del sistema del bloque de concreto reciclado (BDCR, en adelante) no comprenden la demolición o construcción de donde provienen los RCD, debido a que no se considera la energía ni los recursos destinados a estas actividades. Esta decisión se da teniendo en cuenta los alineamientos planteados en las Reglas de Productos por Categoría (PCR, por sus siglas en inglés) de Construcción (EPD INTERNATIONAL, 2021), el cual sostiene que las cargas ambientales provenientes de un sistema anterior o *upstream*, en este caso los RCD provenientes del proceso de demolición, serán considerados en el sistema actual de fabricación de bloques de concreto con agregado reciclado con un valor de cero. En su lugar, este comprende una serie de etapas de producción para la elaboración del

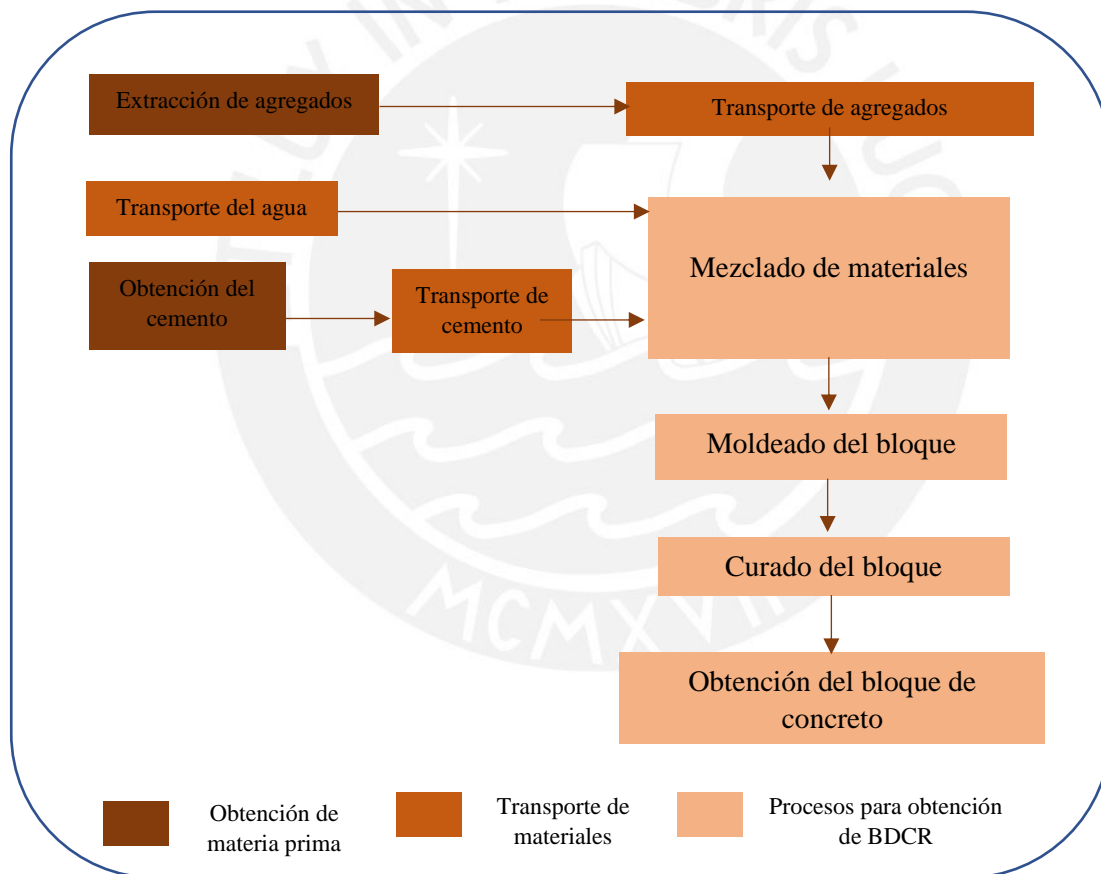
bloque. La primera etapa es la de obtención de materiales, la cual incluye la adquisición de cemento, agua y el RCD. Posteriormente, se contempla el traslado de la materia prima, desde sus respectivos lugares de origen o producción hasta la fábrica de bloques de concreto. Una vez situados en la fábrica, se realiza la etapa de manufactura la cual contempla dos procesos; el tratamiento de RCD para su posterior conversión en agregado reciclado (A.R) y la producción de concreto, el cual incluye las actividades de mezcla, moldeado y curado de los bloques. El esquema de los límites del sistema puede ser visualizado en la Figura 8.



**Figura 8.** Procesos involucrados en la elaboración de bloques de concreto reciclado

En segundo lugar, el sistema que engloba la producción de bloques de concreto convencional (BDC, en adelante) presenta aspectos similares, sin embargo, la principal diferencia radica en la obtención de agregados, ya que estos son extraídos de canteras. En

tal sentido, el sistema bajo el que se realizará el estudio contempla la obtención y transporte de materia prima, entendida como el conjunto de materiales necesarios para la producción de bloques de concreto tales como agua, cemento y agregados gruesos y finos. Adicionalmente, considera el almacenaje de estos elementos en la fábrica y los procesos necesarios para convertir la materia prima en un bloque de concreto convencional. Estos procesos están constituidos por el mezclado de materiales, su respectiva vibro-compactación y finalmente, el curado de los bloques para alcanzar las propiedades mecánicas estipuladas de acuerdo a la normativa. El esquema de los límites del sistema de concreto reciclado puede ser visualizado en la Figura 9.



**Figura 9.** Procesos involucrados en la elaboración de bloques de concreto convencionales

### 3.4.1.2. Definición de la unidad funcional del estudio

El principal objetivo del estudio es determinar las cargas ambientales ligadas a los elementos de mampostería. Para ello, se busca analizar una unidad compatible con los elementos que permita la comparación entre estos, por lo tanto, se ha optado por escoger un metro cuadrado ( $m^2$ ) de muro no portante preparado para recibir la aplicación de la primera capa de pintura como unidad funcional. Cabe resaltar que el análisis ambiental incluirá la evaluación del mortero utilizado en la construcción del muro además del uso de elementos de mampostería (bloques de concreto, bloques de concreto reciclado y ladrillos de arcilla), el cual tendrá un espesor de 14 centímetros.

Para calcular la cantidad de bloques utilizados en un metro cuadrado de muro, se procede a realizar el metrado. Las dimensiones del bloque de concreto empleado tanto para la mezcla con agregado reciclado como para la mezcla convencional son de 39x19x14 cm, donde el largo es de 39 cm, el alto es de 19 cm, mientras que el ancho del bloque es de 14 cm., tal como se aprecia en la Figura 10. Adicionalmente, el espesor de las juntas horizontales y verticales de mortero es de 1.5 cm.



**Figura 10.** Bloque de concreto convencional

Fuente: Empresa dedicada a la producción de BDC

Para estimar la cantidad de bloques a ser empleados en un metro cuadrado de muro se procede a utilizar la fórmula 1 que toma en consideración las dimensiones del ladrillo o bloque y el espesor de las juntas (Aceros Arequipa, 2022), la cual nos da como resultado un total de 12 ladrillos para el muro en cuestión.

$$CL = \frac{1}{(L+J_h) \times (H+J_v)} \quad (1)$$

Donde:

CL = cantidad de ladrillos por m<sup>2</sup>

L= longitud del ladrillo (m)

Jh = espesor de junta horizontal (m)

H = altura del ladrillo (m)

Jv = espesor junta vertical (m)

$$CL = \frac{1}{(0,39 + 0,015) \times (0,19 + 0,015)} = 12$$

Los datos sobre ladrillos empleados han sido tomados del reporte al proyecto IKI PNUMA elaborado por Gutiérrez y colegas (2022), pertenecientes al grupo de investigación PELCAN. En dicho documento, para la construcción de un metro cuadrado de muro no portante con ladrillos se considera el mortero empleado en las juntas, las cuales tienen un espesor de 15 milímetros. En este estudio, compararemos los resultados obtenidos para dos distintos tipos de ladrillos empleados en tabiquería; el ladrillo pandereta liso (PL) y el ladrillo King Kong caravista (KKC).

En el caso del ladrillo pandereta lisa, este tiene unas dimensiones son 9.5x11x23 cm. y posee un peso de 2.1 kilogramos por unidad. Se emplean 38 de unidades de este ladrillo para la construcción de dicho muro y se le aplica un tarrajeo de 15 milímetros de espesor a cada lado, lo que le da al muro un ancho total de 14 centímetros. Por otro lado, en el caso del ladrillo King Kong caravista no se aplica mortero en el tarrajeo debido a que son de tipo arquitectónico y poseen una superficie lisa. El peso de este producto es de 2.7 kg por unidad

y sus dimensiones son de 9x12.5x23 cm, sin embargo, en el modelado del presente estudio el ancho del ladrillo ha sido modificado a 14 centímetros, a fin de poder comparar muros no portantes con el mismo ancho. Esto modifica el peso del ladrillo a un valor de 3.024 kilogramos por unidad.

#### **3.4.1.3. Limitaciones y suposiciones del estudio**

Para la presente investigación, es necesario tener en cuenta una serie de factores que permiten aumentar el nivel de detalle que poseen los procesos analizados. Por ello, es relevante mencionar los aspectos geográficos y temporales de los datos recolectados para el estudio. Por un lado, el análisis del estudio para el sistema del bloque de concreto convencional comprende datos provenientes de la producción del año 2021 y tiene el registro de los meses involucrados desde enero hasta julio del mismo año. Asimismo, el proceso de elaboración se encuentra ubicado en el departamento de Lima, comprendido dentro del área de Lima Metropolitana. Por otro lado, los datos obtenidos para el estudio del bloque de concreto reciclado provienen de la producción abarcada en el año 2020, desde enero a diciembre. Al igual que en el caso anterior, las actividades correspondientes a su producción se realizan de los distritos ubicados en Lima Metropolitana, lo cual incluye la extracción de agregado proveniente de una cantera situada dentro de esta área.

Por lo demás, es necesario mencionar que el estudio no considera la mano de obra empleada dentro de ambos sistemas debido a la complejidad que representa. Adicionalmente, puesto que las distancias de recojo de RCD varían de acuerdo al lugar donde se encuentre la construcción o demolición, se consideró una distancia promedio de 20 km de transporte desde el lugar de recojo hasta la planta. Asimismo, en ambos sistemas de producción, se emplea el transporte de agua en cisternas puesto que ninguna de las dos fábricas cuenta con un sistema de agua potable que pueda proporcionar los volúmenes de este recurso necesarios para sus respectivas actividades.

Por último, respecto a las fases que abarca el ciclo de vida de materiales, se descartan las etapas de uso y mantenimiento, ya que conforme a Colangelo et al. (2020), los impactos generados por los elementos de mampostería durante esas dos etapas son iguales para las mezclas analizadas, por lo que su exclusión no supone una alteración sustancial en los resultados del estudio y no es trascendental en la comparación. No obstante, cabe la posibilidad de que el mantenimiento del muro pueda generar diferencias en los resultados de acuerdo al uso que tenga la edificación.

### **3.4.2. Recolección de datos para el inventario de ciclo de vida (ICV)**

#### **3.4.2.1. Obtención de datos primarios**

La recolección de datos primarios para la investigación siguió los lineamientos comprendidos en la norma ISO 14040. Esta abarca procesos como la elaboración de cuestionarios a modo de herramienta para la recolección de información, el llenado de este formulario por parte de los entes exteriores involucrados, la validación de los datos obtenidos y la verificación de la información brindada relacionada con los procesos unitarios y la unidad funcional. La información recolectada sobre los procesos de producción proviene de distintas fuentes, de acuerdo al tipo de bloque bajo análisis. Los datos correspondientes a la producción de los bloques de concreto convencional fueron proporcionados por una empresa nacional que se dedica a la producción y distribución de este producto. El contacto fue establecido con funcionarios de la planta productora, quienes brindaron la información de producción a través de las respuestas emitidas en el cuestionario y de correos en los cuales se mantuvo reiterada comunicación con el fin de despejar las dudas que surgían conforme se analizaban los datos entrantes. Los datos facilitados abarcan el proceso de producción de los dieciocho distintos tipos de bloque de concreto que ofrece la empresa y las distintas etapas que la conforman. Entre las actividades registradas figuran el proceso de extracción de

agregados en canteras situadas en Jicamarca (Lima, Perú), la obtención de otras materias primas, el transporte de estos elementos, la infraestructura del lugar de fabricación, las maquinarias y el consumo de energía empleadas en los procesos de producción.

En cuanto a la producción de bloques de concreto reciclado, la información fue provista por una empresa dedicada al rubro de la producción de elementos de construcción sostenibles, la cual aplica criterios de sostenibilidad y de economía circular en sus proyectos de construcción. Esta se encarga de recolectar los residuos de construcción y demolición (RCD) que cumplan con ciertos estándares de calidad requeridos por normas (Comité Técnico de Normalización de Unidades de Albañilería, 2002) para, posteriormente, procesarlos y emplearlos como agregado reciclado en la producción de adoquines y bloques de concreto.

La información fue obtenida a través de formularios (ver anexo 1), que fueron elaborados en base a información recopilada previamente en procesos similares desarrollados en otros países. Los datos proporcionados abarcan dos distintos procesos: por un lado, tenemos el procesamiento de los RCD y por el otro, los procesos de manufactura de bloques. El primero de ellos contiene las actividades de transporte de los RCD obtenidos en la demolición o construcción de edificaciones, su respectivo traslado hacia la fábrica y los procesos de trituración, zarandeo y tamizado para obtener el agregado reciclado. El segundo conjunto de procesos comprende el abastecimiento de otras materias primas (agua y cemento), el transporte, la infraestructura de la fábrica, la maquinaria empleada en las actividades de mezclado y curado del concreto, así como el consumo eléctrico y de combustible de la maquinaria consumidos en la producción de los bloques.

Posteriormente, los datos fueron trasladados a una hoja de cálculo donde se cuantificaron los flujos de materiales y energía que serían posteriormente modelados en



SimaPro, el software seleccionado y empleado para modelar el ACV. Sin embargo, en el proceso surgieron algunas dudas, por lo que se realizaron cuestionarios adicionales donde estas interrogantes fueron resueltas. Finalmente, los datos fueron complementados con una visita a la fábrica, en la cual se tuvo una mejor noción de los procesos involucrados y permitió la absolución de algunas dudas adicionales. Los ejemplos de estos procesos se pueden apreciar en las Figuras 11, 12 y 13.

**PREGUNTAS EXTRA**

Respecto a los residuos de construcción y demolición, se indican las siguientes cifras de recolección:

Volumen de material recibidos en la planta	13147
Volumen de RCD recogidos por CICLO	40805
TOTAL	53952

- ¿Cuál es el volumen de RCD que es descartado y dispuesto en algún vertedero/relleno?

Rpta:

- ¿Cuál es el volumen de RCD que son utilizados netamente en la fabricación de **agregado reciclado**?

Rpta:

- Del total del volumen dirigido a la **fabricación de agregado reciclado**, cuál es la cantidad de material retirado (acero, plástico, caucho, etc.) en los RCD.

	Material	Peso anual (kg)	Lugar a donde el material es destinado
Material 1			
Material 2			
Material 3			
Material 4			
Material 5			

**Figura 11.** Ejemplo de las preguntas extras enviadas M.P. RECICLA con el fin de absolver algunas dudas.



con este tipo de maquinaria, ya que la empresa aun no posee con un grado alto de estandarización (Jonsson & Rudberg, 2014). En tercer lugar, la producción de bloques de concreto convencionales corresponde a un proceso netamente industrializado, tanto en temas de estandarización de proceso y materiales como en infraestructura y volumen de producción. Por ello, se deja en claro que la cantidad de producción en la empresa uno (BDC), es altamente mayor en comparación al de la empresa dos (BDCR).

A continuación, en las Tablas 2 - 5, se mostrarán algunos datos obtenidos a través de los cuestionarios, los cuales tienen que ver principalmente con la dosificación del concreto y las características de los materiales empleados.

**Tabla 2**

*Características físicas y mecánicas principales de los bloques de concreto convencional bajo análisis*

Tipo	Medidas (cm)	Peso unitario (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
Bloque Tipo 1	9x19x39	10.4	≥ 71.4
Bloque Tipo 2	12x19x39	11.8	≥ 71.4
<b>Bloque Tipo 3</b>	<b>14x19x39</b>	<b>12.5</b>	<b>≥ 71.4</b>
Bloque Tipo 4	19X39X39	16.5	≥ 71.4
Bloque Tipo 5	9X19X19	6.0	≥ 71.4
Bloque Tipo 6	12X19X19	6.8	≥ 71.4
Bloque Tipo 7	14X19X19	7.0	≥ 71.4
Bloque Tipo 8	19X19X19	9.0	≥ 71.4
Bloque Tipo 9	9x19x39	10.4	≥ 71.4
Bloque Tipo 10	12x19x39	11.8	≥ 71.4
Bloque Tipo 11	15x19x39	12.5	≥ 71.4
Bloque Tipo 12	19X39X39	16.5	≥ 71.4
Bloque Tipo 13	9X35X35	15.4	357

Fuente: Empresa dedicada a la producción de BDC.

**Tabla 3.***Diseño de mezcla para los distintos tipos de bloques elaborados con concreto convencional*

Tipo	Cemento (kg)	Agua (L)	Ag. Fino (kg)	Ag. Grueso (kg)	Aditivo (ml)	Peso total (kg)
Bloque Tipo 1	1.07	0.60	7.10	1.60	0.002	10.3
Bloque Tipo 2	1.20	0.81	8.20	2.29	0.003	12.5
Bloque Tipo 3	1.57	1.10	10.7	3.45	0.003	16.8
Bloque Tipo 4	1.71	1.16	11.3	3.54	0.004	17.7
Bloque Tipo 5	0.64	0.49	4.92	1.37	0.002	7.42
Bloque Tipo 6	0.72	0.66	6.44	2.07	0.002	9.88
Bloque Tipo 7	0.94	0.70	6.80	2.12	0.002	10.5
Bloque Tipo 8	1.03	0.29	2.95	0.82	0.001	5.09
Bloque Tipo 9	1.07	0.60	7.10	1.60	0.002	10.3
Bloque Tipo 10	1.20	0.81	8.20	2.29	0.003	12.5
Bloque Tipo 11	1.57	1.10	10.7	3.45	0.003	16.8
Bloque Tipo 12	1.71	1.16	11.3	3.54	0.004	17.7
Bloque Tipo 13	2.07	1.00	9.30	2.80	0.004	15.2

Fuente: Empresa dedicada a la producción de BDC.

**Tabla 4***Características físicas y mecánicas principales de los bloques de concreto reciclado bajo análisis*

Tipo de producto	Medidas (cm)	Peso (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
Adoquín tipo I	10x20x4	1.50	Unidad individual: 290 Promedio 3 unidades: 320
Adoquín tipo II	10x20x6	2.25	Unidad individual: 380 Promedio 3 unidades: 420
Adoquín tipo III	10x20x8	3.00	Unidad individual: 510 Promedio 3 unidades: 561
Bloque de concreto	39x19x14	8.85	61.18

**Tabla 5***Diseño de mezcla para los distintos tipos de bloques elaborados con concreto convencional*

Tipo	Cemento (kg)	Agua (L)	Ag. Reciclado (kg)
Bloque de concreto reciclado	0.25	1.8	6.8
Adoquín Tipo 1	0.30	1.0	0.2

Adoquín Tipo 2	0.45	1.5	0.3
Adoquín Tipo 3	0.60	2.0	0.4

### 3.4.2.2. Obtención de datos secundarios

#### *Producción de bloques de concreto convencionales*

Para el modelado de la obtención de agregado grueso y fino, se optó por escoger la información disponible en el inventario deecoinvent 3.7.1, el cual presenta distintas opciones, sin embargo, se optó por escoger la opción representativa para el resto del mundo (RoW, por sus siglas en inglés) que abarca la explotación de la cantera. Por ello, para el agregado fino se escogió la opción *Sand {RoW}/gravel and quarry operation/APOS, U*, mientras que para el agregado grueso se escogió la opción *gravel, crushed {RoW}/production/APOS, U*, el cual considera grava triturada, la misma que es utilizada en la mezcla. El planteamiento del modelado en SimaPro puede visualizarse en la Figura 14.

Adicionalmente, para el modelado del cemento se eligió la opción de cemento portland agregada previamente al inventario debido a una investigación desarrollada por Vázquez-Rowe et al. (2019) en la cual se obtuvo el modelado de la producción de cemento Perú, el cual incluye los procesos de manufactura y empaquetado de este producto. Cabe mencionar que el valor de clínker adoptado ha sido obtenido del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) en su última versión (MINAM, 2021) y corresponde a la cifra de a 0.52 kgCO<sub>2</sub>eq por kilogramo de clínker producido.

Por último, el agua fue simulada como una entrada de la naturaleza. Sin embargo, a esta se le incluyó el proceso de extracción de este recurso de pozos subterráneos, dado que ambas empresas de producción de bloques de concreto utilizan el recurso extraído de esta forma, por lo que en entradas tecnológicas se modeló el consumo energético de la bomba de extracción.

Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos		Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación ?	Tipo de residuo	Categoría
I. Obtención de materiales de elaboración para bloques de concreto	(Insertar línea aquí)	1	ton	Mass	100 %	no definido	Constru...BDC - l
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantida	Ud.	Distribución	Comentario		
Cement Portland {PE} production  Alloc Def		0.097	ton	Indefinido	Cemento empleado en la producción de un tonelada de bloques de concreto de enero a junio del año 2021.		
Sand {RoW}  gravel and quarry operation   APOS, U		0.651	ton	Indefinido	Agregado fino empleado en la producción de una tonelada de bloques de concreto de enero a junio del año 2021.		
Gravel, crushed {RoW}  production   APOS, U		0.187	ton	Indefinido	Agregado grueso empleado en la producción un tonelada de bloques de concreto de enero a junio del año 2021.		
Obtención de Agua (extracción)		0.064	ton	Indefinido	Agua empleada en la producción un tonelada de bloques de concreto de enero a junio del año 2021. Este recurso es obtenido de pozos y transportado en cisternas hasta la fábrica de bloques		

**Figura 14.** Introducción de la materia prima para la elaboración de bloques de concreto convencionales.

### ***Producción de bloques de concreto reciclado***

En primer lugar, para la simulación de los RCD recolectados que serán posteriormente convertidos en agregado reciclado, se modeló la entrada como una sustancia que no posee intrínsecamente ningún proceso de elaboración previo o alguna carga ambiental asociada, por ello, se escogió la entrada desde la naturaleza denominada *inert rock*, como se visualiza en la Figura 15. No obstante, para la obtención del agregado reciclado se considera los distintos procesos por los que tuvieron que pasar los residuos de construcción y demolición, los cuales serán descritos posteriormente.

Productos								
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-p		Cantidad	Ud.	Cantida	Asig	Tipo de	Categoría	Comentario
Residuos de Construcción y Demolición {PE}	(Insertar línea aquí)	1	ton	Mass	100	no def	...1. Obtención de	Agregado reciclado modelado como una sustancia inerte.
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^C	Min	Máx	
(Insertar línea aquí)								
Entradas								
Entradas conocidas desde		Subcompa	Cantidad	Ud.	Distribución	Min	Comentario	
Inert rock			1	ton	Indefinido		Se escoge esta sustancia dado que no trae ningún proceso de obtención ni emisiones incorporadas.	

**Figura 15.** Modelado de la entrada de RCD en SimaPro.

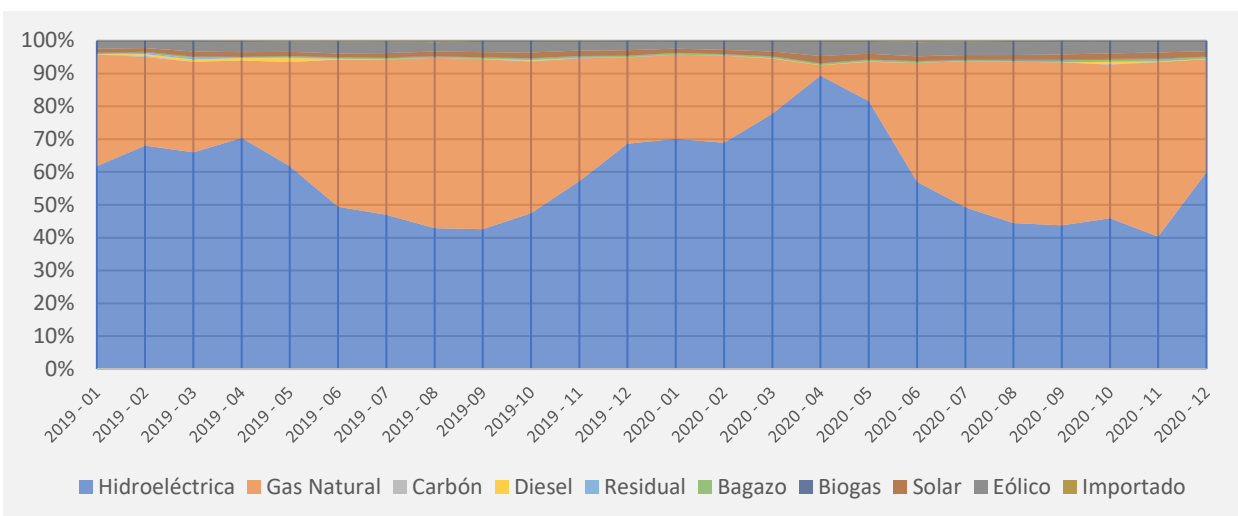
Para el agua y el cemento, las entradas asociadas al proceso de producción de este tipo de bloque son las mismas a las entradas configuradas para el bloque de concreto convencional, como se puede ver en la Figura 16. No obstante, la cantidad de cada insumo utilizado es lo que presenta una variación, debido a las diferencias en la mezcla.

Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-p		Cantidad	Ud.	Cantida	Asigi	Tipo d	Categoría	Comentario
Obtención de materias - caso convencional BDCR	1	ton	Mass	100	no def	...	1. Obtencion de	
(Insertar línea aquí)								
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2	or 2^D	Mín	Máx
(Insertar línea aquí)								
Entradas								
Entradas conocidas desde Subcompa		Cantidad	Ud.	Distribución	I	M	Comentario	
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materi		Cantidad	Ud.	Dist	D	M	Comentario	
Obtencion de Agua	0.127	ton	Ind				Cantidad de agua necesaria para la producción de 1 tonelada de concreto con A.R.	
Bolsa de Cemento	4.71	p	Ind				Se considera la cantidad de bolsas necesarias para obtener una tonelada de cemento Portland. Cantidad de bolsas de cemento consumidas para la produccion anual de produccion de bloques y adoquines con concreto reciclado. Bolsa: 42.5 kg Consumo total: 461 ton Consumo por una tonelada: 4.71 bolsas	
Residuos de Construccion y Demolicion (PE)	0.673	ton	Ind				Cantidad de RCD requerida para la producción de una (1) tonelada de agregado reciclado obtenido de Residuos de Construccion y Demolicion en Lima, Peru. Año de produccion: 2020	

**Figura 16.** Modelado del proceso de obtención de materiales en SimaPro para la producción de bloques de concreto reciclado.

### **Matriz energética**

Respecto a la matriz energética, se empleó el mix energético encontrado en la base de datos proporcionada por PELCAN, la cual posee datos sobre el consumo de electricidad del año 2019 del Perú. La información fue obtenida a partir de la matriz energética pautada en los boletines mensuales Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES) durante los años 2019 y 2020 y, tal como se aprecia en la Figura 17, en las fuentes de energía del país predominan el tipo de energía hidroeléctrica con porcentajes variantes entre 40% a 90% y la energía termal proveniente de plantas de gas natural que contribuye con porcentajes de 10% a 60% del total de energía generada.



**Figura 17.** Matriz energética peruana 2019-2020 al 100%.

Fuente: Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional.

En la Tabla 6, se observan las emisiones asociadas a las fuentes de emisión para la producción de 1 kWh en Perú. Al respecto, obtenemos que, a pesar de ser la mayor fuente de energía, las centrales hidroeléctricas tienen una de las menores emisiones, con una cantidad de 3.8 g CO<sub>2</sub>eq/kWh. Por el contrario, la energía proveniente de gas natural de ciclo combinado genera 140.2 g CO<sub>2</sub>eq/kWh, mientras que la originada de gas natural de ciclo convencional emite 26.4 g CO<sub>2</sub>eq/kWh. Por su lado, la huella de carbono de la energía proveniente de combustibles (R6, R500 y diésel) es de 1.08 g CO<sub>2</sub>eq/kWh.

**Tabla 6**

*Huella de carbono de 1 kWh de la matriz energética peruana en el año 2019*

<b>FUENTE DE EMISIÓN</b>	<b>Valor g CO<sub>2</sub>eq</b>
Red de distribución de energía eléctrica	1.6
Red de distribución de larga distancia	0.1
Hidroeléctrica	3.8
Gas natural (Ciclo combinado)	140.2
Gas natural (Ciclo convencional)	26.4
Carbón	0.8
Residual R6, R500 y diesel	4.1
Bagazo	0.2



Biogas	0.2
Solar	1.1
Eólica	0.5
Importación	0.3
Otros	1.3
<b>TOTAL (g CO<sub>2</sub>eq / kWh)</b>	<b>180.7</b>

Fuente: Boletines mensuales Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES)

### 3.4.2.3. Proceso de producción de bloques de concreto convencionales

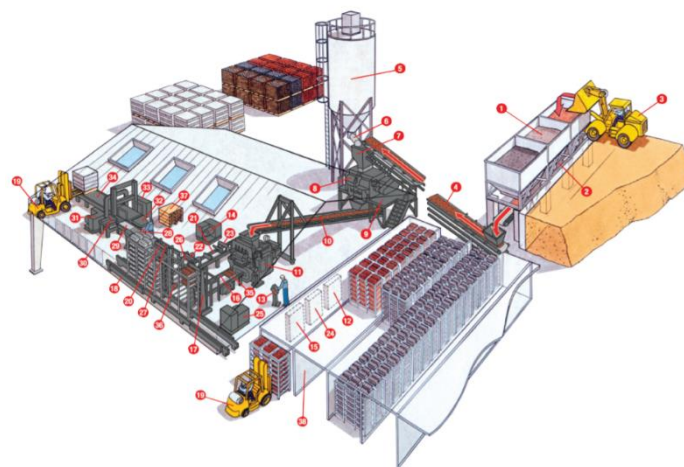
La información proporcionada respecto a la maquinaria empleada en la producción de bloques de concreto convencionales fue recogida mediante el cuestionario que se encuentra en el Anexo 1.

Como primer aspecto relevante de la fábrica de producción, se definen distintas áreas de trabajo, las cuales serán mencionadas con mayor detalle en el inciso *Infraestructura*. Una de ellas es el área de mezclado, donde se inicia el proceso de producción de bloques de concreto con la revisión del mezclador, el cual consiste en asegurar la limpieza de la máquina y la correcta operatividad de sensores y circuitos de seguridad, para, a continuación, ingresar la dosificación en el Panel de Control de la máquina. Luego de verificar que los datos han sido ingresados correctamente empieza el arranque de la máquina en modo automático, la primera función del mezclador es pesar el cemento en una balanza, se continúa con el abastecimiento del agregado fino y grueso a través de fajas transportadoras, una vez que el mezclador reciba los agregados se añade agua (20% del total), para, posteriormente, agregar el cemento y realizar el mezclado de todos los materiales durante 3 minutos. Pasado este tiempo se agrega el 70% de agua requerida para la mezcla junto a su correspondiente aditivo para darle mayor plasticidad a la mezcla. Al alcanzar la homogeneidad, a la mezcla se le adiciona el 10% del agua, denominada “agua de ajuste”, con el cual espera que la humedad de mezcla alcance entre 7% u 8% que es la óptima para mezclas de productos vibro-compactados, una vez alcanzado este porcentaje, se transporta la mezcla hacia la vibro-

compactadora a través de una faja, donde la mezcla es adaptada a la forma de los respectivos moldes y sufren un proceso de vibrado para poder compactar el material.

Una vez compactado el bloque de concreto, estos son colocados en placas metálicas que son transportadas por cadenas hacia unos *racks* metálicos. Cuando este se encuentra lleno, el responsable del montacarga lo retira de la cadena transportadora y los transporta a la cámara de curado, donde los bloques serán almacenados.

Finalmente, en el área de curado, luego de verificar el funcionamiento del 100% de los aspersores se procede a llenar la cámara con los productos moldeados. Una vez llenada la cámara, el operador cierra la puerta e inicia la secuencia de curado que tiene una duración total de dieciséis horas; una hora de reposo para que el cemento empiece a reaccionar e inicie fraguado, once horas de nebulización con neblina en toda la cámara con agua para evitar que el producto se queme y pueda alcanzar su resistencia ideal; y las cuatro horas restantes son destinadas al reposo para que la humedad dentro de la cámara se disipe. Luego de haber concluido con este proceso, el producto se encuentra listo para ser trasladado a la zona de selección, embalaje y almacenaje. El esquema de producción se puede apreciar en la Figura 18.



**Figura 18.** Esbozo de distribución de áreas dentro de la fábrica de concreto convencional

Fuente: Columbia Machine (2023).

### ***Infraestructura***

El área de la fábrica de producción se encuentra dividida en distintos espacios de acuerdo a su función, como se aprecia en la Tabla 7. Cada una de estas áreas tiene su propia infraestructura al igual que sus propias características y están colocadas de manera que se genere un flujo en la cadena de producción.

El área de oficinas administrativas dentro de la fábrica está compuesta por estructuras de un solo nivel construidas con concreto armado y con un tiempo de vida de 20 años. A su vez, el área de transporte tiene una extensión de 800 m<sup>2</sup> y, a través de Google Maps y la información brindada por la empresa, se puede constatar que corresponde a un área pavimentada por donde se moviliza la maquinaria. Por otro lado, el área de almacenaje de agregados está compuesta por tolvas que contienen los agregados y de silos de cemento, donde este elemento es conservado a granel.

**Tabla 7**

*Distribución de los espacios de la fábrica de producción de concreto convencional por área (metro cuadrado).*

<b>Nombre del espacio</b>	<b>Área cubierta</b>	<b>Unidad</b>
Área total de la fábrica	9,800	
Área de oficinas dentro de la fábrica	250	
Área de almacenaje del agregado	2,500	
Área de mezclado	150	m <sup>2</sup>
Área de almacenaje	4,100	
Área de curado	2,000	
Área de transporte	800	

Por su parte, el área de curado tiene una extensión total de 2,000 m<sup>2</sup> distribuidos en veintidós cuartos de 60 m<sup>2</sup> construidos bajo la técnica de albañilería confinada. Dentro de estos cuartos, se encuentra la maquinaria empleada en el proceso de curado, por lo que, en

el modelado de este espacio se tendrá en consideración el consumo eléctrico proveniente de este proceso. Los detalles se encuentran contemplados en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Características del cuarto de curado en la fábrica de producción de concreto convencional*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Cantidad de cuartos	22	und
Área de cada cuarto de curado	60	m <sup>2</sup>
Longitud de cada cuarto de curado	3x20x3	m
Material de cuarto (ver ejemplos)	Albañilería armada	-
Material aislante para el cuarto	No Aplica	-
Tiempo de curado	16	horas
Material empleado para realizar el curado	Agua	-
Cantidad empleada anualmente de dicho material	1400	m <sup>3</sup>
Cantidad de energía empleada en este proceso	13,900	kWh

Fuente: Empresa dedicada a la producción de BDC.

### ***Etapas de transporte de materiales***

En este proceso, se considera la movilización de la materia prima; cemento, agua y agregados, desde el lugar de recolección hasta la fábrica de bloques. Respecto al transporte del cemento, se optó por un camión que permita el uso de una bombona para el traslado de este material en estado de granel. De acuerdo a las características dadas por la empresa en el cuestionario, se considera una bombona con capacidad de carga de 30 toneladas y conforme a las especificaciones técnicas del camión proporcionadas por la marca Renault (Renault Trucks, 2015), el peso neto es de 10 toneladas y tiene un motor con potencia de 460 HP. En cuanto a la movilización de agua, esta se da a través de cisternas que cuentan con una capacidad de transporte de 10 m<sup>3</sup> y una potencia de 270 HP (DONGFENG, 2021).

Por otra parte, las distancias de recorrido fueron calculadas integrando la información brindada por la empresa con los datos sobre los viajes obtenidos a través de Google Maps. Para el transporte de cemento, hay un desplazamiento de aproximadamente 30 km desde el

punto de colección del cemento hasta la fábrica, el cual es desarrollado en un plazo de aproximadamente 1 hora y 15 minutos. Por lo que se refiere a agregados, estos son recogidos de una cantera situada en Jicamarca y llevados a la fábrica, lo cual representa un recorrido de 25 km, con una duración promedio de 1 hora debido al tráfico de la ruta. Por último, la movilización de agua en cisternas, de acuerdo a los datos brindados por la empresa, es de 9 km.

### ***Etapa de mezclado***

Como se mencionó en incisos anteriores, en esta etapa la maquinaria empleada consiste principalmente en fajas transportadoras de distintas longitudes, una mezcladora, una vibro compactadora y el empleo de montacargas para el transporte de los bloques recién moldeados. Las características físicas y mecánicas de estos elementos han sido detallados por la empresa en el cuestionario y se detallan en las Tablas 9- 11, en la cual se incluyen el peso, la potencia de equipo, las horas de servicio, entre otros. Estos datos son relevantes pues permiten calcular el consumo de energía y crear un modelo en la base de datos de SimaPro.

**Tabla 9**

*Características físicas y mecánicas de la primera faja transportadora empleada en el proceso de mezclado en la elaboración del concreto convencional*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/modelo	Faja transportadora	
Peso	3	ton
Distancia de transporte	10	m
Potencia de equipo	5.25	kW
Horas de servicio al día	18	horas
Frecuencia de uso al mes	22	días
Tiempo de vida de la maquinaria	20	años

**Tabla 10**

*Características físicas y mecánicas de la segunda faja transportadora empleada en el transporte desde la mezcladora hacia la vibro-compactadora*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/modelo	Faja transportadora	
Peso (ton)	5	
Distancia de transporte	25	m
Potencia de equipo	18.75	kW
Combustible empleado por hora	No Aplica	
Horas de servicio al día	12	horas
Frecuencia de uso al mes	22	días
Tiempo de vida de la maquinaria	20	años
Otros datos	Fabricación local	

**Tabla 11**

*Características físicas y mecánicas de la tercera faja transportadora empleada en el traslado de los bloques de concreto convencional hacia el montacargas*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/modelo	Modelo: UL-37	
Peso	2	ton
Distancia de transporte	8	metros
Potencia de equipo	37.5	kW
Combustible empleado por hora	No Aplica	-
Horas de servicio al día	18	horas
Frecuencia de uso al mes	22	días
Tiempo de vida	20	años
Otros datos	Marca: Columbia Machine EE.UU.	

### ***Mezcladora y vibro-compactadora***

El equipo adquirido para esta etapa es la mezcladora modelo 81 de Columbia Machine y en Tabla 12 se muestran los datos técnicos de la maquinaria proporcionada por la empresa. Respecto a la vibro – compactadora, la maquinaria adquirida es de la misma marca, sin embargo, el modelo es 1600 y sus características se muestran en la Tabla 13.

Para modelar la entrada de este tipo de elementos se tuvo en cuenta el material usado, el peso de la máquina y el tiempo de vida. Asimismo, con las horas trabajadas por día y la

cantidad de días considerados para la producción, se calculó la energía consumida por los equipos durante sus respectivos tiempos de trabajo.

**Tabla 12**

*Características físicas y mecánicas de la mezcladora empleada en el proceso de fabricación de bloques de concreto convencional*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/modelo	Modelo 81	
Peso	15	ton
Material usado	Acero	
Potencia de equipo	45	kW
Horas de servicio al día	18	horas
Frecuencia de uso al mes	22	días
Tiempo de vida de la maquinaria	20	años
Otros datos	Marca: Columbia Machine EE.UU.	

**Tabla 13**

*Características físicas y mecánicas de la vibro-compactadora empleada en el proceso de fabricación de bloques de concreto convencional*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/modelo	Modelo 1600	
Peso	10	ton
Material usado	Acero	
Potencia de equipo	18.75	kW
Combustible empleado por hora	No Aplica	
Horas de servicio al día	18	horas
Frecuencia de uso al mes	22	días
Tiempo de vida de la maquinaria	20	años
Otros datos	Marca: Columbia Machine EE.UU.	

### ***Montacarga***

El montacarga es empleado para el transporte de bloques de concreto desde el área de mezclado hacia el área de curado. En la Tabla 14 se aprecian las propiedades de este elemento, de las cuales el material empleado, la capacidad de carga, el tiempo de vida y el consumo de diésel fueron empleados para los cálculos correspondientes al modelado de esta entrada en SimaPro.

**Tabla 14.**

*Características físicas y mecánicas del montacargas empleado en el proceso de fabricación de bloques de concreto convencional*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/modelo	Modelo: H135FT	
Peso	8.94	ton
Material usado	Acero	
Potencia de equipo	90	kW
Combustible empleado por hora (GLP)	160	litros
Horas de servicio al día	16	horas
Frecuencia de uso al mes	22	días
Tiempo de vida	15	años
Otros datos	Marca: Hyster	

### ***Bomba de agua***

En el área de curado, se emplea una bomba de agua para la distribución de agua entre los veintidós aspersores que conforman el sistema. Sus características son expuestas en la Tabla 15, entre las que figuran el peso, la potencia, el consumo en términos de hora y el tiempo de vida, parámetros que serán empleados para el modelado de sus respectivas entradas.

**Tabla 15**

*Características físicas y mecánicas de la bomba de agua empleada en el proceso de curado del concreto*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/modelo	Tipo: bomba vertical	
Peso	50	kg
Material usado	Acero	
Potencia de equipo	2.2	kW
Combustible empleado por hora	No Aplica	-
Horas de servicio al día	24	horas
Frecuencia de uso al mes	22	días
Tiempo de vida	15	años
Otros datos	Marca: Lowara	



#### 3.4.2.4. Proceso de producción de bloques de concreto reciclado

El proceso de producción de bloques de concreto reciclado presenta algunas diferencias sustanciales respecto a la producción de bloques de concreto convencional. La más resaltante de ellas, como se mencionó anteriormente, es la obtención de agregado reciclado a partir de los RCD. De igual forma, es conveniente volver a señalar que los límites del sistema no comprenden la demolición de la estructura como una de las actividades a analizar en el presente estudio, sin embargo, sí se considera el uso de maquinaria para el movimiento de los RCD hacia la fábrica. Para el transporte, se emplea una retroexcavadora para el levantamiento de material desde el lugar de demolición o construcción hacia el contenedor, acción que representa un desplazamiento de 0.5 kilómetros. Asimismo, para el traslado de los RCD hacia la fábrica se utilizan camiones con tolva tipo volquete y se realiza un recorrido que cubre una distancia promedio de 25 kilómetros. Los detalles de ambos transportes se encuentran en las Tablas 16 y 17, en las cuales se señalan las características más significativas que serán tomadas en cuenta para el modelado de su configuración.

**Tabla 16**

*Características físicas y mecánicas del minicargador frontal empleado en el recojo de RCD*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/Modelo	Bobcat S650	
Cantidad de maquinaria	1	und
Material	Hierro fundido	
Peso (ton)	3.78	ton
Horas del servicio al día	4	H

**Tabla 17**

*Características físicas y mecánicas del transporte empleado del lugar de construcción demolición hasta la fábrica de producción de bloques de concreto reciclado*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/Modelo	Camión con tolva tipo volquete Renault Kerax 460	
Material:	Acero	-
Peso total	45	ton

Carga util	34	ton
Tipo de combustible empleado	Diesel	-
Potencia del motor	460	HP

Una vez situada la materia prima en la fábrica, empieza el procesamiento de RCD para su transformación en agregados reciclado (AR) que, posteriormente, será utilizado en una mezcla de concreto. Para esto, se lleva a cabo un proceso cuyo primer paso consta de una segregación manual que implica la separación de materiales como plástico, madera, papeles, cartones y acero del concreto, la cantidad de material descartado es menor al 1% por tonelada de RCD reciclado. La información sobre su destino se visualiza en la Tabla 18. En esta etapa, se emplea un martillo demoledor para poder disminuir el tamaño de los residuos de concreto, de manera que este pueda pasar sin mayor dificultad al área de trituración.

**Tabla 18**

*Tipo y cantidad de los materiales descartados en el proceso de segregación*

Material	Peso anual (kg)	Lugar a donde el material es destinado
Plásticos	96.0	Recicladores
Sacos de polipropileno	45.6	Como basura común
Papeles y cartones	15.6	Como basura común
Acero	764.4	Recicladores
Madera	328.8	Reusado en Planta / Recicladores

### **Tratamiento del RCD**

Luego de eliminar el material descartado y reducir el tamaño máximo del concreto proveniente de RCD, este pasa por una máquina trituradora de mandíbula, la cual le dará el tamaño mínimo necesario para pasar por una segunda segregación del material mediante el zarandeo. Los detalles de las maquinarias empleada durante este proceso se describen en las

Tabla 19 y 20. En ellas se detalla el material empleado para su fabricación, el tiempo de vida y la energía consumida.

**Tabla 19**

*Características físicas y mecánicas de la trituradora empleada en el proceso de producción de bloques de concreto reciclado*

<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/Modelo	De mandíbula	-
Cantidad de maquinaria en planta	1	und
Material	Acero al manganeso y fierro	-
Peso	0.45	ton
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:	eléctrico	-
Potencia de motor	7.5	HP
Horas del servicio al día	8	h
Frecuencia de uso al mes	6	días
Tiempo de vida:	10	años

**Tabla 20**

*Características físicas y mecánicas de la faja transportadora que transporta el RCD desde la trituradora hasta el tamiz*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Cantidad de equipos usados	1 faja	-
Material	Caucho negro anticorte y abrasivo	-
Peso	0.6	ton
Distancia recorrida	6	metros
Carga	4 a 5	m <sup>3</sup> /h

Posteriormente, el material es llevado a una zaranda vibratoria que consta de dos mallas con distinto número de abertura, como se detalla en la Tabla 21, que le dan al agregado el tamaño requerido para su uso en la mezcla. En las Tablas 22 y 23 se muestran los detalles característicos de la zaranda y la faja transportadora, respectivamente. Dentro de estos, se considera el material que lo compone, peso, tiempo de vida y consumo eléctrico.

**Tabla 21***Número de malla y material empleados en la tamizadora*

<b>Nombre</b>	<b># de malla</b>	<b>Material de los tamices</b>
Malla 1	4	Acero inoxidable C-304
Malla 2	100	Acero inoxidable C-304

**Tabla 22***Características físicas y mecánicas de la zaranda vibratoria utilizada en el proceso de tamizado de RCD*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/Modelo	-	-
Cantidad de maquinaria en planta	1	UND
Material	Plancha LAF	-
Peso	0.300 – 0.400	ton
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:	Eléctrico	-
Tipo de combustible empleado	No emplea combustible	-
Potencia de motor	2	HP
Horas del servicio al día	L-V: 8 S: 4	h
Tiempo de vida:	10	años
Accesorios adicionales	02 mallas 02 motores	
Otros datos	Hecha en Perú	

**Tabla 23***Características físicas y mecánicas de la faja transportadora en la movilización del RCD desde la zaranda hacia la mezcladora*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/Modelo	Motor reductor de 3.5 HP trifásico	
Material	Caucho	
Peso	0.6	ton
Distancia recorrida	6	m
Carga	4 – 5	m <sup>3</sup> / h
Otros datos:	Hecha en Perú	

***Mezclado***

Con el agregado reciclado finalmente obtenido, el proceso de manufactura continua con la etapa de mezcla, en la cual se reúne la materia prima del concreto; agua, cemento y el

agregado reciclado, en cantidades que van de acuerdo a la dosificación manejada por el fabricante. Estos elementos son vertidos en el mixer tipo batea, cuyas especificaciones técnicas han sido colocadas en la Tabla 24.

**Tabla 24**

*Características físicas y mecánicas de la mezcladora de concreto empleada en la elaboración de bloques de concreto con agregado reciclado.*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/Modelo	Tipo batea	
Cantidad de maquinaria en planta	1	UND
Material	Acero / metal	
Peso	0.5	ton
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:	Eléctrico	
Tipo de combustible empleado	No usa	
Potencia de motor	12	HP
Horas del servicio al día	8	h
Frecuencia de uso	6 días a la semana	
Tiempo de vida:	10	años
Otros datos:	Hecha en Perú	

### **Moldeado del bloque de concreto con A.R.**

Luego de realizar el mezclado de materiales, este compuesto es transportado hacia la bloquetera a través de fajas y es vertido en esta máquina con el fin de moldear los bloques de acuerdo al modelo estipulado. El material principal del cual está hecho la maquinaria es el acero, por lo que es considerado como material bajo estudio. Los datos obtenidos sobre esta máquina fueron recolectados a través de la encuesta y precisan el tipo de motor, la potencia de este, la producción por horas, la capacidad volumétrica, la frecuencia de uso y el tiempo de vida de la maquinaria. Estos han quedado registrados en la Tabla 25.

**Tabla 25**

*Características físicas y mecánicas de la máquina bloquetera empleada para el moldeo del bloque de concreto reciclado*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tipo/Modelo	Máquina hidráulica	
Cantidad de maquinaria en planta	1	UND

Material	Acero	-
Peso	1	ton
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:	eléctrico	-
Tipo de combustible empleado	No usa	-
Potencia de motor	Motor de 12 hp trifásico para sistema hidráulico	HP
Horas del servicio al día	Motor de 3.5 hp trifásico para vibración	8
Frecuencia de uso al mes	6 días a la semana	-
Tiempo de vida:	10	años

### 3.4.3. Procesos unitarios del inventario

En este apartado se indican las entradas, como maquinarias, consumo de electricidad, transporte, entre otros, y sus respectivas cantidades que fueron empleadas para la obtención de una tonelada de concreto. Estas se encuentran separadas de acuerdo al tipo de bloque producido y, dentro de esta diferenciación, agrupadas según la etapa o sub-etapa del proceso de producción que requiera su uso, entre los cuales figuran actividades como la obtención de materia prima, el transporte, el tratamiento de estos materiales y el proceso de fabricación de bloques de concreto.

#### 3.4.3.1. Bloque de concreto convencional

##### Obtención de materia prima

La producción de bloques de concreto convencionales tiene como primer paso la obtención de materia prima, para ello, el primer paso es modelar estos elementos. Como se mencionó anteriormente, para los agregados naturales se eligieron entradas existentes en el inventario y modeladas para el resto del mundo (RoW), las cuales consideran la maquinaria, energía y materia prima empleada en el proceso de extracción de estos materiales. Sin embargo, estas fueron adaptadas de acuerdo al consumo energético calculado a partir de los datos proporcionados de la actividad de extracción de este material en las canteras de Jicamarca. En cuanto al cemento, ya existía una entrada contextualizada a Perú debido a una investigación previa, no obstante, el valor del clínker fue actualizado de acuerdo al INGEl,

por lo que el inventario de emisiones al aire generados por este material fue modificado. El producto final para esta etapa es una (1) tonelada de mezcla de concreto convencional, para el cual se emplea agua, cemento y agregados en cantidades acordes a la dosificación previamente brindada para la obtención de la cantidad final de la mezcla, tal como se aprecia en la Tabla 26.

**Tabla 26**

*Proceso unitario de la etapa de obtención de materiales para la producción de una tonelada de bloques de concreto convencional.*

<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Inventario Asociado</b>
Cemento Portland	97.4	kg	Cement, Portland {PE}  production   Alloc Def, U
Obtención de Agua	0.06	m3	Proceso de obtención de agua extraída de un pozo {PE}
Agregado grueso	187.9	kg	Gravel, crushed {PE} - BDC   production   APOS, U
Agregado fino	651.1	kg	Sand {PE} - BDC 2021  gravel and quarry operation   APOS, U

### **Transporte de materia prima**

La siguiente etapa en el proceso de manufactura es transporte de materia prima, la cual abarca la introducción de distintos tipos de transportes que muestren similitud con los vehículos empleados en la vida real. El factor determinante para la elección del transporte consiste en el peso de este, ya que varía en distintos rangos, sin embargo, de acuerdo a las características, se optó por escoger aquellos que se encuentran en el rango de 16-32 toneladas y en la versión euro 4, de acuerdo a los lineamientos decretados (MINAM, 2018). Las unidades para estas entradas son toneladas por kilómetros (tkm) y los valores ingresados están en función de los kilómetros recorridos desde el lugar de acopio hasta la fábrica, la cantidad demandada en el tiempo de referencia utilizado y la cantidad de material empleado para la producción del producto final, en este caso, una tonelada de bloques de concreto convencional. En la Tabla 27 se pueden apreciar los parámetros anteriormente descritos.

**Tabla 27**

*Proceso unitario de la etapa de transporte de materiales para la producción de bloques de concreto convencional.*

<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Inventario</b>
Transporte de cemento	3.2	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4   APOS, U
Transporte de agua	0.6	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {PE} - BDC   transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   APOS, U
Transporte de agregado fino	12.9	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4   APOS, U
Transporte de agregado grueso	3.7	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4   APOS, U

En cuanto a las emisiones generadas en esta etapa, se han considerado aquellas relacionadas al consumo de diésel por los medios de transporte. Por un lado, se utilizó el factor de emisión de 0.207 kgCO<sub>2</sub>eq/tkm (Mao et al., 2013) en la fórmula 2 planteada en la misma investigación para obtener el total de emisiones provenientes del proceso de combustión de combustible.

$$E = \frac{M_j \times L_j^m \times f_k^t}{1000} \quad (2)$$

Donde, E son las emisiones generadas en la combustión del combustible empleado en el transporte de los materiales de construcción,  $M_j$  es la cantidad de materiales de construcción,  $L_j^m$  es la distancia desde el centro de distribución de estos materiales hasta la fábrica de BDC y  $f_k^t$  es el factor de emisiones de GEI provenientes de la combustión de combustible para el transporte (Mao et al., 2013).

### **Mezclado y moldeado de los bloques de concreto**

En la planta de producción de bloques de concreto, el cemento es colocado en un silo para su almacenaje y los agregados son colocados en tolvas, para poder ser empleados posteriormente. En esta etapa se distinguen tres tipos de productos modelados en el software. Uno de estos corresponde a la maquinaria empleada para los procesos de mezclado y



moldeado, las cuales son una mezcladora de concreto y una vibro-compactadora. El valor ingresado de cada una de estas se calculó en base al peso total de la maquinaria, al tiempo de vida de dicho el elemento y al tiempo de referencia sobre el cual fue modelado el estudio. Como estamos realizando procesos unitarios, se procede a dividir este resultado entre las toneladas de concreto producidos en el tiempo de referencia y tenemos como resultado la cantidad de maquinaria empleada para la producción de una tonelada de concreto, cifra ingresada en el modelado del producto.

$$Cantidad\ empleada = \frac{Peso\ de\ maquinaria\ (kg) * \frac{tiempo\ de\ uso\ (6\ meses)}{tiempo\ de\ vida\ útil}}{Toneladas\ de\ concreto\ producidas}$$

Para el cálculo de la cantidad de fajas transportadoras empleadas se realizó una operación similar, sin embargo, la diferencia radica en que el numerador no es el peso de la máquina, sino que, en su lugar, se coloca la cantidad de metros de los cuales disponen estos elementos.

$$Valor\ ingresado = \frac{longitud\ de\ faja\ (cm.) * \frac{tiempo\ de\ uso\ (6\ meses)}{tiempo\ de\ vida\ util}}{Toneladas\ de\ concreto\ producidas}$$

**Tabla 28**

*Proceso unitario de la etapa de mezclado y moldeado interno para la producción de bloques de concreto convencionales*

<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Inventario Asociado</b>
Máquina mezcladora de concreto	4.62	g	Industrial machine, heavy, unspecified {RoW}  production   APOS, U
Faja transportadora - colectora	1.23	mm	Faja transportadora {PE}  production   APOS, U
Faja transportadora - inclinada	3.08	mm	Faja transportadora {PE}  production   APOS, U
Máquina vibrocompactadora	3.08	g	Industrial machine, heavy, unspecified {RoW}  production   APOS, U
Faja transportadora - cargadora	0.99	mm	Faja transportadora {PE}  production   APOS, U
Montacarga BDC	0.5	tkm	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO4   APOS, U
Consumo electrico	12.4	kWh	Electricity, medium voltage {PE}  market for   APOS, U (SEIN)

## Curado

En el proceso de curada, la salida es de 1.01 toneladas de concreto, debido a que el porcentaje de perdidas es de 1%, sin embargo, no hay pérdida neta debido a que los bloques descartados se recirculan. En esta etapa, la maquinaria utilizada es una bomba de agua cuyo valor para la generación de una tonelada de concreto reciclado está en unidades de energía y fue obtenido dividiendo el consumo total de mega Joules entre la cantidad total de toneladas producidas anualmente. Por otra parte, la infraestructura correspondiente a los cuartos de curado también es considerada, y, si bien el valor asignado inicialmente es el de una pieza, la cantidad ingresada en este proceso unitario corresponde al valor de una pieza dividida entre el tiempo de vida de la infraestructura y la cantidad de toneladas de concreto convencional producido anualmente. Los valores de los parámetros mencionados se encuentran colocados en la Tabla 29.

**Tabla 29**

*Proceso unitario de la etapa de curado de bloques de concreto convencionales*

<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Inventario Asociado</b>
Bomba de agua	0.29	MJ	water pump operation, electric {PE}  water pump operation, electric   APOS, U
Cuarto de curado	6E-7	p	Cuarto de curado - BDC {PE}  construction   APOS, U
Consumo eléctrico	1.9	kWh	Electricity, medium voltage {PE}  market for   APOS, U (SEIN)

### 3.4.3.2. Bloque de concreto reciclado

#### Obtención de materia prima

En esta etapa figuran los inventarios asociados a los productos empleados como materia prima en la producción de bloques de concreto con agregado reciclado. Las cantidades ingresadas, mostradas en la Tabla 30, corresponden a la dosificación empleada por el fabricante para la producción de una tonelada de mezcla.

**Tabla 30**

*Proceso unitario de la etapa de obtención de agregado reciclado*

<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Inventario asociado</b>
----------------	-----------------	---------------	----------------------------

Obtención de agua	127.0	kg	Water, unspecified natural origin, PE
Cemento Portland	4.7	p	Bolsa de Cemento
RCD	673.0	kg	Residuos de Construcción y Demolición {PE} - inert rock

### Transporte de materia prima

El proceso de manufactura continua con el transporte de los materiales. El inventario asociado al transporte es el mismo al mencionado en la producción de bloques de concreto convencionales, el cual corresponde al vehículo de 16-32 toneladas en la versión euro 4. Las unidades son toneladas por kilómetros (tkm) y los valores ingresados están en función a los mismos parámetros mencionados anteriormente, las entradas han sido colocadas en la Tabla 31.

**Tabla 31**

*Proceso unitario de la etapa de transporte de materiales para la producción de bloques de concreto reciclado*

Entrada	Cantidad	Unidad	Inventario
Transporte de cemento	4.61	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4   APOS, U
Transporte de agua	2.56	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {PE} - BDC   transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   APOS, U
Transporte de RCD en camión	13.50	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4   APOS, U
Transporte de RCD en montacarga	0.03	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {PE} - BDC   transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   APOS, U

El cálculo de emisiones por tonelada por kilómetro para el transporte de cada material se realiza de la misma manera a lo indicado en el apartado de transporte en la producción de bloques de concreto convencionales, es decir, empleando los factores de emisión (0.207 kgCO<sub>2</sub>eq/tkm) y la fórmula 2.

## Conversión del RCD a agregado reciclado

En esta etapa, se consideran sub procesos en el desarrollo de la actividad. En primer lugar, está la segregación de residuos, la cual emplea un martillo eléctrico demoledor y una faja transportadora, luego se da el proceso de trituración y finalmente el zarandeo del material. La cantidad de maquinaria y el consumo eléctrico generados en la producción de una tonelada de BDCR, así como el inventario asociado a estos productos se pueden visualizar en la Tabla 32.

**Tabla 32**

*Entradas unitarias para el tratamiento de RCD con el fin de convertir estos residuos en agregado reciclado.*

<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Inventario asociado</b>
Martillo demoledor	400	g	Martillo Demoledor{PE} - Industrial machine, heavy, unspecified {RoW}  production   APOS, U
Faja transportadora	400	µm	Faja Transportadora {PE}  production   APOS, U
Consumo eléctrico	4710	Wh anual	Electricity, medium voltage {PE}  market for   APOS, U (SEIN)
Máquina trituradora	29	g	Trituradora- Industrial machine, heavy, {PE}  production   APOS, U
Faja transportadora	400	µm	Faja Transportadora {PE}  production   APOS, U
Consumo eléctrico	11400	Wh anual	Electricity, medium voltage {PE}  market for   APOS, U (SEIN)
Zaranda vibratoria	20	g	Zaranda - Industrial machine, heavy, unspecified {PE}  production   APOS, U
Consumo eléctrico	2.030	kWh	Electricity, medium voltage {PE}  market for   APOS, U (SEIN)

### **Mezclado**

Asimismo, para la etapa de mezclado, se considera de entrada una tonelada de mezcla de concreto reciclado como materiales individuales que serán procesados en la mezcladora que es de tipo trompo. La salida de este proceso es una tonelada de esta mezcla que posteriormente será vertida en la bloquetera. El inventario asociado a la maquinaria y el consumo, así como la cantidad requerida para la producción de la salida estipulada se encuentran en la Tabla 33.

**Tabla 33**

*Proceso unitario de la etapa de mezclado de materiales para la producción de una tonelada de bloques de concreto con agregado reciclados*

<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Inventario asociado</b>
Máquina mezcladora	21.7	g	Mezcladora {PE} - Industrial machine, heavy, unspecified {RoW}  production   APOS, U
Consumo eléctrico	8.4	kWh	Electricity, medium voltage {PE}  market for   APOS, U (SEIN)

Para el moldeado del bloque de concreto reciclado, las entradas del proceso consisten en el aceite empleado para lubricar los moldes (*lubricating oil*) el cual fue obtenido del inventario *ecoinvent* 3.4, característica compartida con la bloquetera. No obstante, los valores ingresados para cada uno corresponden a la cantidad consumida o utilizada registrada en el cuestionario dividida entre el total de toneladas de producción de concreto reciclado y se encuentran en la Tabla 34.

**Tabla 34**

*Proceso unitario para la etapa de moldeado de bloque de concreto reciclado*

<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Inventario asociado</b>
Máquina bloquetera	43.4	g	Bloquetera - Industrial machine, heavy, unspecified {RoW}  production   APOS, U
Aceite lubricante	20.9	g	Lubricating oil {RoW}  production   APOS, U
Consumo eléctrico	10.8	kWh	Electricity, medium voltage {PE}  market for   APOS, U (SEIN)

Por último, se modeló la infraestructura de la fábrica de concreto reciclado teniendo en consideración los elementos empleados en la construcción. Este lugar posee muros exteriores elaborados con bloques de concreto, oficinas y servicios higiénicos construidos usando ladrillos de arcilla. El valor ingresado corresponde a la cantidad de infraestructura empleada en la producción de una tonelada de bloques de concreto reciclado, cifra obtenida en función al tiempo de vida de la fábrica, tiempo de uso abarcado en el estudio y el total de toneladas producidas durante el tiempo de estudio. La información se puede apreciar en la Tabla 35.

**Tabla 35***Proceso unitario para la infraestructura de bloque de concreto reciclado*

<b>Entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Inventario asociado</b>
Infraestructura	21.7	μp	Fábrica de producción de bloques de concreto reciclado {PE}



## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

### 4.1. Evaluación de impacto ambiental

#### 4.1.1. Método IPCC 2013: Cambio climático

##### 4.1.1.1. Análisis del bloque de concreto convencional

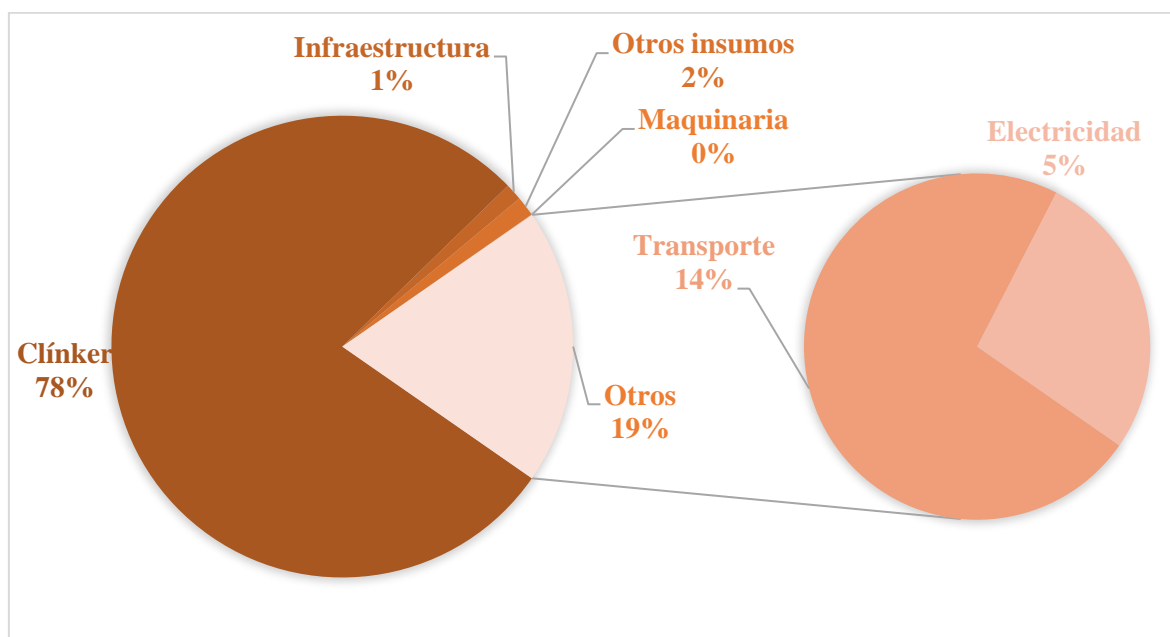
En primer lugar, se procederá a presentar los resultados de la evaluación ambiental realizada a una tonelada de bloques de concreto convencional, los cuales son mostrados a continuación en las Tabla 36 donde se muestra el aporte de emisiones por etapas y en la Figura 19, en la cual se asocian las emisiones de GEI por insumos empleados, respectivamente. En la producción de una tonelada de esta mezcla, se generan un total de 90.1 kg CO<sub>2</sub>eq, de las cuales más del 80% son producidas en la etapa de obtención de la materia prima. Sin embargo, al analizar a mayor detalle se identifica que la producción de cemento portland es la actividad con mayores impactos y, dentro de esta, encontramos que el clínker es el responsable del 78% de las emisiones generadas, con un aporte de 70.4 kg CO<sub>2</sub>eq. En la misma etapa, la obtención de los agregados fino y grueso representan el 3% del impacto total generado, con valores de 1.9 kg CO<sub>2</sub>eq y 1.1 kg CO<sub>2</sub>eq cada uno. Por otro lado, la etapa de mezclado contribuye con un 11% al total de emisiones de GEI, mientras que aquellas generadas en el desplazamiento de materiales hacia la fábrica representan el 6%.

Adicionalmente, las emisiones asociadas al uso de transporte externo e interno y consumo de energía ocupan los siguientes lugares con valores de 12.7 kg de CO<sub>2</sub>eq y 4.7 kg de CO<sub>2</sub>eq respectivamente. Finalmente, aquellas categorías con menor impacto fueron el uso de maquinaria, la infraestructura y el uso de otros insumos, categoría que abarca elementos como el yeso, el acero, etileno y combustible empleado en la obtención de cemento. Los valores de cada uno de estos representan un porcentaje igual o menor a dos y generan una emisión de 0.03, 1.1 y 1.25 kg CO<sub>2</sub>eq, respectivamente.

**Tabla 36**

*Emisiones de kgCO<sub>2</sub>eq generadas en las etapas de producción de una tonelada de bloques de concreto convencional*

Obtención de materia prima	Transporte de materiales	Mezclado	Curado de bloques	Infraestructura	<b>Total</b>
74.6	5.1	10.0	0.4	0.1	90.1



**Figura 19.** Distribución porcentual con mayor detalle de las emisiones generadas en el proceso de producción de bloques de concreto convencional.

Por otro lado, los resultados de la evaluación ambiental de la unidad funcional (1 m<sup>2</sup> de muro preparado para recibir la aplicación de la primera capa de pintura) se encuentran en la Tabla 37. En ella, observamos que del total de emisiones (21.5 kgCO<sub>2</sub>eq), aquellas correspondientes a los bloques de concreto abarcan más del 60%, mientras que las emisiones restantes son atribuidas al mortero empleado en el tarrajeo, cuyo valor asciende a 8 kgCO<sub>2</sub>eq.

**Tabla 37**

*Emisiones de kgCO<sub>2</sub>eq generadas en la construcción de un metro cuadrado de muro no portante con bloques de concreto.*

Bloques de concreto	Cemento empleado en mortero	Arena empleada en mortero	<b>Total</b>
13.4	7.8	0.2	21.5



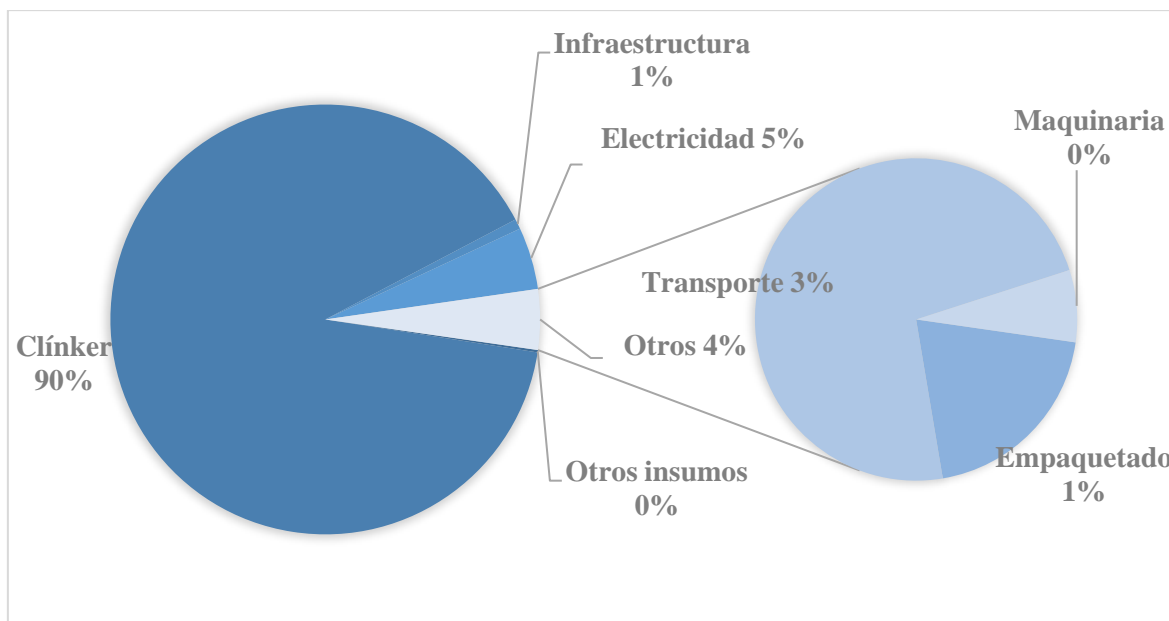
#### 4.1.1.2. Análisis del bloque de concreto reciclado

Los resultados de la evaluación ambiental de los bloques de concreto con agregado reciclado indican que, por una tonelada de estas piezas, se producen 162.9 kg CO<sub>2</sub>eq. En las Tabla 38 y Figura 20, se han colocado a través de graficas de barras, las contribuciones de CO<sub>2</sub> generados por etapas y por insumo, respectivamente. En cuanto a las etapas del proceso, la obtención de materia prima representa más del 90% de los impactos generados, con un aporte de 148.8 kgCO<sub>2</sub>. Este aporte está originado, en su mayoría, por la obtención de cemento; específicamente, en la producción de clínker, debido a que este proceso emite 144.6 kg CO<sub>2</sub>eq, cantidad que se estima como un 89% de los impactos totales. Adicionalmente, el empaquetamiento de cemento es otra actividad que contribuye de manera considerable en la emisión de GEI, produciendo 1.5 kg CO<sub>2</sub>eq, equivalente al 1% del total de emisiones. En la misma línea, la segunda etapa con mayores contribuciones es el transporte de materia prima, con un aporte de 5.3 kg CO<sub>2</sub>eq, que representa el 3.3% del total, seguido por el consumo de electricidad en la fábrica que genera 7.5 kgCO<sub>2</sub> por producción de tonelada de concreto. Finalmente, aquellos insumos que proporcionan un aporte de emisiones casi nulo (cercanos al 0%) son la infraestructura, el uso de maquinaria, y otros componentes adicionales tales como piedras calizas, acero, etileno, entre otros, empleados en la obtención del cemento, con valores de 1.2, 0.5 y 0.3 kg CO<sub>2</sub>eq, respectivamente.

**Tabla 38**

*Emisiones de CO<sub>2</sub>eq generadas en las etapas de producción de bloques de concreto reciclado*

Obtención de materia prima	Obtención de A.R	Mezclado	Moldeado del bloque	Infraestructura	Transporte	<b>Total</b>
148.8	2.55	1.54	2.05	0.56	7.34	162.9



**Figura 20.** Distribución porcentual con mayor detalle de las emisiones generadas en el proceso de producción de bloques de concreto reciclado.

Por otro lado, los resultados de la evaluación ambiental de la unidad funcional (1 m<sup>2</sup> de muro preparado para recibir la aplicación de la primera capa de pintura) se encuentran en la Tabla 39. En ella, observamos que del total de emisiones (25.2 kgCO<sub>2</sub>eq), aquellas correspondientes a los bloques de concreto abarcan casi el 70%, mientras que las emisiones restantes son atribuidas al mortero empleado en el tarrajeo, cuyo valor asciende a 7.9 kgCO<sub>2</sub>eq.

**Tabla 39**

*Emisiones de kgCO<sub>2</sub>eq generadas en la construcción de un metro cuadrado de muro no portante con bloques de concreto reciclado*

Bloques de concreto	Cemento empleado en mortero	Arena empleada en mortero	Total
17.3	7.8	0.2	25.3

#### **4.1.2. Método ReCiPe**

Los resultados de la evaluación ambiental del ACV de la producción de bloques de concreto convencional y reciclado bajo la metodología ReCiPe 2016 v.1.1 MidPoint (H) son presentados a continuación.

##### ***4.1.2.1. Bloque de concreto convencional***

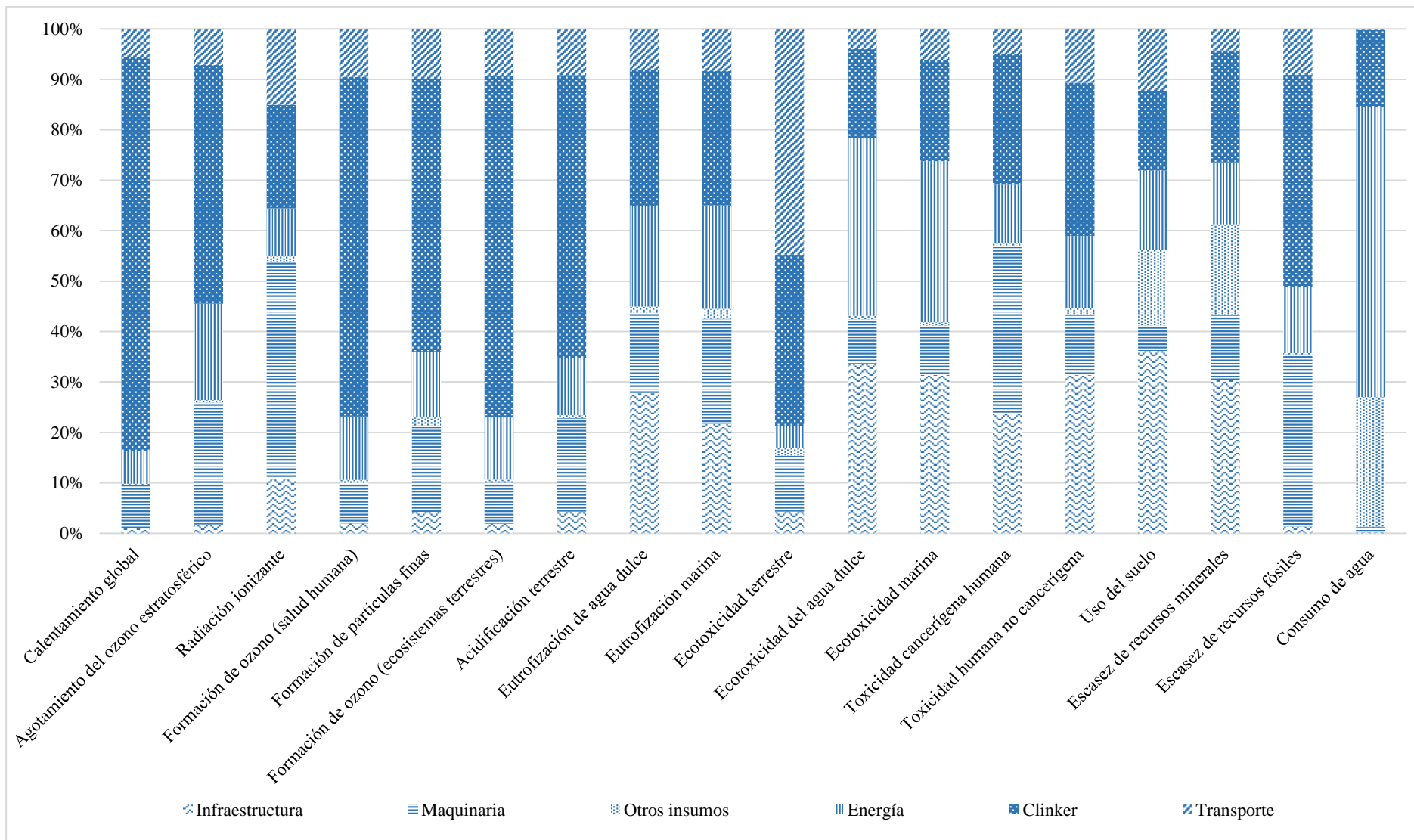
Los resultados de la evaluación ambiental, bajo la metodología ReCiPe de la producción de una tonelada de bloques de concreto convencional, se encuentran planteados en la Figura 21 a través de una gráfica de barras en la que se aprecia la contribución de cada etapa en la categoría de impacto correspondiente. Asimismo, los resultados se encuentran plasmados en la Tabla 40.

En esta evaluación se puede identificar que la obtención de materiales es la etapa con mayores contribuciones en dieciséis de las dieciocho categorías de impacto. De estas, destacan los indicadores de formación de ozono, con una contribución de 131 mg CFC11eq, en el impacto de la salud humana y de 136 g NOx eq en el impacto de los ecosistemas terrestres, así como el de ecotoxicidad de agua dulce y marina, en las cuales se genera 666 y 882 g de 1,4-DCB y, finalmente, en consumo de agua, donde se genera un gasto en esta etapa una cantidad de 2.5 m<sup>3</sup>. En todos estos indicadores, el aporte esta etapa representa el 60% en sus respectivas categorías de impacto.

El mezclado de materiales es la segunda etapa con mayores impactos, especialmente en los indicadores de agotamiento del ozono estratosférico (5.9 mg CFC11eq), radiación ionizante (160 Bq Co-60 eq), escasez de recursos fósiles (6.3 kg oil eq) y consumo de agua (1.3 m<sup>3</sup>), en los cuales se genera una contribución mayor al 30% del total. Respecto al transporte de materiales, esta etapa aporta con el 45% de emisiones de kg 1,4-DCB de ecotoxicidad terrestre, con el 15% de emisiones de Bq Co-60 eq en el indicador de radiación ionizante. Además, los impactos generados en esta etapa generan el 12.4% y 10.7% de

contribuciones en los indicadores de uso de suelo y toxicidad humana no cancerígena, respectivamente. Finalmente, tanto los impactos en infraestructura como en el curado de bloques son mínimos y representan menos del 5% del total en los dieciocho indicadores evaluados por ReCiPe.





**Figura 21.** Resultados del concreto convencional para las categorías evaluadas en el método ReCiPe MidPoint (H)

**Tabla 40**

*Resultados obtenidos de la producción de una tonelada de BDC en las categorías de impacto de la metodología ReCiPe 2016.*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Total</b>	<b>Obtención de materia prima</b>	<b>Transporte de materiales</b>	<b>Mezclado de materiales</b>	<b>Curado de los bloques</b>	<b>Infraestructura</b>
Calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq	90.6	75.0	5.1	10.0	0.4	0.1
Agotamiento del ozono estratosférico	mg CFC11 eq	18.5	11.0	1.3	5.9	0.2	0.0
Radiación ionizante	Bq Co-60 eq	374.7	152.1	56.5	160.1	1.7	4.4
Formación de ozono (salud humana)	g NO <sub>x</sub> eq	163.1	130.5	15.5	16.0	0.5	0.5
Formación de partículas finas	g PM <sub>2.5</sub> eq	42.4	29.9	4.2	7.9	0.2	0.2
Formación de ozono (ecosistemas terrestres)	g NO <sub>x</sub> eq	170.2	136.3	15.9	16.9	0.6	0.6
Acidificación terrestre	g SO <sub>2</sub> eq	111.2	77.5	10.1	22.7	0.4	0.5
Eutrofización de agua dulce	g P eq	1.8	1.3	0.1	0.3	0.0	0.0
Eutrofización marina	mg N eq	172.4	119.9	14.4	34.4	2.0	1.8
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	101.5	44.0	45.4	11.6	0.2	0.3
Ecotoxicidad del agua dulce	g 1,4-DCB	846.0	666.2	34.0	119.3	23.3	3.1
Ecotoxicidad marina	g 1,4-DCB	1149.2	881.8	70.3	164.2	28.5	4.4
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DCB	2.5	2.0	0.1	0.3	0.0	0.0
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	12.8	9.6	1.4	1.7	0.1	0.1
Uso del suelo	m <sup>2</sup> a crop eq	1.2	0.8	0.2	0.1	0.0	0.1
Escasez de recursos minerales	g Cu eq	79.1	66.1	3.3	8.3	0.7	0.7
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	16.0	8.1	1.5	6.3	0.1	0.0
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	4.0	2.5	0.0	1.3	0.2	0.0

En cuanto a la evaluación de un metro cuadrado de muro no portante, los resultados indican que más del 65% de impactos en cada uno de los indicadores provienen de los bloques de concretos empleados. Aquellos en los que se genera mayor incidencia son consumo de agua, radiación ionizante, ecotoxicidad marina y ecotoxicidad de agua dulce. Por otro lado, si bien es cierto los impactos generados por el mortero son menores, con una contribución inferior al 30% en la mayoría de casos, resalta el aporte en los indicadores de potencial de calentamiento global, formación de ozono tanto para la salud humana como para ecosistemas terrestres. Los valores en estas categorías son de 8 kgCO<sub>2</sub>eq, 13.5 g NO<sub>x</sub>eq y 14.1 g NO<sub>x</sub> eq, respectivamente. Los impactos del BDC y mortero pueden apreciarse en la Tabla 41.

**Tabla 41**

*Resultados obtenidos de un metro cuadrado de muro construido con BDC en las categorías de impacto de la metodología ReCiPe 2016.*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>BDC</b>	<b>Mortero</b>	<b>Total</b>
Calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq	14.7	8.0	22.7
Agotamiento del ozono estratosférico	mg CFC11 eq	3.5	1.1	4.6
Radiación ionizante	Bq Co-60 eq	49.4	13.8	63.2
Formación de ozono (salud humana)	g NO <sub>x</sub> eq	25.9	13.5	39.3
Formación de partículas finas	g PM2.5 eq	6.4	3.0	9.4
Formación de ozono (ecosistemas terrestres)	g NO <sub>x</sub> eq	27.0	14.1	41.0
Acidificación terrestre	g SO <sub>2</sub> eq	16.8	7.8	24.6
Eutrofización de agua dulce	mg P eq	322.2	117.3	439.5
Eutrofización marina	mg N eq	32.9	10.4	43.3
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	15.1	4.5	19.6
Ecotoxicidad del agua dulce	g 1,4-DCB	182.6	50.0	232.5
Ecotoxicidad marina	g 1,4-DCB	239.9	67.9	307.8
Toxicidad cancerígena humana	g 1,4-DCB	416.3	162.4	578.6
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	2.3	0.9	3.1
Uso del suelo	m <sup>2</sup> a crop eq	0.2	0.1	0.3
Escasez de recursos minerales	g Cu eq	13.5	6.0	19.5
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	2.6	0.8	3.4
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	1.5	0.2	1.7

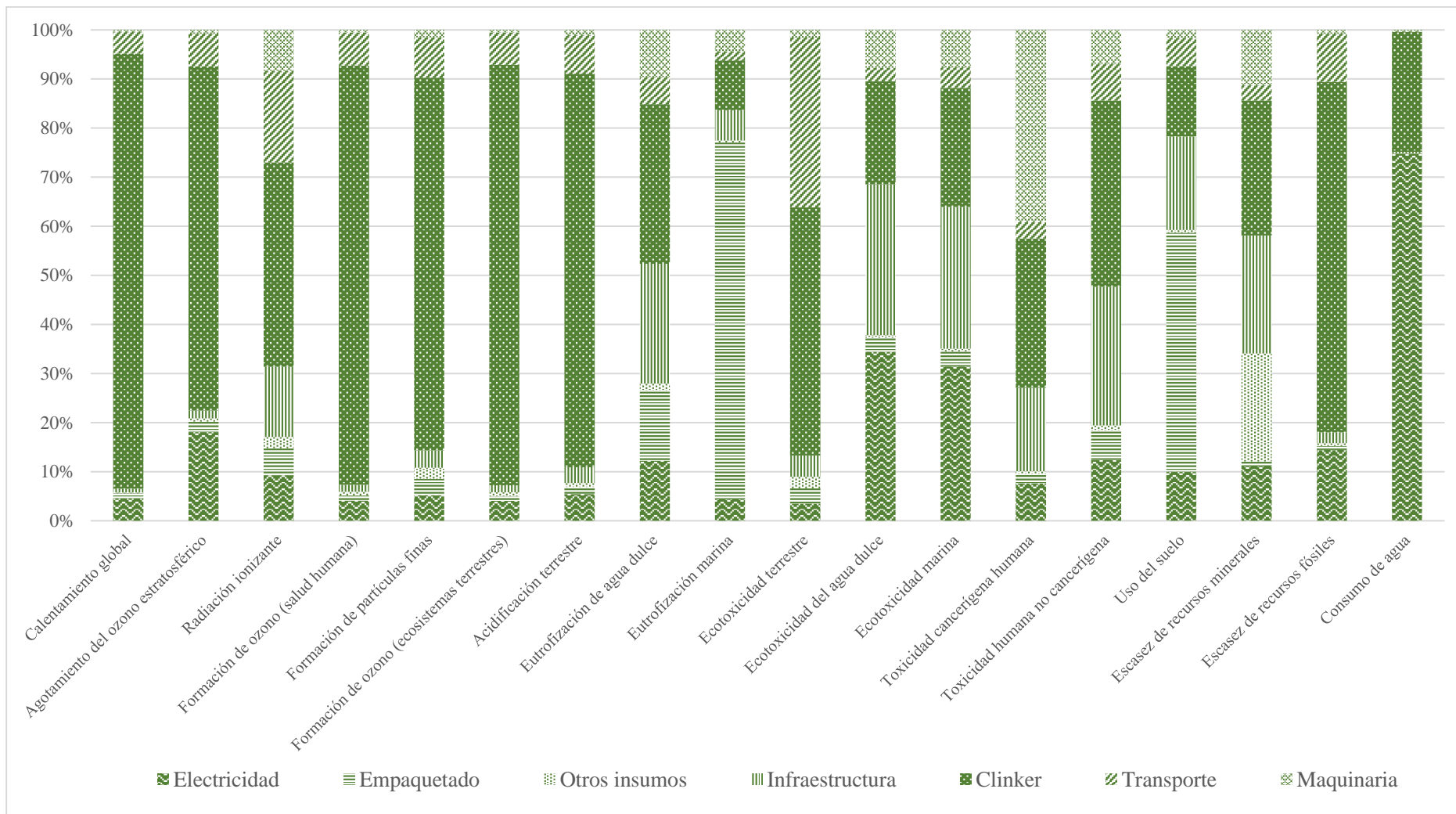
#### **4.1.2.2. Bloque de concreto reciclado**

Los resultados obtenidos, colocados en la Tabla 42, muestran la alta influencia de la obtención de materias primas en los impactos ambientales generados en la producción de una tonelada de bloques de concreto reciclado, debido a que, como se puede apreciar en la Figura 22, esta etapa aporta más del 60% del total en 16 de los 18 indicadores. Las excepciones corresponden a los índices de toxicidad cancerígena humana y consumo de agua, en los cuales el aporte asociado a la obtención del agregado reciclado es mayor al de la mayoría de casos, con una contribución de 1.3 kg 1,4-DCB y 1.2 m<sup>3</sup>, lo que representa un 22% y 31% de los totales del respectivo indicador. Respecto a este último indicador cabe mencionar que el consumo de agua en las etapas de mezclado y moldeado de bloque es cuantioso, representando el 16% y 20% con consumos de 0.8 m<sup>3</sup> y 1.03 m<sup>3</sup> cada uno.

Por otro lado, el transporte de materia prima coopera con menos de 10% en 16 de las 18 categorías de impacto, no obstante, su influencia es mayor en la categoría de impacto correspondiente a ecotoxicidad terrestre, debido a que genera 48.5 kg de 1,4-DCB de un total de 138.6 kg 1,4-DCB obtenidos en total dentro de esa categoría, lo que representa el 35%. Adicionalmente, la contribución de este proceso en la categoría de impacto de radiación ionizante representa cerca del 19% del total, debido a que en esta actividad se liberan 70.3 Bq Co-60 eq de un total de 371 Bq Co-60 eq.

Cabe resaltar que en el indicador de consumo de agua la obtención de materiales contribuye en un 43%, la obtención del agregado reciclado genera un consumo del 22% del total de agua, el mezclado y moldeado de la mezcla de concreto también tienen injerencia en este impacto con 15% y 20% del uso de agua, respectivamente





**Figura 22.** Resultados del concreto reciclado para las categorías evaluadas en el método ReCiPe MidPoint (H).

**Tabla 42**

*Resultados obtenidos de la producción de una tonelada de BDCR en las categorías de impacto de la metodología ReCiPe 2016.*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Obtención de materiales</b>	<b>Obtención de A.R</b>	<b>Mezclado de materiales</b>	<b>Moldeado del BDCR</b>	<b>Infraestructura</b>	<b>Transporte</b>	<b>TOTAL</b>
Calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq	149.8	2.6	1.6	2.1	0.6	7.4	163.9
Agotamiento del ozono estratosférico	mg CFC11 eq	20.1	1.5	1.0	1.3	0.1	1.7	25.7
	Bq Co-60 eq	240.2	30.6	8.8	15.1	14.0	70.3	378.9
Radiación ionizante	g NO <sub>x</sub> eq	235.4	4.1	2.3	3.2	1.5	17.8	264.3
Formación de ozono (salud humana)	g PM <sub>2.5</sub> eq	53.1	1.5	0.7	1.0	0.7	5.1	62.1
Formación de ozono (ecosistemas terrestres)	g NO <sub>x</sub> eq	246.9	4.2	2.4	3.4	1.5	18.2	276.7
Acidificación terrestre	g SO <sub>2</sub> eq	137.7	3.5	1.8	2.6	1.6	12.5	159.8
Eutrofización de agua dulce	g P eq	2.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	3.1
Eutrofización marina	mg N eq	832.0	40.3	11.2	17.5	13.1	17.2	931.2
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	85.8	2.4	0.9	1.5	1.3	48.5	140.3
Ecotoxicidad del agua dulce	kg 1,4-DCB	1.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	1.5
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	1.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	2.0
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DCB	2.2	1.3	0.2	0.4	0.1	0.1	4.3
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	16.3	1.4	0.6	0.9	0.4	1.6	21.1
Uso del suelo	m <sup>2</sup> a crop eq	2.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	2.8
Escasez de recursos minerales	g Cu eq	103.7	12.4	3.5	5.8	2.2	4.1	131.5
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	14.9	0.9	0.6	0.8	0.3	1.9	19.4
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	2.2	1.2	0.8	1.0	0.0	0.0	5.2

Finalmente, se evalúa la unidad funcional cuyos resultados muestran que, en los dieciocho indicadores, los impactos ambientales generados por bloques de concreto son mayores al 60%. Dentro de estos resaltan aquellos originados en el indicador de eutrofización marina y uso de tierra pues representan el 90% y 80% del total con valores de 98.9 mg N eq y 0.3 m<sup>2</sup>a crop eq, respectivamente. Por otra parte, la mezcla de mortero tiene contribuciones mayores al 30% en la categoría de potencial de cambio climático, formación de ozono (salud humana y ecosistemas terrestres), formación de partículas finas y acidificación terrestre. Los resultados se encuentran en la Tabla 43.

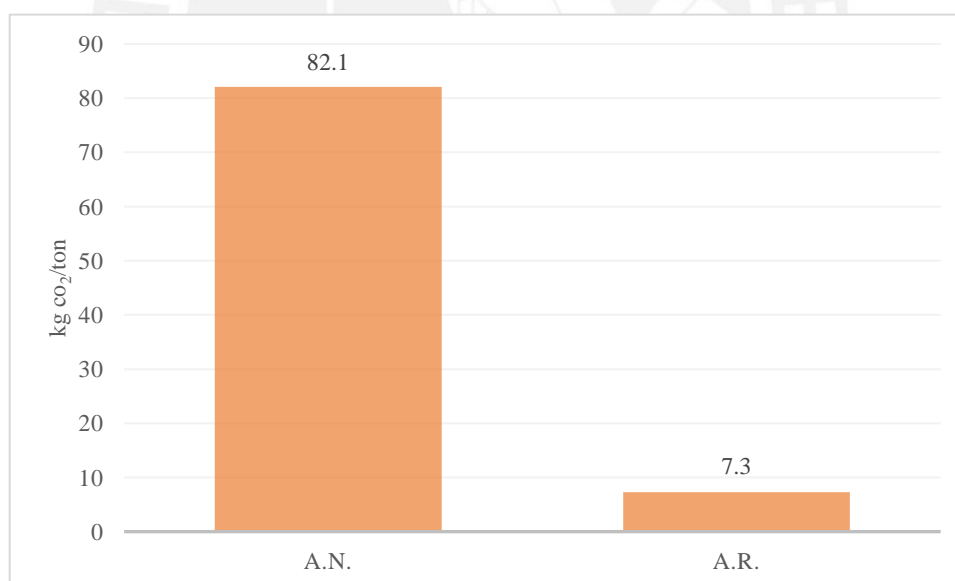
**Tabla 43**

*Resultados obtenidos de un metro cuadrado de muro construido con BDCR en las categorías de impacto de la metodología ReCiPe 2016.*

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>BDCR</b>	<b>Mortero</b>	<b>Total</b>
Calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq	17.4	8.0	25.4
Agotamiento del ozono estratosférico	mg CFC11 eq	2.7	1.1	3.8
Radiación ionizante	Bq Co-60 eq	40.2	13.8	54.1
Formación de ozono (salud humana)	g NO <sub>x</sub> eq	28.1	13.5	41.5
Formación de partículas finas	g PM <sub>2.5</sub> eq	6.6	3.0	9.6
Formación de ozono (ecosistemas terrestres)	g NO <sub>x</sub> eq	29.4	14.1	43.5
Acidificación terrestre	g SO <sub>2</sub> eq	17.0	7.8	24.8
Eutrofización de agua dulce	mg P eq	328.7	117.3	446.0
Eutrofización marina	mg N eq	98.9	10.4	109.3
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	14.9	4.5	19.4
Ecotoxicidad del agua dulce	g 1,4-DCB	155.5	50.0	205.4
Ecotoxicidad marina	g 1,4-DCB	208.1	67.9	276.0
Toxicidad cancerígena humana	g 1,4-DCB	460.7	162.4	623.1
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	2.2	0.9	3.1
Uso del suelo	m <sup>2</sup> a crop eq	0.3	0.1	0.4
Escasez de recursos minerales	g Cu eq	14.0	6.0	19.9
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	2.1	0.8	2.9
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	0.6	0.2	0.8

## Resultados obtenidos para la obtención de agregado natural y agregado reciclado

Como se observa en la Figura 23, la obtención de agregados naturales provenientes de canteras conlleva una carga ambiental de 82 kgCO<sub>2</sub> por tonelada de agregado. Esto se debe, principalmente, a las actividades de extracción que incluyen el uso de maquinaria y energía de agregados finos y gruesos. Por otro lado, el agregado reciclado considera únicamente los procesos de transporte, segregación, trituración y tamizado para su obtención, actividades que también incluyen el uso de maquinaria y el consumo de energía, sin embargo, representa cerca del 10% de las emisiones generadas con un total de 7.3 kgCO<sub>2</sub> por tonelada de agregado.



**Figura 23.** Comparación de CO<sub>2</sub>eq generado por tonelada de producción de distintos tipos de agregados bajo la metodología IPCC 2013 (100a)

## **CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

Los resultados referentes a la evaluación ambiental de la producción de una tonelada de BDC y BDCR indican que las emisiones generadas en el desarrollo de esta actividad se generan 90 y 163 kg CO<sub>2</sub>eq respectivamente. En ambos casos, la obtención del cemento es el proceso que genera mayores impactos ambientales, con emisiones de 71 kg CO<sub>2</sub>eq que representan un 80% en el caso de los BDC, y con un aporte de 148 kg CO<sub>2</sub>eq que equivale al 90% en el caso de los BDCR. Las disimilitudes en los valores de emisiones son producto de la diferencia en cantidad de cemento presente en las mezclas. Por una parte, para la producción de una tonelada de mezcla de concreto convencional, se necesitan 97 kg de cemento portland, mientras que, para la obtención de la misma cantidad de concreto con agregado reciclado, se utilizan 200 kg del mismo material. Esta variación en la dosificación del concreto es una consecuencia de la incorporación de agregados reciclados en la mezcla, debido a que su uso supone una disminución en las propiedades mecánicas del concreto, por tanto, con el objetivo de asegurar que una mezcla de concreto con agregados reciclados tenga propiedades análogas a las mezclas de concreto con agregados naturales, la cantidad de cemento es aumentada (Dias et al., 2021). Asimismo, debido a que la manufactura de BDC es industrializada y tiene una escala de producción más amplia, mientras que la elaboración de BDCR posee una producción a pequeña escala, la calidad en el primer caso es mayor en comparación al segundo (Miller, John, Pacca, & Horvath, 2018), aspecto que podría explicar el alto consumo de cemento para los BDCR.

En comparación con otros estudios, los cuales están colocados en la Tabla 44, los valores de kg CO<sub>2</sub>eq por tonelada de mezcla producida hallados en el presente estudio son los menores. Este resultado surge por dos motivos principales. Por un lado, uno de los principales factores que explican esta disimilitud es el valor de las emisiones de dióxido de carbono por kilogramo de clínker producido, ya que, mientras en Perú se maneja una emisión

de 0.5214 kg CO<sub>2</sub>eq (MINAM, 2021), en otros estudios como el de Crossin (2012) este valor es de 0.862. Por otro lado, se tiene en consideración la fuente de energía empleada en el proceso de combustión, pues en el país se emplea gas natural, mientras que en otros, combustible fósil (Vázquez-Rowe et al., 2019).

Adicionalmente, la cantidad de cemento empleada en la mezcla de concreto con el 100% de agregados naturales (A.N.) es la menor con relación a las investigaciones que analizan el mismo tipo de mezcla colocadas en la Tabla 42, pues equivale al 80% de la cantidad de cemento empleada en las respectivas investigaciones de Colangelo et al. (2020) y Yazdanbakhsh et al. (2018), el 58% en el caso de la investigación de Crossin et al. (2012). No obstante, esta diferencia puede ser explicada por el esfuerzo a compresión para el cual la mezcla ha sido diseñada, ya que mientras los tres últimos son capaces de soportar esfuerzos mayores a 30 MPa, el BDC del presente estudio soporta esfuerzos de compresión de 14 MPa. Respecto al BDCR, la cantidad de cemento empleada en la mezcla de este estudio es el mayor entre la literatura encontrada a pesar de que la resistencia a compresión para la cual ha sido diseñada no es la más alta. No obstante, es necesario señalar que, en algunos estudios el agregado natural no ha sido reemplazado al 100%, tal como se puede apreciar en la Tabla 44 o se han utilizado aditivos superplastificantes para aumentar la resistencia (Yazdanbakhsh et al., 2018).

**Tabla 44**

*Comparación de los resultados obtenidos en estudios que analizan mezclas de concreto*

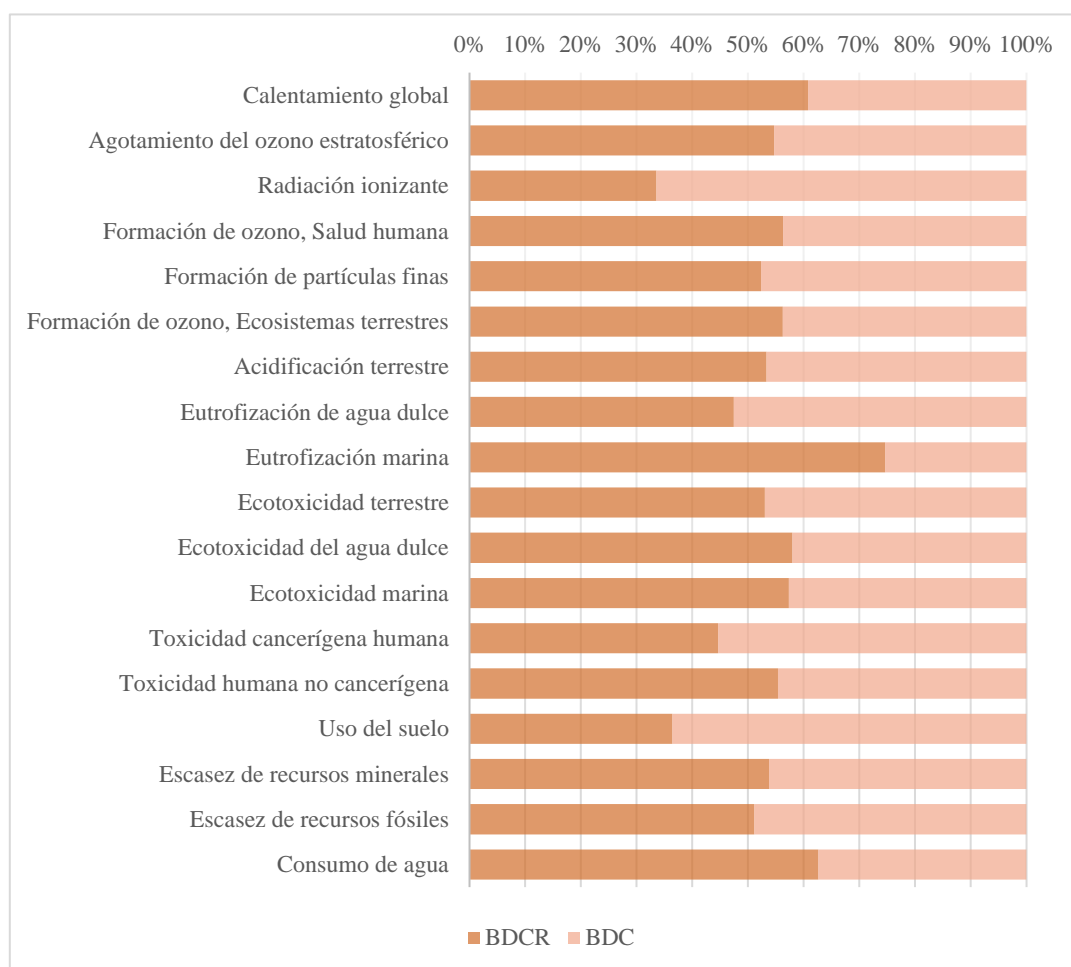
Porcentaje de A.R	kgCO <sub>2</sub> /ton. de mezcla	kgCO <sub>2</sub> /cemento	kg cem./ton de mezcla	kgCO <sub>2</sub> /kg cemento	Región/ País	Año	Fuente
0%	170.8	146.1	169.5	0.862	Australia	2012	(Crossin, 2012)
0%	161.8	108.1	122.9	0.87	Europa	2020	(Colangelo et al., 2020)
0%	261.5	200.8	-	-	Japón	2015	(Hossain, Sun, Lo, & Cheng, 2016)
0%	123.1	110.8	123.1	0.9	Estados Unidos	2017	(Yazdanbakhsh et al., 2018)
0%	90.1	71.4	97.3	0.733	Perú	2022	Presente estudio

35%	217.0	1.6	-	-	Japón	2015	(Hossain et al., 2016)
62%	176.0	124.3	141.2	0.89	Europa	2020	(Colangelo et al., 2020)
100%	135.2	126.5	152.6	0.89	Estados Unidos	2017	(Yazdanbakhsh et al., 2018)
100%	162.4	146.8	200.2	0.733	Perú	2022	Presente estudio
Sin agregado	-	-	-	0.746	Perú	2019	(Vázquez-Rowe et al., 2019)

### 5.1. Comparación por tonelada de bloques de concreto – Método ReCiPe

La evaluación ambiental bajo la metodología ReCiPe de ambos tipos de bloques de concreto; BDC y BDCR, arroja resultados diversos sobre la predominancia de los impactos de un tipo respecto al otro en las distintas categorías. Por ejemplo, la producción de BDCR genera mayores contribuciones ambientales en doce de los dieciocho indicadores, siendo los más resaltantes la categoría de calentamiento global, eutrofización marina, formación de partículas finas, toxicidad humana no cancerígena, escasez de recursos minerales y escasez de recursos fósiles. A su vez, en la mayoría de caso, los aportes provienen de la obtención del cemento. Todos estos resultados han sido colocados en la Figura 24 a través de una gráfica de barras comparativa.

Por su lado, los BDC generan un mayor impacto ambiental en las categorías de radiación ionizante, toxicidad cancerígena humana y uso de suelo. Esta preponderancia está asociada a la diferencia en la infraestructura de las fábricas de BDC y BDCR, dado que la primera cuenta con mayor desarrollo de obras y actividades que han permitido la industrialización del proceso, tales como la construcción de pistas pavimentadas para el transporte, edificaciones destinadas a su uso como oficinas, cuartos de curado construidos bajo un sistema de albañilería armada, entre otros aspectos que no forman parte de la infraestructura de la planta de BDCR.



**Figura 24.** Comparativa de los resultados obtenidos para los BDCR y BDC en las categorías evaluadas en el método ReCiPe MidPoint (H).

## 5.2. Comparación por metro cuadrado de muro construido – Método IPCC 2013

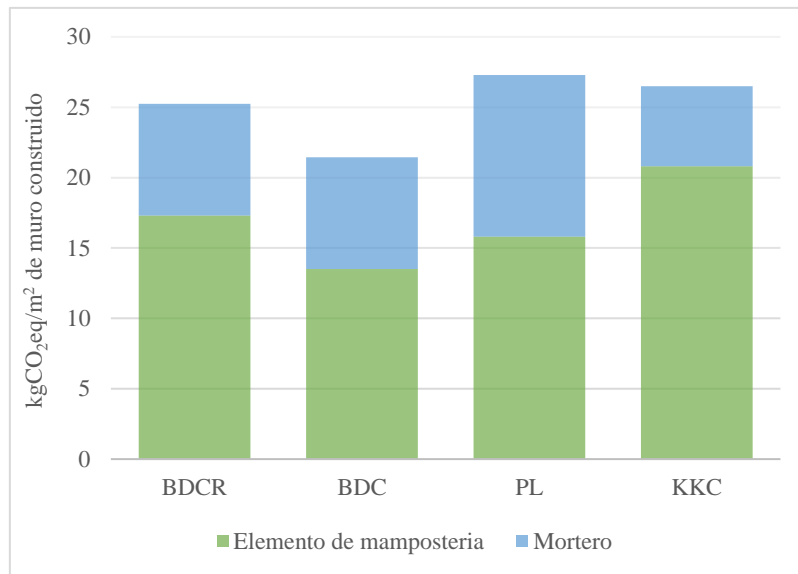
La comparación se realiza a través de la unidad funcional, la cual corresponde a un metro cuadrado de muro preparado para recibir la primera capa de pintura, de cuatro distintos elementos de mampostería. Los resultados sobre el ladrillo King Kong caravista (KKC) y el ladrillo pandereta lisa (LP) han sido obtenidos de la investigación de Gutiérrez et al. (2022), mientras que los valores de la evaluación ambiental de los bloques de concreto son tomados del presente estudio. Los muros poseen un ancho de 14 cm, mientras que las juntas del muro tienen un espesor de 1.5 cm y la lámina de mortero para tarrajeo a aplicarse en el muro con ladrillo LP posee una anchura de 1.5 cm. para cada lado del muro. Asimismo, cabe indicar



que el presente estudio contempla únicamente el muro como elemento divisorio de espacios y no incluye bajo análisis otras funciones del muro, tales como aislamiento acústico, térmico, entre otros. Los resultados de la comparación del desempeño ambiental de los cuatro elementos se encuentran en la Figura 25. En este gráfico se diferencia las emisiones generadas por los elementos de mampostería y las emisiones generadas por el mortero empleado en la mezcla.

Respecto a las emisiones, un muro construido con bloques de concreto con AN (BDC) genera menos emisiones que los otros elementos analizados en la Figura 27 con un valor de 21.5 kg CO<sub>2</sub>eq. Este resultado se debe, principalmente, a la baja presencia de cemento en la mezcla, lo que conlleva a una baja carga ambiental. El segundo elemento que genera menos emisiones es el bloque de concreto con agregados reciclados (BDCR), cuyo resultado asciende a 25.2 kgCO<sub>2</sub>eq.

En relación a los ladrillos de arcilla, el estudio de Gutiérrez (2022) indica que las emisiones varían de acuerdo a la variedad de este elemento que sea utilizada. En el caso del ladrillo PL, el impacto ambiental generado por el consumo de mortero es considerable debido a que no se emplea solo como insumo para las juntas sino también para el tarrajeo de ambas caras del muro. En tal sentido, como se observa en la Figura 25, la carga ambiental de este elemento de mampostería es uno de los de menores valores entre los cuatro (15.8 kgCO<sub>2</sub>eq), sin embargo, las emisiones ligadas al uso de mortero (11.5 kgCO<sub>2</sub>eq) ocasionan que el impacto ambiental total sea el mayor dentro de los elementos bajo estudio (27.3 kgCO<sub>2</sub>eq). En cuanto al ladrillo KKC, el impacto ambiental generado por la elaboración de este elemento es el mayor entre los cuatro con un valor de 20.8 kgCO<sub>2</sub>eq, no obstante, al tener un mejor acabado y una menor cantidad de vacíos, el mortero utilizado para la construcción de un metro cuadrado de muro es menor en su uso para las juntas (5.7 kgCO<sub>2</sub>eq), generando una emisión final de 26.5 kg CO<sub>2</sub>eq.



**Figura 25.** Comparación de CO<sub>2</sub>eq generado por m<sup>2</sup> de muro empleando distintos tipos de elementos de mampostería bajo la metodología IPCC 2013 (100a).

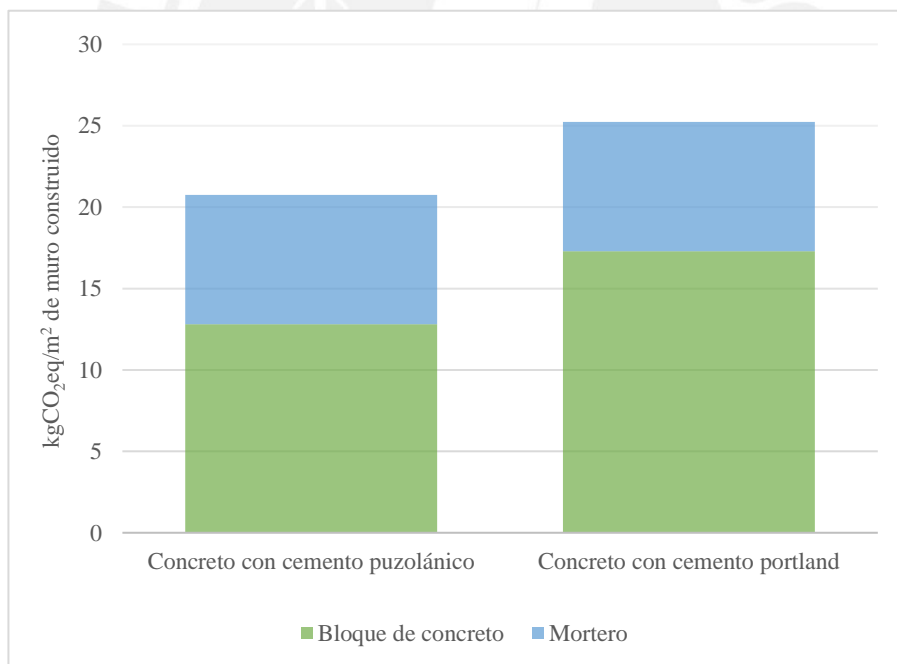
### 5.3. Medidas de mejora en el proceso de producción de bloques

#### 5.3.1. Bloques de concreto convencionales

El proceso de producción tiene una dosificación adecuada que permite la integración de los elementos y alcanza la resistencia requerida por la norma, sin embargo, estudios demuestran que emplear un porcentaje de agregado reciclado en lugar de agregado natural podría significar un beneficio ambiental y ahorro económico. El estudio planteado por Conlango et al (2020) señala el porcentaje apropiado que genera mayores beneficios ambientales sin reducir sustancialmente las propiedades mecánicas del bloque.

### 5.3.2. Bloques de concreto reciclado

En este caso, se ha planteado un escenario de mejora en los cuales se han evaluado otras alternativas. La opción consiste en emplear cemento puzolánico en lugar de cemento portland en la mezcla de los BDCR. Para esto, se emplearon los resultados de ese tipo de cementantes obtenidos en el estudio de Vázquez et al. (2019) como reemplazo del cemento portland. De acuerdo a los resultados, el más nocivo sigue siendo el bloque de concreto reciclado que emplea concreto Portland, sin embargo, se evidencia la disminución de emisiones producto del uso de cemento puzolánico, logrando un 18% de reducción. Sin embargo, es necesario acotar que para este reemplazo se ha asumido una distancia de transporte de 25 km para la bolsa de cemento. Los valores de emisión se encuentran a continuación en la Tabla 45.



**Figura 29.** Comparación de CO<sub>2</sub>eq generado por m<sup>2</sup> de muros de con distintos bloques de concreto bajo la metodología IPCC 2013 (100a)

**Tabla 45**

*Emisiones generadas en la construcción de un metro cuadrado de muro no portante elaborado con distintos tipos de bloques de concreto.*

Tipo de concreto	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>
Concreto reciclado usando cemento puzolánico	20.7
Concreto reciclado usando cemento Portland	25.3

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

El presente estudio ha tenido por fin realizar la evaluación ambiental de un metro cuadrado de muro construido con distintos elementos de mampostería. Con ese propósito, se ha aplicado la metodología de análisis de ciclo de vida para obtener los impactos ambientales de la producción de BDC y BDCR en el presente proyecto, mientras que para los valores de los ladrillos PL y BBC se han tomado datos de la investigación de Gutiérrez et al. (2022). Cabe resaltar que la comparación de la construcción de un metro cuadrado de muro no portante se ha realizado analizando únicamente una perspectiva ambiental, dejando de lado otros factores como condiciones térmicas y acústicas relacionadas al uso de cada tipo de elemento de mampostería.

Bajo las condiciones del estudio, los resultados respecto a la producción de bloques de concreto, empleando la metodología del IPCC, señalan que una tonelada de BDCR contiene una carga ambiental mayor a una tonelada de BDC. La diferencia entre ambas es de 72.8 kgCO<sub>2</sub>eq y es explicada por la superior presencia de cemento en los BDCR, ya que es el doble a la cantidad de cemento empleado en los BDC. Estos resultados van de acuerdo a distintas investigaciones donde concluyen que una mayor presencia de agregado reciclado conlleva a un mayor uso de cemento, lo cual representa una mayor carga ambiental (Yazdanbakhsh et al., 2018). Además, la presencia de cemento en la mezcla de concreto de ambos bloques es el elemento que genera mayores impactos ambientales, siendo el responsable de más del 60% de emisiones de CO<sub>2</sub>eq. Asimismo, se reconoce que la diferencia en el nivel de industrialización y la escala de producción de ambos tipos de bloques pueden influenciar esta disimilitud.

Por otro lado, al comparar la unidad funcional del presente estudio, un metro cuadrado de muro no portante preparado para recibir la aplicación de la primera capa de pintura, con ambos tipos de bloques, la diferencia entre ambos valores se vuelve más estrecha. En este caso, la construcción de 1 m<sup>2</sup> con BDCR emite 25.2 kg CO<sub>2</sub>eq, mientras que el mismo proceso con BDC genera 21.4 kg de CO<sub>2</sub>eq, representando una diferencia menor al 15%. De la misma forma, el valor de las emisiones asociadas al muro de BDC es el menor en comparación a las emisiones generadas en la construcción de 1m<sup>2</sup> de muro usando ladrillo PL y usando ladrillo tipo KKC. Respecto a estos dos elementos de mampostería, se ha identificado que presentan valores similares, sin embargo, las emisiones no son producidas por los mismos insumos. En el muro construido con ladrillos PL, 15.8 kg de CO<sub>2</sub>eq son generados por el elemento de mampostería, mientras que las emisiones restantes (11.5 kg CO<sub>2</sub>eq) provienen del consumo de mortero para el relleno de juntas y, además, para el tarrajeo. Este último aspecto solo es considerado con este tipo de ladrillo debido a la naturaleza de su superficie y a que se necesita mortero de tarrajeo en ambos lados del muro a fin de que esté listo para que se le pueda aplicar la primera capa de pintura, lo que se ve traducido en un aumento en la cantidad de cemento utilizada para construir un muro.

En cuanto a los cuatro tipos de muros analizados, aquel que presenta menores impactos ambientales es el muro construido con BDC. Además, se encuentra en el rango inferior en comparación con otros estudios encontrados en la literatura, previamente mencionado en discusiones. Esto puede explicarse por el uso de gas natural en el proceso de combustión de clínker, alternativa con menores cargas ambientales en comparación a otros combustibles (Vázquez-Rowe et al., 2019). Adicionalmente, las distancias de transporte establecidas para la movilización de materia prima, las cuales se encuentran en un rango de 9 – 30 km., son menores a las encontradas en otros estudios, lo que genera una influencia en los impactos ambientales generados en esta actividad (Pešta, Pavlů, Fortová, & Kočí, 2020;

Yazdanbakhsh et al., 2018). Así también, hay que tener en consideración que estos bloques de concretos fueron diseñados para soportar esfuerzos de compresión variantes entre 6 y 14 MPa, mientras que otros estudios han basado sus investigaciones en bloques que resisten esfuerzos mayores a 30 MPa.

Por otro lado, dentro de la cadena de valor y bajo la evaluación de las metodologías ReCiPe e IPCC, la obtención de materiales es aquella que genera mayores impactos ambientales en la producción de bloques de concreto debido a la presencia de cemento, aspecto previamente comentado. No obstante, dentro de esta cadena de suministro resaltan también los impactos generados el consumo de energía y transporte, ambos con menos de 10% de contribución de GEI en ambos casos.

Respecto a la obtención de agregados, la producción de agregado reciclado origina una menor emisión de GEI, ya que representa menos del 10% del CO<sub>2</sub>eq generado por la obtención de agregado natural conformado por arena y grava. Entonces, si bien las emisiones asociadas a la producción de bloques con agregado reciclado son mayores a la producción de bloques con agregados naturales, este resultado demuestra la viabilidad de la inserción de material reciclado en la mezcla de concreto, sin embargo, es necesaria la búsqueda de una dosificación que permita aprovechar los beneficios ambientales ligados al uso de RCD sin afectar considerablemente las propiedades mecánicas del concreto. De esta forma, una economía circular en el sector construcción puede ser posible teniendo en consideración las recomendaciones que se darán posteriormente.

Luego de realizar la evaluación ambiental de los productos empleando la herramienta de análisis de ciclo de vida, las metodologías r cipe e IPCC y el software SimaPro, se ha observado que, si bien estas sirven para obtener los impactos ambientales generados por los productos, es necesaria la implementación de bases de datos o categorías de impacto que

contemplan la reutilización de residuos. Esto permitirá considerar los impactos ambientales evitados a través de la gestión adecuada de los residuos y la reducción de la demanda de recursos naturales. Por ejemplo, la base de datos del software *Athena LCA Impact Estimator for Buildings* cuenta con información sobre el uso de residuos de construcción y demolición como agregado reciclado (Yazdanbakhsh et al., 2018).

Finalmente, si bien los resultados no respaldaron las hipótesis planteadas en la presente investigación, este estudio deja un precedente de información respecto al impacto ambiental originados por elementos de mampostería, tanto en datos sobre las emisiones generadas por la producción de estos elementos, como en recomendaciones o indicaciones que podrían realizarse posteriormente con el fin de aminorar los GEI producidos en los procesos para la obtención de bloques de concreto.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

En cuanto a la mezcla de concreto con agregados reciclados, se recomienda el uso de aditivos para alcanzar la resistencia mínima conferida por la norma NTP 399.602 (2002) para los bloques de concreto reciclado, con la finalidad de disminuir el consumo de cemento. Asimismo, se recomienda el planteamiento de dosificaciones en las cuales se pueda usar un porcentaje de agregado reciclado como reemplazo de agregado natural, sin afectar las propiedades mecánicas del concreto para evitar un consumo adicional de cemento. Al respecto, la investigación de Colangelo y compañeros (2020) señala que la mezcla de concreto con 25% de agregados reciclados es la mejor desde una perspectiva ambiental y estructural.

Adicionalmente, es recomendable el empleo de tipos de cementantes alternativos que contengan menor huella de carbono. Este reemplazo facilitaría la reducción del CO<sub>2</sub>eq emitido en los bloques de concreto reciclado y evidenciaría con mayor relevancia los

beneficios ambientales de estos. Por ello, se alienta la investigación nacional en este rubro debido a la incidencia de los materiales de construcción y la industria inmobiliaria en la generación de GEI a nivel nacional y mundial.

Por último, un factor importante a tomar en cuenta es el tipo de proceso de producción bajo el cual son elaborados los bloques, como se ha evidenciado en el presente caso. Un artículo escrito por Habert et al. (2020) demuestra que la producción industrial de concreto puede disminuir la cantidad de cemento empleado en comparación a un método de mezclado y producción artesanal. Por tanto, se recomienda la fabricación industrial de bloques de concreto reciclado, puesto que favorecería la disminución de impactos ambientales debido a que trae consigo una mayor eficiencia en el proceso, lo cual está ligado a la disminución en el consumo de materias primas.

## REFERENCIAS

- Aceros Arequipa. (2022). *Construye seguro: Manual del maestro constructor*. Lima. Recuperado de <https://www.acerosarequipa.com/manuales/pdf/manual-del-maestro-constructor.pdf>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2006). *LIFE CYCLE ASSESSMENT: PRINCIPLES AND PRACTICE* (pp. 12–13). pp. 12–13.
- Agencia Internacional de Energía. (2018). Global Status Report 2018 : Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. *Global Status Report*, 325. Recuperado de <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>
- Althaus, H., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischer, R., ... Wernet, G. (2007). Overview and Methodology. *ecoinvent Centre*, (1), 1–77.
- Anand, C. K., & Amor, B. (2017, enero 1). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, pp. 408–416. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>
- Balmaceda, H. (2021). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO ENTRE EL USO DE CONCRETO CONVENCIONAL Y ALTERNATIVAS DE CONCRETO RECICLADO*.
- Burchart-Korol, D. (2013). Life cycle assessment of steel production in Poland: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 54, 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.031>
- Chacón, J. R. (2008). Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, (72), 37–70.



- Christoforou, E., Kylili, A., Fokaides, P. A., & Ioannou, I. (2016). Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production*, 112, 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.016>
- Colangelo, F., Navarro, T. G., Farina, I., & Petrillo, A. (2020). Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: a circular economy mindset in Europe. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1790–1804. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01798-6>
- Comité Técnico de Normalización de Unidades de Albañilería. (2002). *NTP 399.602 UNIDADES DE ALBAÑILERÍA: Bloques de concreto para uso estructural. Requisitos*.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (2017). El Acuerdo de París. Recuperado de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris#:~:text=Fue adoptado por 196 Partes,comparación con los niveles preindustriales>.
- Crossin, E. (2012). *Comparative Life Cycle Assessment of Concrete Blends*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3644.3683>
- Devaki, H., & Shanmugapriya, S. (2022). LCA on Construction and Demolition Waste Management Approaches: A review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 764–770. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.286>
- Dias, A., Pacheco, J., Silvestre, J., Martins, I., & de Brito, J. (2021). Environmental and economic life cycle assessment of recycled coarse aggregates: A Portuguese case study. *Materials*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/ma14185452>
- Díaz, J., & Álvarez, L. (2014). Sustainable Construction Approach through Integration of LCA and BIM Tools. *Computing in Civil and Building Engineering*, 283–290.
- DONGFENG. (2021). *Camión de agua con motor Cummins 270 Hp tipo E3, tanque de agua de 12000 litros, 4x2 LHD*. Recuperado de <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Dongfeng-1600547194445.html?spm=a2700.details.0.0.16fd5fdejapu1h>
- EPA. (2022, septiembre 20). Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts (TRACI). Recuperado el 19 de marzo de 2023, de <https://www.epa.gov/chemical-research/tool-reduction-and-assessment-chemicals-and-other-environmental-impacts-traci>
- EPD INTERNATIONAL. (2021). *PRODUCT CATEGORY RULES (PCR) 2019:14 v1.11*. Recuperado de [www.environdec.com](http://www.environdec.com).
- Escamilla, E. Z., Habert, G., Daza, J. F. C., Archilla, H. F., Echeverry Fernández, J. S., & Trujillo, D. (2018). Industrial or traditional bamboo construction? Comparative life cycle assessment (LCA) of bamboo-based buildings. *Sustainability (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/su10093096>
- Farina, I., Colangelo, F., Petrillo, A., Ferraro, A., Moccia, I., & Cioffi, R. (2020). LCA of concrete with construction and demolition waste. En *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819055-5.00024-3>
- Fava, J. A. (2002). Life Cycle Initiative: A joint UNEP/SETAC partnership to advance the life-cycle economy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(4), 196–198. <https://doi.org/10.1007/BF02978873>

- Fava, J. A., Smerek, A., Heinrich, A., & Morrison, L. (2014). *The Role of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) in Life Cycle Assessment (LCA) Development and Application*. Springer.
- Ferronato, N., Moresco, L., Guisbert Lizarazu, G. E., Gorrity Portillo, M. A., Conti, F., & Torretta, V. (2021). Sensitivity analysis and improvements of the recycling rate in municipal solid waste life cycle assessment: Focus on a Latin American developing context. *Waste Management*, 128, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.043>
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R. B. H., Christiansen, K., & Klüppel, H. J. (2006). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 11, pp. 80–85. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1065/lca2006.02.002>
- Gabathuler, H. (1997). LCA history: Centrum voor milieukunde leiden (CML). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2(4), 187–194. <https://doi.org/10.1007/BF02978413>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2018). IPCC Updates Methodology for Greenhouse Gas Inventories. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/2019/05/13/ipcc-2019-refinement/>
- Guerra, B. (2021). *Análisis del ciclo de vida de una vivienda unifamiliar de bambú* (PUCP). PUCP, Lima. Recuperado de [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/21170/GUERRA\\_JESUS\\_BETSY\\_ANALISIS\\_CICLO\\_VIDA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/21170/GUERRA_JESUS_BETSY_ANALISIS_CICLO_VIDA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment : operational guide to the ISO standards*. Kluwer Academic Publishers.
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., ... Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science and Technology*, 45(1), 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Guinée, J., Hupes, G., Lankreijer, R., Udo de Haes, H., & Wegener, A. (1992). *ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PRODUCTS*. Leiden. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2008.4811787>
- Gutiérrez, M., Rucoba, L., Cucchi, C., & Kahhat, R. (2022). *Proyecto IKI-PNUMA - Avanzando y midiendo consumo y producción sostenible para una economía baja en carbono en economías de ingresos medios y nuevos países industrializados*.
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020, noviembre 1). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth and Environment*, Vol. 1, pp. 559–573. Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Hauschild, M., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment* (M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, & S. I. Olsen, Eds.). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Hendry, E. A. W. (2001). Masonry walls: materials and construction. En *Construction and Building Materials* (Vol. 15).
- Hernández-Padilla, F., Margni, M., Noyola, A., Guereca-Hernandez, L., & Bulle, C. (2017). Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility.

- Journal of Cleaner Production*, 142, 2140–2153.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.068>
- Hischier, R., Weidema, B., Althaus, H.-J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., ... Nemecek, T. (2010). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*.
- Hossain, U., Sun, C., Lo, I., & Cheng, J. (2016). Evaluation of environmental friendliness of concrete paving eco-blocks using LCA approach. En *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 21). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0988-2>
- Ibrahim, K. (2011). An overview on Life Cycle Impact Assessment ( LCIA ) methodologies : State of the art. *Disertation*.
- INEI. (2018). *Características de las viviendas particulares y los hogares Acceso a servicios básicos Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Recuperado de [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1538/Libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1538/Libro.pdf)
- INEI. (2023). *Principales indicadores del sector construcción*. Recuperado de <https://m.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/construccion-11154/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2007). NORMA TECNICA COLOMBIA NTC-ISO14040. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. *Icontec*, 2(571), 1–24.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Informe técnico - producción nacional*. 1–60.
- ISO. (2006a). ISO 14040. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- ISO. (2006b). *ISO 14044*. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:eshttps://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- Jacquemin, L., Pontalier, P. Y., & Sablayrolles, C. (2012, septiembre). Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: A review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 17, pp. 1028–1041. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0432-9>
- Jensen, A. A., Hoffman, L., Møller, B. T., & Schmidt, A. (2018). Life Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources. *Procedia CIRP*, 69(6), 916–920. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.024>
- Jonsson, H., & Rudberg, M. (2014). Classification of production systems for industrialized building: A production strategy perspective. *Construction Management and Economics*, 32(1–2), 53–69. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.812226>
- Mao, C., Shen, Q., Shen, L., & Tang, L. (2013). Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects. *Energy and Buildings*, 66, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.033>
- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>

- MINAM. (2018). *A partir del 1 de abril del 2018 entró en vigencia las normas de emisiones vehiculares Euro IV, Tier 2 y EPA 2007*. Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/a-partir-del-1-de-abril-del-2018-entro-en-vigencia-las-normas-de-emisiones-vehiculares-euro-iv-tier-2-y-epa-2007/>
- MINAM. (2019). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del año 2014 y actualización de las estimaciones de los años 2000, 2005, 2010 y 2012*. 317. Recuperado de <http://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2014/>
- MINAM. (2021). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del año 2016 y actualización de las estimaciones de los años 2000, 2005, 2010, 2012 y 2014*. Recuperado de [https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2021/06/INGEI\\_2016\\_Junio-2021\\_Final.pdf](https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2021/06/INGEI_2016_Junio-2021_Final.pdf)
- MINAM. (2022, febrero). *Política Nacional del Ambiente*. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/minam/campa%C3%B1as/2041-politica-nacional-del-ambiente>
- Ministerio de Energía y Minas. (2016). Producción minera no metálica del Perú creció 79% en los últimos cinco años. Recuperado de [http://www.minem.gob.pe/\\_detallenoticia.php?idSector=1&idTitular=7440](http://www.minem.gob.pe/_detallenoticia.php?idSector=1&idTitular=7440)
- Moltesen, A., & Bjørn, A. (2018). *LCA and Sustainability*. Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- National Institute for Public Health and the Environment. (2017). *ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. Recuperado de [www.rivm.nl/en](http://www.rivm.nl/en)
- Pakdel, A., Ayatollahi, H., & Sattary, S. (2021). Embodied energy and CO2 emissions of life cycle assessment (LCA) in the traditional and contemporary Iranian construction systems. *Journal of Building Engineering*, 39(June). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102310>
- PELCAN. (2022a). NEPTUNUS Project: Water-Energy-Seafood Nexus: Eco-innovation and circular economy strategies in the Atlantic area. Recuperado el 12 de febrero de 2023, de <https://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/proyecto/neptunus-project-water-energy-seafood-nexus-eco-innovation-and-circular-economy-strategies-in-the-atlantic-area/>
- PELCAN. (2022b, junio 3). Cierre del proyecto IKI-REAL, en colaboración con el Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Recuperado el 12 de febrero de 2023, de <https://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/noticia/cierre-del-proyecto-iki-real-colaboracion-programa-la-nacionales-unidas-medio-ambiente-pnuma/>
- Pešta, J., Pavlů, T., Fortová, K., & Kočí, V. (2020). Sustainable masonry made from recycled aggregates: LCA case study. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/su12041581>
- Pierobon, F., Huang, M., Simonen, K., & Ganguly, I. (2019). Environmental benefits of using hybrid CLT structure in midrise non-residential construction: An LCA based comparative case study in the U.S. Pacific Northwest. *Journal of Building Engineering*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100862>
- Pré Sustainability. (2014). *Simapro Database Manual*. 3–48.

- Pre Sustainability. (2016). *Life Cycle-Based Sustainability - Standards & Guidelines*. Recuperado de <https://pre-sustainability.com/legacy/download/Life-Cycle-Based-Sustainability-Standards-Guidelines.pdf>
- PRé Sustainability. (2020). *SimaPro database manual Methods library*. Recuperado de <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/DatabaseManualMethods.pdf>
- PUCP. (2013). *Estudio de análisis de ciclo de vida de ladrillos y bloques de concreto San Jerónimo - Cusco*. Lima. Recuperado de [https://www.cooperacionsuiza.pe/wp-content/uploads/2019/06/13\\_estudio\\_ladrillo.pdf](https://www.cooperacionsuiza.pe/wp-content/uploads/2019/06/13_estudio_ladrillo.pdf)
- Rashedi, A., & Khanam, T. (2020). Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 29075–29090. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09194-1>
- Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 244–248. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- Red Peruana Ciclo de Vida y Ecología Industrial. (s/f). PRESENTACIÓN PELCAN. Recuperado de <https://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/sobre-la-red-ciclo-de-vida/presentacion/>
- Renault trucks. (2015). *Ficha tecnica - K460 6x4*. Recuperado de <https://salfacamiones.cl/wp-content/uploads/2021/07/010-CR-K460-6X4-E5.pdf>
- Rezaei, F., Bulle, C., & Lesage, P. (2019). Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages. *Building and Environment*, 153, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.034>
- RIVM. (2018, noviembre 2). LCIA: the ReCiPe model. Recuperado el 9 de abril de 2023, de <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
- Roth, A. (2019). Climate change and public policies: An approach from the theory of risk society. *Prometeica*, pp. 36–46. CONICET - Emiliano Aldegani. <https://doi.org/10.24316/prometeica.v0i18.250>
- Sala, S., Amadei, A. M., Beylot, A., & Ardente, F. (2021). The evolution of life cycle assessment in European policies over three decades. *International Journal of Life Cycle Assessment*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01893-2>
- Sala, S., Reale, F., Cristóbal-García, J., Marelli, L., & Pant, R. (2016). Life cycle assessment for the impact assessment of policies. Life thinking and assessment in the European policies and for evaluating policy options. En *Joint Research Centre* (Vol. 28380). <https://doi.org/10.2788/318544>
- Scientific Applications International Corporation. (2006). *LIFE CYCLE ASSESSMENT: PRINCIPLES AND PRACTICE*. 15, 151.
- SETAC. (1991). *A TECHNICAL FRAMEWORK FOR LIFE CYCLE ASSESSMENT*. Recuperado de [https://cdn.ymaws.com/www.setac.org/resource/resmgr/books/lca\\_archive/technical\\_framework.pdf](https://cdn.ymaws.com/www.setac.org/resource/resmgr/books/lca_archive/technical_framework.pdf)
- SimaPro. (2021a). About SimaPro. Recuperado el 16 de julio de 2021, de <https://simapro.com/about/>

- SimaPro. (2021b). ecoinvent LCI database. Recuperado el 16 de julio de 2021, de <https://simapro.com/databases/ecoinvent/>
- Suárez, S., Roca, X., & Calderón, L. (2022). A comparative Life Cycle Assessment between recycled aggregate and natural aggregate. *Revista EIA*, 19, 1–15. <https://doi.org/10.24050/reia>
- Tecnológico de Costa Rica. (2019). VIII CONFERENCIA INTERNACIONAL DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN AMÉRICA LATINA. Recuperado de <https://www.tec.ac.cr/en/eventos/viii-conferencia-internacional-analisis-vida-america-latina>
- Tocto, N. (2020). *Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Adoquín para Pavimento Reciclado vs el Convencional*.
- UNEP. (2009). Buildings and climate change. *Design and Management of Sustainable Built Environments*, 9781447147. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4781-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4781-7_2)
- UNIT. (2019). *Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Requisitos y directrices (ISO 14044:2006+Amd 1:2017, IDT)*. Montevideo. Recuperado de [http://www.fagro.edu.uy/images/sistemas\\_ambientales/fotos/14044\\_2006\\_Gesti%C3%B3n\\_ambiental\\_\\_Evaluaci%C3%B3n\\_del\\_ciclo\\_de\\_vida\\_\\_Requisitos\\_y\\_directrices\\_compressed.pdf](http://www.fagro.edu.uy/images/sistemas_ambientales/fotos/14044_2006_Gesti%C3%B3n_ambiental__Evaluaci%C3%B3n_del_ciclo_de_vida__Requisitos_y_directrices_compressed.pdf)
- United Nations Environment Programme. (2014). *Sand, rarer than one thinks*. 2012(March), 1–15.
- Universidad Politécnica de Cataluña. (2013). *Análisis del Ciclo de Vida* (pp. 1–14). pp. 1–14.
- USEtox. (2023). The USEtox Model. Recuperado el 16 de marzo de 2023, de <https://usetox.org/model>
- Vallejo, A. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. *Universitat Politècnica de Catalunya*, 37.
- Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Quispe, I., & Bentín, M. (2016). Environmental profile of green asparagus production in a hyper-arid zone in coastal Peru. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2505–2517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.076>
- Vázquez-Rowe, I., Torres-García, J. R., Cáceres, A. L., Larrea-Gallegos, G., Quispe, I., & Kahhat, R. (2017). Assessing the magnitude of potential environmental impacts related to water and toxicity in the Peruvian hyper-arid coast: A case study for the cultivation of grapes for pisco production. *Science of The Total Environment*, 601–602, 532–542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.221>
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler-Rodriguez, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R., & Kahhat, R. (2019). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.017>
- Vélez, M. A. (2014). *Elaboración del inventario para el análisis de ciclo de vida de suelos adicionados con polímeros y su aplicación para la estabilización de vías terciarias*.
- Vieira, D. R., Calmon, J. L., & Coelho, F. Z. (2016, octubre 15). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review.

*Construction and Building Materials*, Vol. 124, pp. 656–666. Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>

Yazdanbakhsh, A., Bank, L. C., Baez, T., & Wernick, I. (2018). Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(6), 1163–1173.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-017-1360-5>

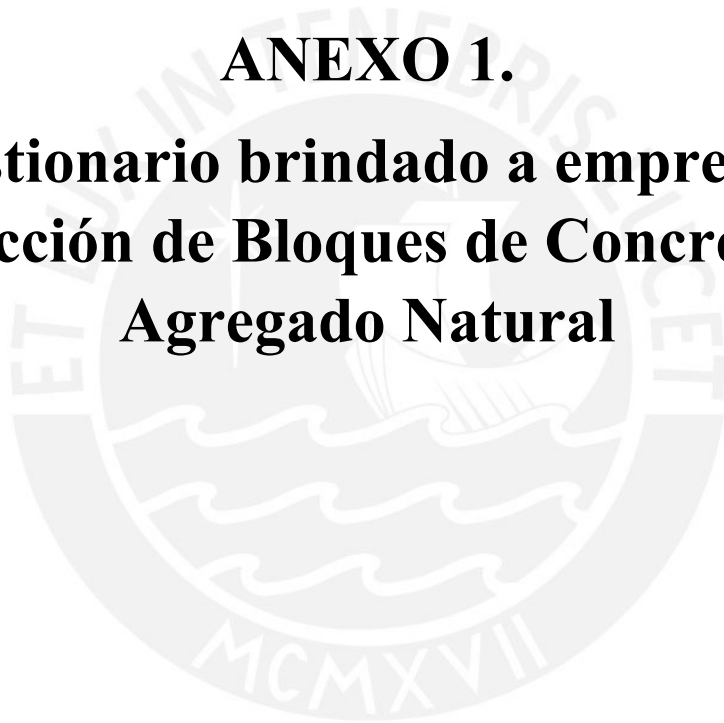
You, S., & Wang, X. (2019). On the carbon abatement potential and economic viability of biochar production systems: Cost-benefit and life cycle assessment. En *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*. Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00020-0>

Zhang, Y., Yan, D., Hu, S., & Guo, S. (2019). Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China, a process-based LCA approach. *Energy Policy*, 134(August), 110949. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110949>



## **ANEXO 1.**

**Cuestionario brindado a empresa de  
producción de Bloques de Concreto con  
Agregado Natural**







**OBTENCIÓN DE AGREGADOS**

**Agregado grueso**

Llenar la siguiente información con datos del año de referencia indicado previamente

**1. ¿El agregado grueso es extraído por la empresa? (Sí/No)**

Si la respuesta es sí, llenar la siguiente tabla. De lo contrario, pasar a la pregunta 2

Dirección de cantera	
Distancia a la planta (km)	
Volumen extraído anualmente	
Toneladas extraídas anualmente	
Días en funcionamiento al mes	
Días en funcionamiento al año	

Respecto a la maquinaria empleada en el proceso de extracción, se solicita completar la información del cuadro:

<b>Máquina 1</b>		UND
Tipo/modelo		
Cantidad de maquinaria		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

<b>Maquina 2</b>		UND
Tipo/modelo		
Cantidad de maquinaria		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

<b>Máquina 3</b>		UND
Tipo/modelo		
Cantidad de maquinaria		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

<b>Máquina 4</b>		UND
Tipo/modelo		
Cantidad de maquinaria		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

\* dentro de la maquinaria se puede considerar el transporte

**2. A continuación, indique las canteras de las cuales se suministra el agregado grueso**

	Lugar de extracción	Distancia (km)	Volumen transportado	Toneladas de agregado grueso
1				
2				
3				
4				

Para los datos de transporte de agregado, se le solicita llenar la siguiente tabla

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		-
Cantidad de vehículos usados		-
Material		-
Peso sin carga		ton
Distancia recorrida		km
Capacidad de carga del vehículo		m3
Capacidad de carga del vehículo		ton

**OBTENCIÓN DE AGREGADOS**

**Agregado fino**

Llenar la siguiente información con datos del año de referencia indicado previamente

**1. ¿El agregado fino es extraído por la empresa? (Sí/No)**

Si la respuesta es sí, llenar la siguiente tabla. De lo contrario, pasar a la pregunta 2

Dirección de cantera	
Distancia a la planta (km)	
Volumen extraído anualmente	
Toneladas extraídas anualmente	
Días en funcionamiento al mes	
Días en funcionamiento al año	

Respecto a la maquinaria empleada en el proceso de extracción, se solicita completar la información del cuadro:

<b>Máquina 1</b>		UND
Tipo/modelo		
Cantidad de maquinaria		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

<b>Maquina 2</b>		UND
Tipo/modelo		
Cantidad de maquinaria		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

<b>Máquina 3</b>		UND
Tipo/modelo		
Cantidad de maquinaria		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

<b>Máquina 4</b>		UND
Tipo/modelo		
Cantidad de maquinaria		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

\* dentro de la maquinaria se puede considerar el transporte

**2. A continuación, indique las canteras de las cuales se suministra el agregado fino**

	Lugar de extracción	Distancia (km)	Volumen transportado	Toneladas de agregado fino
1				
2				
3				
4				

Para los datos de transporte de agregado fino, se le solicita llenar la siguiente tabla

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		-
Cantidad de vehículos usados		-
Material		-
Peso sin carga		ton
Distancia recorrida		km
Capacidad de carga del vehículo		m3
Capacidad de carga del vehículo		ton

## OBTENCIÓN DE AGUA

¿Se emplea agua tratada para la mezcla

Cantidad de agua usada diariamente

Cantidad de agua usada anualmente

¿Se dispone del recurso a través de servicios de agua y desagüe?

	m3
	m3

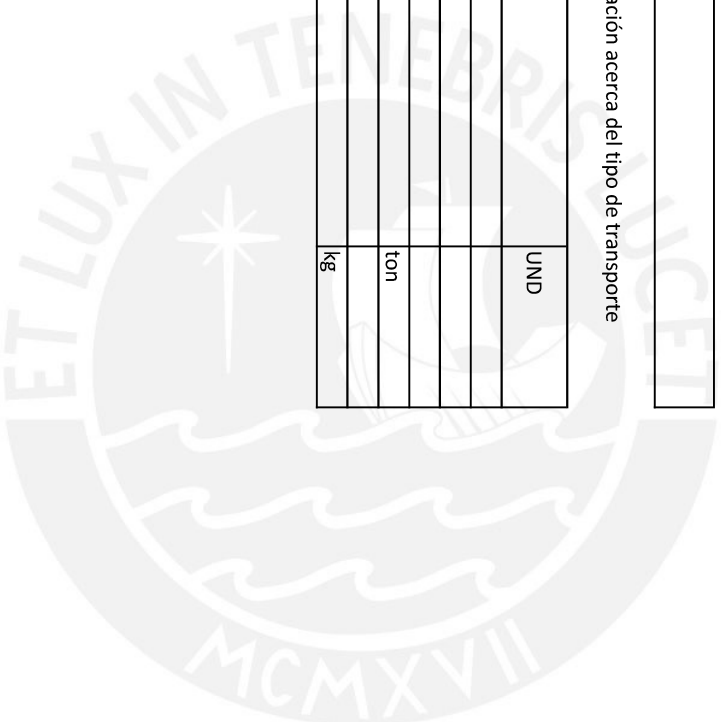
Si la respuesta es no, contestar la siguiente pregunta

¿Se emplea el transporte de cisternas para el suministro de agua?

--

Si es así, completar la siguiente tabla con información acerca del tipo de transporte

Transporte	UND
Tipo/Modelo	
Cantidad de vehículos usados	
Material	
Peso	ton
Distancia recorrida	
Carga	kg









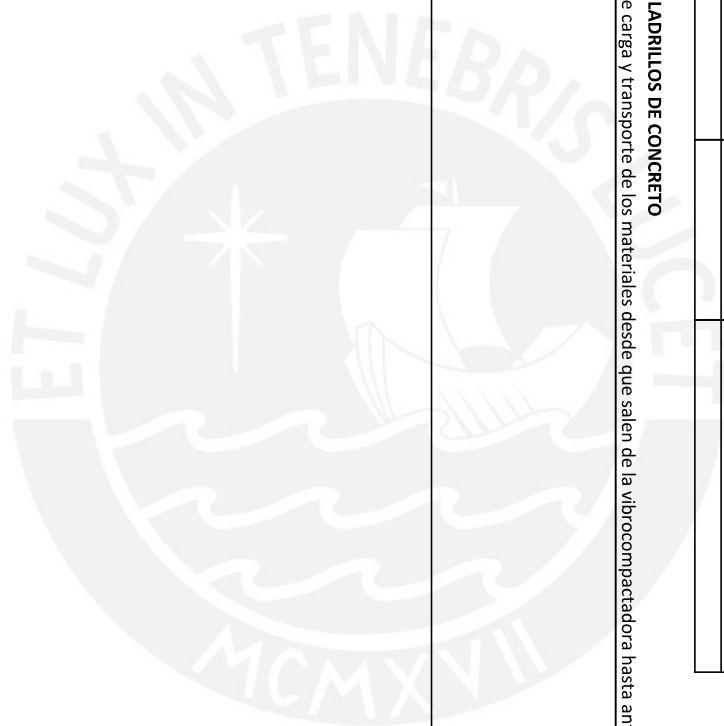
**Moldes**

Tipo de bloque	Medidas	Material del molde	Cantidad de moldes
Molde 1:			
Molde 2:			
Molde 3:			
Molde 4:			
Molde 5:			
Molde 6:			
Molde 7:			
Molde 8:			
Molde 9:			
Molde 10:			

**CARGA Y TRANSPORTE DE LOS ADOQUINES, BLOQUES Y LADRILLOS DE CONCRETO**

En el siguiente recuadro, comentar un poco del proceso de carga y transporte de los materiales desde que salen de la vibrocompactadora hasta antes de llegar a la sala de curado

--





A continuación, se le solicita información sobre la maquinaria empleada en este proceso

<b>Faja transportadora 3</b>	<b>Área:</b>	UND
Tipo/modelo		
Peso (ton)		
Distancia de transporte		m
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

<b>Maquinaria</b>		UND
Tipo/modelo		
Peso (ton)		
Material usado		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

<b>Maquinaria</b>		UND
Tipo/modelo		
Peso (ton)		
Material usado		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

<b>Maquinaria</b>		UND
Tipo/modelo		
Peso (ton)		
Material usado		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

Cantidad de tarimas de madera empleadas anualmente  
 Distancia recorrida para la obtención de tarimas  
 ¿Las tarimas son de un solo uso o se emplean en varias tandas anualmente?  
 Porcentaje de pérdidas de bloque en la carga y transporte  
 ¿Qué se hace con los bloques descartados?


Para el transporte de bloques hacia el cuarto de curado, se le solicita llenar la siguiente información

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material		
Peso		ton
Distancia recorrida		
Carga		kg

**Curado**

En esta sección, se le solicitará información respecto a la maquinaria y materiales empleados en el proceso de producción de bloques  
 En el siguiente recuadro, comentar un poco del proceso de curado desde el recojo de los bloques en los rodillos hasta su disposición

--

Para la maquinaria, llenar el cuadro con la siguiente información sobre la maquinaria empleada

Maquinaria		UND
Tipo/modelo		
Peso (ton)		
Material usado		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

Maquinaria		UND
Tipo/modelo		
Peso (ton)		
Material usado		
Potencia de equipo		MW
Combustible empleado por hora		
Horas de servicio al día		horas
Frecuencia de uso al mes		días
Tiempo de vida		años
Otros datos		

Cuarto de curado		UND
Cantidad de cuartos		und
Área de cada cuarto de curado		m <sup>2</sup>
Longitud de cada cuarto de curado		m
Material de cuarto (ver ejemplos)		
Material aislante para el cuarto		
Tiempo de curado		horas
Material empleado para realizar el curado		
Cantidad empleada anualmente de dicho material		
Cantidad de energía empleada en este proceso		kWh



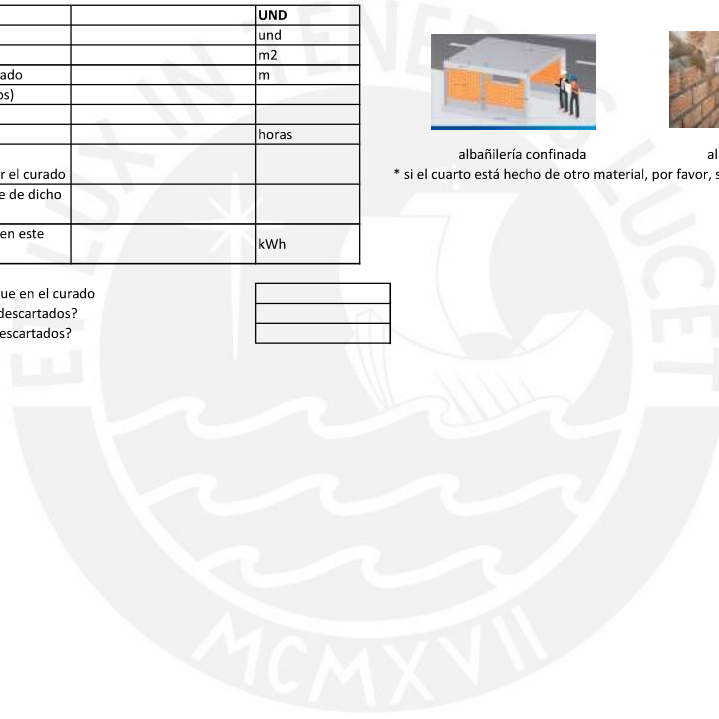
albañilería confinada



albañilería armada

\* si el cuarto está hecho de otro material, por favor, señalar cuál es

Porcentaje de pérdidas de bloque en el curado  
 ¿Por qué estos elementos son descartados?  
 ¿Qué sucede con los bloques descartados?

**MATERIAL AUDIOVISUAL**

En esta sección, se puede adjuntar material audiovisual como imágenes, vídeos, audios que sirvan para proporcionar una mejor idea del proceso de producción en UNICON  
¡Muchas gracias por su participación y tiempo al llenar este cuestionario!





**ANEXO 2.**

**Cuestionario brindado a empresa de  
producción de Bloques de Concreto con  
Agregado Reciclado**

## CUESTIONARIO - ADOQUINES

### INFORMACIÓN DEL CONTACTO

A continuación, se le proporcionan información sobre las personas implicadas en la investigación. En caso de dudas u otro, comunicarse con los siguientes contactos:

Lucía Rucoba	lucia.rucoba@pucp.edu.pe	Asistente de investigación	982 670 275
Ramzy Kahhat	ramzy.kahhat@pucp.edu.pe	Coordinador de investigación	954 710 290

### CONTACTO

Nombre de la empresa u organización

Nombre y cargo de la persona de contacto en la planta de producción

Número de la persona de contacto en la planta de producción

Correo electrónico de la persona de contacto en la planta de producción

Nombre y cargo de un contacto de emergencia en la planta

Número de la persona de contacto de emergencia en la planta de producción

### 1. PLANTA DE PRODUCCIÓN

¿Cuál es la ubicación/dirección de la planta de producción a ser analizada?



En la siguiente tabla, indique en qué % se produce cada tipo de adoquín con su respectivo color.

Color	Adoquín tipo I	Adoquín tipo II	Adoquín tipo III
Rojo			
Gris			
Amarillo			
Color a pedido			

## 2. OBTENCIÓN DE MATERIALES

Respecto a la recolección de materiales y para el año de estudio especificado

¿Cuál es el volumen de material obtenido desde botaderos?

¿Cuál es el volumen de material recibido en la planta de CICLO?

¿Cuál es el volumen de RCD recogidos por CICLO desde el lugar de construcción/demolición?

### 2.1 RECOJO DEL LUGAR DE DEMOLICIÓN

Respecto al lugar de recojo de demolición, se le pide los siguientes datos para el año especificado.

Área promedio de demolición (m<sup>2</sup>)

Número de pisos promedio de las edificaciones demolidas

Cantidad de m<sup>3</sup> de material (concreto, acero y otros) obtenidos por demolición

Cantidad de servicios de recojo de demolición ejecutados al año

Distancia promedio entre la planta y el lugar de demolición (km)

### Maquinaria

Respecto a la maquinaria empleada durante el proceso de demolición de la edificación, se le pide la siguiente información.

<b>Maquinaria 1</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de maquinaria		
Material		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Tipo de combustible empleado		

Combustible empleado por hora		
Capacidad de carga		ton
Carga por hora		ton/h
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		

<b>Maquinaria 2</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de maquinaria		
Material		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Tipo de combustible empleado		
Combustible empleado por hora		
Capacidad de carga		ton
Carga por hora		ton/h
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		

<b>Maquinaria 3</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de maquinaria		
Material		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Tipo de combustible empleado		
Combustible empleado por hora		
Capacidad de carga		ton
Carga por hora		ton/h
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		

### Transporte

A continuación, se le pide información acerca del tipo de movilidad empleada para el transporte de los residuos desde el lugar de edificación hasta la planta.



Transporte		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados en un día		
Material:		
Peso (ton):		
Tipo de combustible empleado		
Combustible empleado por hora		litros
Capacidad de carga		ton o kg
Carga por hora		ton/h
Horas del servicio al día		h
Cantidad de viajes efectuados por un vehículo durante un día		
Consumo promedio de combustible anual por vehículo		litros

### Uso de agua:

¿Se emplea agua para evitar la propagación de partículas?

Si la respuesta es sí ¿Qué cantidad de m<sup>3</sup> de agua se emplea mensual y anualmente en esta etapa?

mensual

anual

¿Cuál/es son las principales fuentes de abastecimiento?

Fuente 1:

Fuente 2:

Fuente 3:

## 2.2 COLECCIÓN EN VERTEDEROS

¿Cuáles son los principales vertederos de abastecimiento?

	Lugar	Cantidad de viajes al día	Cantidad de viajes al mes	Cantidad de viajes anuales
1				
2				
3				

¿Se tiene registro de los lugares de donde provenían los escombros por demolición?

Sí  No

Nombre de los lugares y distancia desde el vertedero de origen.

	Lugar de demolición	Nombre del Vertedero	Distancia recorrida (km)
1			
2			
3			
4			

#### Transporte del vertedero a la planta

En la siguiente tabla, indique la cantidad de viajes realizados para transportar el material según corresponda:

Transporte		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material:		
Peso (ton):		
Tipo de combustible empleado		
Combustible empleado por hora		litros
Capacidad de carga		ton o kg
Carga por hora		ton/h
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		
Consumo promedio de combustible anual por vehículo		litros

De utilizar alguna maquinaria en el transporte desde el vertedero hasta el equipo de acopio (p.e una excavadora) indicarlo a continuación

<b>Maquinaria</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de maquinaria		
Material		
Peso (ton)		
Potencia de equipo		MW
Tipo de combustible empleado		
Combustible empleado por hora		
Capacidad de carga		ton
Carga por hora		ton/h
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		

### 3. SEGREGACIÓN DE LOS RCD SEGÚN MATERIAL

¿La separación entre materiales (fierro, madera, vidrio, etc.) se realiza manualmente o se emplea maquinaria? Ejemplo: imanes para remover el acero. Indicar modelo, peso y material principal de la herramienta o maquinaria utilizada.

herramienta 1:

herramienta 2:

herramienta 3:

¿Se reduce el tamaño máximo de los RCD? (Sí/No)

Si la respuesta es sí ¿Qué herramienta se emplea para la disminución de tamaño? Indicar modelo, peso y material principal de la herramienta empleada.

¿Cuál es el área ocupada por la zona de segregación (m<sup>2</sup>)?

Para el transporte de material del área de trituración al área de tamizado, llenar los respectivos datos en la siguiente tabla:

Transporte		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material		
Peso		ton
Distancia recorrida		
Carga		kg

Para la información sobre la maquinaria empleada en el proceso de segregación, llene la siguiente tabla con los datos pedidos.

<b>Maquinaria</b>	p.e: tolva con faja transportadora	UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de maquinaria		
Material		
Peso (ton)		
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:		
Potencia de motor		MW
Tipo de combustible empleado		
Combustible empleado por hora		litros/h
Capacidad de carga		ton
Carga por hora		ton/h
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		
Consumo de energía mensual:		KWh
Tiempo de vida:		
Cantidad de mantenimiento del equipo en 10 años**		

#### 4. TRITURACIÓN DEL MATERIAL DE CONCRETO

Indicar se realiza:

- Trituración primaria ( Sí/No )
- Trituración primaria y secundaria ( Sí/No )
- 

¿Se emplea imanes para remover los restos de acero? (Sí/No)

¿Se emplea faja transportadora?

¿Se emplea agua para evitar la propagación de partículas?

Si la respuesta es sí ¿Qué cantidad de  $m^3$  de agua se emplea mensual y anualmente en esta etapa?

mensual

anual

¿Cuál/es son las principales fuentes de abastecimiento y la cantidad extraída de cada una?

Fuente 1:

Fuente 2:

Fuente 3:

A continuación, llene la tabla con la información sobre la maquinaria empleada en este proceso:

Maquinaria	p.e: trituradora	UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de maquinaria en planta		
Material		
Peso		ton
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:		
Potencia de motor		MW
Producción (ton/h)		
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		

Consumo de energía mensual:		KWh
Tiempo de vida:		
Cantidad de mantenimiento del equipo en 10 años**		

¿Se emplea transporte del área de trituración al área de tamizado? Si es así, llenar el siguiente cuadro.

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material		
Peso		ton
Distancia recorrida		
Carga		kg

## 5. TAMIZADO DEL MATERIAL

¿Cuántos tamices se emplean en el proceso?

¿Cuál es el # de malla empleada en cada tamiz? Para cada uno de estos, indicar el peso de la malla y el material de los tamices

	# de malla	Peso de la malla	Material de los tamices
Malla 1			
Malla 2			
Malla 3			
Malla 4			

Respecto a la maquinaria empleada en el proceso, se le pide los siguientes datos:

<b>Maquinaria</b>	p.e: vibradora	UND
Tipo/Modelo		

Cantidad de maquinaria en planta		
Material		
Peso		ton
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:		
Tipo de combustible empleado		
Potencia de motor		MW
Producción (ton/h)		
Capacidad		ton
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		
Consumo de energía diario/mensual:		KWh
Tiempo de vida:		
Cantidad de mantenimiento del equipo en 10 años**		
Accesorios adicionales	- - - -	

Respecto a los residuos generados en el proceso de tamizado, se le plantea las siguientes preguntas.

- ¿Cuál es el criterio para considerar a una clase de material residuo? P.e: partículas que pasa la malla de tamizado #200

- ¿Qué se hace con el material que es descartado? ¿Vuelve a ser empleado en el proceso de elaboración de adoquines en otra etapa o es desechado?

- ¿Cuál es el peso de (material descartado que no se ha utilizado nuevamente) generados en este proceso anualmente\*? (kg)

- Respecto al total de material ingresado en esta etapa ¿cuál es el porcentaje de residuos generados? (%)

¿Cuál es el destino de los residuos generados?

¿A qué distancia se encuentra el lugar?

Respecto al transporte de residuos, desde la planta hasta el lugar del botadero, se le solicita la siguiente información

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos		
Material		
Peso		ton
Distancia recorrida		
Carga por vehículo		kg
Tipo de combustible empleado		
Cantidad de combustible empleado anualmente		

Para el transporte del área de tamizado al área de mezclado, señale los siguientes aspectos solicitados.

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material		
Peso		ton
Distancia recorrida		
Carga		kg



## 6. DISEÑO DE MEZCLA

¿Lo materiales se almacenan? ¿Dónde?

Respecto a la dosificación empleada en la mezcla para la obtención de cada tipo de adoquín, complete la siguiente tabla.

Tipo	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Dosificación (ej: 1:3:1)	Cemento (bolsa)	Agregado reciclado (m3)	Agua (m3)	Aditivos	Otros (por favor, especificar)
Adoquín tipo I: pavimento personal							
Adoquín tipo II: pavimento vehicular ligero							
Adoquín tipo III: pavimento vehicular pesado							

Respecto al consumo de agua durante este proceso tomando en cuenta el año de referencia previamente indicado.

¿Cuál/es son las principales fuentes de abastecimiento y el porcentaje de aporte de cada una?

Fuente 1:

Fuente 2:

Fuente 3:

Consumo mensual de agua (m<sup>3</sup>)

Consumo anual de agua (m<sup>3</sup>)

De usar transporte de la fuente a la planta para la obtención de agua, por favor, llenar la siguiente tabla con la información requerida.

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material		
Peso		ton
Distancia recorrida		
Carga		m <sup>3</sup>

Respecto al cemento empleado, contestar las siguientes preguntas con la información del año de referencia indicado

Tipo(s) de cemento utilizado(s):



¿Cuál/es son las principales fuentes de abastecimiento?

Fuente 1:

Fuente 2:

Fuente 3:

Bolsas de cemento adquiridas mensualmente:

Bolsas de cemento adquiridas anualmente:

A continuación, se le solicita información, del año de referencia estipulado, sobre el transporte de las bolsas de cemento hasta la planta

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material:		
Peso (ton):		
Tipo de combustible empleado		
Combustible empleado por hora		litros
Capacidad de carga		ton o kg
Carga por hora		ton/h
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		
Consumo de combustible o energía		

Respecto al uso de aditivos, se le solicita la siguiente información

Tipo(s) de aditivo(s) utilizados:



Cantidad de aditivo adquirido anualmente:



A continuación, se le solicita información, del año de referencia estipulado, sobre el transporte de las bolsas de cemento hasta la planta

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material:		
Peso (ton):		
Tipo de combustible empleado		
Combustible empleado por hora		litros
Capacidad de carga		ton o kg
Carga por hora		ton/h
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		
Consumo de combustible o energía		

## 7. MEZCLADO DE MATERIALES

¿Cuál es el tiempo promedio de mezclado?

Utiliza algún tipo de maquinaria/herramientas para este proceso? Para cada una de ellas, por favor, llenar la tabla adjunta.

<b>Maquinaria</b>	p.e: mezcladora	UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de maquinaria en planta		
Material		
Peso		ton
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:		
Tipo de combustible empleado		
Potencia de motor		MW
Producción (ton/h)		
Capacidad volumétrica		m <sup>3</sup>
Horas del servicio al día		h

Frecuencia de uso al mes		
Consumo de energía diario/mensual:		KWh
Tiempo de vida:		
Cantidad de mantenimiento del equipo en 10 años**		
Accesorios adicionales	- - - -	

Respecto al transporte empleado para el área movilizar material del área de mezclado al área de moldeado, se le solicite llene la siguiente información.

<b>Transporte</b>		UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material		
Peso		ton
Distancia recorrida		
Carga		kg

## 8. MOLDEADO DE ADOQUÍN

¿Cuántas tandas se necesitan en la maquinaria para obtener 1 ton de adoquines?

¿Se emplea agua durante el proceso? (Sí/No)

Cantidad en litros:

¿Cuál/es son las principales fuentes de abastecimiento y el porcentaje de aporte de cada una?

Fuente 1:

Fuente 2:

Fuente 3:

Respecto a los moldes empleados en el proceso, se le solicita la siguiente información

	Medidas	Material del molde	Peso (kg)	Otros (Por favor, especificar)
Molde 1				
Molde 2				
Molde 3				
Molde 4				

Tiempo de vida del molde (años):

Respecto a la maquinaria empleada en el moldeado, se le solicita la siguiente información.

<b>Maquinaria</b>	p.e: bloquera	UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de maquinaria en planta		
Material		
Peso		ton
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:		
Tipo de combustible empleado		
Potencia de motor		MW
Producción (ton/h)		
Capacidad volumétrica		m <sup>3</sup>
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		
Consumo de energía diario/mensual:		KWh
Tiempo de vida:		
Cantidad de mantenimiento del equipo en 10 años**		
Accesorios adicionales	- - - -	

## 9. CURADO DE ADOQUÍN

¿Se emplea alguna maquinaria en este proceso o se realiza de manera manual?

De utilizarse maquinaria en el proceso, se le solicita brindar la siguiente información.

Maquinaria	p.e:	UND
Tipo/Modelo		
Cantidad de maquinaria en planta		
Material		
Peso		ton
Tipo (eléctrico/mecánico) de motor:		
Tipo de combustible empleado		
Potencia de motor		MW
Producción (ton/h)		
Capacidad volumétrica		m <sup>3</sup>
Horas del servicio al día		h
Frecuencia de uso al mes		
Consumo de energía diario/mensual:		KWh
Tiempo de vida:		
Cantidad de mantenimiento del equipo en 10 años**		
Accesorios adicionales	- - - -	

Respecto al agua empleada en el proceso:

Consumo diario de agua empleada en este proceso (litros)

Consumo mensual de agua empleada en este proceso (litros)

Consumo anual de agua empleada en este proceso (m<sup>3</sup>)

¿Cuál/es son las principales fuentes de abastecimiento y cuál es el porcentaje de aporte de cada una?

Fuente 1:

Fuente 2:

Fuente 3:

De usar transporte de la fuente a la planta para la obtención de agua, por favor, llenar la siguiente tabla con la información requerida.

<b>Transporte</b>	<b>Fuente:</b>	<b>UND</b>
Tipo/Modelo		
Cantidad de vehículos usados		
Material		
Peso		ton
Distancia recorrida		
Carga		m <sup>3</sup>