

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**IMPACTO AMBIENTAL ASOCIADO AL PROCESO PRODUCTIVO DE UNA  
COLUMNA MENSULAR PREFABRICADA DE CONCRETO ARMADO**

**Tesis para obtener el título profesional de INGENIERA CIVIL**

**AUTOR:**

KEYLLA DEL ROSARIO CHAVEZ ATALAYA

**ASESOR:**

FEDERICO ALEXIS DUEÑAS DÁVILA

Lima, julio del 2022

## DEDICATORIA

A mis padres,

por su apoyo incondicional y por brindarme la oportunidad de concluir mi formación profesional.

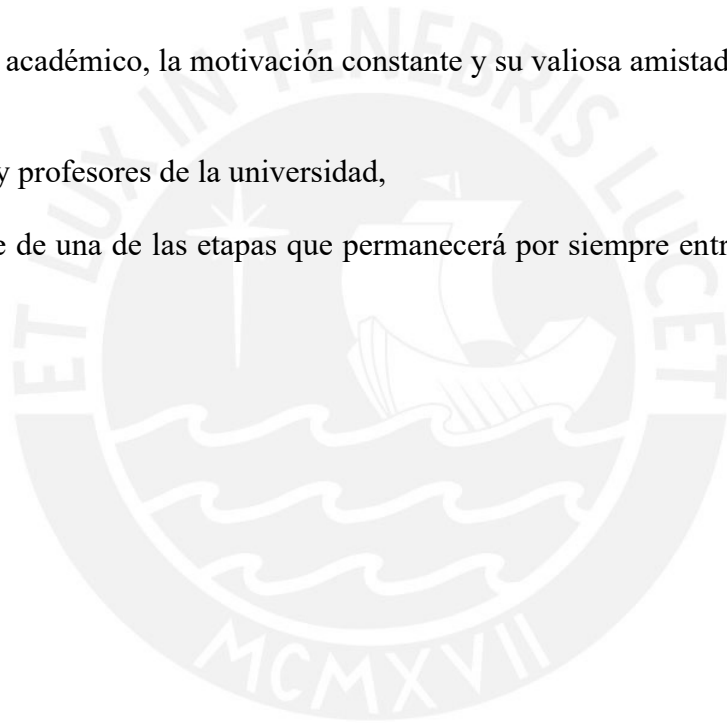
Ha sido un camino extenso y fluctuante, en el que he tenido la dicha de que hayan sido partícipes de cada uno de mis logros académicos y, sobre todo, de mi crecimiento personal.

A mi asesor,

por el vasto soporte académico, la motivación constante y su valiosa amistad.

A mis compañeros y profesores de la universidad,

por haber sido parte de una de las etapas que permanecerá por siempre entre mis recuerdos más vibrantes.



## RESUMEN

El sector construcción se caracteriza por ser una de las industrias de cambio más lento, lo cual ha generado que su adaptabilidad a la coyuntura global a lo largo de los años, haya sido cuestionada, aún más en un contexto de crisis ambiental, sanitaria y económica. Con respecto a la dimensión ambiental, es conocido que los procesos constructivos tradicionales precisan de altos niveles de consumo, tanto de materias primas, como de energía. En ese contexto, emplear una herramienta para evaluar los impactos ambientales, como es el caso del análisis de ciclo de vida (ACV), toma importancia. Para el presente caso de estudio se expone el ACV para una columna prefabricada de concreto armado, componente estructural que ha sido empleado en ciertos proyectos de edificación no convencional en el país. Se optó por un enfoque de la cuna a la puerta como límite del sistema, compuesto por las siguientes etapas: producción del concreto premezclado, producción del acero, transporte del concreto premezclado hacia la planta de prefabricación y manufactura del componente prefabricado. El modelo ambiental se desarrolló con base en la unidad funcional definida, empleando el software SimaPro 9.1 y el inventario de Ecoinvent v.2.2. Luego, se procedió a realizar el análisis de inventario de ciclo de vida (AICV) mediante los métodos de evaluación de impactos seleccionados: IPCC2021 GWP 100<sup>a</sup> y ReCiPe EndPoint (H). Los resultados mostraron que las fases productivas, tanto del concreto premezclado como del acero, fueron las que mayor repercusión tuvieron sobre el potencial de calentamiento global (PCG) y las categorías de daño evaluadas sobre las 3 áreas de protección (AoP): salud humana, ecosistemas y recursos. En contraste, la manufactura del componente prefabricado en planta y el transporte del concreto premezclado tuvieron una incidencia menor al 5% en el impacto global. Para investigaciones futuras, se recomienda dirigir los esfuerzos de mitigación de impactos ambientales hacia las fases productivas, dándole mayor importancia al proceso de eco-diseño de materiales alternativos o al desarrollo de nuevas tecnologías para obtener procesos más eficientes.

**Palabras clave:** construcción tradicional, análisis de ciclo de vida (ACV), columna prefabricada de concreto armado, producción de concreto premezclado, producción de acero, potencial de calentamiento global (PCG), salud humana, ecosistemas, recursos, eco-diseño.

## ABSTRACT

The construction sector is characterized by being one of the industries with the slowest rate of change, which has meant that its adaptability to the global situation over the past years, is being questioned, even more in a context of environmental, health and economic crisis. As regards to the environmental dimension, it is known that traditional construction processes require high levels of, both, raw materials and energy consumption. In this context, using a tool to assess environmental impacts, such as life cycle assessment (LCA), becomes important. For the present case study, the LCA presented belongs to a precast concrete column, a structural component that has been used in certain non-conventional building projects in the country. A cradle-to-gate approach was chosen as the system boundary, consisting of the following stages: ready-mix concrete production, steel production, transport of ready-mix concrete to the precast plant, and manufacturing of the precast component. The environmental model was developed based on the defined functional unit, using the SimaPro 9.1 software and the Ecoinvent v.2.2 inventory. Then, the life cycle inventory analysis (LCIA) was carried out using the selected impact assessment methods: IPCC2021 GWP 100<sup>a</sup> and ReCiPe EndPoint (H). The results showed that the production phases, both for ready-mix concrete and steel, were the ones that had the greatest impact on the global warming potential (GWP) and the damage categories evaluated on the 3 areas of protection (AoP): human health, ecosystems and resources. In contrast, the manufacturing of the precast component in the plant and the transportation of the ready-mix concrete had an incidence of less than 5% in the global impact. For future research, it is recommended to direct efforts to mitigate environmental impacts towards the production phases, giving greater importance to the process of eco-design of alternative materials or the development of new technologies to obtain more efficient processes.

**Keywords: traditional construction, life cycle analysis (LCA), precast reinforced concrete column, ready-mix concrete production, steel production, global warming potential (GWP), human health, ecosystems, resources, eco-design.**

## Tabla de Contenido

1.	Capítulo I: Generalidades .....	1
1.1.	Introducción.....	1
1.2.	Justificación.....	3
1.3.	Objetivos.....	5
1.3.1.	Objetivo general.....	5
1.3.2.	Objetivos específicos.....	5
1.4.	Limitaciones .....	6
2.	Capítulo II: Estado del arte .....	7
2.1.	Estado situacional de la prefabricación en el sector construcción nacional .....	7
2.2.	Materiales involucrados en la prefabricación.....	9
2.2.1.	Concreto prefabricado .....	9
2.3.	Ciclo productivo del componente prefabricado en planta.....	15
2.3.1.	Colocación del fondo y costados del encofrado metálico .....	16
2.3.2.	Aplicación del desmoldante .....	17
2.3.3.	Habilitado del acero de refuerzo y preesfuerzo.....	17
2.3.4.	Vaciado del concreto .....	18
2.3.5.	Vibrado del concreto .....	19
2.3.6.	Curado a vapor .....	19
2.3.7.	Revisión de la resistencia a la compresión y corte de torones .....	20

2.3.8.	Desenfofrado y extracción del componente.....	21
2.4.	Perspectiva del análisis de ciclo de vida (ACV).....	22
2.4.1.	Definición del objetivo y alcance del estudio .....	23
2.4.2.	Análisis del ICV .....	24
2.4.3.	Evaluación del AICV .....	26
2.4.4.	Interpretación .....	29
2.5.	Metodología de cálculo de las emisiones de GEI según sus fuentes de generación	29
2.5.1.	Factores de emisión por el consumo de energía estacionaria.....	30
2.5.2.	Factores de emisión por el consumo de energía móvil .....	33
3.	Capítulo III: Desarrollo de la investigación.....	38
3.1.	Caso de estudio: Columna prefabricada de concreto armado.....	38
3.2.	Marco metodológico del ACV aplicado al caso de estudio.....	43
3.2.1.	Definición del objetivo y alcance.....	43
3.2.2.	Inventario de ciclo de vida (ICV).....	46
3.2.3.	Evaluación del AICV .....	71
4.	Capítulo IV: Resultados.....	72
4.1.	Análisis de resultados: IPCC 2021 GWP 100 <sup>a</sup> .....	72
4.1.1.	Etapa I: Producción del concreto premezclado .....	72
4.1.2.	Etapa II: Producción del acero .....	75

4.1.3.	Etapa III: Transporte del concreto premezclado .....	75
4.1.4.	Etapa IV: Manufactura del componente prefabricado .....	76
4.1.5.	Consolidado por etapas .....	77
4.2.	Análisis de resultados: ReCiPe EndPoint (H) .....	78
4.2.1.	Etapa I: Producción del concreto premezclado .....	78
4.2.2.	Etapa II: Producción del acero .....	83
4.2.3.	Etapa III: Transporte del concreto premezclado .....	85
4.2.4.	Etapa IV: Manufactura del componente prefabricado .....	86
4.2.5.	Consolidado por etapas .....	89
5.	Capítulo V: Discusión de resultados.....	90
6.	Capítulo VI: Conclusiones y perspectiva de futuro .....	93
6.1.	Conclusiones.....	93
6.2.	Perspectivas a futuro.....	96

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## **ANEXOS**

## Índice de Figuras

Figura 1 <i>Ciclo productivo de un componente prefabricado en planta</i> .....	15
Figura 2 <i>Izaje del componente prefabricado a partir de sus accesorios de sujeción</i> .....	21
Figura 3 <i>Fases para abordar un ACV</i> .....	22
Figura 4 <i>Factores de conexión entre elementos de cada enfoque para la evaluación de impactos</i> .....	28
Figura 5 <i>Participación porcentual en la generación eléctrica, según la fuente de origen</i> .....	32
Figura 6 <i>Columna prefabricada de concreto armado con ménsulas de apoyo</i> .....	38
Figura 7 <i>Detalle del armado estructural para una conexión de viga postensada y columna mensular prefabricada</i> .....	39
Figura 8 <i>Modo de falla en la conexión emulativa viga-columna</i> .....	40
Figura 9 <i>Modo de falla en la conexión articulada viga-columna</i> .....	41
Figura 10 <i>Detalle de la elevación, sección transversal y propiedades de tipo de la ménsula</i> .....	42
Figura 11 <i>Vistas en elevación y modelo tridimensional de la columna prefabricada de concreto armado</i> .....	42
Figura 12 <i>Criterios considerados para la selección de la unidad funcional (UF)</i> .....	44
Figura 13 <i>Límites del sistema para el ACV del caso de estudio</i> .....	45
Figura 14 <i>Consideraciones metodológicas para la estimación de las entradas del ICV</i> .	47
Figura 15 <i>Consideraciones metodológicas para la estimación de las salidas del ICV</i> ....	47
Figura 16 <i>Rutas generadas a partir de Google Maps para emular el transporte desde la ubicación de los proveedores hacia la planta de prefabricados</i> .....	51



Figura 17 <i>Esquema del ICV para la producción de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto premezclado .</i>	54
Figura 18 <i>Esquema del ICV para la producción de una columna prefabricada .....</i>	57
Figura 19 <i>Esquema del ICV para el transporte de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto premezclado...</i>	59
Figura 20 <i>Esquema para la cuantificación del número de vibradores externos para una columna prefabricada de 29.01 m de altura.....</i>	64
Figura 21 <i>Perfil de consumo del recurso hídrico de una caldera a gas natural .....</i>	66
Figura 22 <i>Esquema del ICV para la manufactura de una columna prefabricada de concreto.....</i>	70
Figura 23 <i>Contribución de las entradas al PCG del proceso de extracción y transformación de materias primas .....</i>	72
Figura 24 <i>Contribución de las entradas al PCG del proceso de transporte de las materias primas .....</i>	73
Figura 25 <i>Contribución de las entradas al PCG del proceso de preparación de la mezcla .....</i>	74
Figura 26 <i>Contribución al PCG por proceso que conforma la etapa de producción del</i>	74
Figura 27 <i>Contribución al PCG por proceso que conforma la etapa de producción del acero .....</i>	75
Figura 28 <i>Contribución al PCG por cada proceso que conforma la etapa de transporte del concreto premezclado a la planta de prefabricados.....</i>	75
Figura 29 <i>Contribución al PCG de cada entrada que conforma los procesos de la etapa de manufactura del componente prefabricado .....</i>	76
Figura 30 <i>Contribución al PCG de cada proceso que conforma la etapa de manufactura del componente prefabricado .....</i>	77

Figura 31 <i>Contribución al PCG de cada etapa definida en el LCA del caso de estudio.</i>	78
Figura 32 <i>Contribución de las entradas del proceso evaluado a las respectivas categorías de daño: salud humana, ecosistemas y recursos</i> .....	80
Figura 33 <i>Resultados del AICV para la etapa de producción del concreto premezclado, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	83
Figura 34 <i>Resultados del AICV para la etapa de producción del acero, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	84
Figura 35 <i>Resultados del AICV para la etapa de transporte del concreto premezclado, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	85
Figura 36 <i>Resultados del AICV para la etapa de manufactura del componente prefabricado, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	87
Figura 37 <i>Contribución de las entradas de la etapa evaluada a las respectivas categorías de daño: salud humana, ecosistemas y recursos</i> .....	88
Figura 38 <i>Contribución al daño generado sobre la salud humana, ecosistemas y recursos por cada etapa definida en el ACV del caso de estudio</i> .....	89

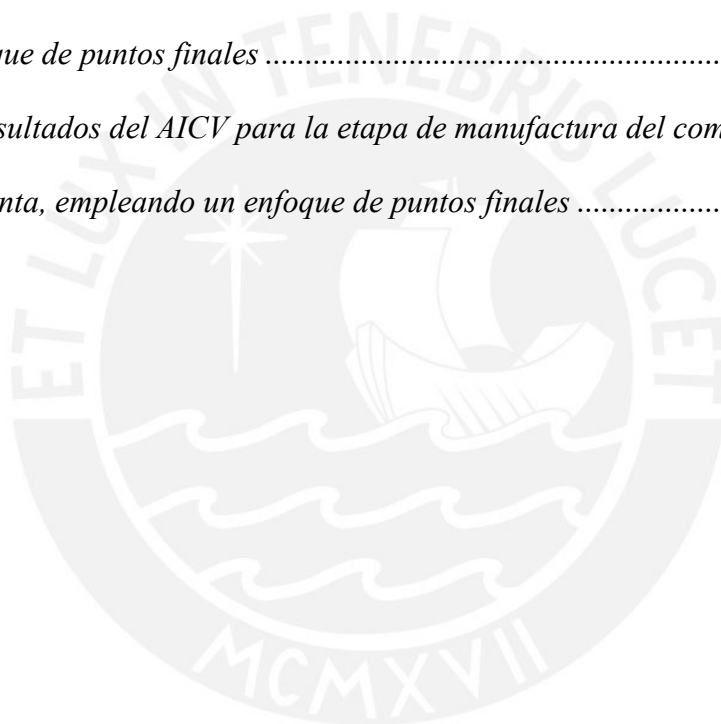
## Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Enfoques del ACV de acuerdo a los límites del sistema</i> .....	23
Tabla 2 <i>Potenciales de calentamiento global, según GEI y horizonte temporal</i> .....	26
Tabla 3 <i>Enfoques para abordar un AICV</i> .....	27
Tabla 4 <i>Categorías de daño (AoP) evaluadas a partir de un enfoque de puntos finales</i> .	28
Tabla 5 <i>Factores de emisión del SEIN propuestos por el MINAM (2017) y MINEM (2016)</i> .....	30
Tabla 6 <i>Producción de energía eléctrica en el mercado nacional, según origen y servicio</i> .....	31
Tabla 7 <i>Factores de emisión por defecto propuestos para la combustión estacionaria en las industrias energéticas</i> .....	33
Tabla 8 <i>Consideraciones metodológicas para el cálculo de emisiones GEI según el nivel de jerarquía</i> .....	34
Tabla 9 <i>Factores de emisión de CO<sub>2</sub> por defecto del transporte terrestre en el Perú</i> .....	36
Tabla 10 <i>Factores de emisión por defecto de N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> del transporte terrestre</i> .....	37
Tabla 11 <i>Valores caloríficos netos (VCN) de los combustibles empleados en el transporte terrestre</i> .....	37
Tabla 12 <i>Métricas obtenidas a partir del modelo construido en Revit 2021</i> .....	43
Tabla 13 <i>Especificaciones técnicas requeridas para el diseño de mezcla de concreto prefabricado</i> .....	48
Tabla 14 <i>Dosificación de materias primas para producir 1 m<sup>3</sup> de concreto</i> .....	49
Tabla 15 <i>Dosificación de materias primas para producir 14.56 m<sup>3</sup> de concreto</i> .....	49

Tabla 16 <i>Ubicación de los proveedores de las materias primas que componen la mezcla de concreto</i> .....	50
Tabla 17 <i>Estimación de las entradas asociadas al transporte de las materias primas requeridas para la producción de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto</i> .....	52
Tabla 18 <i>Consumo de energía eléctrica para el proceso de preparación de la mezcla de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto</i> .....	53
Tabla 19 <i>Emisiones asociadas al proceso de preparación de la mezcla de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto</i> .....	53
Tabla 20 <i>Peso de acero estimado para el encofrado metálico del componente prefabricado</i> .....	55
Tabla 21 <i>Emisiones asociadas a la producción de 1kg de acero virgen</i> .....	55
Tabla 22 <i>Emisiones asociadas a la producción de 1kg de acero virgen para 1 ciclo productivo en planta</i> .....	56
Tabla 23 <i>Emisiones asociadas a la producción del encofrado metálico del componente prefabricado, para un ciclo de manufactura</i> .....	56
Tabla 24 <i>Emisiones asociadas a la habilitación de 3931.7 kg de acero de refuerzo</i> .....	57
Tabla 25 <i>Consumo de diésel para el transporte de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto premezclado</i> ....	58
Tabla 26 <i>Emisiones asociadas al proceso de transporte de la mezcla de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto hacia la planta de prefabricados</i> .....	59
Tabla 27 <i>Volumen de desmoldante requerido para cubrir la superficie interior de 92 m<sup>2</sup> del componente prefabricado</i> .....	60
Tabla 28 <i>Consumo de gasolina para la aplicación del desmoldante sobre una superficie de 92 m<sup>2</sup></i> .....	61

Tabla 29 <i>Emisiones asociadas al proceso de aplicación de desmoldante sobre una superficie de 92 m<sup>2</sup></i> .....	61
Tabla 30 <i>Consumo de energía eléctrica del vibrador manual para vibrar un volumen de concreto de 14.56 m<sup>3</sup></i> .....	62
Tabla 31 <i>Emisiones asociadas al proceso de vibrado manual de un volumen de concreto de 14.56 m<sup>3</sup></i> .....	63
Tabla 32 <i>Consumo de energía eléctrica durante el proceso de vibrado externo para la columna prefabricada de 29.1 m de altura</i> .....	64
Tabla 33 <i>Emisiones asociadas al proceso de vibrado externo de una columna prefabricada de 29.1 m de altura</i> .....	65
Tabla 34 <i>Consumo de gas natural para el curado a vapor de la columna prefabricada</i> . 67	
Tabla 35 <i>Emisiones asociadas al consumo de gas natural para el curado a vapor de la columna prefabricada</i> .....	67
Tabla 36 <i>Energía eléctrica consumida por la bomba de inyección para el curado a vapor de la columna prefabricada</i> .....	68
Tabla 37 <i>Emisiones asociadas a la inyección de agua para el curado a vapor de la columna prefabricada</i> .....	68
Tabla 38 <i>Energía eléctrica consumida por el puente grúa para desencofrar y extraer la columna prefabricada</i> .....	69
Tabla 39 <i>Emisiones asociadas al proceso de desencofrado y extracción de la columna prefabricada</i> .....	69
Tabla 40 <i>Resultados del AICV para el proceso de extracción y transformación de materias primas, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	79

Tabla 41 <i>Resultados del AICV para el proceso de transporte de las materias primas, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	81
Tabla 42 <i>Resultados del AICV para el proceso de preparación de la mezcla, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	82
Tabla 43 <i>Resultados del AICV para la etapa de producción del acero, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	84
Tabla 44 <i>Resultados del AICV para la etapa de transporte del concreto premezclado, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	85
Tabla 45 <i>Resultados del AICV para la etapa de manufactura del componente prefabricado en planta, empleando un enfoque de puntos finales</i> .....	86



## Capítulo I: Generalidades

### 1.1. Introducción

A lo largo del siglo veinte, la industria de la construcción en el país fue preponderantemente gobernado por un enfoque constructivo tradicional, que se caracterizó por contar con procesos constructivos consolidados, de fácil implementación y bajos costos asociados a la mano de obra. No obstante, con la transición hacia un nuevo siglo, surgió la necesidad de invertir en la innovación, con la finalidad de adaptarse al nuevo panorama y requerimientos de una industria más exigente. En consecuencia, emergieron enfoques constructivos no convencionales, que parecían confrontar la falta de dinamismo y adaptabilidad del enfoque tradicional, más aún en el contexto de informalidad y crecimiento demográfico acelerado que caracterizaba a los países en vías de desarrollo. Uno de estos enfoques no convencionales fue la construcción industrializada, que acorde con Gann (1996), buscó optimizar los rendimientos y procesos de la construcción tradicional, a partir del aprendizaje ganado en otras industrias de producción, principalmente la automotriz. De esta manera, fue factible desarrollar un aprendizaje bidireccional entre dos áreas distintas: la industria automotriz, a menudo percibida como la líder en prácticas de gestión, y la industria de la construcción, comúnmente asociada a una de tipo artesanal y de cambio lento.

Por otro lado, la industria de la construcción tradicional parecía generar también un perjuicio importante sobre uno de los fenómenos más relevantes y controversiales para las naciones en las últimas décadas: el calentamiento global. De acuerdo con Gann (2017), el sector construcción se distingue por considerarse como uno de los principales contribuyentes al referido fenómeno, pues libera un tercio de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), además de precisar del 40% de la producción mundial de energía y recursos (UNEP, 2009). De

hecho, la construcción de edificaciones residenciales es responsable del consumo del 50% de la producción mundial de acero, entre el 60 y el 70% de la producción de cemento y el 50% de la ocupación del suelo destinado a la construcción en zonas urbanas (Li et al., 2018). En relación con ello, la mitigación del fenómeno de calentamiento global está estrechamente ligado a la identificación y reducción de aquellas fuentes antropogénicas de mayor significancia en cuanto a emisiones de GEI. En este sentido, los enfoques constructivos no convencionales parecían representar también una buena opción de reforma y propuesta para construir de una forma más sostenible, pues incorporaban mejoras no solo a nivel de lo sustentable, sino también de lo social y económico. De acuerdo con Tam et al. (2007), la construcción industrializada es un claro ejemplo de ella, pues no solo eleva los estándares de calidad de los procedimientos constructivos y empleo eficiente de recursos, sino que además reduce los plazos y los costos asociados al proyecto, toda vez que incrementa la durabilidad de las edificaciones. Particularmente, la construcción industrializada mediante el empleo de prefabricados tiene un claro diferenciador respecto de la tradicional, y es que traslada el proceso constructivo de sus componentes estructurales hacia plantas industriales, para luego ser transportados hacia el sitio de construcción, y finalmente integrados al mismo sistema constructivo. Este enfoque es también conocido como construcción fuera del sitio (Mao et al., 2013) o construcción prefabricada modular (Kamali & Hewage, 2016).

Con base en lo expuesto con anterioridad, si bien los enfoques constructivos no convencionales parecen contar con un importante respaldo académico, es importante precisar que parte de las investigaciones antecedentes limitaron la evaluación de los impactos ambientales a los entornos de construcción in-situ, es decir, no consideraron dentro del alcance a los procesos involucrados en la producción de los componentes dentro de las plantas industriales (Cao et al.,



2015). Por tanto, la necesidad de ampliar el panorama de investigación para establecer nuevos resultados, y con ello, objetivos de mejora para la industria, sigue vigente. Al respecto, para estudiar particularmente el impacto ambiental de los componentes prefabricados en la presente investigación, se optó por la selección de una metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), pues esta permite diagnosticar y valorar, de acuerdo con las categorías de impacto de interés, los procesos que componen la materialización del componente.

## **1.2. Justificación**

Con el creciente interés público por el fenómeno del calentamiento global, se han impulsado una serie de iniciativas sociales y políticas públicas centradas en reducir las emisiones de GEI de las principales fuentes antropogénicas. A propósito de ello, el sector construcción representa uno de los objetivos de reducción más relevantes, toda vez que libera aproximadamente el 30% del total de estas emisiones, relacionadas con el consumo de energía (Habert & Rousell, 2009). Específicamente, en el caso de los países en vías de desarrollo, el impacto ambiental asociado al sector constructivo se torna aún más crítico debido a la construcción informal y la brecha tecnológica, factores que además repercuten directamente sobre la durabilidad, control de calidad de los procesos constructivos y seguridad de las edificaciones. De acuerdo con Li (2015), la construcción de edificaciones en estos países precisa también de un consumo mayor de recursos: aproximadamente 30% más agua, y entre 10 y 25% más acero y cemento que en países desarrollados. Sumado a ello, en las últimas dos décadas, las ciudades del país se han expandido cerca del 50%, y este crecimiento ha sido proporcional al de la autoconstrucción, o la denominada construcción informal. De acuerdo con el CEPLAN (2016), la informalidad en un país abarca todas aquellas actividades económicas que son desarrolladas por trabajadores y unidades productivas

que no satisfacen las regulaciones previstas por el Estado para el ejercicio de sus actividades. En este contexto, en la ciudad de Lima, siete de cada diez edificaciones de vivienda son de carácter informal (Angulo, 2017). Frente al crecimiento demográfico acelerado y la informalidad existente, un enfoque de construcción industrializada podría representar una mejor forma de construir.

La prefabricación no solo se presenta como una opción más eficiente en cuanto al uso de energía, con proyecciones de reducción del consumo hasta en un 20% respecto al generado en una construcción tradicional, sino que también ha demostrado generar un impacto menor sobre el agotamiento de los recursos naturales, la salud humana y los ecosistemas (Cao et al., 2015). En adición, de acuerdo con Chen et al. (2010), la construcción industrializada puede llegar a reducir las emisiones de GEI de una edificación en un 20%, así como los residuos sólidos que se generen durante su construcción en un 30%, y el consumo de madera, hasta en un 70% (Zhang & Skitmore, 2012). Si bien la construcción industrializada ya es una realidad en el país, aunque poco diversificada, ha sido prioritariamente adoptada debido a los beneficios constructivos que aporta a un proyecto. Tal es el caso de la reducción considerable en la mano de obra, la optimización del tiempo de ejecución de los proyectos y la mejora en las condiciones de seguridad y salud in-situ (Blismas et al., 2006). En contraste, el aporte sustentable implícito en su adopción no ha sido abordado con el mismo interés, sobre todo en cuanto concierne a las operaciones que toman lugar en las plantas de prefabricación. En consecuencia, se considera relevante generar un acercamiento más integral hacia la evaluación de la sostenibilidad de la construcción prefabricada en el país, para así identificar las oportunidades de mejora y trazar con ello, la ruta que permitirá lograr una reducción del impacto ambiental generado sobre las categorías de interés para la presente investigación.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

Realizar la evaluación con perspectiva de ACV y enfoque de la cuna a la puerta (cradle-to-gate) para un componente prefabricado de concreto armado empleado en proyectos de edificación en el país. A partir de los resultados obtenidos del análisis, se espera identificar los procesos que generan mayores impactos ambientales, según las categorías de impacto seleccionadas, y con ello, plantear las estrategias necesarias para lograr una producción más eficiente, vista desde las tres dimensiones de la sostenibilidad: social, económica y ambiental.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Modelar los procesos y subprocesos que componen al ciclo productivo del componente prefabricado seleccionado.
- Evaluar el impacto ambiental asociado a la estructuración de inventarios de entradas y salidas para el componente prefabricado seleccionado, teniendo en consideración los límites definidos para el sistema en cuestión.
- Abordar las consecuencias ambientales de la evaluación de impacto ambiental realizada, incidiendo en la huella de carbono y el método de análisis de puntos finales para las categorías de impacto seleccionadas.

#### 1.4. Limitaciones

Dado que en la trazabilidad de los procesos modelados no siempre se contó con la información necesaria para realizar los cálculos y estimaciones pertinentes, fue necesario realizar ciertas asunciones. A modo de ejemplo, los consumos de energía eléctrica de los equipos fueron determinados mediante el producto entre sus potencias y tiempos de operación. Para estos casos, se tomó las potencias de las fichas técnicas adjuntas en los anexos, pero los tiempos tuvieron que aproximarse con base en la consulta a expertos. De otro lado, en cuanto a la metodología de cálculo empleada para estimar las emisiones de GEI para fuentes móviles, es conveniente precisar que se emplearon algunos factores de emisión por defecto y la jerarquía de nivel 1, lo cual implica un incremento en el nivel de incertidumbre. En contraste, para las fuentes estacionarias, se empleó un factor de emisión representativo para la matriz eléctrica nacional, el mismo que fue tomado de las recomendaciones del MINAM en el año 2017. Por otra parte, el proceso de modelado ambiental en SimaPro estuvo condicionado al inventario Ecoinvent, el cual, para un caso en particular, no contaba con la entrada material requerida, pues esta consistía en una solución específica. En consecuencia, se extrajo de la hoja de seguridad del material su composición química, y se trabajó con el compuesto de mayor representatividad del inventario Ecoinvent. Asimismo, cabe precisar que el *allocation* empleado para el caso de estudio fue APOS U (*Allocation at Point of Substitution, Unit*), fundamentalmente porque el ACV presentado es de tipo atribucional. Es decir, la finalidad es mostrar la imagen específica de la fabricación del componente prefabricado en un momento de tiempo dado.

## Capítulo II: Estado del arte

### 2.1. Estado situacional de la prefabricación en el sector construcción nacional

En setiembre del año 2020, el sector construcción registró un aumento de 4.38% respecto de su anterior porcentaje de representatividad del producto bruto interno (PBI) nacional, estando ello ligado principalmente al incremento registrado de 9.73% en el consumo interno de cemento. Por otro lado, el avance físico de las obras registró un decremento del 11.71% (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento et al., 2020). Entonces, como se evidencia en las cifras, el sector construcción mantiene una relación inversa entre el incremento de su actividad y el avance físico de sus obras, hecho que se ha visto reforzado por las medidas de seguridad adoptadas por el gobierno a causa de la pandemia. En este contexto, la construcción con prefabricados ofrece una clara ventaja en cuanto a reducción de plazos en la ejecución de obras, toda vez que sustituye gran parte de la mano de obra por el empleo de equipos de montaje, siendo ello determinante no solo para nivelar el avance, sino también para minimizar el riesgo de contagios por Covid-19 en los proyectos de construcción (Alfaro et al., 2020). La construcción con prefabricados en el país, sin embargo, no ha sido lo suficientemente difundida por una serie de limitaciones. De acuerdo con Alfaro et al. (2020), la relación existente entre el volumen de concreto prefabricado y el concreto vaciado in-situ en el Perú no supera el 1.5%, esto quiere decir que el volumen de concreto prefabricado, estimado en 240 000 metros cúbicos al año, representa solo el 1.5% del volumen de concreto vaciado in-situ, procedente tanto de la construcción formal como informal. Luego, este valor porcentual puede ser interpretado como una oportunidad de crecimiento importante al compararse con las métricas de otros países, como España, donde el volumen de concreto destinado a la prefabricación asciende al 10% del total producido.

Al analizar las limitaciones existentes para una adopción a gran escala de los prefabricados en el sector nacional, se distinguen barreras desde políticas hasta técnicas, dada la brecha en investigación y normativas de construcción que avalen estas prácticas. De acuerdo con Prefabricando ICH (2014), una de las principales limitantes en la escalabilidad de los prefabricados, sobre todo en países de latinoamérica con mayor riesgo sísmico, es que, además de representar un incremento en la inversión inicial, existe un paradigma sísmico arraigado en los *stakeholders* de la construcción. Este fenómeno alude a la incertidumbre relativa al desempeño estructural de las uniones entre componentes prefabricados ante la eventualidad de un sismo. En las últimas dos décadas se trató de desarrollar y ensayar conexiones “secas” entre componentes prefabricados, las cuales se caracterizan por ser bastante similares a las uniones empleadas en estructuras metálicas. No obstante, estas últimas no tuvieron el desempeño esperado al someterse a ensayos, es por ello que se propuso como solución continuar con el empleo de conexiones “húmedas” para resistir las cargas laterales inducidas por los sismos (Elliott et al., 2003). Las conexiones húmedas se asemejan más a las uniones monolíticas logradas entre elementos estructurales en la construcción tradicional, ya que, si bien conectan componentes prefabricados, el nudo sigue siendo vaciado in-situ. De acuerdo con Aninthaneni & Dhakal (2017), si bien las conexiones húmedas representan una solución al desempeño sísmico de la estructura, se debería continuar con la investigación para garantizar la seguridad estructural en las conexiones secas, pues poseen ciertas ventajas respecto a las húmedas. En primer lugar, no limitan la velocidad de construcción in-situ, toda vez que no precisan la habilitación de encofrados ni la espera del tiempo de curado del nudo para proceder con el izaje y conexión de otro prefabricado. En segundo lugar, en caso uno de los componentes prefabricados se dañe ante la eventualidad de un sismo, las conexiones secas permiten que este pueda ser retirado, reparado o reemplazado, sin necesidad de

demoler la estructura completa. Comerio & Blecher (2010) sostuvieron que, si bien las conexiones húmedas emulan un comportamiento entre componentes prefabricados más cercano al de una estructura monolítica, también limitan las acciones y la velocidad de respuesta ante eventuales eventos sísmicos. Por ejemplo, se debe someter a la estructura a un tiempo de inactividad considerable, pese a que se haya identificado componentes que podrían ser reparables, al no haber sufrido un daño mayor. Evidentemente, esto implica adicionar a los costos de restauración, uno relacionado a la inoperatividad del activo, lo cual impacta, incluso de forma más importante, sobre los usuarios.

## **2.2. Materiales involucrados en la prefabricación**

### ***2.2.1. Concreto prefabricado***

El concreto prefabricado se puede definir como una mezcla preparada, moldeada y curada en un entorno de condiciones de calidad controladas (Chen et al., 2010). De acuerdo con Caparó (2017), el concreto prefabricado está constituido por una mezcla convencional de materiales de construcción: cemento de una determinada especificación, agregado fino (arena), agregado grueso (grava), y en la mayoría de los casos, aditivos. No obstante, a diferencia del concreto que es vaciado in-situ, este se coloca en una ubicación distinta a donde el componente que conforma será finalmente montado e integrado al sistema estructural. Asimismo, este tipo de concreto deberá contar con un diseño de mezcla tal que le permita desarrollar altas resistencias a edades tempranas, las cuales deberían oscilar entre los 350 y 500 kg/cm<sup>2</sup> (Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas, 2010). El desarrollo temprano de resistencias o esfuerzos de compresión elevados en el concreto prefabricado es trascendental porque permitirá acelerar el

tiempo de desencofrado del componente, y con ello, alcanzar los rendimientos de producción deseados las plantas de prefabricación.

#### **2.2.1.1. Cemento**

En la actualidad, la industria del cemento produce 4.1 mil millones de metros cúbicos de material por año, con lo cual se generan entre el 8 y el 10% de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono globales (Jiang et al., 2019). A partir de ello, es posible establecer que se trata de un material, cuyo proceso de manufactura aporta considerablemente sobre el fenómeno de cambio climático, toda vez que requiere de una cantidad importante de energía y recursos. De acuerdo con Valdivia & Valdivia (2014), la industria cementera inicia su proceso productivo con la explotación de canteras y extracción de materias primas, generalmente conformadas por calizas y arcillas; luego, se somete al material extraído a una serie de procesos, entre ellos, la reducción, prehomogenización, almacenamiento, molienda, homogenización y calcinación, siendo este último el responsable del 80% de la energía consumida durante la manufactura del cemento, y el que permite además la obtención del clinker (Tomatis et al., 2020). De acuerdo con Labahn (1985), el clinker es un mineral sintético que compone la mayor parte del cemento, y está a su vez integrado por los siguientes compuestos: silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A) y el ferro-aluminato tetra cálcico (C4AF). Ahora bien, conocer sobre la composición del clinker resulta relevante para realizar una correcta selección del cemento con el que se producirá el concreto prefabricado, pues las altas resistencias tempranas que se precisan para este último se consiguen al incrementar el contenido de aluminato y silicato tricálcico, respecto a los demás de compuestos (Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, 2016).



Por otro lado, en cuanto al desempeño sostenible del cemento, De Carvalho (2001) sostiene que el 90% del total de energía consumida en la manufactura del cemento corresponde a la producción del clinker, por lo que los cementos que requieren de menores cantidades de clinker, consumen menos energía. De hecho, un informe publicado recientemente por el Instituto Real de Asuntos Internacionales (2018), estima que para controlar efectivamente el impacto ambiental generado por la industria cementera, el porcentaje actual de clinker en los cementos debería reducirse en un 60% para el año 2050.

#### **2.2.1.2. Adiciones minerales**

Las adiciones minerales son materiales cementantes suplementarios, es decir, sustituyen parcialmente al cemento en la mezcla de concreto, dando con ello lugar a la producción de un material más sostenible, pues logra importantes reducciones en el consumo energético (Redacción 360 en Concreto-Comunidad, 2020). De acuerdo con el CSI/ECRA (2009), si se sustituyese del 25 al 35% en masa de cemento por ceniza volante, que es un tipo de adición mineral, se esperaría que las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyan de 20 a 90 kg por cada tonelada de cemento producido, mientras que la energía térmica y eléctrica consumidas para la misma producción se reducirían hasta en 400 MJ y 15kWh, respectivamente. Asimismo, una observación importante realizada por Sánchez et al. (2016) sobre el empleo de nanosílice, otro tipo de adición mineral, en la producción de concreto, consistió en la generación de un aumento considerable de la velocidad de fraguado, lo cual constituye una ventaja para la industria de la prefabricación, toda vez que permite desmoldar los componentes con mayor celeridad. En general, aun cuando el empleo de adiciones minerales represente en sí misma una buena alternativa para reducir el consumo de cemento y mejorar las propiedades del concreto, se deberá tener en cuenta la influencia del valor porcentual

de reemplazo que se escoja. A propósito de ello, de acuerdo con los Miembros de la Comisión Permanente del Hormigón (2010), en la producción de concreto prefabricado los valores porcentuales de sustitución del cemento por adiciones minerales deben estar entre el 4 y 12% del peso de cemento.

### **2.2.1.3. Agregados**

De acuerdo con Bedoya & Dzul (2015), los agregados son materias primas no renovables que se requieren para la elaboración del concreto, y suelen estar asociados con un impacto ambiental negativo, toda vez que son obtenidos a partir de actividades minero-extractivas a cielo abierto. Si bien la selección de agregados debe hacerse obedeciendo a los lineamientos técnicos de la normativa ASTM C33 y a la especificación del diseño de mezcla, en general, se puede establecer que su composición representa entre el 60 y 80% del volumen total del concreto (Ninanya & Melgar, 2016).

### **2.2.1.4. Aditivos químicos**

Los aditivos químicos son compuestos orgánicos o inorgánicos que se adicionan a la mezcla antes o durante el proceso de vaciado de concreto para modificar de forma dirigida alguna propiedad en su proceso de hidratación, endurecimiento o estructura interna (Caparó, 2017). De acuerdo con la normativa ASTM C494 (2019), en la industria de la prefabricación se suelen emplear aditivos del tipo retardantes de fragua, pues su acción consiste en reducir el tiempo normal de endurecimiento de la pasta de cemento y acelerar el desarrollo de la resistencia inicial, logrando así tiempos de espera menores en cuanto respecta al proceso de desencofrado en planta. Asimismo, Caparó (2017) sostiene que en la referida industria también es frecuente el empleo de aditivos superplastificantes, pues estos últimos permiten producir un concreto fluido, que resulta

particularmente importante cuando se prefabrica, pues los componentes poseen una congestión de acero de refuerzo elevada.

Por otro lado, según Balsano et al. (2005), la manufactura de los aditivos químicos se caracteriza por consumir una serie de materias primas e insumos, siendo la más relevante el agua, pues el 95% de aditivos son de consistencia líquida, por tanto, su consumo podría ascender entre los 700 y 900 m<sup>3</sup> por mes; asimismo, es frecuente el empleo de otros insumos, tal es el caso de los derivados orgánicos del azúcar, maderas y ácidos cítricos.

#### **2.2.1.5. Agua**

Las especificaciones técnicas relativas a la composición química del agua de mezclado apta para el proceso de elaboración de concreto se rigen de acuerdo con la normativa ASTM C1602 (2018). Al margen de ello, es una práctica común emplear agua potable directamente de la red pública de abastecimiento del servicio.

#### **2.2.1.6. Acero**

De acuerdo con el Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas (2010), el acero empleado en un componente prefabricado suele clasificarse en acero de preesfuerzo y de refuerzo. Por un lado, el acero de preesfuerzo es un material compuesto por varillas de acero de aleación y un torón, que es un elemento compuesto por siete alambres de alta adherencia y resistencia a la rotura. Este se encarga de generar los momentos y esfuerzos necesarios para contrarrestar a los inducidos por las cargas que soporte el componente. Por otro lado, el acero de refuerzo ordinario son barras corrugadas de forma cilíndrica, cuyo propósito consiste en aumentar la ductilidad, resistencia y confinamiento en el componente. Asimismo, en las conexiones y apoyos de los elementos prefabricados, es común emplear placas y perfiles de

acero, cuyo esfuerzo nominal de fluencia suele ser poco más de la mitad del acero: 2,530 kg/cm<sup>2</sup> (Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas, 2010).

De acuerdo con el Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas (2010), el acero empleado en un componente prefabricado suele clasificarse en acero de preesfuerzo y de refuerzo. Por un lado, el acero de preesfuerzo es un material compuesto por varillas de acero de aleación y un torón, que es un elemento compuesto por siete alambres de alta adherencia y resistencia a la rotura. Este se encarga de generar los momentos y esfuerzos necesarios para contrarrestar a los inducidos por las cargas que soporte el componente. Por otro lado, el acero de refuerzo ordinario son barras corrugadas de forma cilíndrica, cuyo propósito consiste en aumentar la ductilidad, resistencia y confinamiento en el componente. Asimismo, en las conexiones y apoyos de los elementos prefabricados, es común emplear placas y perfiles de acero, cuyo esfuerzo nominal de fluencia suele ser poco más de la mitad del acero: 2,530 kg/cm<sup>2</sup> (Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas, 2010).

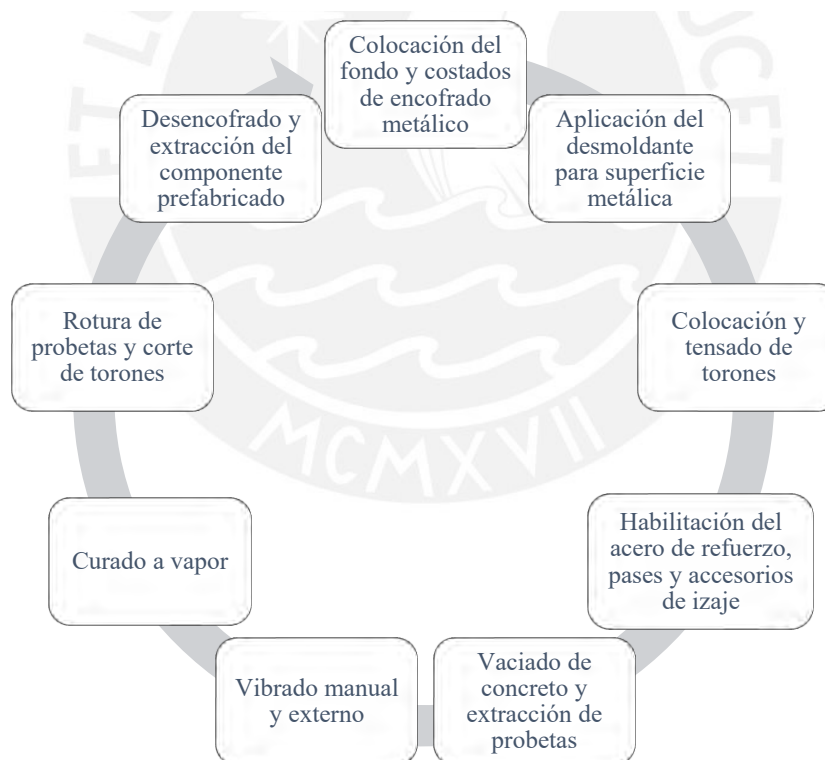
En cuanto al desempeño sostenible del material, Rohden & Garcez (2018) sostienen que el acero y el concreto son los materiales de construcción, cuya manufactura genera los impactos más relevantes en cuanto concierne a la ecotoxicidad y cambio climático; no obstante, es posible adoptar ciertas medidas de mitigación, tal es el caso del empleo de materia prima reciclada en la producción del acero. Según De Carvalho (2001), el consumo de energía para la obtención de un acero con 0% de materia prima reciclada equivale aproximadamente a 29.2 MJ/kg, mientras que para un acero con 50% de materia prima reciclada, se precisaría de solo 14.6 MJ/kg; es decir, se lograría una reducción del 50% en el consumo energético.

### 2.3. Ciclo productivo del componente prefabricado en planta

De acuerdo con el Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas (2010), una vez que el control de calidad de los materiales que conforman la mezcla de concreto es aprobado, estos son transportados hacia las plantas de prefabricación. A propósito de ello, en la Figura 1 se muestran los procesos típicos que conforman el ciclo productivo en las plantas de prefabricación. Este esquema puede simplificarse si se trata de un componente prefabricado no preesforzado, ya que en este caso es factible omitir los procesos de colocación, tensado, y corte de torones.

**Figura 1**

*Ciclo productivo de un componente prefabricado en planta*



*Nota.* El esquema presentado puede simplificarse si se prefabrica un componente no preesforzado, ya que será factible omitir los procesos de colocación y tensado de torones, así como la verificación de sus esfuerzos internos. Adaptado del Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas (2010).

Es relevante precisar que antes de dar inicio con el ciclo productivo en planta, se sugiere tener en cuenta que para ejecutarse el proceso de vaciado del concreto, se debe haber realizado a tiempo el requerimiento a la planta de premezclado. De acuerdo con Estrada (2014), el concreto premezclado se produce a partir de la acción de un equipo de mezcla estacionario que se encarga de integrar a las materias primas que lo conforman. A su vez, estas últimas deben pasar previamente por controles de calidad, para luego transportarse, almacenarse y dosificarse, ya sea en peso o volumen, según las especificaciones técnicas dadas por el especialista.

### ***2.3.1. Colocación del fondo y costados del encofrado metálico***

El fondo del encofrado es un elemento continuo y fijo, que sirve como base para dar inicio con la producción del componente prefabricado. De acuerdo con Peng & Sui Pheng (2011), en las plantas de prefabricación es común elegir encofrados metálicos, toda vez que el material es lo suficientemente durable como para extender su potencial de reutilización hasta el fin de su vida útil, implicando ello un beneficio a nivel económico y ambiental. De hecho, un encofrado metálico de acero podría alcanzar los trescientos usos a lo largo de su vida útil sin perder las propiedades mecánicas del material con el que fue fabricado, y de esta manera, cumplir su función de contención de la masa de concreto hasta su endurecimiento (Urbina, 2001). Por otro lado, en cuanto a los costados del encofrado metálico, estos serán instalados una vez que el acero de refuerzo y/o preesfuerzo se encuentre ya habilitado. Para ello, se deberá tomar en cuenta que, el encofrado, en su conjunto, debe ser lo suficientemente hermético como para impedir la fuga del concreto, y debe contar además con el arriostramiento adecuado para conservar su posición y forma inicial hasta el momento de la extracción del componente prefabricado (Norma E.060 Concreto Armado, 2020).

### ***2.3.2. Aplicación del desmoldante***

Un desmoldante es una sustancia química que se aplica sobre las caras internas de los encofrados, ya sean metálicos o de madera, para facilitar la remoción del componente prefabricado cuando sea momento de realizar su extracción del molde. Particularmente, para el caso de elementos prefabricados, se deberá procurar que el secado de esta sustancia sea de acción rápida, pues ello permitirá habilitar el acero de forma inmediata, y así, acelerar los ritmos de producción. De otro lado, cabe precisar que para poner los encofrados nuevamente en servicio, es decir, una vez concluido el ciclo productivo antecedente, bastará con limpiar la superficie y realizar nuevamente la aplicación del producto sobre ella (SOQUIMIC, 2019). En cuanto a su composición química, estos suelen estar formulados en base a aceites minerales ligeros, tal es el caso de mezclas de hidrocarburos como son los destilados del petróleo (SOQUIMIC, 2019). Asimismo, estos deben ser producidos bajo los lineamientos técnicos de la normativa ASTM C309 Tipo 1.

### ***2.3.3. Habilitado del acero de refuerzo y preesfuerzo***

El metraje de acero que suele instalarse para prefabricar componentes estructurales es elevado. Por tanto, la habilitación del acero de refuerzo y preesfuerzo será realizable en planta solo si se cuenta con las instalaciones para almacenaje y preparación suficientes: talleres y equipos para cortar y doblar varillas, placas y accesorios metálicos (Manual de Calidad en Procedimientos de Prefabricación de ANIPPAC, 2015). De lo contrario, es común que esta tarea sea subcontratada a un tercero, el cual será el encargado de abastecer a la planta de prefabricación con el acero listo para habilitar. Análogamente a lo mencionado para el concreto premezclado, en el caso del acero de refuerzo, se deberá tener en cuenta que el requerimiento debe realizarse a tiempo, pues el suministro puntual del material condicionará el ritmo de producción en planta. De la misma forma,

el metrado de acero que se estime para un determinado componente prefabricado, será realizado en unidades de peso y debe ser lo más exacto posible, pues, de esta forma se evitarán mermas en la habilitación, y sobre costos al momento de hacer el presupuesto.

#### ***2.3.4. Vaciado del concreto***

Si bien el proceso de vaciado suele realizarse de forma inmediata una vez verificada la calidad en los procesos que le anteceden, se deberá tener en cuenta que es importante realizar un muestreo del concreto que esté siendo suministrado a planta (Manual de Calidad en Procedimientos de Prefabricación de ANIPPAC, 2015). En general, el muestreo consiste en extraer probetas de concreto para verificar que cumplan con las especificaciones del diseño de mezcla requeridas por el especialista.

Es de relevancia mencionar también que el abastecimiento de concreto de la planta de premezclado hacia la planta de prefabricación debe coordinarse con un nivel de precisión elevado, pues el proceso de vaciado debe procurarse a una velocidad continua, es decir, no debe ser interrumpido, para así evitar principalmente la generación de juntas frías y otros problemas que puedan afectar el desempeño de la mezcla una vez endurecida (Norma E.060 Concreto Armado, 2020). Así también, de acuerdo con Joyo y López (2019) será importante definir los equipos o medios auxiliares con los que se realizará el proceso de vaciado de acuerdo a las necesidades del proyecto, pues existe una amplia gama de equipos como recipientes, tolvas, carretillas de mano o de motor, bandas transportadoras, sistemas de bombeo y entre otros. A propósito de ello, en la industria de la prefabricación los métodos suelen reducirse a la colocación directa o mediante el empleo de un carpacho concretero, dependiendo del ritmo de producción requerido. Por un lado, la colocación directa consiste en realizar el vaciado a través de las canaletas propias del camión que transporta el concreto; es decir, no requiere de mayores equipos auxiliares. En contraste, el



carpacho concretero es un equipo auxiliar recibirá el concreto del camión de mezclado, para posteriormente verterlo en el interior del encofrado con la ayuda de portales grúa, que serán los encargados movilizar y sostener al equipo (Cárdenas, 2021).

### ***2.3.5. Vibrado del concreto***

A medida que el concreto es colocado en el molde del componente a prefabricar, este debe ser compactado a través de los equipos de vibrado que se hayan previsto para realizar dicha operación. De acuerdo con la norma E.060 Concreto Armado (2020), los equipos de vibrado deben introducirse verticalmente en el concreto para así accionar en su área de influencia; estos no deben emplearse para desplazar lateralmente o acomodar el concreto en el encofrado. El proceso de vibrado del concreto se podrá realizar de dos formas complementarias: vibrado manual empleando una sonda tipo aguja y vibrado empleando vibradores externos. Por un lado, el vibrado manual consiste en introducir el vibrador cada cierta distancia en el concreto fresco y por un tiempo controlado, toda vez que un excesivo tiempo de vibrado puede acarrear problemas posteriores en el concreto como la segregación de los agregados. Esta forma de vibrado se debe complementar mediante una acción de vibrado externo: los vibradores externos son equipos metálicos de motor eléctrico, que suelen ir integrados a los costados del encofrado mediante accesorios de sujeción. Así, el número de vibradores externos dependerá de la separación recomendada entre los mismos y la luz a cubrir.

### ***2.3.6. Curado a vapor***

La construcción que emplea componentes prefabricados posee la clara ventaja de aportar rapidez a la ejecución de obras, lo cual está directamente influenciado por el ritmo de producción en la planta de prefabricación. De acuerdo con el Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas (2010), el curado es uno de los procesos que mayor influenciará en los tiempos y

rendimientos de producción en planta, por tanto, se precisa que el método de curado seleccionado acelere las reacciones químicas para producir un concreto resistente y durable. Con respecto a ello, el método de curado más común en elementos prefabricados y especialmente en los pretensados, es el curado a vapor, pues este permite la producción de elementos de forma económica y rápida al posibilitar la utilización de moldes en más de un ciclo de producción por día. El curado a vapor es un método de curado acelerado, que consiste en una serie de periodos de incremento térmico y aplicación de vapor. En relación a este último, se debe tener en cuenta que la generación de vapor requiere del empleo de una caldera, que acciona por medio de la combustión de un combustible fósil, generalmente gas natural, que calienta el agua almacenada en su interior e induce el cambio de fase. Entonces, el vapor generado podrá ser aplicado sobre el concreto una vez que este haya alcanzado su fraguado inicial, es decir, 1 o 2 horas posteriores al vaciado. Luego, la temperatura deberá incrementarse en la caldera de 22° a 33° por hora, hasta alcanzar una temperatura de 70°, con la cual se deberá sostener la aplicación de vapor por un periodo de cuatro a seis horas. Una vez transcurrido el referido tiempo, se iniciará con el periodo de enfriamiento, que consiste en suspender la aplicación de vapor y conservar cubierto el componente prefabricado hasta que se verifique la resistencia a la compresión mínima requerida de las probetas tomadas (Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas, 2010).

### ***2.3.7. Revisión de la resistencia a la compresión y corte de torones***

La revisión de la resistencia a la compresión del concreto es un procedimiento trascendental para autorizar el corte de torones, en caso se trate de un componente prefabricado preesforzado, o el desencofrado y extracción del componente, en caso se trate de un componente prefabricado con acero de refuerzo simple. En cualquier caso, la revisión consiste en someter a las probetas de concreto, una vez curadas, a ensayos de compresión axial simple para determinar si el concreto

alcanzó la resistencia mínima de diseño requerida. De acuerdo con el Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas (2010), la resistencia a la compresión del concreto debe alcanzar el mínimo requerido del 70 u 80% de su resistencia de diseño antes de proceder con el corte de los torones o cables de pretensado. Entonces, una vez ejecutados los ensayos, y validado el cumplimiento de la premisa anterior, se podrá verificar que el concreto es capaz de soportar la transferencia de esfuerzos y con ello, autorizar la extracción del componente.

### ***2.3.8. Desencofrado y extracción del componente***

Este proceso se debe realizar ineludiblemente mediante la asistencia de equipos como marcos de carga y grúas pórtico, dependiendo de la disponibilidad con la que se cuente en planta. Estos equipos sujetan a la pieza prefabricada a partir de sus accesorios de izaje, los mismos que deben estar capacitados para soportar las solicitaciones de carga actuantes, tanto el peso propio del elemento como la fuerza de succión generada al momento de la extracción (Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas, 2010). Una vez que el componente es extraído del encofrado, este es almacenado en planta sobre dos puntos de apoyo específicos. Después, tal y como se observa en la Figura 2, este es nuevamente izado hacia el vehículo que se encargará de su transporte hacia la locación de montaje final.

#### **Figura 2**

*Izaje del componente prefabricado a partir de sus accesorios de sujeción*



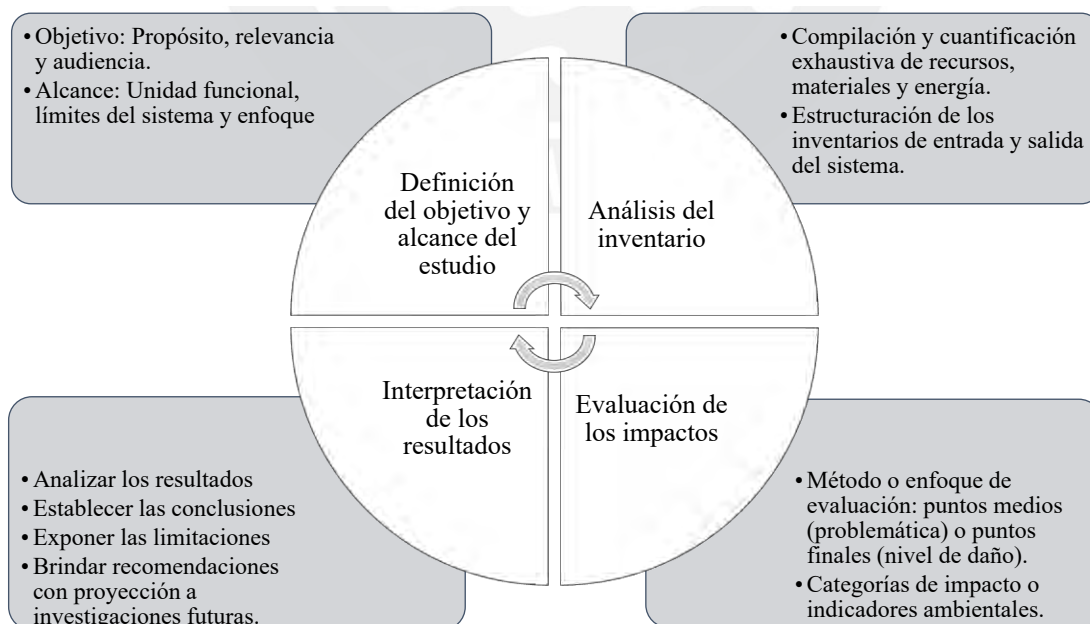
Con respecto al proceso de almacenamiento, el Manual de Diseño de Estructuras Preesforzadas y Prefabricadas (2010) establece que los puntos de apoyo deben estar localizados a la altura de los accesorios de izaje, de esta forma se evitan problemas principalmente asociados al pandeo del elemento. Este fenómeno podría suscitarse también ante la existencia de un gradiente térmico entre las superficies del componente.

#### 2.4. Perspectiva del análisis de ACV

El ACV es una metodología científica que aborda la "compilación y evaluación de todas las entradas, salidas y posibles impactos ambientales de un sistema de productos, procesos o servicios a lo largo de su ciclo de vida" (ISO 14040, 2006). Como se muestra en la Figura 3, todo ACV está estructurado en cuatro fases: definición del objetivo y alcance del estudio, análisis de inventario de ciclo de vida (ICV), evaluación del impacto del ciclo de vida (AICV) e interpretación de los resultados.

**Figura 3**

*Fases para abordar un ACV*



*Nota.* Figura construida a partir de la información de la guía "Introduction to LCA with SimaPro" (2016)

### 2.4.1. Definición del objetivo y alcance del estudio

Si bien la metodología propuesta por el ACV es una herramienta útil para modelar un producto, proceso o servicio, este modelo será una simplificación de una realidad mucho más compleja. Por tanto, una definición cautelosa del objetivo y alcance del estudio contribuirá a que las simplificaciones, estimaciones y asunciones realizadas no distorsionen en gran medida los resultados (Goedkoop et al., 2016).

Ventura et al. (2012) sostiene que definir el objetivo y alcance de un estudio ofrece una visión integral del contexto de la investigación, para lo cual es imperativo establecer la unidad funcional y los límites del sistema, así como detallar la razón por la que se está realizando el estudio, su aplicación, relevancia y la audiencia a la cual estará dirigido. En primer lugar, la unidad funcional servirá como base de referencia para el análisis de todas las entradas y salidas que compongan a un sistema (Vasishta, 2020), mientras que los límites establecidos para el sistema, posibilitarán el abordaje del ACV desde tres enfoques distintos: de la cuna a la tumba, de la cuna a la puerta y de la cuna al sitio, tal y como se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
*Enfoques del ACV de acuerdo a los límites del sistema*

<b>Enfoques del ACV</b>	<b>Límite del sistema</b>
Cuna a la tumba (cradle-to-grave)	Comprende las fases desde el pre-uso hasta el final del ciclo de vida
Cuna a la puerta (cradle-to-gate)	Comprende las fases desde la extracción de la materia prima hasta el final de la fabricación/manufactura
Cuna al sitio (cradle-to-site)	Comprende las fases desde la extracción de la materia prima hasta la construcción in-situ

*Nota.* Adaptada a partir de lo expuesto por los autores Rashid & Yusoff (2015)

### **2.4.2. Análisis del ICV**

El ICV es el proceso siguiente a la recopilación de datos orientados a la estructuración del inventario de las entradas y salidas del sistema. De acuerdo con Finnveden et al. (2009), la compilación de data puede ser una tarea compleja, por lo cual se plantean ciertos enfoques guías como el análisis basado en procesos, el análisis de entradas y salidas, y el análisis híbrido, siendo el primero de ellos el más frecuentemente usado por los modeladores. Con respecto a ello, el análisis basado en procesos es un enfoque que requiere de una cuantificación exhaustiva de recursos, materiales y energía (Vasishtha, 2020).

Los inventarios ambientales son una colección de datos limitados, cuyo valor radica en ser capaces de caracterizar a los datos de entrada y salida que componen al proceso modelado. De esta forma, se estará garantizando una mayor cercanía hacia la realidad del proceso modelado. Goedkoop et al. (2016) sostiene que en caso no se logre encontrar un material dentro de los inventarios disponibles, se evalúa su incidencia en el impacto ambiental generado por el proceso, y de ser relevante, es válido recurrir a bibliografía que proporcione descripciones claras para estimar el uso de energía, desperdicios e incluso emisiones.

#### **2.4.2.1. Análisis de los datos de entrada**

Las entradas que componen a un sistema usualmente se conforman por materias primas y recursos, donde estos últimos corresponden al consumo de energía, ya sea en su forma eléctrica o térmica. De acuerdo con el Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria o GPC (2016), la industria energética registra grandes emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, principalmente a partir de sus sectores estacionario y móvil.

#### 2.4.2.2. Análisis de los datos de salida

Las emisiones son un tipo de salida gaseosa que suele estar asociada a una fuente de emisión. De acuerdo con el GPC (2016), las principales fuentes de emisiones son las industrias de energía estacionaria, energía móvil (transporte), residuos, procesos industriales y agricultura, respectivamente. Así, el análisis de los datos de salida, en cuanto refiere a emisiones, contempla de la identificación de las fuentes de emisión y la selección de los factores de estudio más representativos del proceso evaluado, así como la cuantificación y determinación de su incidencia en cada etapa del ciclo productivo (De Carvalho, 2001). En otras palabras, será trascendental definir qué gases de efecto invernadero resultan más relevantes para el estudio según su incidencia en la fuente de emisión estudiada, que para este caso corresponde a las de energía estacionaria y móvil dentro del sector construcción.

De acuerdo con el Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks:1990-2019 & EPA (2019), los GEI son aquellos que se caracterizan por atrapar calor en la atmósfera, en consecuencia, retrasan la velocidad con la que la energía escapa al espacio. Es importante precisar también que las emisiones de cada uno de los referidos gases deben ser reportada tanto de forma independiente, como conjunta, siendo esto último posible mediante la conversión a una unidad equivalente de dióxido de carbono ( $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ), que a su vez representa la huella de carbono del proceso evaluado. Esta conversión se obtiene multiplicando cada emisión independiente por su potencial de calentamiento global (PCG), que es un indicador de la energía absorbida a causa de las emisiones de una tonelada de un determinado GEI con respecto a las emisiones de una tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), considerando también el tiempo en que el gas permanece en la atmósfera (Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks:1990- 2019 & EPA, 2019). Así, cuanto mayor es el PCG de un GEI, este absorberá más energía y permanecerá más tiempo en

la atmósfera; por tanto, su contribución al calentamiento global será mayor. A propósito de ello, en la Tabla 2 se muestran los principales GEI incidentes en el sector construcción, junto con sus PCG para los horizontes temporales de 100 y 20 años, respectivamente.

**Tabla 2**

*Potenciales de calentamiento global, según GEI y horizonte temporal*

GEI(Fórmulas químicas)	Horizonte temporal de 100 años			Horizonte temporal de 20 años		
	AR4(2007)	AR5(2014)	AR6(2021)	AR4(2007)	AR5(2014)	AR6 (2021)
CO <sub>2</sub>	1	1	1	1	1	1
CH <sub>4</sub> (fossil origin)	25	28	29.8	72	84	82.5
N <sub>2</sub> O	298	265	273	289	264	273

*Nota.* Tabla tomada del Sexto informe de evaluación del IPCC-AR6 (2021)

### **2.4.3. Evaluación del AICV**

Según lo establecido por la ISO 14040 (2006), la AICV relaciona el inventario ya estructurado en la fase antecedente con los potenciales impactos ambientales asociados. No obstante, al no existir un método único de análisis, la selección del método de evaluación y sus categorías de impacto, obedecen al objetivo y alcance delimitados para el estudio (Vasishta, 2020). De acuerdo con Buyle et al. (2013) se tiene dos enfoques para abordar un AICV: evaluación a nivel de problemas (método de puntos medios) y a nivel de daños (método de puntos finales), tal y como se expone en la Tabla 3.



**Tabla 3**  
*Enfoques para abordar un AICV*

Enfoques para abordar un AICV	Alcance
Puntos medios	Muestra valores determinados al inicio o a la mitad del impacto ambiental, tales como el PCG, acidificación o agotamiento de la capa de ozono.
Puntos finales	Muestra resultados proyectados al final del impacto ambiental y orientados a una determinada área de protección.

*Nota.* Tabla adaptada del “Life cycle assessment in the construction sector: A review” (Buyle et al., 2013).

En general, los enfoques para abordar un AICV, ya sean de punto medio o punto final, son modelos de caracterización que proporcionan indicadores en distintos niveles de interpretación. Por un lado, de acuerdo con Yi et al. (2011), el enfoque de puntos medios evalúa el impacto mediante una serie de indicadores de causa-efecto, para una docena de categorías de impacto, lo cual dificulta la interpretación final de los resultados. En contraste, el enfoque de puntos finales condensa todas las referidas categorías de impacto en tres áreas de daño: salud humana, ecosistemas y recursos, en la Tabla 4 se expone cada una; y esto hace relativamente más simple la interpretación de resultados (Goedkoop et al. 1999). No obstante, Finnveden et al. (2009) sostiene que la arista negativa de emplear un enfoque de puntos finales en el AICV, es que el modelo de caracterización se complejiza considerablemente al reducir el análisis a un modelamiento por nivel de daño, pues introduce mayor incertidumbre en los resultados.

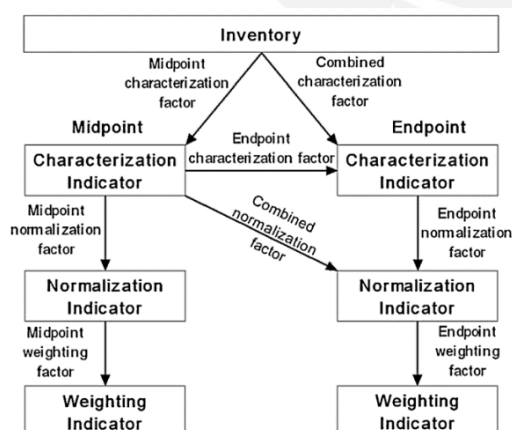
**Tabla 4**  
*Categorías de daño (AoP) evaluadas a partir de un enfoque de puntos finales*

Categorías de daño	Unidad	Descripción
Salud humana	DALY	La unidad DALY considera un año de vida perdido o discapacitado debido a afecciones ambientales.
Ecosistemas	especies. año	La unidad especies. año refiere a la pérdida de especies vivas en una determinada extensión territorial, debido a las emisiones liberadas en los sistemas terrestres, de agua dulce y marinos.
Recursos	USD2013	La unidad USD2013 refiere pérdida económica causada por el aumento marginal de los costos (respecto al valor del dólar en el año 2013) debido a la extracción de un recurso no renovable (fósil y/o mineral).

*Nota.* Tabla adaptada del “ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level” (Goedkoop et al., 2009).

Cabe precisar que, desde un punto de vista de evaluación del nivel de daño, los resultados con enfoque de puntos finales podrían interpretarse como una integral de los resultados de puntos medios (Dong & Ng, 2014), ya que se relacionan mediante factores de caracterización y normalización, tal y como se expone en la Figura 4.

**Figura 4**  
*Factores de conexión entre elementos de cada enfoque para la evaluación de impactos*



*Nota.* Figura tomada del “Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe—a study of commercial buildings in Hong Kong” (Dong & Ng, 2014).

En cuanto a la selección del método para la evaluación de impactos, se deberá tener en cuenta que este muestre los resultados con base en el enfoque seleccionado para el caso de estudio. Desde un enfoque de puntos finales, se podrá analizar los resultados mediante las categorías de impacto, y las áreas de daño (Dong & Ng, 2014). La interrelación existente entre ambos se basa en analizar en qué magnitud cada categoría de impacto contribuye con el daño global generado sobre cada área. De esta manera, es posible identificar las categorías con mayor influencia.

#### ***2.4.4. Interpretación***

De acuerdo con Khasreen et al. (2009, p.689) "el propósito de esta fase es analizar los resultados, establecer las conclusiones, y explicar las limitaciones y recomendaciones basadas en las conclusiones de las fases anteriores del ACV".

### **2.5. Metodología de cálculo de las emisiones de GEI según sus fuentes de generación**

De acuerdo con A2G Climate Partners (2015), la metodología de cálculo de las emisiones de GEI precisa del conocimiento de sus factores de emisión: ratios que relacionan la masa de emisiones de cada GEI, respecto a una unidad energética generada por una determinada actividad. Por lo general, se recomienda que los factores de emisión sean propios del país para el que se está realizando el estudio; sin embargo, es factible trabajar con los factores de emisión por defecto proporcionados por The National Greenhouse Gas Inventories Programme et al. (2006) y el GPC (2016). De acuerdo con estos últimos, para estimar las emisiones de un determinado GEI, se deberá multiplicar los datos de la actividad que genera las emisiones por el factor de emisión asociado a ella. Cabe precisar que, los datos de la actividad son una medida cuantitativa que se registra para un periodo de tiempo determinado. Por ejemplo, el volumen de gas natural empleado para transformar en vapor el agua contenida en una caldera.

### 2.5.1. Factores de emisión por el consumo de energía estacionaria

De acuerdo con el GPC (2016), las fuentes de energía estacionaria son uno de los mayores contribuyentes a las emisiones de GEI de una ciudad. Estas emisiones pueden provenir de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía o del consumo de las formas útiles de energía a partir de la red de suministro y distribución eléctrica.

#### 2.5.1.1. Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN)

La energía suministrada mediante las redes eléctricas nacionales genera emisiones que se producen en las mismas instalaciones de generación eléctrica, mas no en las instalaciones de consumo; para estimar este tipo de emisiones, que corresponden al consumo de la energía eléctrica distribuida por el SEIN, se precisa de un factor de emisión que caracterice a la red eléctrica del país. Al respecto, existen dos recomendaciones planteadas por las siguientes instituciones gubernamentales: MINAM (Ministerio del Ambiente) y MINEM (Ministerio de Energía y Minas). Estas son expuestas en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Factores de emisión del SEIN propuestos por el MINAM (2017) y MINEM (2016)*

<b>Factores de emisión del SEIN (tCO<sub>2eq</sub>/MWh)</b>	<b>Fuentes</b>
0.52144	MINAM (2017)
0.4367	MINEM (2016)

Nota. El factor de emisión propuesto por el MINAM fue calculado por el desarrollador del proyecto

‘Central Hidroeléctrica Poechos II’, para la validación del MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio) del mismo. De otro lado, el factor de emisión propuesto por el MINEM fue calculado por los proponentes de los proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

Una vez estimado el consumo de energía eléctrica a partir del factor de emisión característico del SEIN, será importante identificar en qué medida esta es producida por una determinada fuente de generación. De acuerdo con el Anuario Estadístico de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas (2020), la producción de energía eléctrica en el país, según el tipo de servicio y origen, está caracterizada con base en lo mostrado en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Producción de energía eléctrica en el mercado nacional, según origen y servicio*

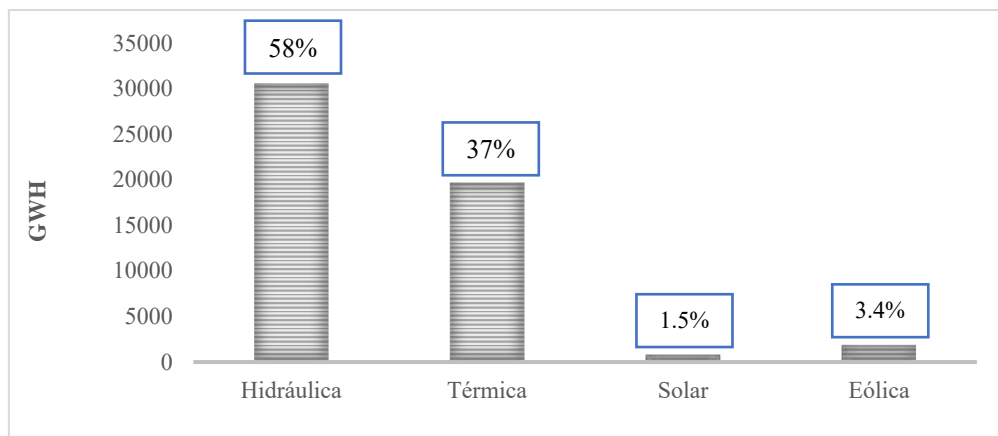
Servicio	Origen				Total
	Hidráulica	Térmica	Solar	Eólica	
Mercado eléctrico	29 895	18 169	778	1 814	50 657 (96%)
Uso propio	615	1 472	-	-	2 087 (4%)
Total (GWh)	30 510	19 641	778	1 814	<b>52 744</b> <b>(100%)</b>
	<b>58%</b>	<b>37%</b>	<b>1.5%</b>	<b>3.4%</b>	

*Nota.* Figura adaptada a partir del Anuario Estadístico de Electricidad 2020-Capítulo 3: Generación eléctrica. Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2021).

A partir de la data presentada en la Tabla 6, es posible establecer que para el año 2020, fecha de actualización más reciente, la energía eléctrica producida en el país ascendía a un total de 52744 GWh, procedente tanto de fuentes renovables (hidráulica, solar y eólica), como no renovables (térmica). En relación con ello, en la Figura 5 se presenta la caracterización porcentual del mercado eléctrico, según sus fuentes de origen.

**Figura 5**

*Participación porcentual en la generación eléctrica, según la fuente de origen*



Nota. Con los porcentajes de participación establecidos, es posible caracterizar al mix eléctrico nacional con una proporción de 63:37, entre las fuentes de origen renovable y no renovable, respectivamente.

### 2.5.1.2. Combustibles fósiles

Los factores de emisión a considerar en este caso son los presentados en las Directrices del IPCC para inventarios nacionales de GEI (2006). En el capítulo 2 de la bibliografía en referencia, se presentan los factores de emisión característicos por cada combustible, y para los sectores industriales de combustión estacionaria, tal es el caso de las industrias de energía, construcción y manufactura. Cabe precisar que, para el caso del gas natural, el factor de emisión adoptado es el que figura en el reporte nacional del Ministerio de Energía y Minas & Dirección General de Eficiencia Energética (2017). A continuación, en la Tabla 7 se presentan los referidos factores de emisión, según el tipo de combustible y GEI.

**Tabla 7**

*Factores de emisión por defecto propuestos para la combustión estacionaria en las industrias energéticas*

Combustible	GEI		
	CO <sub>2</sub> FE (kgCO <sub>2</sub> /TJ)	CH <sub>4</sub> FE (kgCH <sub>4</sub> /TJ)	N <sub>2</sub> O FE (kgNO <sub>2</sub> /TJ)
Petróleo crudo	73300	3	0.6
Gas natural licuado	64200	3	0.6
Gasolina paramotores	69300	3	0.6
Gas/Diesel Oil	74100	3	0.6
Carbón de Coque	94600	1	1.5
Gas natural	56206	1	0.1

Nota. Tabla adaptada de las Directrices del IPCC para inventarios nacionales de GEI (2006)-Capítulo 2:

Combustión estacionaria

### **2.5.2. Factores de emisión por el consumo de energía móvil**

De acuerdo con las Directrices del IPCC para inventarios nacionales de GEI (2006), el sector transporte terrestre constituye la fuente de emisiones más importante del sector de energía móvil. En parte porque considera tanto la combustión como la evaporación de los combustibles que posibilitan el accionar de los vehículos terrestres. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (2006), establece mediante la Resolución Directorial N° 002-2006-MTC/15, que se consideran vehículos terrestres a los automóviles, camiones de servicio ligero, camiones de servicio pesado, autobuses y motocicletas.

Para el sector de energía móvil, la complejidad metodológica para el cálculo de las emisiones de GEI se subdivide en tres niveles jerárquicos, los cuales buscan reducir la incertidumbre a medida que ascienden. Asimismo, cabe precisar que los cálculos deben ser

abordados por separado para el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. En relación con ello, en la Tabla 8 se presenta el consolidado de la metodología de cálculo por cada nivel jerárquico y GEI.

**Tabla 8**

*Consideraciones metodológicas para el cálculo de emisiones GEI según el nivel de jerarquía*

Nivel jerárquico	GEI			Nomenclaturas
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
Nivel 1	Emisión= $\sum(\text{Combustible}_a \times \text{EF}_a)$	Emisión= $\sum(\text{Combustible}_a \times \text{EF}_a)$	Emisión= $\sum(\text{Combustible}_a \times \text{EF}_a)$	-Emisión = Emisiones de CO <sub>2</sub> (kg) -Combustible <sub>a</sub> = Combustible consumido (TJ) -EF <sub>a</sub> = Factor de emisión de CO <sub>2</sub> por defecto (kg/TJ). -a = tipo de combustible (p. ej., gasolina, diesel, gas natural, GLP, etc.)
Nivel 2	Emisión= $\sum(\text{Combustible}_a \times \text{EF}_{a,b,c})$	Emisión= $\sum(\text{Combustible}_a \times \text{EF}_{a,b,c})$	Emisión= $\sum(\text{Combustible}_a \times \text{EF}_{a,b,c})$	-Emisión = emisión o CH <sub>4</sub> o N <sub>2</sub> O (kg) -EF <sub>a, b, c, d</sub> = factor de emisión (kg/km) -Distancia a, b, c, d = distancia recorrida durante la fase de funcionamiento térmicamente estabilizado del motor, para una actividad de fuente móvil dada (km) -C a, b, c, d = emisiones durante la fase de calentamiento (arranque en frío) (kg) -a = tipo de combustible -b = tipo de vehículo -c = tecnología de control de emisiones (como convertor catalítico no controlado, etc.) -d = condiciones de funcionamiento (p. ej., tipo de carretera urbana o rural, clima, u otros)
Nivel 3	-	Emisión= $\sum(\text{Distancia}_{a,b,c,d} \times \text{EF}_{a,b,c,d}) + \sum c_{a,b,c,d}$	Emisión= $\sum(\text{Distancia}_{a,b,c,d} \times \text{EF}_{a,b,c,d}) + \sum c_{a,b,c,d}$	

*Nota.* Ecuaciones tomadas de las Directrices del IPCC para inventarios nacionales de GEI (2006)-Capítulo

3: Combustión móvil (pág. 3.12, 3.13 y 3.15).



Como se observa en la Tabla 8, para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> con una complejidad metodológica de nivel 2, es posible emplear la misma ecuación que para el nivel 1. No obstante, se debe precisar que el factor de emisión de CO<sub>2</sub> en este caso, debe basarse en el contenido real de carbono de los combustibles consumidos en el país que se está inventariando, mas no en uno por defecto. Luego, el Nivel 3 no aplica para las emisiones del CO<sub>2</sub>, toda vez que no es posible reducir significativamente la incertidumbre con respecto al nivel precedente. En este último caso, los esfuerzos deberían dirigirse a mejorar la calidad de datos acerca del combustible consumido, y realizar la distinción con los combustibles que no son empleados para fines de transporte terrestre. De otro lado, para estimar las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de los vehículos terrestres, los métodos se basan en los kilómetros recorridos por el vehículo (KRV) o en la cantidad de combustible consumido. En la Tabla 8 se muestra que el nivel 1 requiere determinar la cantidad de combustible consumido y emplear los factores de emisión por defecto, todo ello asumiendo que no es posible estimar el consumo de combustible por tipo de vehículo. En cuanto al método de nivel 2, este se distingue básicamente porque los factores de emisión empleados no solo consideran el tipo de combustible consumido, si no que incorporan nuevas variables de interés, tal es el caso del tipo de vehículo y la tecnología de control de emisiones que pueda tener este último. Cabe precisar que el tipo de vehículo debería distinguir entre uno de servicio ligero o pesado, así como contar con la especificación de su antigüedad. Este último factor permitirá inferir la adopción de una tecnología de control de emisiones como función del año de instrumentación de la política. Finalmente, el nivel 3 incorpora como variable de cálculo a la distancia recorrida por el vehículo, así como otros parámetros mostrados en la Tabla 8.

En cuanto a la elección de los factores de emisión para cada GEI, se deberá tener en cuenta que, según el nivel jerárquico seleccionado, se podrá optar por emplear factores de emisión por

defecto (nivel 1) o específicos de cada país (nivel 2 y 3). En particular para el CO<sub>2</sub>, los valores empleados en el Perú son los mismos que los presentados por defecto en el GL2006 para ciertos combustibles; tal es el caso de los que se detallan en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Factores de emisión de CO<sub>2</sub> por defecto del transporte terrestre en el Perú*

Tipo de combustible	GEI
	FE (kg CO <sub>2</sub> /TJ)
Gasolina	69300
Diésel D2	74100
Petróleo industrial	73300
Gas natural	56100

Nota. Tabla adaptada de las Directrices del IPCC para inventarios nacionales de GEI (2006)-Capítulo 3: Combustión móvil (pág. 3.16)

En cuanto refiere a los factores de emisión por defecto del CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, estos dependen principalmente de la combustión y de la tecnología de control de emisiones presentes en los vehículos; por lo tanto, los factores de emisión por defecto basados en el combustible, que no especifican la tecnología del vehículo, son muy inciertos. No obstante, si las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O procedentes de las fuentes móviles no son una categoría principal, pueden utilizarse los factores de emisión por defecto presentados en la Tabla 10.

**Tabla 10**  
*Factores de emisión por defecto de N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> del transporte terrestre*

Tipo de combustible	GEI	
	FE (kg CH <sub>4</sub> /TJ)	FE (kg N <sub>2</sub> O/TJ)
Gasolina para motores (sin control de emisiones)	33	3.2
Gasolina para motores (con catalizador de oxidación)	25	8
Diesel	3.9	3.9
Gas natural	92	3

Nota. Tabla adaptada de las Directrices del IPCC para inventarios nacionales de GEI (2006)-Capítulo 3: Combustión móvil (pág. 3.21)

De otro lado, cabe precisar que, de contarse con el consumo de un determinado combustible en unidades de volumen o masa, este puede ser convertido a unidades de energía a través de su valor calórico neto (VCN) (Ministerio de Energía y Minas Viceministerio de Energía & Dirección General de Eficiencia Energética, 2017). Con relación a ello, en la Tabla 11 se presentan los VCN para los combustibles más empleados en el sector transporte terrestre.

**Tabla 11**  
*Valores caloríficos netos (VCN) de los combustibles empleados en el transporte terrestre*

Tipo de combustible	VCN	Unidad
Petróleo industrial	40.72	TJ/Gg
Diésel D2	43	TJ/Gg
Gasolina	44.24	TJ/Gg
Gas natural	48	TJ/Gg

Nota. Adaptado de INGEI 2000 y 2005, Petroperú y GL2006 (Cap.1, p.1.19)

### Capítulo III: Desarrollo de la investigación

#### 3.1. Caso de estudio: Columna prefabricada de concreto armado

Como se observa en la Figura 6, el componente estructural del caso de estudio está compuesto por una sección rectangular constante y ménsulas de sección variable, predispuestas a lo largo de toda su altura.

##### **Figura 6**

*Columna prefabricada de concreto armado con ménsulas de apoyo*



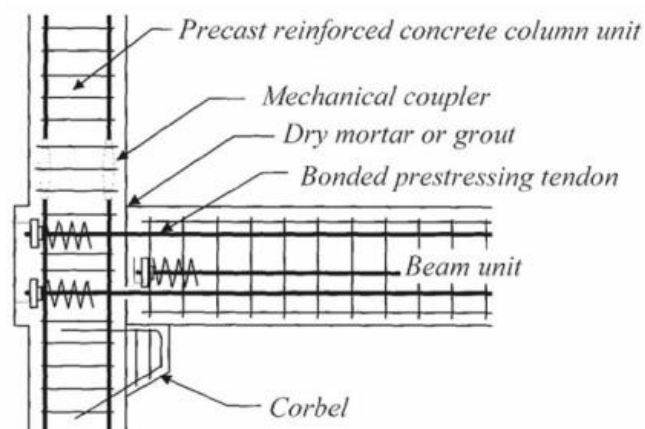
*Nota.* La imagen corresponde a un renderizado de elaboración propia, para el modelo de la columna prefabricada construido en el software Revit 2021.

Ahora bien, para estructuras de concreto prefabricado en zonas sísmicas, tal es el caso del Perú, es imprescindible abordar el tipo de conexión entre las distintas unidades prefabricadas. En particular, el comportamiento estructural de un edificio aporticado se basa predominantemente en el rendimiento de la conexión viga-columna (Aninthaneni1& Dhakal, 2017). De acuerdo con Kurama et al. (2018), estas conexiones se pueden clasificar en dos tipos para edificios aporticados: emulativas equivalentes y articuladas o no emulativas. Las conexiones emulativas equivalentes se

logran mediante el empleo de juntas húmedas o *wet joints*, que se consiguen vaciando in situ las uniones entre elementos prefabricados. De acuerdo con Bedriñana (2021), este tipo de conexión se diseña para lograr un desempeño equivalente al de una estructura convencional de concreto monolítico. Ahora bien, en cuanto a las desventajas de emplear juntas húmedas en edificios prefabricados de concreto, se tiene lo siguiente: la velocidad de construcción se limita por el tiempo requerido para el curado del concreto que es vaciado in-situ, el edificio debe ser demolido, en lugar de desmantelado y reutilizado, y no hay posibilidad de reemplazar los componentes dañados ante una eventualidad sísmica. De otro lado, en cuanto al desempeño sísmico de este tipo de conexiones, se observó que durante la secuencia de sismos de Nueva Zelanda (2010-2011), las estructuras prefabricadas diseñadas y construidas con base en los códigos de concretos modernos, tuvieron el desempeño esperado, incluso en las zonas de mayor intensidad sísmica (Fleischman et al. 2014). Ahora bien, el esquema para el tipo de conexión del caso de estudio, que corresponde específicamente a vigas postensadas apoyadas en columnas, se detalla en la Figura 7.

### Figura 7

*Detalle del armado estructural para una conexión de viga postensada y columna mensular prefabricada*

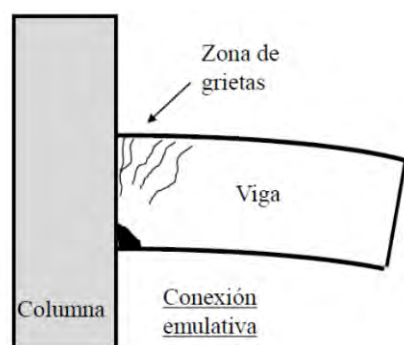


*Nota.* Figura tomada de las Recomendaciones Técnicas para el Diseño de Estructuras Emulativas de Concreto Prefabricado para Edificios en Zonas Sísmicas (Bendriñana,2021).

A partir de lo mostrado en la Figura 7, se observa que la conexión emulativa incluye un elemento de apoyo vertical en la columna, al cual se le denomina ménsula. Este último se incorpora en el diseño con diversas finalidades: vanos largos, mejorar la transferencia de las cargas gravitacionales a las columnas adyacentes, y generalmente para edificios de pocos pisos (Bedriñana, 2021). Ahora bien, es preciso mencionar también que el modo de falla de este mecanismo tiende a ser frágil, ósea intempestivo, y se presenta en las vigas y ménsulas, tal y como se muestra en la Figura 8.

### Figura 8

*Modo de falla en la conexión emulativa viga-columna*



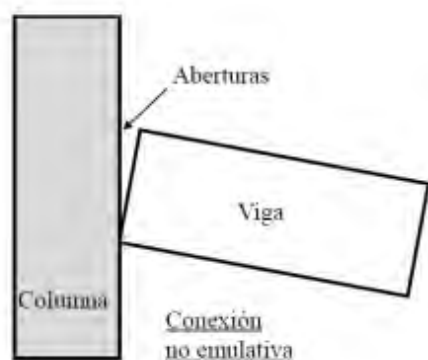
*Nota.* Figura tomada de las Recomendaciones Técnicas para el Diseño de Estructuras Emulativas de Concreto Prefabricado para Edificios en Zonas Sísmicas (Bedriñana, 2021).

De otro lado, las conexiones articuladas suelen unir a las unidades prefabricadas mediante tendones postensados desadheridos, elementos que se emplean para mejorar el desempeño sísmico de estas uniones. Si bien este tipo de conexión no emula el monolitismo de una estructura convencional, puede lograr que la estructura global tenga un comportamiento dúctil, además de ser factible su desmontaje seguro y la reutilización al término de su vida útil, así como el reemplazo de sus componentes ante eventuales daños sísmicos (Aninthaneni & Dhakal, 2017). En general, el empleo de este tipo de conexiones es menos frecuente porque su desempeño sísmico y

resistencia a las cargas laterales inducidas por estos eventos es más pobre que el de un sistema monolítico (Englekirk 1995). Así fue demostrado en los ensayos realizados sobre un tipo de conexión articulada conocida como de junta seca, muy similar a las conexiones existentes en los edificios de acero (Elliott et al. Alabama., 2003). El modo de falla más frecuente para este tipo de conexión, se muestra en la Figura 9.

### Figura 9

*Modo de falla en la conexión articulada viga-columna*



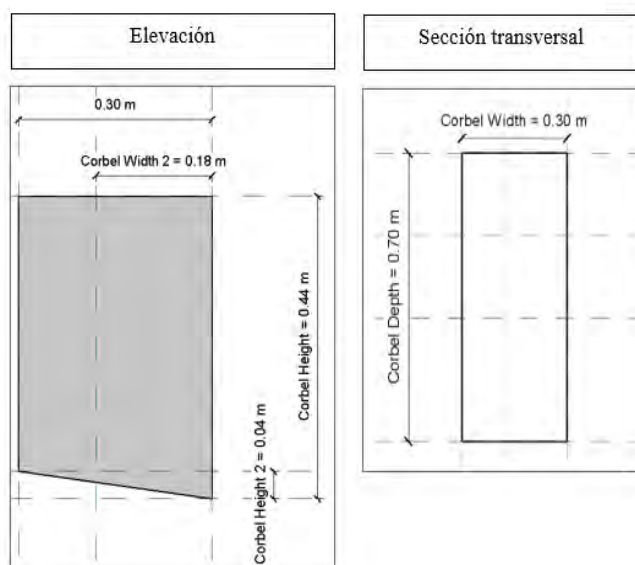
*Nota.* Figura tomada de las Recomendaciones Técnicas para el Diseño de Estructuras Emulativas de Concreto Prefabricado para Edificios en Zonas Sísmicas (Bendriñana,2021).

Una vez delimitado el marco conceptual que compete al caso de estudio, se procedió a realizar el modelado del componente prefabricado mediante el software Revit 2021. El objetivo de la construcción del modelo residió en estimar los parámetros reales más relevantes, asociados al componente prefabricado, tal es el caso del volumen de concreto, área de encofrado y peso del acero de refuerzo. En ese contexto, el modelamiento de la columna prefabricada se realizó mediante los planos de sección transversal, corte y elevación, acotándose en estos últimos las alturas de entrepiso indicadas en los planos. Una vez definida la sección transversal y elevación

de la ménsula, tal y como se observa en la Figura 10, se procedió con la generación del modelo tridimensional y las elevaciones de la columna prefabricada, mostradas en la Figura 11.

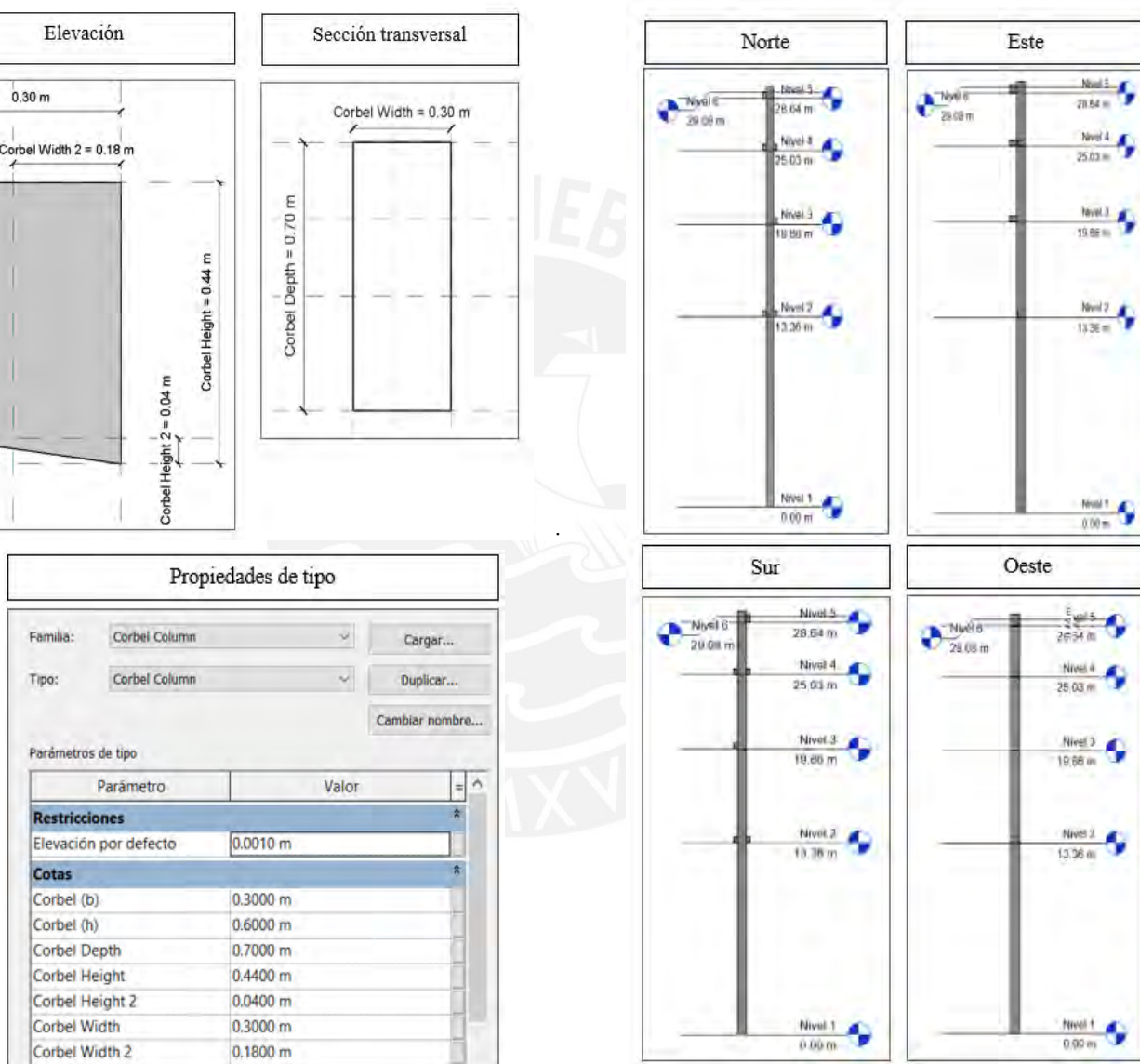
**Figura 10**

*Detalle de la elevación, sección transversal y propiedades de tipo de la ménsula.*



**Figura 11**

*Vistas en elevación y modelo tridimensional de la columna prefabricada de concreto armado*



*Nota.* Se creó la familia “Corbel Column” o columna mensular, y sus respectivos parámetros de tipo, mediante el software Revit2021.



Finalmente, en la Tabla 12 se presentan las métricas requeridas para el desarrollo de la investigación.

**Tabla 12**

*Métricas obtenidas a partir del modelo construido en Revit 2021*

<b>Parámetros</b>	<b>Métricas</b>
Volumen de concreto (m <sup>3</sup> )	14.56
Área de encofrado (m <sup>2</sup> )	92
Acero de refuerzo (kg)	3931.66
Cuantía de acero (kg/m <sup>3</sup> )	270.03
Longitud de la columna (m)	29.08
<u>Peso de la columna (tn)</u>	<u>40.33</u>

*Nota.* El peso obtenido para el acero corresponde únicamente a las varillas de acero de refuerzo, mas no incluye a los accesorios de izaje, estribos o cables postensados que serán instalados posteriormente en obra para la conexión viga-columna.

### **3.2. Marco metodológico del ACV aplicado al caso de estudio**

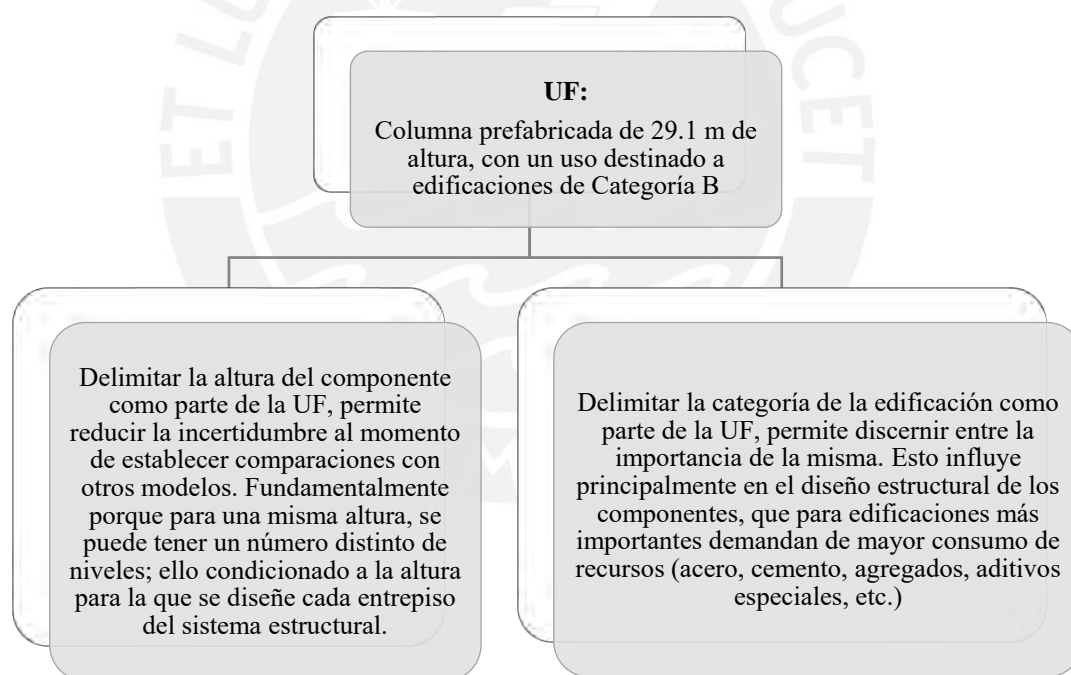
#### ***3.2.1. Definición del objetivo y alcance***

El objetivo de la investigación estuvo centrado en evaluar los impactos ambientales asociados al ciclo productivo de una columna prefabricada de concreto armado, de las especificaciones del caso de estudio. Los impactos fueron evaluados mediante los métodos de AICV seleccionados, logrando obtener de ello las contribuciones al impacto global de cada uno de los procesos y fases, definidos para el LCA. Los resultados del LCA se emplearon también para plantear oportunidades de mejora en el desempeño ambiental de materiales, y con ello, minimizar la huella de carbono y otros indicadores de daño por unidad de producción.

En cuanto al alcance del estudio, como fue descrito con anterioridad, se define una unidad funcional (UF) y los límites del sistema, que sustenten el criterio para la elección de las entradas y salidas, así como la descripción de las asunciones y limitaciones metodológicas más importantes (Goedkoop et al., 2016). En primer lugar, en cuanto a la selección de la unidad funcional, al tratarse de la evaluación de uno de los componentes prefabricados de una edificación, más no del conjunto, se consideró pertinente la selección de la siguiente UF: columna prefabricada de categoría B (Edificaciones importantes), que posea una altura de 29.1 m. En la Figura 12 se propone un esquema para exponer el sustento de la elección.

### Figura 12

*Criterios considerados para la selección de la unidad funcional (UF)*

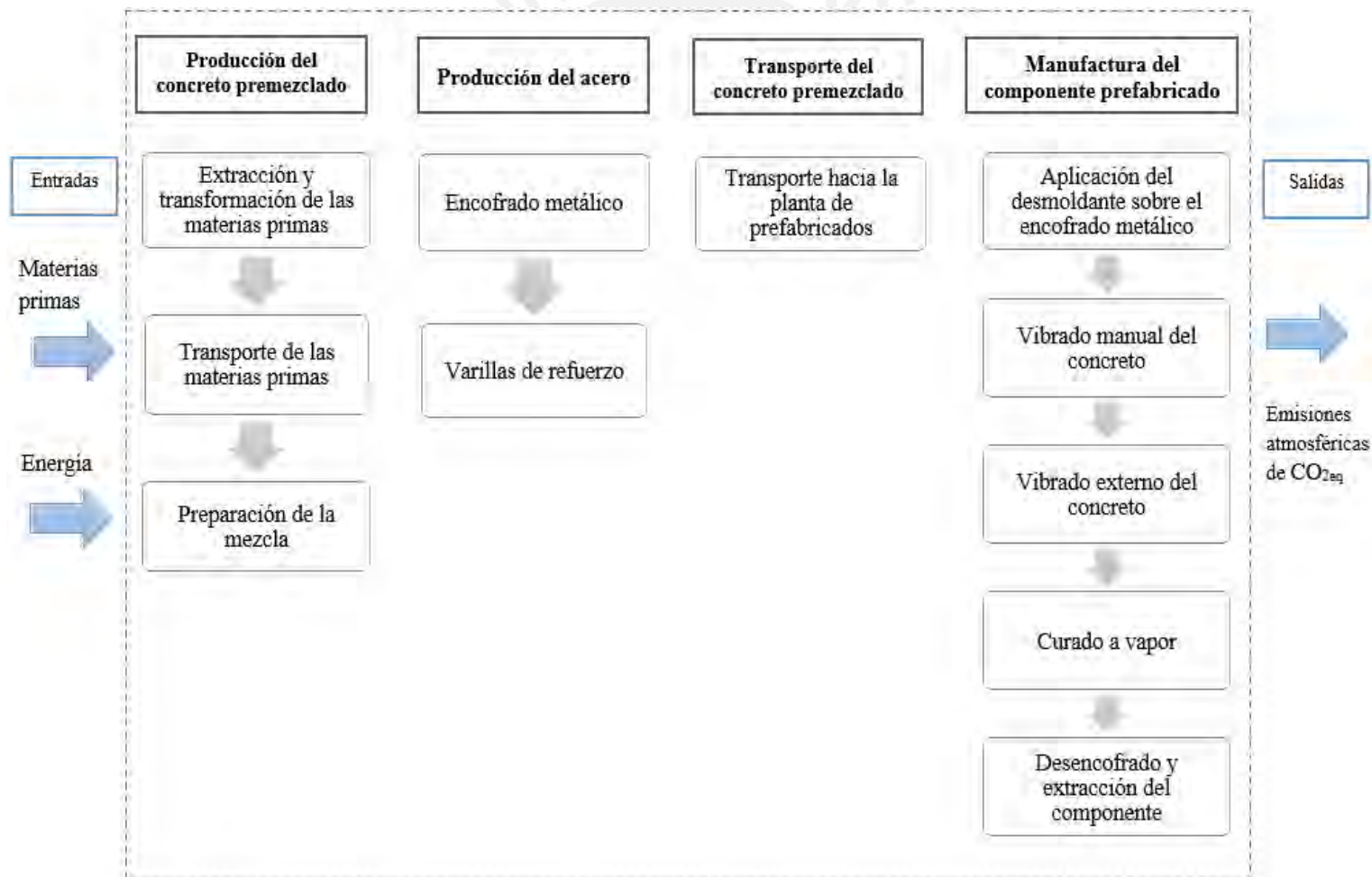


*Nota.* El concepto de categoría de una edificación se encuentra desarrollado con mayor amplitud en la Norma Técnica Peruana E.060. En general, se contemplan cuatro tipos: Esenciales (A), Importantes (B), Comunes (C) y Temporales (D) (NTP E.060,2019).

De otro lado, en cuanto a los límites del sistema, se condujo el estudio por medio de un enfoque de tipo de la cuna a la puerta (cradle-to-gate); en la que se inició con la fase de producción del concreto premezclado (cradle), seguida por el transporte de la mezcla desde la planta de producción del concreto hacia la planta de prefabricados, y finalmente, la manufactura del componente prefabricado (gate). En general, la definición de los límites se muestra con mayor nivel de detalle en la Figura 13.

**Figura 13**

*Límites del sistema para el ACV del caso de estudio*



*Nota.* Se excluyó del alcance la influencia de los bienes capitales que intervienen en cada una de las etapas mostradas, tal es el caso de los procesos de manufactura de los equipos y maquinaria.

Con base en la Figura 13, fue posible abordar el ACV en 4 etapas, para cada una de las cuales se identificó y describió el inventario característico de cada proceso incluido en el análisis. Con respecto a las entradas, se consideró tanto el aporte de materias primas, como de energía (térmica y eléctrica). De otro lado, para estimar las salidas asociadas al consumo energético, se empleó la metodología de cálculo de nivel jerárquico 1, tanto para fuentes de energía estacionaria como móvil; mientras que las salidas asociadas al consumo de recursos, se estimó mediante el modelo ambiental construido en el software SimaPro. En todos los casos, la evaluación para cada proceso, se realizó con base en la unidad funcional designada para el caso de estudio.

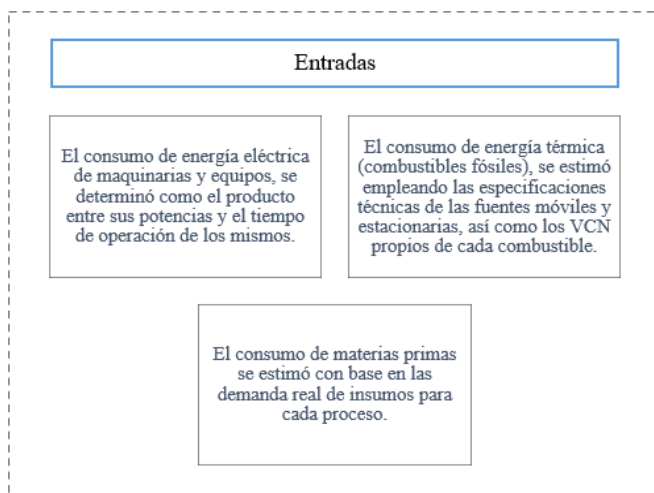
### ***3.2.2. Inventario de ciclo de vida (ICV)***

Elaborar un ICV se requiere de una exhaustiva búsqueda y recopilación de datos confiables; esta información puede ser recopilada a través de diversas fuentes. Para elaborar el ICV del caso de estudio se recurrió a las siguientes: base de datos Ecoinvent v.2.2. del software SimaPro 9.3.0.3, fichas técnicas de fabricantes homologados, y reportes e informes institucionales.

Ahora bien, antes de iniciar con el ICV para cada una de las etapas del caso de estudio, en la Figura 14 se exponen ciertas consideraciones tomadas durante la estimación de las entradas para cada proceso. De otro lado, en la Figura 15 se expone lo referido a las salidas.

**Figura 14**

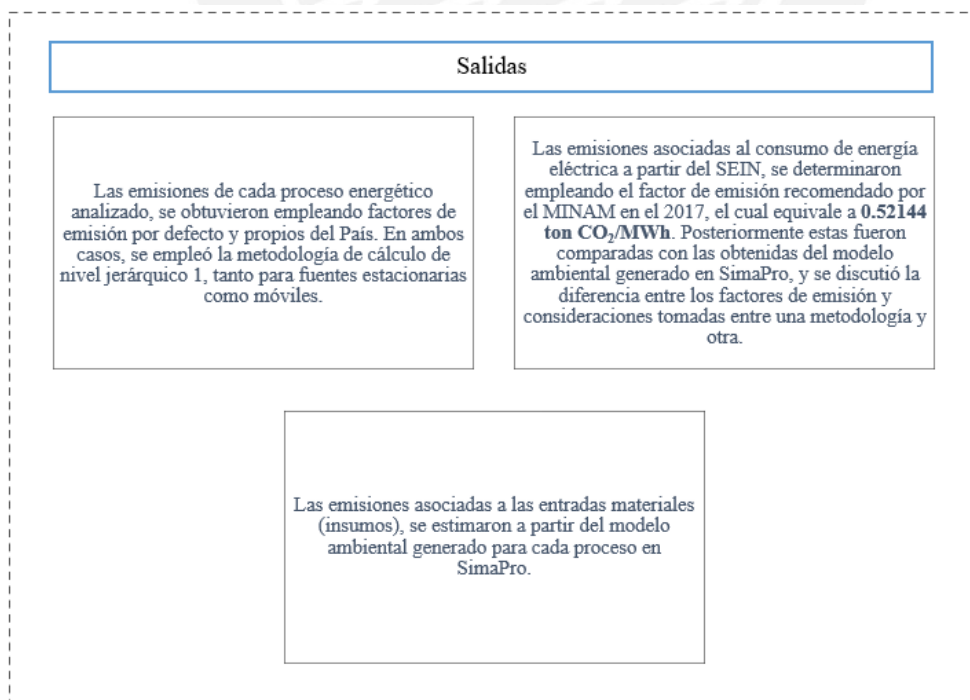
*Consideraciones metodológicas para la estimación de las entradas del ICV*



Nota. La estructuración de los inventarios de entrada de cada proceso, se realizó con respecto a la unidad funcional del caso de estudio: Columna prefabricada de 29.1 m de altura, con un uso destinado a edificaciones de Categoría B. En ese contexto, se emplearon las métricas obtenidas a partir del modelo construido en Revit 2021.

**Figura 15**

*Consideraciones metodológicas para la estimación de las salidas del ICV*



### 3.2.2.1. Etapa I: Producción del concreto premezclado

#### a) Proceso 1: Extracción y transformación de las materias primas

Para materializar la producción de concreto premezclado se precisa, en primera instancia, contar con las materias primas que integran la mezcla en la dosificación adecuada. Ahora, al tratarse de un concreto empleado para prefabricar un componente estructural, fue necesario proponer un diseño de mezcla que satisfaga los requisitos técnicos y de calidad demandados. En ese sentido, en la Tabla 13 se presenta la dosificación detallada con la que se cuantificó las entradas materiales para el proceso.

**Tabla 13**

*Especificaciones técnicas requeridas para el diseño de mezcla de concreto prefabricado*

Especificaciones técnicas para el diseño de mezcla	
Resistencia nominal a la compresión ( $f'c$ )	350 kg/cm <sup>2</sup>
Slump (asentamiento)	9 ± 1 inches
Relación Agua Cemento (a/c)	0.38
Agregado fino (arena)	48%
Agregado grueso (grava-huso 67)	52%
Aditivo (Aqua HP-300)	1.30%

*Nota.* Especificaciones de diseño de mezcla proporcionadas por la unidad de prefabricados PREANSA-Perú (2021).

En consideración de las especificaciones mostradas en la Tabla 13 y la recomendación de emplear 450kg de Cemento Portland Tipo I por cada metro cúbico de concreto prefabricado (Dazcko, 2012), en la Tabla 14 se muestra el detalle de la dosificación de materias primas requeridas para producir 1 m<sup>3</sup> de concreto.

**Tabla 14***Dosificación de materias primas para producir 1 m<sup>3</sup> de concreto*

<b>Dosificación de materias primas en peso (kg)</b>				
Cemento Portland (Tipo I)	Agregado fino (arena)	Agregado grueso (grava Huso 67)	Agua	Aditivo (Aqua HP-300)
450	175.68	190.32	171	4.76

Ahora bien, para determinar las entradas correspondientes al proceso, fue necesario trabajar con la demanda real de concreto, métrica que se extrajo a partir del modelo construido para el componente prefabricado en el software Revit 2021. Entonces, se procedió con el escalamiento de la dosificación de materias primas hacia la demanda real de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto, resultando ello en lo expuesto en la Tabla 15.

**Tabla 15***Dosificación de materias primas para producir 14.56 m<sup>3</sup> de concreto*

<b>Dosificación de materias primas en peso (kg)</b>				
Cemento Portland (Tipo I)	Agregado fino (arena)	Agregado grueso (grava Huso 67)	Agua	Aditivo (Aqua HP-300)
6552	2557.90	2771.10	2489.80	69.31

Por otro lado, en cuanto respecta a las emisiones asociadas a los procesos extractivos y de manufactura de cada insumo empleado en la mezcla de concreto, estas fueron determinadas en acápites posteriores, a partir del modelo ambiental generado para el proceso en el software SimaPro.

### b) Proceso 2: Transporte de las materias primas

Las materias primas son almacenadas en locaciones distintas a la planta de prefabricación, por lo cual es usual que se solicite a los proveedores que estas sean suministradas en una cantidad que cubra la demanda de producción. En ese sentido, para estructurar las entradas correspondientes al presente proceso, se consideró tanto las distancias recorridas como el peso de las cargas transportadas. Cabe precisar que estas últimas fueron determinadas en el acápite anterior para caracterizar la dosificación de mezcla requerida para producir los 14.53 m<sup>3</sup> de concreto. De otro lado, particularmente para el caso de estudio, se identificó a los proveedores de cada uno de los insumos requeridos, y se determinó su ubicación, tal y como se detalla en la Tabla 16.

**Tabla 16**

*Ubicación de los proveedores de las materias primas que componen la mezcla de concreto*

Insumo	Proveedor	Ubicación del proveedor	Punto de destino (Planta de prefabricados)
Cemento Portland Tipo I	UNACEM Perú S.A.	Av. Atocongo 2440, Villa María del Triunfo	
Agregado fino (arena)	UNICON-Cantera Jicamarca	Lurigancho-Chosica 15461	Preansa, Atocongo 2802, Villa María del Triunfo 15822
Agregado grueso (grava)	UNICON-Cantera Jicamarca	Lurigancho-Chosica 15461	
Agua	Red de suministro público	-	
Aditivo (Aqua HP-300)	Z Aditivos	Villa el Salvador 15842	

Con base en ello, fue posible estimar las distancias con la función “Indicaciones” de la aplicación “Google Maps”, para así emular una ruta de transporte real, que considere los parámetros de tránsito que caracterizan al entorno. Al respecto de ello, en la Figura 16 se expone el esquema de transporte para cada proveedor.



**Figura 16**

*Rutas generadas a partir de Google Maps para emular el transporte desde la ubicación de los proveedores hacia la planta de prefabricados*



*Nota.* Para la simulación de rutas en Google Maps, se seleccionó el automóvil como medio de transporte recomendado.

A partir de las rutas mostradas en la Figura 15, se extrajo los valores correspondientes a las distancias más eficientes para el transporte. Luego, junto con los valores de las cargas transportadas en cada viaje, se estimó las entradas correspondientes al transporte en unidades de *tkm* (tons.per. kilometer). Al respecto, en la Tabla 17, se detalla el proceso de cálculo seguido.

**Tabla 17**

*Estimación de las entradas asociadas al transporte de las materias primas requeridas para la producción de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto*

<b>Insumo</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Distancia recorrida (km)</b>	<b>Carga transportada (t)</b>	<b>TKM</b>
Cemento Portland Tipo I	UNACEM Perú S.A.	1.1	6.55	7.21
Agregado fino (arena)	UNICON-Cantera Jicamarca	47.8	2.56	122.37
Agregado grueso (grava)	UNICON-Cantera Jicamarca	47.8	2.77	132.41
Agua	Red de suministro público	-	-	-
Aditivo (Aqua HP-300)	Z Aditivos	13.1	0.07	0.92

Ahora bien, para la estimación de las salidas asociadas a este proceso, se empleó el modelo ambiental generado en el software SimaPro, considerando que las unidades de *tkm* son las precisadas para realizar el análisis de transporte que amerita el caso.

### **c) Proceso 3: Preparación de la mezcla**

Una vez que las materias primas requeridas llegan a la planta de producción del concreto, se procede con el proceso de mezcla. Luego, con el objeto de estimar los inventarios relacionados al consumo de energía, se seleccionó el siguiente equipo: mezcladora de dos ejes horizontales modelo JS500 del fabricante HAMAC, cuyas especificaciones técnicas se encuentran adjuntas en el Anexo 1.

A partir de las especificaciones técnicas de la mezcladora, se obtuvo tanto el valor de su potencia, como el tiempo de operación. Por un lado, la potencia total del equipo se estimó como la sumatoria de las potencias asociadas al motor y la bomba de mezclado, lo cual ascendió a 25.1 kW. De otro lado, el tiempo de operación fue estimado a partir del rendimiento del equipo, equivalente a 25 m<sup>3</sup>/h, y el volumen de concreto real a producir (14.56 m<sup>3</sup>), resultando ello en 0.6 h. Finalmente, se determinó el consumo de energía eléctrica para el proceso, de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 18.

**Tabla 18**

*Consumo de energía eléctrica para el proceso de preparación de la mezcla de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto*

<b>Consumo energético del equipo de mezcla</b>					
Rendimiento del equipo (m <sup>3</sup> /h)	del	Volumen de concreto (m <sup>3</sup> )	Tiempo de operación (h)	Potencia del equipo (kW)	Energía eléctrica (kWh)
25		14.56	0.6	25.1	<b>15.1</b>

Ahora, al ser esta energía proveniente del SEIN, las emisiones asociadas al consumo de energía eléctrica fueron determinadas empleando el Factor de Emisión de la Red Eléctrica Peruana, equivalente a 0.52144 tonCO<sub>2</sub>/MWh. El proceso se detalla en la Tabla 19.

**Tabla 19**

*Emisiones asociadas al proceso de preparación de la mezcla de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto*

<b>Energía eléctrica (kWh)</b>	<b>Factor de emisión SEIN 2017 (gCO<sub>2eq</sub>/kWh)</b>	<b>Emisiones (gCO<sub>2eq</sub>)</b>
15.1	521.44	7873.75

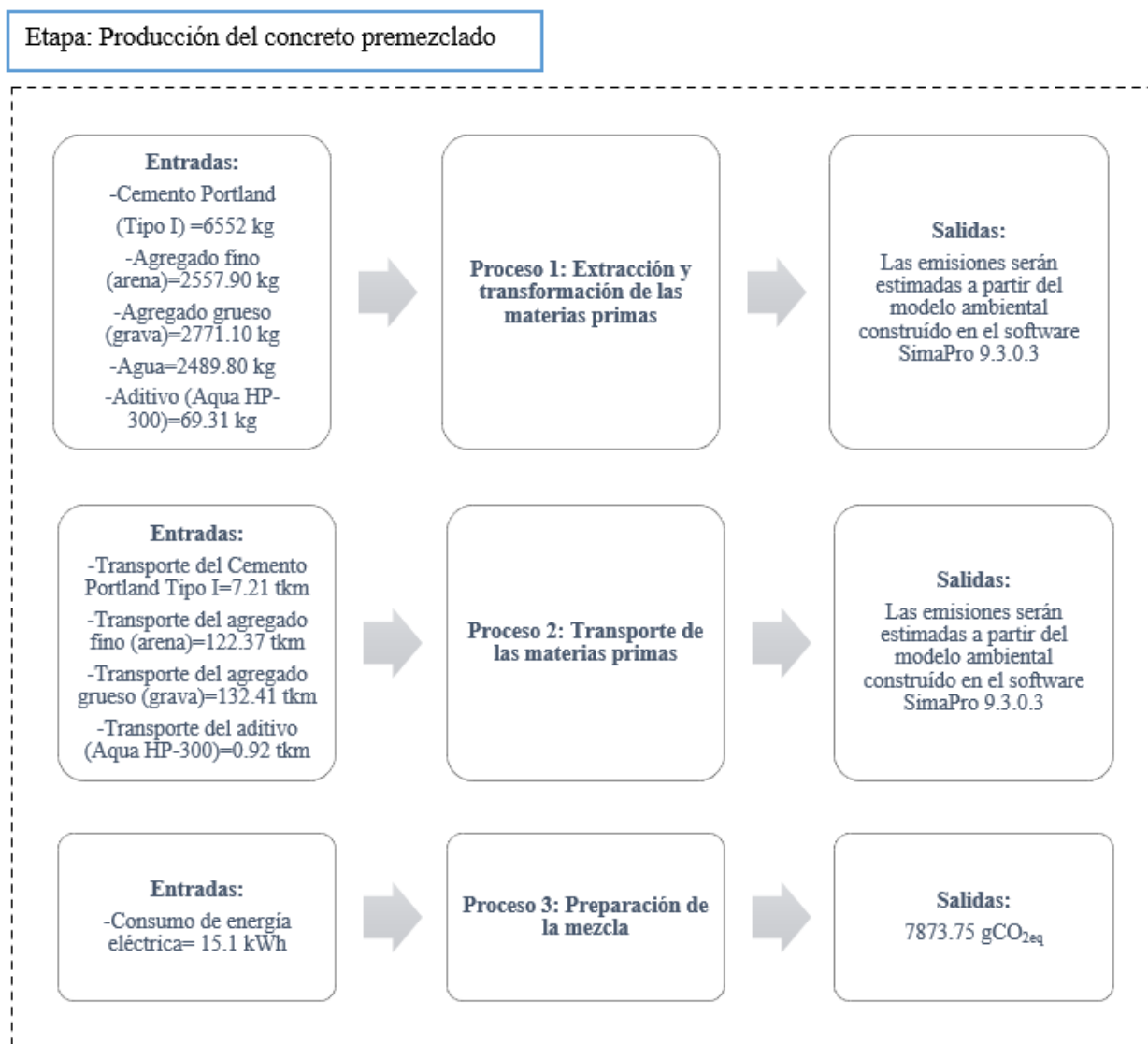
Nota. Considerar un factor de conversión de 10<sup>3</sup> para pasar de tonCO<sub>2</sub>/MWh a gCO<sub>2eq</sub>/MWh.

## d) Esquema del ICV

Para estructurar el ICV de la etapa analizada, considerando que el análisis de cada proceso se hizo con base en la unidad funcional, se construyó el esquema mostrado en la Figura 17.

**Figura 17**

*Esquema del ICV para la producción de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto premezclado*



### 3.2.2.2. Etapa II: Producción del acero

#### a) Proceso 1: Encofrado metálico

Las entradas asociadas al proceso de habilitación del encofrado metálico corresponden al consumo de acero en peso, que se precisa para fabricar el encofrado metálico del componente prefabricado. En ese contexto, la cantidad de material requerido se determinó como el producto entre el área lateral del prefabricado, su espesor y el peso específico del acero. Cabe precisar que el área lateral se obtuvo a partir del modelo construido en el software Revit 2021, mientras que para el espesor se asumió un valor de 0.1 m. El proceso de cálculo de muestra con mayor detalle en la Tabla 20.

**Tabla 20**

*Peso de acero estimado para el encofrado metálico del componente prefabricado*

Área de encofrado (m <sup>2</sup> )	Espesor del molde (m)	Peso específico del acero (kg/m <sup>3</sup> )	Peso de acero (kg)
92	0.1	7860	72312

Una vez estimado el peso del acero requerido para el encofrado, se procedió a calcular las salidas asociadas al material a partir de los resultados obtenidos por Lawson (1996), en su publicación “Perfil medioambiental del acero”. Esta última muestra las emisiones de GEI asociadas a la producción de 1 kg de acero virgen, tal y como se presenta en la Tabla 21.

**Tabla 21**

*Emisiones asociadas a la producción de 1kg de acero virgen*

GEI	Emisiones (g)
CO <sub>2</sub>	1950
CH <sub>4</sub>	0.626
N <sub>2</sub> O	3

*Nota.* Tabla tomada de “el perfil medioambiental del acero” Lawson (1996)

Los encofrados empleados en la industria de prefabricados son de material metálico, puesto que se requiere que estos sean resistentes, herméticos y durables. En particular, la durabilidad de estos hace que puedan ser empleados hasta 300 veces a lo largo de vida útil (Urbina, 2001). Por tanto, para la estimación de las emisiones que corresponden únicamente a un ciclo de manufactura en planta, se empleó un factor de reducción por número de usos, equivalente a 1/300. En la Tabla 22 se muestran las salidas asociadas a ello para la producción de 1 kg de acero virgen.

**Tabla 22**

*Emisiones asociadas a la producción de 1kg de acero virgen para 1 ciclo productivo en planta*

GEI	Factor de reducción	Emisiones (g)
CO <sub>2</sub>		6.5
CH <sub>4</sub>	1/300	0.0021
N <sub>2</sub> O		0.01

*Nota.* Tabla adaptada de “el perfil medioambiental del acero” Lawson (1996)

Finalmente, en la Tabla 23 se presentan las emisiones asociadas al proceso, para el peso real de acero requerido por el encofrado metálico.

**Tabla 23**

*Emisiones asociadas a la producción del encofrado metálico del componente prefabricado, para un ciclo de manufactura*

GEI	Emisiones estimadas para un ciclo de manufactura (g)	Peso del acero (kg)	Emisiones (g)
CO <sub>2</sub>	6.5		470028
CH <sub>4</sub>	0.0021	72312	151.86
N <sub>2</sub> O	0.01		723.12

### b) Proceso 2: Varillas de refuerzo

Respecto a la estructuración del inventario de este proceso, se consideró como entrada la cantidad de acero de refuerzo requerido para prefabricar el componente, que equivale a 3931.7 kg. Mientras que para las salidas, como se observa en la Tabla 23, se emplearon los resultados obtenidos por Lawson (1996) para estimar las emisiones de GEI asociadas a la producción del peso de acero de la referencia.

**Tabla 24**

*Emisiones asociadas a la habilitación de 3931.7 kg de acero de refuerzo*

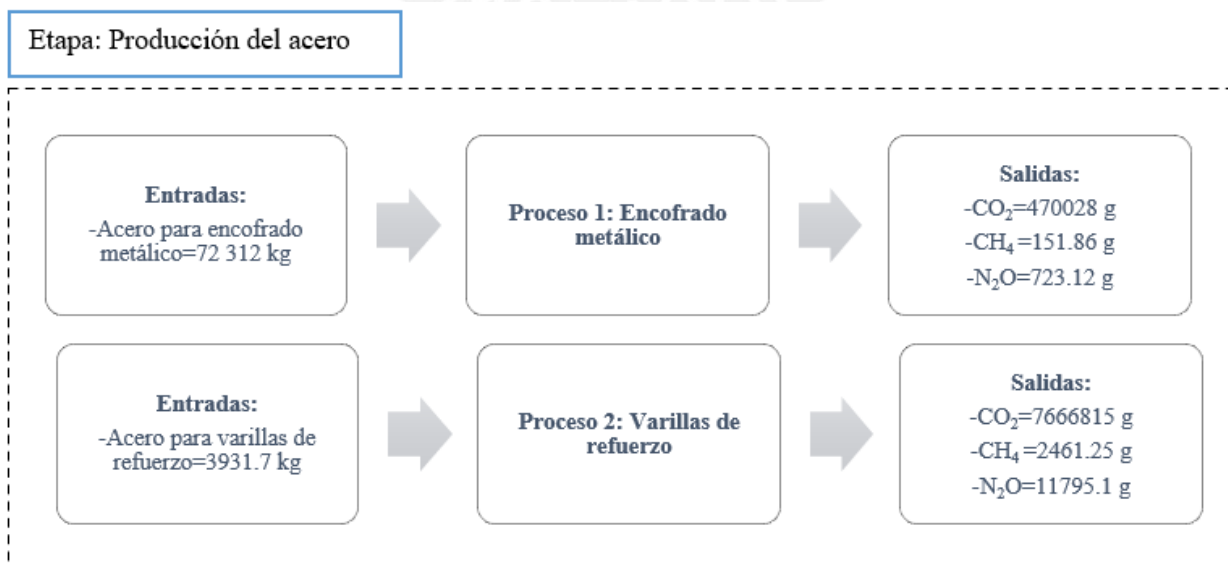
GEI	Peso de acero (kg)	Emisiones para 1 kg de acero virgen (g)	Emisiones (g)
CO <sub>2</sub>		1950	7666815
CH <sub>4</sub>	3931.7	0.626	2461.25
N <sub>2</sub> O		3	11795.1

### c) Esquema del ICV

Para estructurar el ICV de la etapa analizada, considerando que el análisis de cada proceso se hizo con base en la unidad funcional, se construyó el esquema mostrado en la Figura 18.

**Figura 18**

*Esquema del ICV para la producción de una columna prefabricada*



### 3.2.2.3. Etapa III: Transporte del concreto premezclado

#### a) Proceso 1: Transporte desde la planta de concreto hacia la planta de prefabricados

Una vez preparado el concreto premezclado, este debe ser descargado hacia un camión *mixer*, el cual sirve como vehículo de transporte terrestre desde la planta de concreto hacia la planta de prefabricados. No obstante, de acuerdo con Cárdenas (2021), es común que una planta de prefabricados tenga su propia unidad de producción de concreto, para así garantizar un suministro constante y eficiente. En ese sentido, para la elaboración del ICV se consideró una distancia de traslado mínima, equivalente a 5 km por cada tramo. Asimismo, se seleccionó como vehículo de transporte un camión *mixer* del fabricante HAMAC, que cuenta con de 8 m<sup>3</sup> de capacidad y opera a combustible diésel. Sus especificaciones técnicas completas se encuentran adjuntas en el Anexo 2.

Con base en las especificaciones técnicas del camión *mixer*, se obtuvo que la potencia del motor equivale a 215 kW y la velocidad máxima de transporte es de 85 km/h. Luego, considerando que la capacidad máxima del *mixer* es de 8 m<sup>3</sup> y la demanda real de concreto es de 14.56 m<sup>3</sup>, se determinó que se precisaba realizar 2 viajes, es decir, 4 tramos de 5 km cada uno. Finalmente, asumiendo una velocidad media de 40 km/h, que resulta más conveniente al ser tramos cortos, el consumo de combustible se determinó de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 25.

**Tabla 25**

*Consumo de diésel para el transporte de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto premezclado*

Distancia total recorrida (km)	Tiempo de viaje (h)	Consumo de energía térmica (kWh)	Consumo de diésel (MJ)
20	0.5	107.5	386.9

*Nota.* Se aplicó un factor de conversión 3.6 para pasar de las unidades kWh a MJ, en lo que respecta a la estimación del consumo de combustible diésel.



Una vez cuantificado el consumo de diésel en unidades de energía, fue posible estimar las emisiones para cada GEI seleccionado, aplicando la metodología de nivel jerárquico 2 para el CO<sub>2</sub> y 1 para el N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>. Al respecto, en la Tabla 26 se muestra con mayor detalle el proceso de cálculo.

**Tabla 26**

*Emisiones asociadas al proceso de transporte de la mezcla de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto hacia la planta de prefabricados*

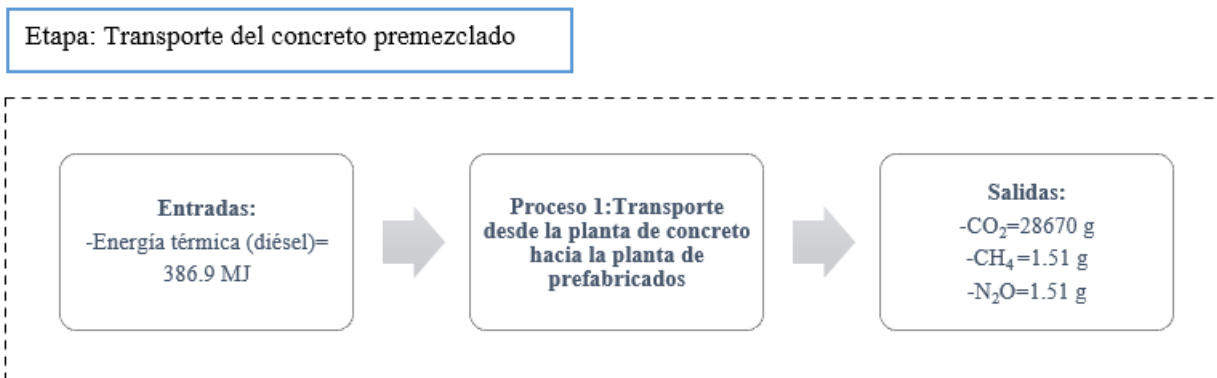
GEI	Nivel jerárquico	Factor de emisión por país (kg/TJ)	Consumo de diésel (MJ)	Emisiones (g)
CO <sub>2</sub>	2	74100	386.9	28670
CH <sub>4</sub>	1	3.9	386.9	1.51
N <sub>2</sub> O	1	3.9	386.9	1.51

#### b) Esquema del ICV

Considerando que el análisis realizado para el proceso se hizo con base en el transporte de la demanda real de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto, las entradas y salidas determinadas son las que se exponen en el esquema del ICV mostrado en la Figura 19.

**Figura 19**

*Esquema del ICV para el transporte de 14.56 m<sup>3</sup> de concreto premezclado*



### 3.2.2.4. Etapa IV: Manufactura del componente prefabricado

#### a) Proceso 1: Aplicación del desmoldante sobre el encofrado metálico

Un desmoldante es una sustancia química que tiene por finalidad posibilitar el proceso seguro de extracción del componente prefabricado, a partir del encofrado metálico. Ahora bien, se inició con la estructuración del inventario, a partir de la selección de un agente desmoldante y un equipo de aplicación para el mismo. Es así que se seleccionó el desmoldante Finishcrete 50 del fabricante SOQUIMIC, y una mochila pulverizadora a gasolina, del fabricante PANTHER. En ambos casos, sus especificaciones técnicas se encuentran adjuntas en los Anexos 3 y 4, respectivamente.

Se tienen 2 entradas asociadas a este proceso: la cantidad de desmoldante requerido para cubrir la superficie interior del encofrado metálico y la cantidad de gasolina requerida para pulverizar el contenido total de desmoldante. En el primer caso, se conoce a partir de las especificaciones técnicas del desmoldante, que el rendimiento de aplicación es de 40 m<sup>2</sup> de superficie por cada 1 L de producto. Por tanto, para la superficie real del componente prefabricado, se obtuvo lo mostrado en la Tabla 27.

**Tabla 27**

*Volumen de desmoldante requerido para cubrir la superficie interior de 92 m<sup>2</sup> del componente prefabricado*

Rendimiento de aplicación (L/m <sup>2</sup> )	Superficie interior del encofrado metálico (m <sup>2</sup> )	Volumen de desmoldante metálico (L)
1/40	92	2.3

*Nota.* La superficie interior del encofrado se extrajo a partir del modelo generado para el componente prefabricado, en el software Revit 2021.

De otro lado, para determinar la cantidad de gasolina requerida para la aplicación del desmoldante, se consideró, a partir de las especificaciones técnicas de la mochila pulverizadora, que la potencia del equipo equivale a 1.1 HP, y se asumió un tiempo de operación de 0.5 h. Luego, el consumo de gasolina en unidades de energía, se estimó de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 28.

**Tabla 28**

*Consumo de gasolina para la aplicación del desmoldante sobre una superficie de 92 m<sup>2</sup>*

Potencia de la mochila pulverizadora (HP)	Tiempo de operación (h)	Consumo de gasolina (MJ)
1.1	0.5	1.476

Nota. Se consideraron para el cálculo unos factores de conversión de 0.7457 de HP a kW, y de 3.6 de kWh a MJ.

En cuanto a las emisiones asociadas al proceso, se evaluó tanto el aporte del desmoldante consumido, como la gasolina empleada para pulverizarlo. En la Tabla 29 se detallan las emisiones asociadas al proceso de aplicación del desmoldante.

**Tabla 29**

*Emisiones asociadas al proceso de aplicación de desmoldante sobre una superficie de 92 m<sup>2</sup>*

GEI	Nivel jerárquico	Factor de emisión por país (kg/TJ)	Consumo de gasolina (MJ)	Emisiones (g)
CO <sub>2</sub>	2	69300	1.476	102.3
CH <sub>4</sub>	1	33	1.476	0.05
N <sub>2</sub> O	1	3.2	1.476	0.005

### b) Proceso 2: Vibrado manual del concreto

Para estructurar el inventario asociado a este proceso, se inició seleccionando un vibrador portátil con motor eléctrico del fabricante AMYECO, cuyas especificaciones técnicas se encuentran adjuntas en el Anexo 5. La selección del equipo se realizó tomando en cuenta su ligereza, rendimiento de vibrado y diámetro de cabezal, puesto que estas características influyen en la calidad de vibrado, sobre todo para áreas altamente congestionadas por acero de refuerzo. Además, condicionan también la rapidez con la que se ejecuta la actividad, optimizando así los tiempos y consumos de energía, parámetros especialmente importantes al vibrarse volúmenes de concreto significativos. La ligereza del equipo, de otro lado, simplifica la manipulación del mismo por el técnico encargado de la tarea.

A partir de las especificaciones técnicas del vibrador manual, fue posible estimar la energía consumida por el equipo, toda vez que esta última está condicionada por su rendimiento (15 m<sup>3</sup>/h), el tiempo de vibrado estimado y la potencia del motor (3HP). En la Tabla 30 se muestra el detalle del cálculo realizado.

**Tabla 30**

*Consumo de energía eléctrica del vibrador manual para vibrar un volumen de concreto de 14.56 m<sup>3</sup>*

Rendimiento (m <sup>3</sup> /h)	Volumen de concreto a vibrar (m <sup>3</sup> )	Tiempo de vibrado estimado (h)	Potencia del motor (HP)	Consumo de energía eléctrica (kWh)
15	14.56	0.97	3	2.17

Nota. Se consideraron para el cálculo unos factores de conversión de 0.7457 de HP a kW.

Ahora, al ser esta energía proveniente del SEIN, las emisiones asociadas al consumo de energía eléctrica fueron determinadas empleando el Factor de Emisión de la Red Eléctrica Peruana, equivalente a 0.52144 tonCO<sub>2</sub>/MWh. El proceso se detalla en la Tabla 31.

**Tabla 31**

*Emisiones asociadas al proceso de vibrado manual de un volumen de concreto de 14.56 m<sup>3</sup>*

<b>Energía eléctrica (kWh)</b>	<b>Factor de emisión SEIN 2017 (gCO<sub>2eq</sub>/kWh)</b>	<b>Emisiones (gCO<sub>2eq</sub>)</b>
2.17	521.44	1131.53

*Nota.* Considerar un factor de conversión de 103 para pasar de tonCO<sub>2</sub>/MWh a gCO<sub>2eq</sub>/MWh.

### c) Proceso 3: Vibrado externo del concreto

El vibrado externo es un proceso que complementa al vibrado manual, y tiende a ser una práctica frecuente en la industria de prefabricados. En general, tiene una finalidad muy similar a la del vibrado manual, con la diferencia de que no se precisa de un operario que ejecute la tarea, sino que esta se ejecuta automáticamente, una vez que los equipos se instalan en las paredes laterales del encofrado. En ese contexto, se seleccionó el vibrador externo a motor eléctrico Serie AR34 del fabricante WACKER NEUSON, cuyas especificaciones técnicas se encuentran adjuntas en el Anexo 6.

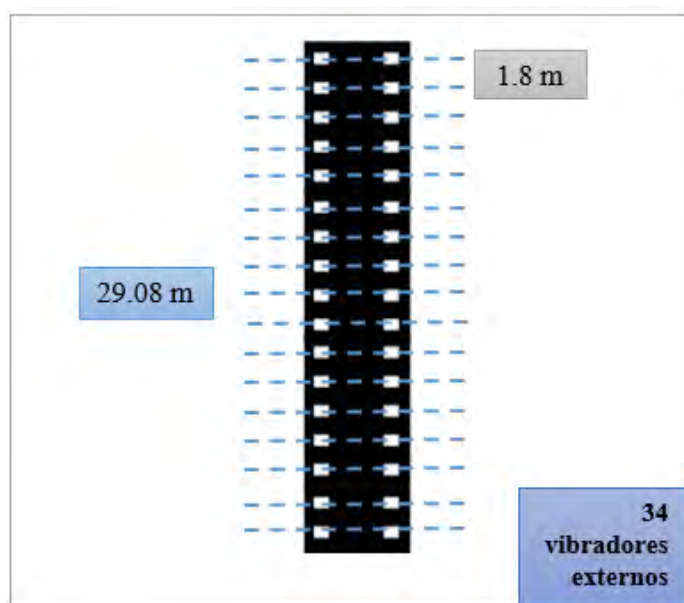
A partir de las especificaciones técnicas del equipo, fue posible estimar el consumo de energía de todo el conjunto de vibradores externos. En primer lugar, se estableció que la potencia del motor eléctrico equivalía a 0.4 kW; luego, para estimar el tiempo de vibrado, se optó por asumir 5 minutos por cada capa de concreto fresco vaciada en el encofrado. Posterior a ello, para una altura máxima de capa de 50cm, la ejecución del vibrado externo se determinó en 2 etapas, es decir, la acción de vibrado se activó durante 10 minutos por cada equipo. Con ello, fue posible estimar el consumo de energía eléctrica por vibrador, el cual asciende a 0.067 kWh.

Una vez calculado el consumo de energía eléctrica por equipo, se procedió con la estimación del número de vibradores externos que se precisan para todo el componente

prefabricado. Ahora bien, de acuerdo con el fabricante WACKER NEUSON, se debe considerar una separación máxima de 1.80m entre vibradores, además, estos deben instalarse en ambos extremos del encofrado. En ese contexto, al tratarse de una columna prefabricada de 29.08 m, se determinó que se precisaría de 34 vibradores externos, tal y como se aprecia en el esquema de la Figura 20.

**Figura 20**

*Esquema para la cuantificación del número de vibradores externos para una columna prefabricada de 29.01 m de altura*



Una vez que se determinó el consumo de energía unitario y el número de equipos de vibrado requeridos, se calculó el consumo de energía eléctrica total, de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 32.

**Tabla 32**

*Consumo de energía eléctrica durante el proceso de vibrado externo para la columna prefabricada de 29.1 m de altura*

Número de vibradores externos	Consumo de energía eléctrica unitario (kWh)	Consumo de energía eléctrica global (kWh)
34	0.067	2.28

Ahora, al ser esta energía proveniente del SEIN, las emisiones asociadas al consumo de energía eléctrica fueron determinadas empleando el Factor de Emisión de la Red Eléctrica Peruana, equivalente a 0.52144 tonCO<sub>2</sub>/MWh. El proceso se detalla en la Tabla 33.

**Tabla 33**

*Emisiones asociadas al proceso de vibrado externo de una columna prefabricada de 29.1 m de altura*

<b>Energía eléctrica (kWh)</b>	<b>Factor de emisión SEIN 2017 (gCO<sub>2eq</sub>/kWh)</b>	<b>Emisiones (gCO<sub>2eq</sub>)</b>
2.28	521.44	1188.88

Nota. Considerar un factor de conversión de 10<sup>3</sup> para pasar de tonCO<sub>2</sub>/MWh a gCO<sub>2eq</sub>/MWh.

#### **d) Proceso 4: Curado a vapor del concreto**

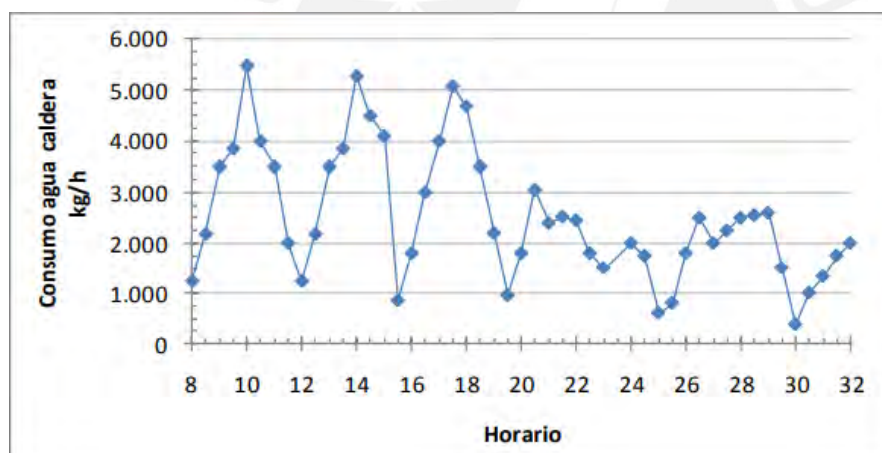
La estructuración de los inventarios para este proceso estuvo fundamentalmente condicionada por el método y el equipo de curado seleccionados. Por un lado, los métodos más frecuentes son los siguientes: por vía húmeda y a vapor. Ahora, si bien para un componente prefabricado se puede optar por cualquiera de ellos, se decidió finalmente por el curado a vapor, pese a que este implica un consumo de energía mayor. Las razones para su selección residen en que este último permite optimizar los tiempos de desencofrado en planta, y con ello, agilizar la producción en serie: producir más en menos tiempo. De acuerdo con Cárdenas (2021), el proceso de curado a vapor inicia cubriendo al componente con lonas gruesas de alta resistencia térmica por un tiempo estimado de 1 hora, el cual suele ser suficiente para inhibir el fraguado inicial del concreto. Después, se procede con la aplicación de vapor mediante el accionamiento del equipo de curado por un lapso aproximado de 6 horas. Finalmente, se apaga la caldera y se espera 1 hora adicional para que la temperatura del habitáculo donde se curó al prefabricado descienda progresivamente. De otro lado, para este estudio se optó por elegir una caldera a gas natural modelo

AB del fabricante SERVITEC, cuyas especificaciones técnicas se encuentran adjuntas en el Anexo 7.

La estructuración de las entradas se hizo con base en los consumos requeridos para la operación de la caldera: gas natural, energía eléctrica y recurso hídrico. De acuerdo con el Programa de Estudios e Investigaciones en Energía (2010), el consumo del recurso hídrico consumido por una caldera, se puede estimar como un equivalente a su producción de vapor en una determinada unidad de tiempo. En ese contexto, en la Figura 21 se muestra el rango de consumo hídrico habitual para una caldera a gas, según la cantidad horaria de vapor producido.

**Figura 21**

*Perfil de consumo del recurso hídrico de una caldera a gas natural*



*Nota.* Imagen tomada del Programa de Estudios e Investigaciones en Energía (2010)

A partir de la Figura 21, se evidenció que el consumo de agua asciende a 50 L por cada hora de funcionamiento de la caldera; entonces, al requerirse de 6 horas de operación continua, se determinó que el consumo total del recurso hídrico equivale a 300 L. Por otro lado, el consumo energético de este proceso se estimó a partir de la cantidad de gas natural consumido por la caldera y la energía eléctrica precisada por la bomba de inyección de agua.



En el primer caso, la cantidad de gas natural combustionado se calculó mediante el parámetro de consumo propio de la caldera, que equivale a 3.5 m<sup>3</sup>/h; luego, al precisarse de 6 horas de operación continua, el consumo total de gas natural se estimó en 21 m<sup>3</sup>. En la Tabla 34 se presenta el detalle del cálculo realizado, junto con la transformación a unidades de energía mediante el empleo del VCN del combustible.

**Tabla 34**

*Consumo de gas natural para el curado a vapor de la columna prefabricada*

Consumo de gas natural de la caldera a vapor (m <sup>3</sup> /h)	Tiempo de curado (h)	Consumo de gas natural (m <sup>3</sup> )	VCN del gas natural (TJ/Gg)	Consumo de gas natural (MJ)
3.5	6	21	48	749.35

Nota. Considerar para la conversión de unidades que la densidad del gas natural equivale a 0.0007434 g/cm<sup>3</sup> y que el VCN por defecto del gas natural equivale a 48 TJ/Gg. Fuentes: División de Distribución y Comercialización Gerencia de Fiscalización de Gas Natural OSINERGMIN y GL 2006 - Capítulo 1: Introducción, pág. 1.19, cuadro 1.2, respectivamente.

A partir de la estimación del consumo de gas natural en unidades de energía, se procedió con el cálculo de las emisiones asociadas al combustible empleado en el proceso. En relación con ello, en la Tabla 35 se detalla la metodología seguida.

**Tabla 35**

*Emisiones asociadas al consumo de gas natural para el curado a vapor de la columna prefabricada*

GEI	Consumo de gas natural (MJ)	Factor de emisión del gas natural (kg/TJ)	Emisiones (g)
CO <sub>2</sub>	749.35	56206	42117.97
CH <sub>4</sub>	749.35	1	0.75
N <sub>2</sub> O	749.35	0.1	0.08

Nota. Considerar un factor de conversión de 10<sup>6</sup> para pasar de TJ a MJ, y de 10<sup>3</sup> para pasar de kg a g.

De otro lado, la energía eléctrica requerida por la bomba de inyección de agua, se determinó mediante el valor de la potencia que figura en las especificaciones técnicas, igual a 33.7 kW, y el tiempo de curado total. Al respecto de ello, en la Tabla 36 se detalla el proceso de cálculo realizado.

**Tabla 36**

*Energía eléctrica consumida por la bomba de inyección para el curado a vapor de la columna prefabricada*

Potencia de la bomba de inyección (kW)	Tiempo de curado (h)	Consumo de energía eléctrica (kWh)
33.7	6	202.2

Ahora, al ser esta energía proveniente del SEIN, las emisiones asociadas al consumo de energía eléctrica fueron determinadas empleando el Factor de Emisión de la Red Eléctrica Peruana, equivalente a 0.52144 tonCO<sub>2</sub>/MWh. El proceso se detalla en la Tabla 37.

**Tabla 37**

*Emisiones asociadas a la inyección de agua para el curado a vapor de la columna prefabricada*

Energía eléctrica (kWh)	Factor de emisión SEIN 2017 (gCO <sub>2eq</sub> /kWh)	Emisiones (gCO <sub>2eq</sub> )
202.2	521.44	105435.17

*Nota.* Considerar un factor de conversión de 10<sup>3</sup> para pasar de tonCO<sub>2</sub>/MWh a gCO<sub>2eq</sub>/MWh.

#### e) Proceso 5: Desencofrado y extracción del componente prefabricado

De acuerdo con Cárdenas (2021), el proceso de extracción del prefabricado a partir de su encofrado metálico, requiere de equipos auxiliares de motores eléctricos, tales como portales grúas, que suelen instalarse a lo largo del área de producción en una planta de prefabricados. Ahora bien, considerando que estos pueden tener capacidades de carga desde 5 hasta 50 t, y que el peso

de la columna prefabricada se estimó en 40.33 t, se seleccionó las especificaciones de una grúa pórtico cuyo motor fuese capaz de levantar y desplazar la carga mínima requerida a una velocidad constante. De acuerdo con Collado (2010) para un puente grúa diseñado con una capacidad de carga de 5 t, se debe contar con un motor de potencia equivalente o superior a 8kW y un reductor de 11 kW de potencia transmisible. Entonces, considerando el peso real de la columna prefabricada y un tiempo de maniobra aproximado de 0.25 h, se realizó el cálculo del consumo energético, tal y como se detalla en la Tabla 38.

**Tabla 38**

*Energía eléctrica consumida por el puente grúa para desencofrar y extraer la columna prefabricada*

Potencia total requerida para una carga de 5 t (kW)	Potencia total requerida para una carga de 41 t (kW)	Tiempo de maniobra (h)	Consumo de energía eléctrica (kWh)
19	155.8	0.25	38.95

Ahora, al ser esta energía proveniente del SEIN, las emisiones asociadas al consumo de energía eléctrica fueron determinadas empleando el Factor de Emisión de la Red Eléctrica Peruana, equivalente a 0.52144 tonCO<sub>2</sub>/MWh. El proceso se detalla en la Tabla 39.

**Tabla 39**

*Emisiones asociadas al proceso de desencofrado y extracción de la columna prefabricada*

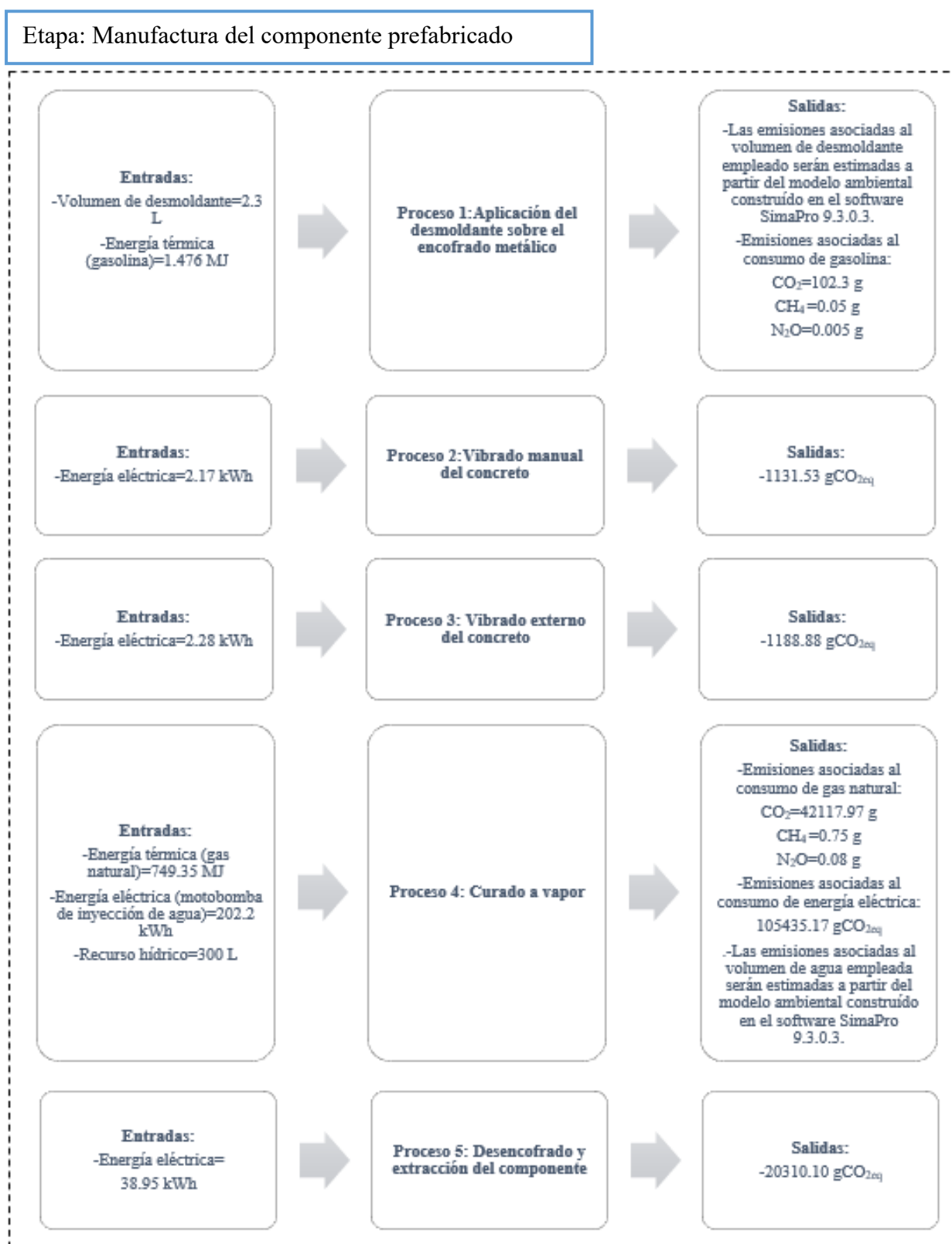
Energía eléctrica (kWh)	Factor de emisión SEIN 2017 (gCO <sub>2eq</sub> /kWh)	Emisiones (gCO <sub>2eq</sub> )
38.95	521.44	20310.10

*Nota.* Considerar un factor de conversión de 10<sup>3</sup> para pasar de tonCO<sub>2</sub>/MWh a gCO<sub>2eq</sub>/MWh.

#### f) Esquema del ICV

**Figura 22**

*Esquema del ICV para la manufactura de una columna prefabricada de concreto*



### **3.2.3. Evaluación del AICV**

Para el presente caso de estudio se optó por seleccionar los métodos de evaluación de impactos del IPCC 2021 GWP 100<sup>a</sup> y ReCiPe EndPoint (H).

#### **3.2.3.1. IPCC 2021 GWP 100<sup>a</sup>**

Este método se focaliza en determinar la contribución de un determinado producto o servicio al PCG, para un horizonte temporal de 100 años. De acuerdo con Dong et al. (2014) el PCG es una de las categorías de impacto ambiental más relevantes en el sector construcción.

#### **3.2.3.2. ReCiPe EndPoint (H)**

ReCiPe es otro método de evaluación de impactos ambientales para el ACV. En cuanto respecta al enfoque de puntos finales, este se seleccionó para poder evaluar el nivel de daño con base en las áreas de salud humana, ecosistemas y recursos. De otro lado, se eligió el arquetipo de jerarquía (H), que suele ser el que se selecciona por defecto, para obtener una perspectiva equilibrada, que sea capaz de integrar ciertas consideraciones del arquetipo individualista (I) e igualitario (E). El primero de ellos, prioriza los impactos a corto plazo, mientras que el segundo considera más una perspectiva de largo plazo (Dong & Ng, 2014).

## Capítulo IV: Resultados

Como fue descrito en el acápite antecedente, el AICV se llevó a cabo mediante el empleo de los siguientes métodos estándares de evaluación de impactos: IPCC 2021 GWP 100<sup>a</sup> y ReCiPe EndPoint (H).

### 4.1. Análisis de resultados: IPCC 2021 GWP 100<sup>a</sup>

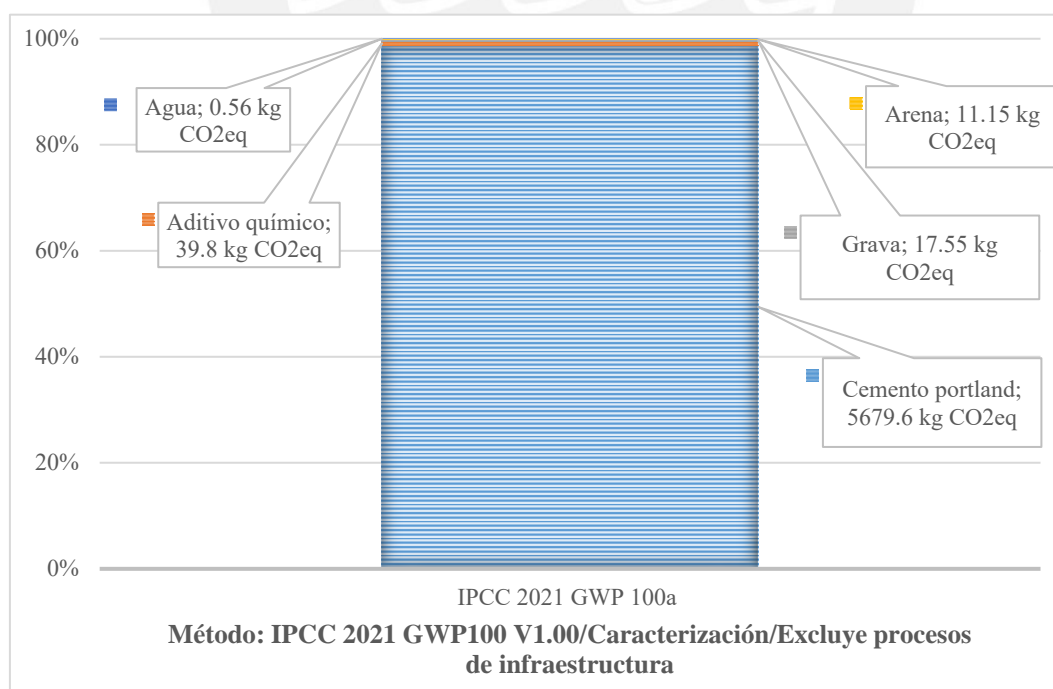
#### 4.1.1. Etapa I: Producción del concreto premezclado

##### a) Proceso 1: Extracción y transformación de las materias primas

En la Figura 23, se muestra la contribución de cada entrada al PCG. Los resultados indican que el cemento portland es el material más relevante, pues aporta con el 5679.60 kgCO<sub>2</sub>eq (98.80%).

#### Figura 23

Contribución de las entradas al PCG del proceso de extracción y transformación de materias primas

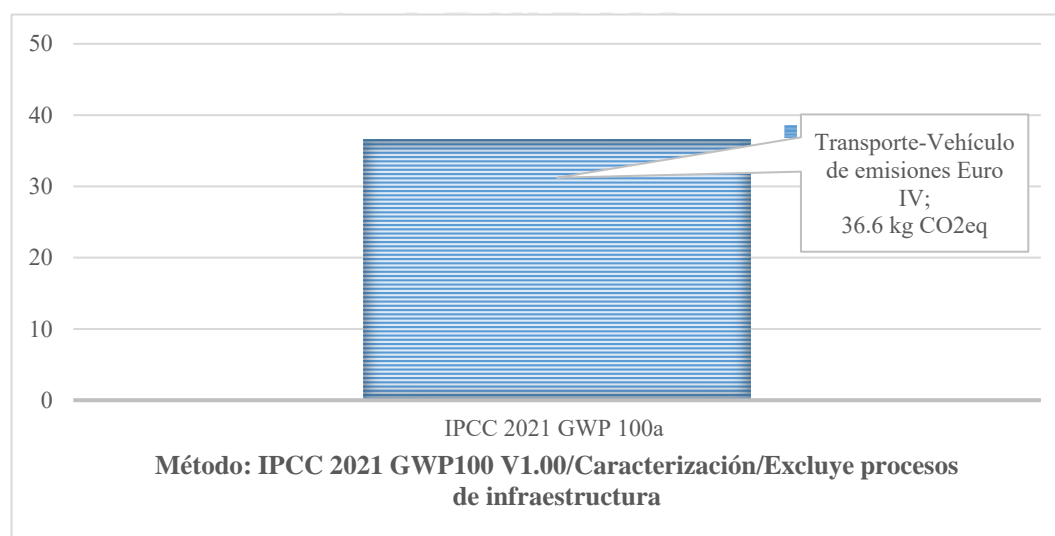


### b) Proceso 2: Transporte de las materias primas

Como se observa en la Figura 24, la única entrada considerada para este proceso fue la del transporte de las materias primas que componen la mezcla de concreto. Por tanto, el suministro de estas desde su centro de distribución hacia la planta de concreto, contribuye con el 100% al PCG asociado al proceso.

**Figura 24**

*Contribución de las entradas al PCG del proceso de transporte de las materias primas*

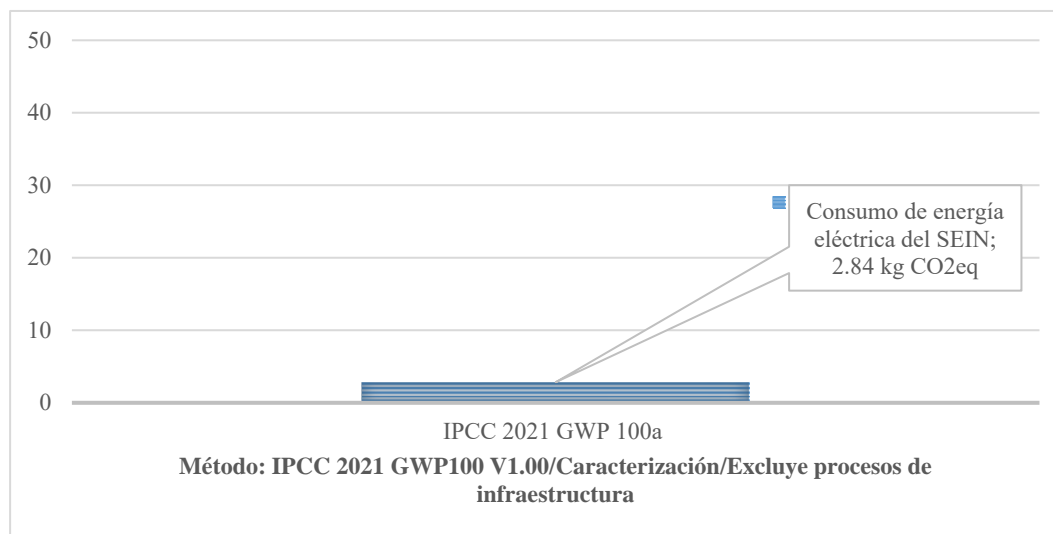


### c) Proceso 3: Preparación de la mezcla

Para este proceso, la única entrada considerada fue la de consumo de energía eléctrica. Por tanto, el suministro directo de esta desde la red del SEIN hacia el equipo de mezclado, contribuye con el 100% al PCG asociado al proceso. Asimismo, como se evidencia en la Figura 25, sus emisiones ascienden a 2.84 kg CO<sub>2</sub>eq.

**Figura 25**

*Contribución de las entradas al PCG del proceso de preparación de la mezcla*

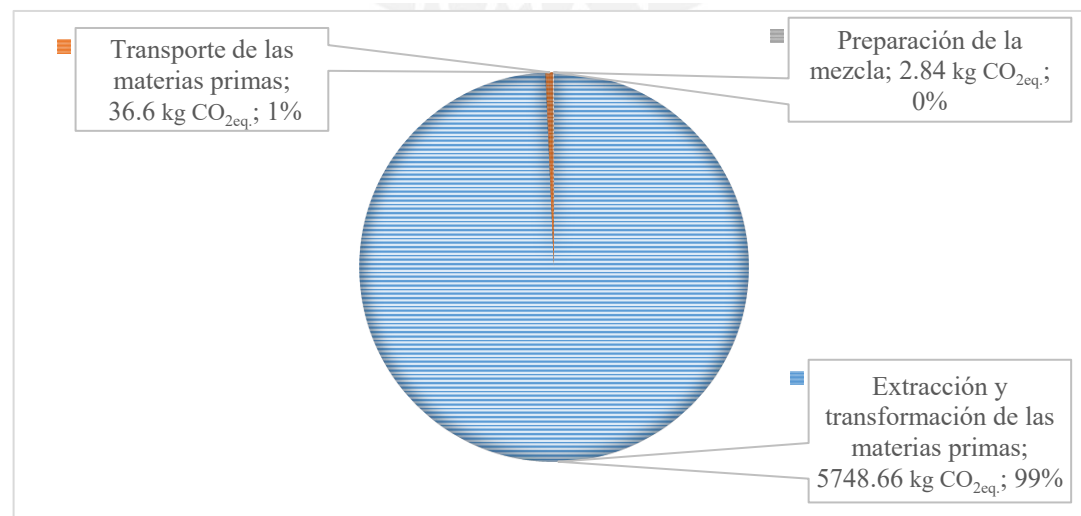


#### d) Consolidado por procesos

En la Figura 26 se expone la contribución de cada proceso al PCG asociado a la etapa de producción del concreto premezclado. Se evidencia que el proceso de extracción y transformación de materias primas es el que mayor impacto tiene sobre la fase analizada.

**Figura 26**

*Contribución al PCG por proceso que conforma la etapa de producción del concreto premezclado*



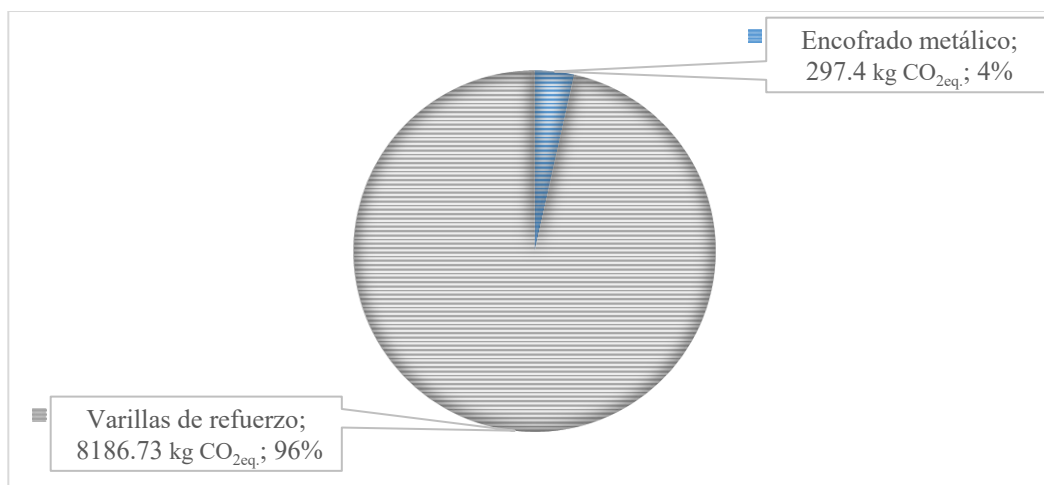


Posteriormente, se realizó un procedimiento análogo para obtener los resultados de las etapas remanentes del LCA. Estos se presentan en los incisos mostrados líneas abajo.

#### 4.1.2. Etapa II: Producción del acero

**Figura 27**

*Contribución al PCG por proceso que conforma la etapa de producción del acero*

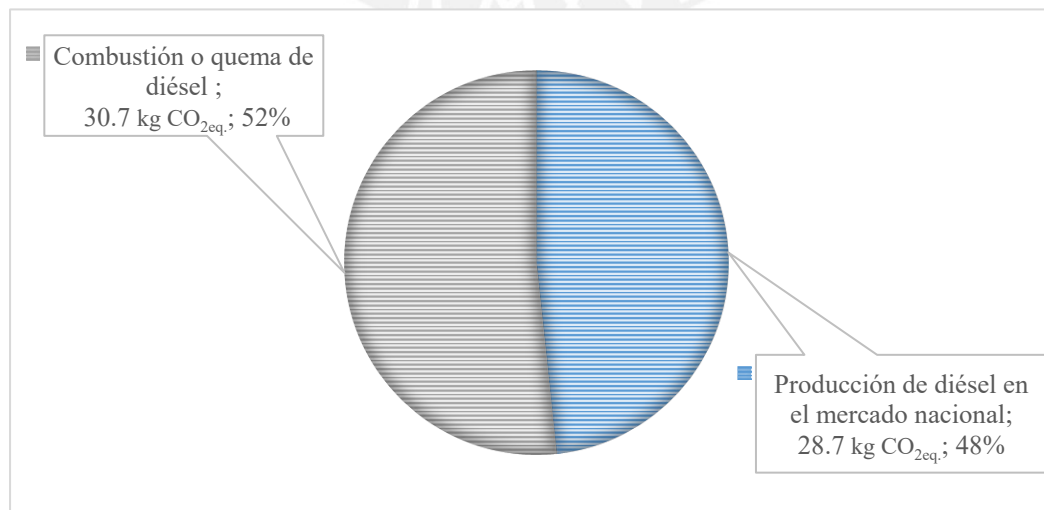


*Nota.* Considerar que las emisiones obtenidas en SimaPro para el proceso de manufactura del encofrado metálico, fueron multiplicadas por el factor de reducción por número de usos (1/300).

#### 4.1.3. Etapa III: Transporte del concreto premezclado

**Figura 28**

*Contribución al PCG por cada proceso que conforma la etapa de transporte del concreto premezclado a la planta de prefabricados*

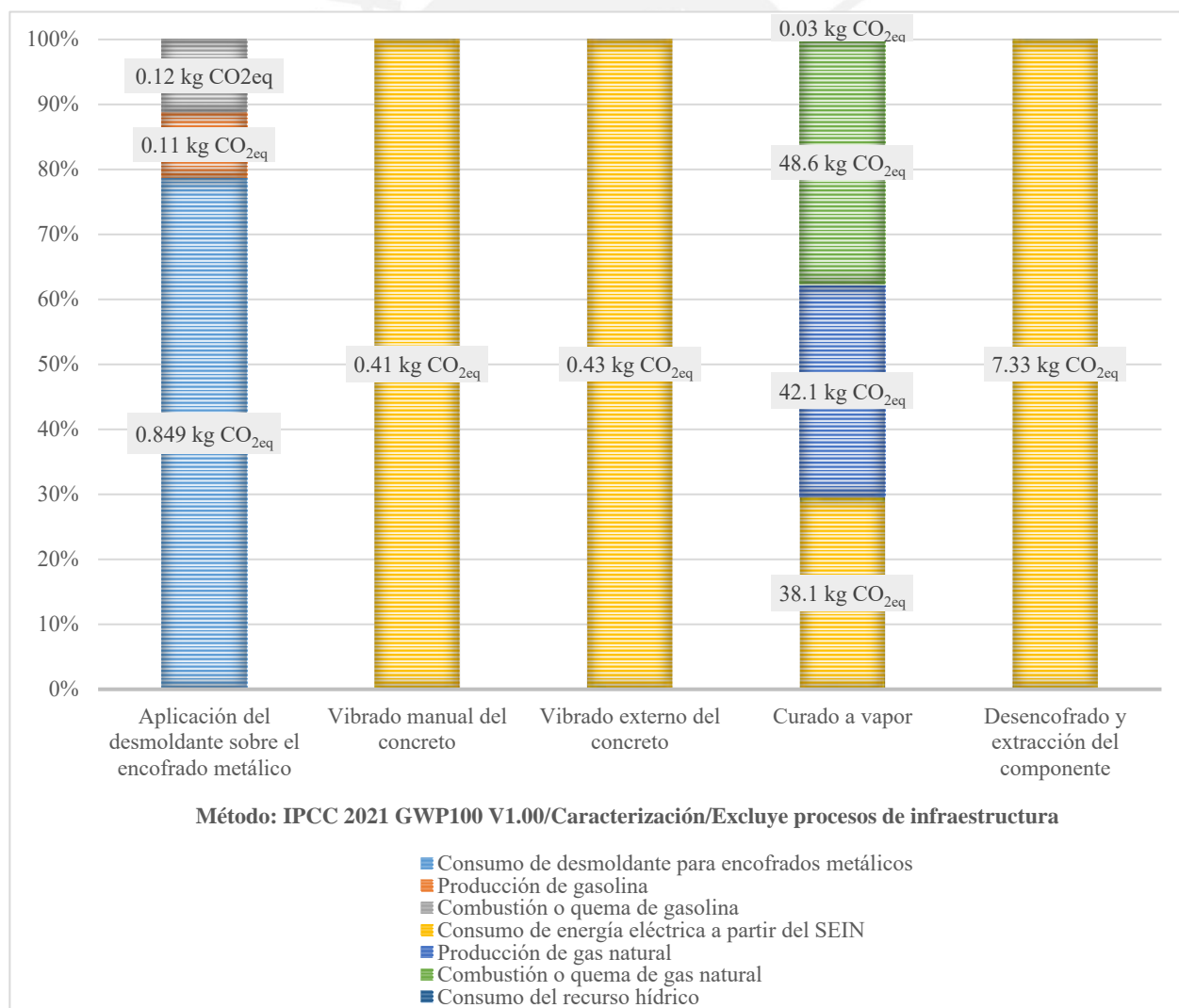


#### 4.1.4. Etapa IV: Manufactura del componente prefabricado

La Figura 29 muestra a detalle la contribución de las entradas al PCG de cada uno de los procesos que componen la etapa de manufactura del componente prefabricado. Se observa que para el proceso de aplicación del desmoldante sobre el encofrado metálico, la producción del desmoldante en sí mismo contribuye con el 79.1% (0.849 kg CO<sub>2eq</sub>). De otro lado, para el proceso de curado a vapor, la combustión del gas natural contribuye con el 37.7% (48.6 kg CO<sub>2eq</sub>).

**Figura 29**

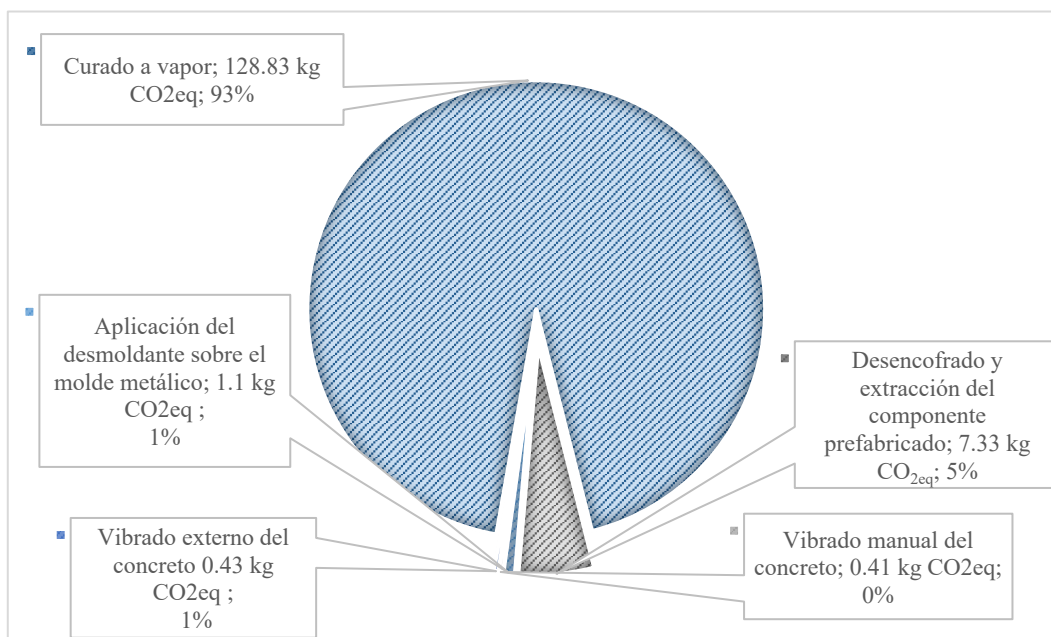
*Contribución al PCG de cada entrada que conforma los procesos de la etapa de manufactura del componente prefabricado*



Con el objetivo de contrastar cuantitativamente la contribución al PCG de cada proceso respecto a la fase evaluada, se construyó la Figura 30. En esta se evidencia que el proceso que mayor impacto tiene sobre la fase es indiscutiblemente el curado a vapor del componente prefabricado, ya que contribuye con el 93% (128.93 kg CO<sub>2eq</sub>).

### Figura 30

*Contribución al PCG de cada proceso que conforma la etapa de manufactura del componente prefabricado*

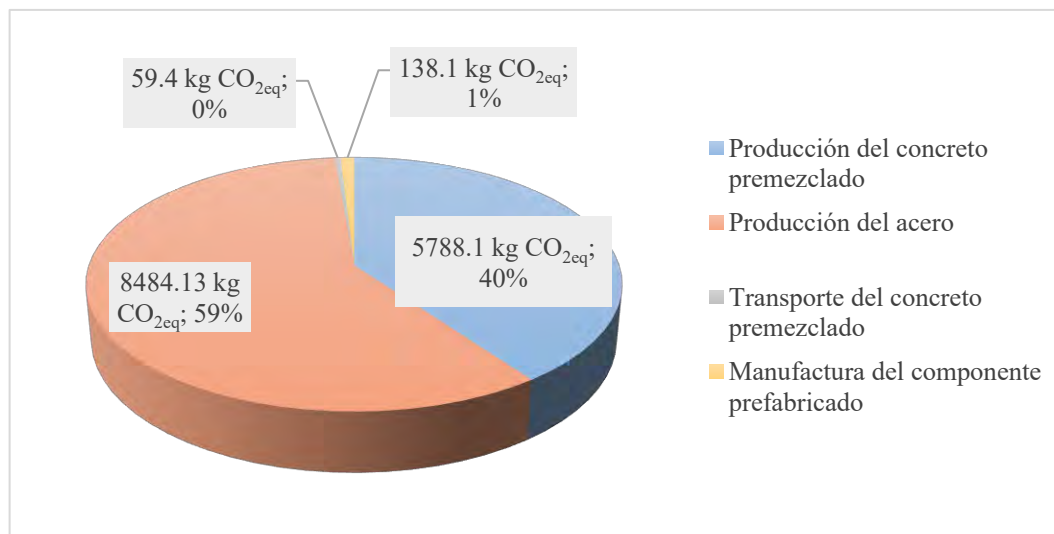


#### 4.1.5. Consolidado por etapas

Finalmente, en la Figura 31 se expone la contribución al PCG de cada una de las etapas delimitadas para el LCA del caso de estudio. Es claro que las etapas de producción del concreto y acero son las que mayor impacto tienen sobre el PCG total. En contraste, la influencia del transporte y las operaciones que se ejecutan dentro de la planta de prefabricación, son ínfimas.

**Figura 31**

*Contribución al PCG de cada etapa definida en el LCA del caso de estudio*



## 4.2. Análisis de resultados: ReCiPe EndPoint (H)

### 4.2.1. Etapa I: Producción del concreto premezclado

#### a) Proceso 1: Extracción y transformación de las materias primas

En la Tabla 40, se evidencia la contribución que posee cada una de las categorías de impacto enlistadas, sobre las categorías de daño principales: salud humana, ecosistemas y recursos. En el primer caso, el daño generado sobre la salud humana por los procesos extractivos y de transformación de materias primas, es atribuido principalmente al cambio climático (67.6%), y a la formación de material particulado (26.1%). En segundo lugar, el daño a los ecosistemas está influenciado en mayor medida por el calentamiento global (78.4%), que afecta principalmente a los ecosistemas terrestres. Mientras que el agotamiento de los recursos fósiles (95.3%) es el principal responsable del daño a los recursos.

**Tabla 40**

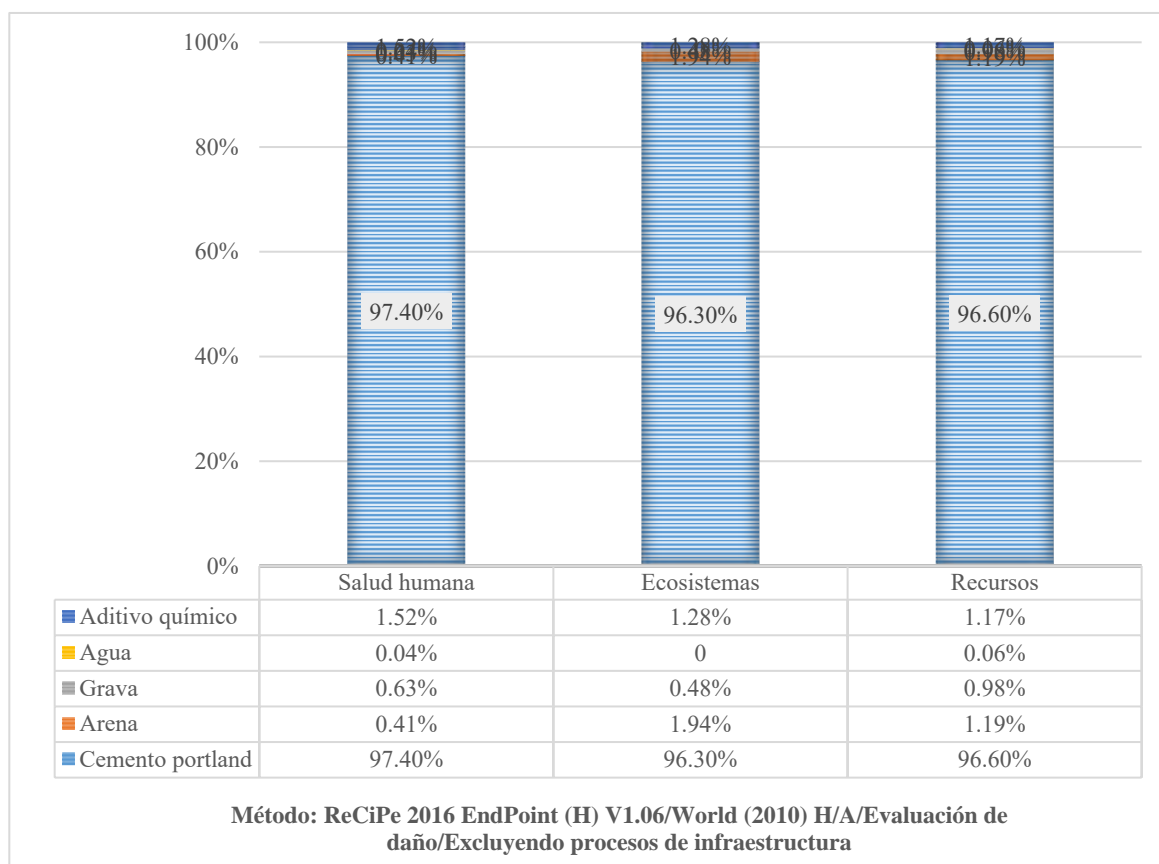
*Resultados del AICV para el proceso de extracción y transformación de materias primas, empleando un enfoque de puntos finales*

Categorías de daño	Categorías de impacto	Puntos finales	
		Caracterización	Evaluación del daño
Salud humana	Cambio climático, salud humana	0.0054 (67.6%)	0.0079 DALY
	Agotamiento de la capa de ozono	1.52E-07	
	Radiación ionizante	6.87E-08	
	Formación de ozono, salud humana	9.57E-06	
	Formación de material particulado	0.0021 (26.1%)	
	Toxicidad carcinogénica humana	0.0002	
	Toxicidad no carcinogénica humana	0.0003	
	Consumo de agua, salud humana	9.81E-06	
Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	1.62E-05 (78.4%)	2.06E-5 species. year
	Calentamiento global, ecosistemas acuáticos	4.41E-10	
	Formación de ozono, ecosistemas terrestres	1.37E-06	
	Acidificación terrestre	1.76E-06	
	Eutrofización de agua dulce	5.78E-07	
	Eutrofización marina	9.08E-11	
	Ecotoxicidad terrestre	3.47E-08	
	Ecotoxicidad de agua dulce	1.81E-08	
	Ecotoxicidad marina	3.94E-09	
	Uso de tierra	4.44E-07	
	Consumo de agua, ecosistemas terrestres	2.16E-07	
Consumo de agua, ecosistemas acuáticos	1.89E-10		
Recursos	Escasez de recursos minerales	6.35	135 USD 2013
	Escasez de recursos fósiles	128.63 (95.3%)	

En la Figura 32 se expone también la contribución de cada entrada material al proceso sobre cada una de las categorías de daño evaluadas. Es posible establecer que la producción del cemento portland es la actividad que mayor daño genera, tanto a la salud humana (97.4%) y ecosistemas (96.3%), como a los recursos (96.6%).

**Figura 32**

*Contribución de las entradas del proceso evaluado a las respectivas categorías de daño: salud humana, ecosistemas y recursos*



Posteriormente, se realizó un procedimiento análogo para obtener los resultados de los procesos remanentes; estos se presentan en los incisos mostrados líneas abajo. Cabe precisar que las categorías de impacto mostradas en las tablas, son las más representativas de cada área de daño; se indican los porcentajes de contribución respecto a la evaluación global del proceso.

### b) Proceso 2: Transporte de las materias primas

En la Tabla 41 se observa que el daño generado por el proceso de transporte de las materias primas sobre la salud humana, ecosistemas y recursos, es atribuido principalmente al cambio climático (54.4%), calentamiento global (96.3%) y escasez de recursos fósiles (100%), respectivamente.

**Tabla 41**

*Resultados del AICV para el proceso de transporte de las materias primas, empleando un enfoque de puntos finales*

Categorías de daño	Categorías de impacto	Puntos finales	
		Caracterización	Evaluación del daño
Salud humana	Cambio climático, salud humana	3.41E-05 (54.4%)	<b>6.16E-5 DALY</b>
	Formación de material particulado	2.44E-05 (39.6%)	
Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	1.03E-07 (96.3%)	<b>1.57E-7 species. year</b>
Recursos	Escasez de recursos minerales	0.0012	<b>5.38 USD 2013</b>
	Escasez de recursos fósiles	5.38 (100%)	

*Nota.* Se muestran los porcentajes de contribución de las categorías de impacto más relevantes sobre la evaluación del daño global.

### c) Proceso 3: Preparación de la mezcla

En la Tabla 42 se observa que el daño generado por el proceso de preparación de la mezcla sobre la salud humana, ecosistemas y recursos, es atribuido principalmente al cambio climático (78.85%), calentamiento global (62.31%) y escasez de recursos fósiles (100%), respectivamente. Cabe precisar que la única entrada considerada para este proceso fue el consumo de energía eléctrica del SEIN.

**Tabla 42**

*Resultados del AICV para el proceso de preparación de la mezcla, empleando un enfoque de puntos finales*

Categorías de daño	Categorías de impacto	Puntos finales	
		Caracterización	Evaluación del daño
Salud humana	Cambio climático, salud humana	2.68E-06 (78.9%)	<b>3.4E-6 DALY</b>
Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	8.1E-09 (62.3%)	
	Consumo de agua, ecosistemas terrestres	3.24E-09 (24.9%)	<b>1.3E-8 species. year</b>
Recursos	Escasez de recursos minerales	5.72E-06	
	Escasez de recursos fósiles	0.4 (100%)	<b>0.4 USD 2013</b>

*Nota.* Se muestran los porcentajes de contribución de las categorías de impacto más relevantes sobre la evaluación del daño global.

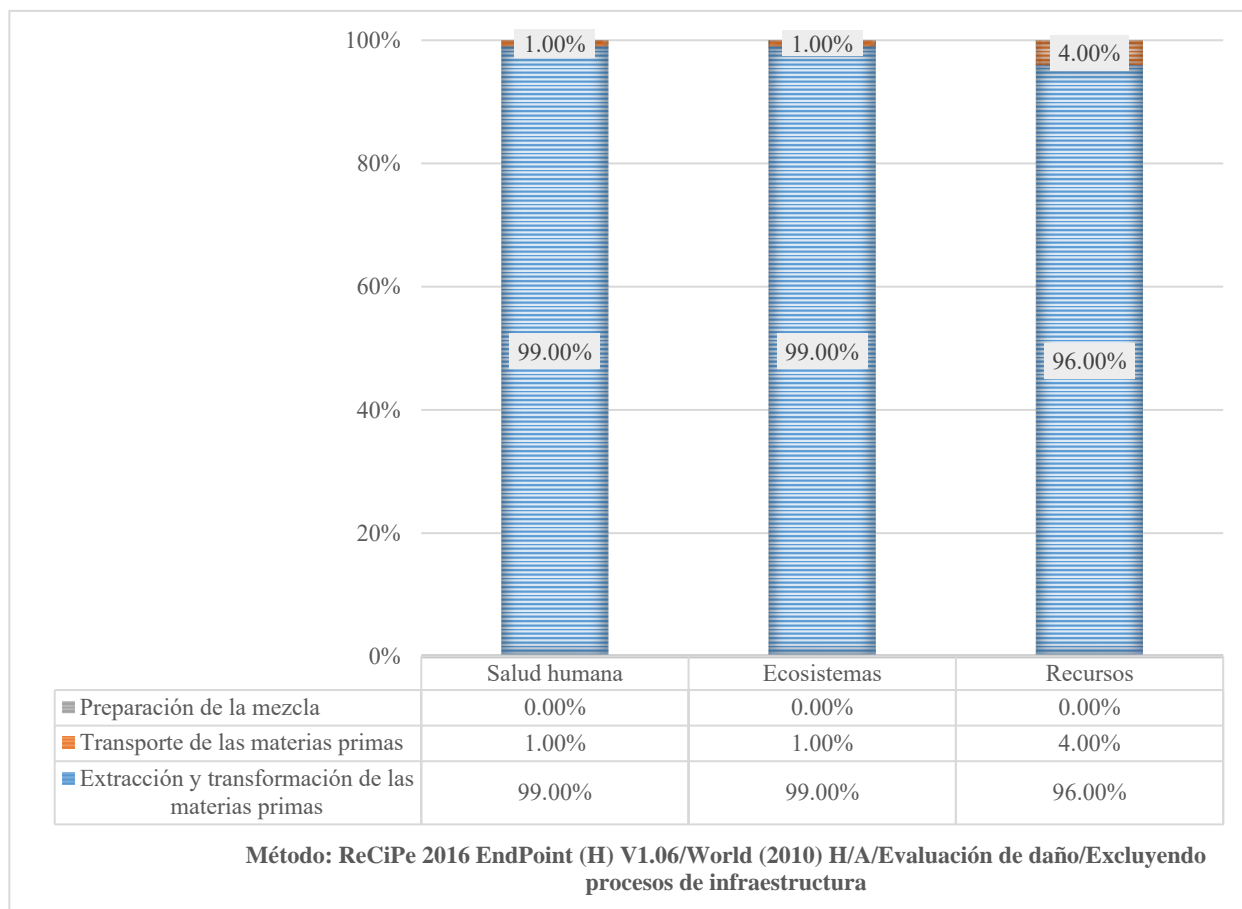
#### **d) Consolidado de procesos**

A partir de la data mostrada en la Figura 33, es posible establecer que el proceso de extracción y transformación de las materias primas es el que mayor impacto genera sobre las 3 categorías de daño evaluadas: salud humana (99%), ecosistemas (99%) y recursos (96%).



**Figura 33**

*Resultados del AICV para la etapa de producción del concreto premezclado, empleando un enfoque de puntos finales*



Posteriormente, se realizó un proceso análogo para obtener los resultados de las etapas remanentes del LCA. Estos se presentan en los incisos mostrados líneas abajo.

#### **4.2.2. Etapa II: Producción del acero**

Con base en la data mostrada en la Tabla 43 es posible aseverar que el daño generado por ambos procesos sobre la salud humana, ecosistemas y recursos, es atribuido principalmente a las categorías de toxicidad cancerígena humana, calentamiento global y escasez de recursos fósiles, respectivamente. Por otro lado, de la Figura 34, es posible establecer que el proceso de producción

de las varillas de refuerzo es el que mayor impacto genera sobre las 3 categorías de daño evaluadas: salud humana (97.9%), ecosistemas (96.16%) y recursos (95.8%).

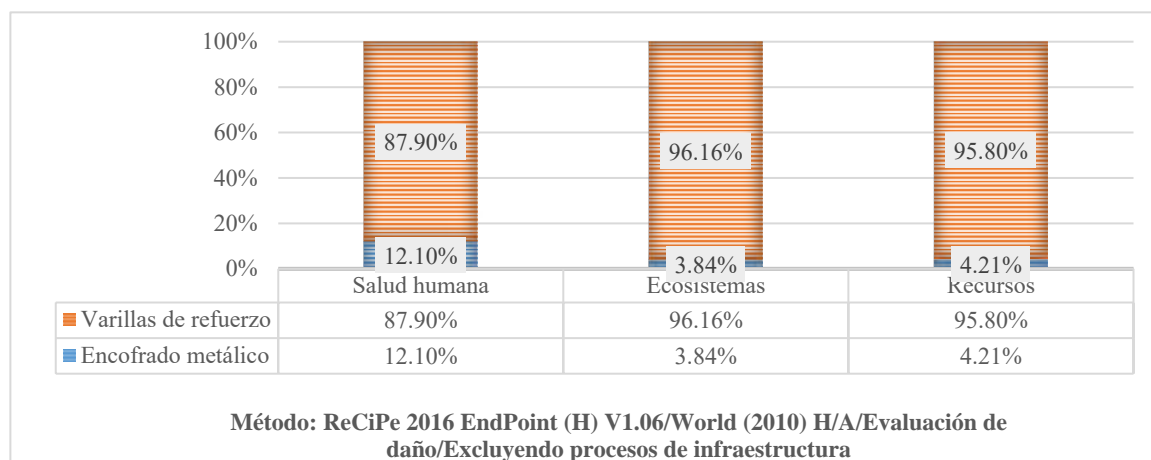
**Tabla 43**

*Resultados del AICV para la etapa de producción del acero, empleando un enfoque de puntos finales*

Procesos	Categorías de daño	Categorías de impacto	Puntos finales	
			Caracterización	Evaluación del daño
Encofrado metálico	Salud humana	Toxicidad cancerígena humana	0.005 (87.7%)	0.0057 DALY 1.41E-6 species. year
	Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	8.48E-7 (60.1%)	
	Recursos	Escasez de recursos minerales	1.2	16.9 USD 2013
		Escasez de recursos fósiles	15.7 (92.9%)	
Varillas de refuerzo	Salud humana	Toxicidad cancerígena humana	0.023 (55.3%)	0.0416 DALY 3.53E-5 species. year
	Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	2.335E-5 (66%)	
	Recursos	Escasez de recursos fósiles	314.3 (81.6%)	385 USD 2013
		Escasez de recursos minerales	70.7	

**Figura 34**

*Resultados del AICV para la etapa de producción del acero, empleando un enfoque de puntos finales*



### 4.2.3. Etapa III: Transporte del concreto premezclado

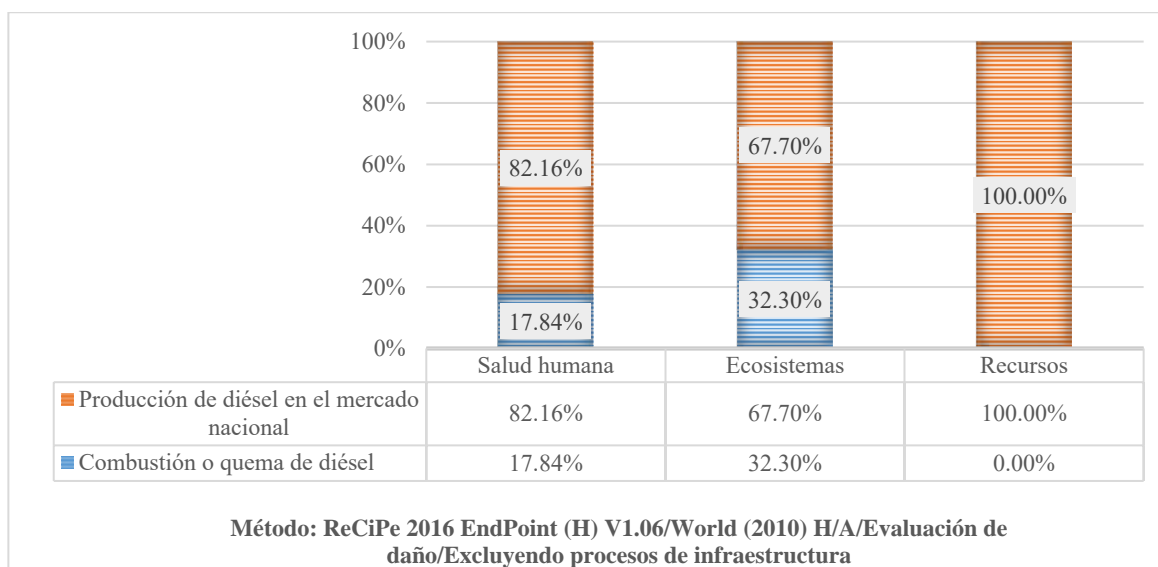
**Tabla 44**

Resultados del AICV para la etapa de transporte del concreto premezclado, empleando un enfoque de puntos finales

Procesos	Categorías de daño	Categorías de impacto	Puntos finales	
			Caracterización	Evaluación del daño
Combustión o quema de diésel	Salud humana	Calentamiento global, salud humana	2.67E-5 (100%)	2.67E-5 DALY 8.11E-8 species. year
	Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	8.04E-8 (99.1%)	
	Recursos	Escasez de recursos minerales	-	
			Escasez de recursos fósiles	-
Producción de diésel en el mercado nacional	Salud humana	Formación de material microparticulado	5.81E-5 (47.2%)	0.000123 DALY 1.7E-7 species. year
	Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	8.63E-8 (50.8%)	
	Recursos	Escasez de recursos fósiles	4.46 (100%)	4.46 USD 2013
		Escasez de recursos minerales	0.000492	

**Figura 35**

Resultados del AICV para la etapa de transporte del concreto premezclado, empleando un enfoque de puntos finales



#### 4.2.4. Etapa IV: Manufactura del componente prefabricado

**Tabla 45**

Resultados del AICV para la etapa de manufactura del componente prefabricado en planta, empleando un enfoque de puntos finales

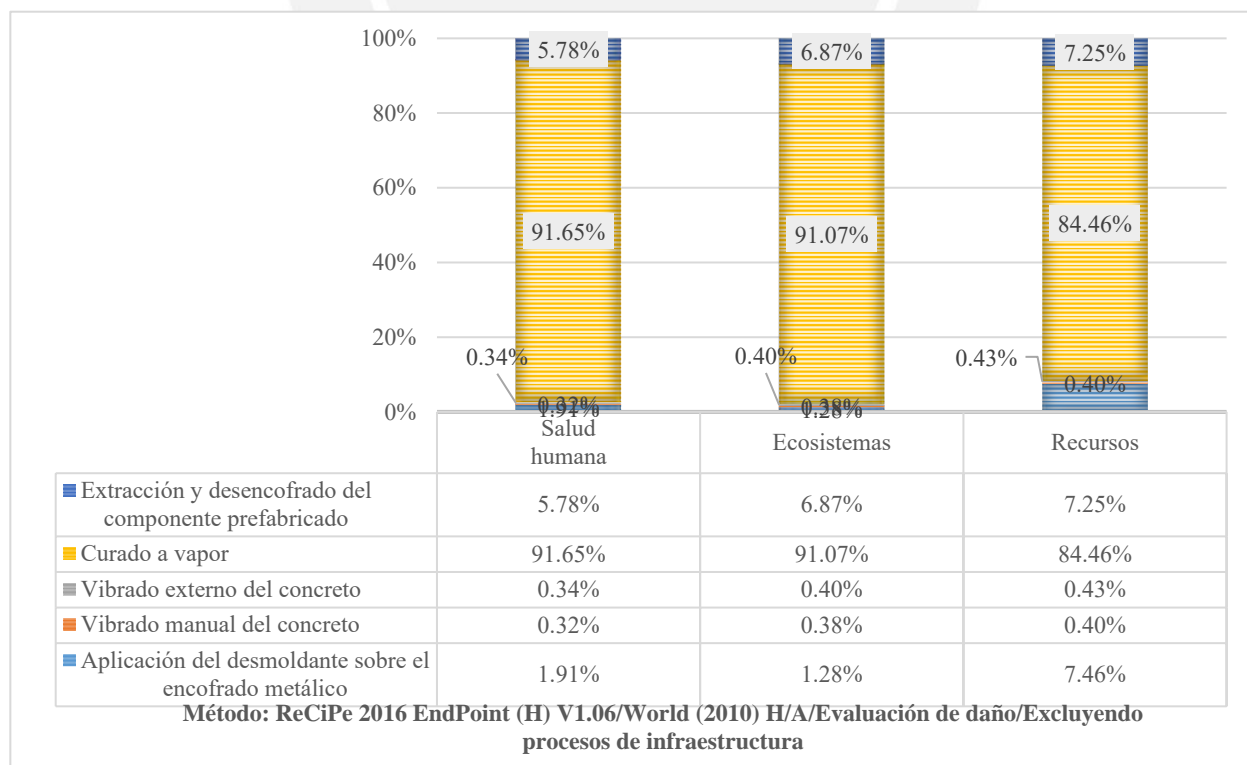
Procesos	Categorías de daño	Categorías de impacto	Puntos finales	
			Caracterización	Evaluación del daño
Aplicación del desmoldante sobre el encofrado metálico	Salud humana	Calentamiento global, salud humana	1.01E-6 (35%)	<b>2.89E-6 DALY</b>
	Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	3.05E-9 (49%)	
	Recursos	Escasez de recursos minerales	0.00014	<b>1.06 USD2013</b>
		Escasez de recursos fósiles	1.06 (100%)	
Vibrado manual del concreto	Salud humana	Calentamiento global, salud humana	3.85E-7 (78.7%)	<b>4.89E-7 DALY</b>
	Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	1.16E-9 (62.4%)	
	Recursos	Escasez de recursos fósiles	0.0575 (100%)	<b>0.0575 USD2013</b>
		Escasez de recursos minerales	8.22E-7	
Vibrado externo del concreto	Salud humana	Calentamiento global, salud humana	4.05E-7 (79%)	<b>5.13E-7 DALY</b>
	Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	1.22E-9 (62.3%)	
	Recursos	Escasez de recursos fósiles	0.0604 (100%)	<b>0.0604 USD 2013</b>
		Escasez de recursos minerales	8.63E-7	
Curado a vapor	Salud humana	Calentamiento global, salud humana	0.000121 (86.4%)	<b>0.00014 DALY</b>
	Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	3.65E-7 (82.4%)	
	Recursos	Escasez de recursos fósiles	12 (100%)	<b>12 USD 2013</b>
		Escasez de recursos minerales	0.000152	
Desencofrado y extracción del componente prefabricado	Salud humana	Formación de material microparticulado	6.91E-6 (78.8%)	<b>8.77E-6 DALY</b>
	Ecosistemas	Calentamiento global, ecosistemas terrestres	2.09E-8 (62.6%)	
	Recursos	Escasez de recursos fósiles	1.03 (100%)	<b>1.03 USD 2013</b>
		Escasez de recursos minerales	1.47E-5	

Con base en la Tabla 45, es posible establecer que todos los procesos de manufactura del componente prefabricado en planta, tienen en común las categorías de impacto que más inciden sobre las tres áreas de daño evaluadas. El calentamiento global es la categoría que más repercute sobre la salud humana y ecosistemas, mientras que la escasez de recursos fósiles es la que más afecta los recursos. Para cada proceso, se muestran los porcentajes asociados a la contribución a cada una de las referidas categorías.

Por otro lado, en la Figura 36 se observa que los procesos de curado a vapor y desencofrado y extracción del componente prefabricado son los de primer y segundo mayor impacto, respectivamente, sobre las categorías de daño evaluadas. En contraste, los procesos de vibrado del concreto, son los de menor significancia.

### Figura 36

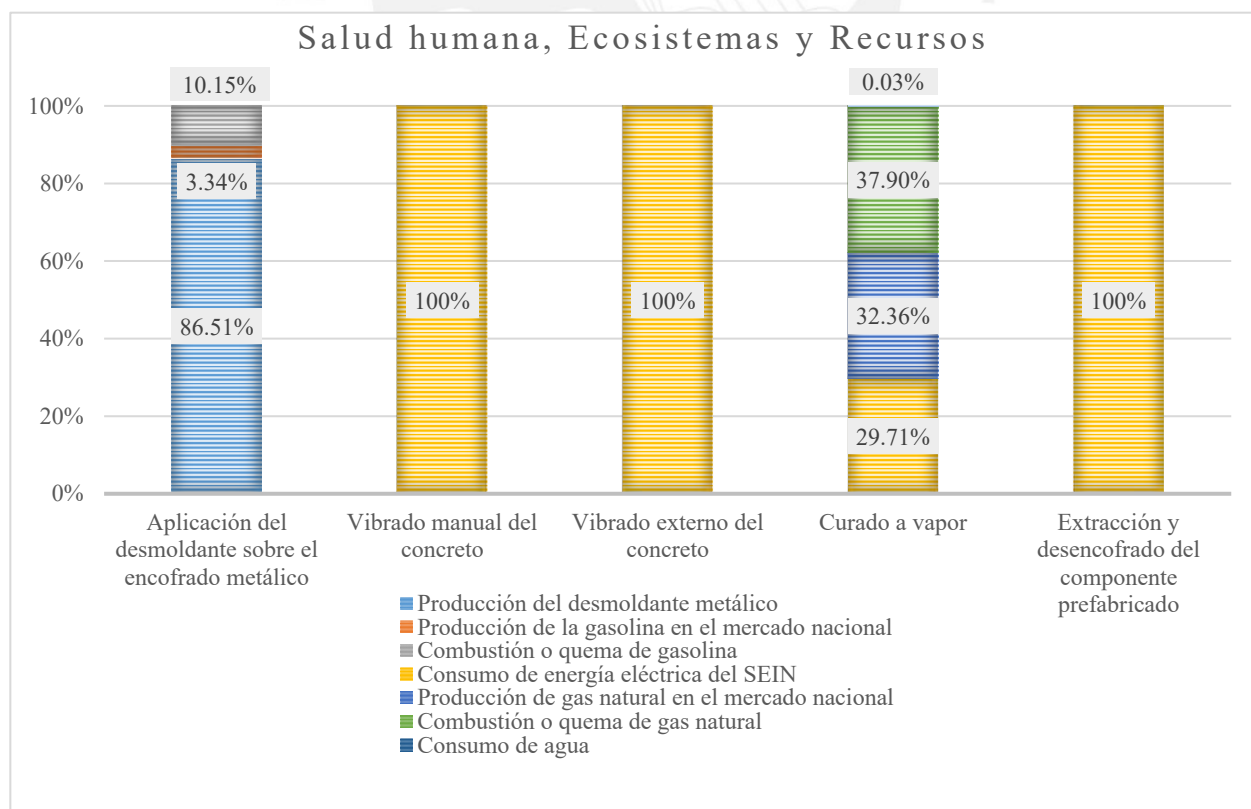
*Resultados del AICV para la etapa de manufactura del componente prefabricado, empleando un enfoque de puntos finales*



La Figura 37 se presenta con el propósito de mostrar las contribuciones de cada entrada a los procesos que componen la fase de manufactura del componente prefabricado en planta. En primer lugar, se evidencia que para el proceso de curado a vapor, la entrada de mayor influencia corresponde a la combustión de gas natural. De otro lado, la entrada que más impacta sobre la aplicación del desmoldante sobre el encofrado metálico y sus tres categorías de daño, es la producción del desmoldante en sí misma. En relación con ello, es importante precisar que la hoja de seguridad del producto, detalla que su descripción química corresponde a un hidrocarburo alifático, derivado del petróleo con una concentración al 80% de diésel N°2. Este dato fue empleado para seleccionar la entrada con mayor afinidad del inventario Ecoinvent.

**Figura 37**

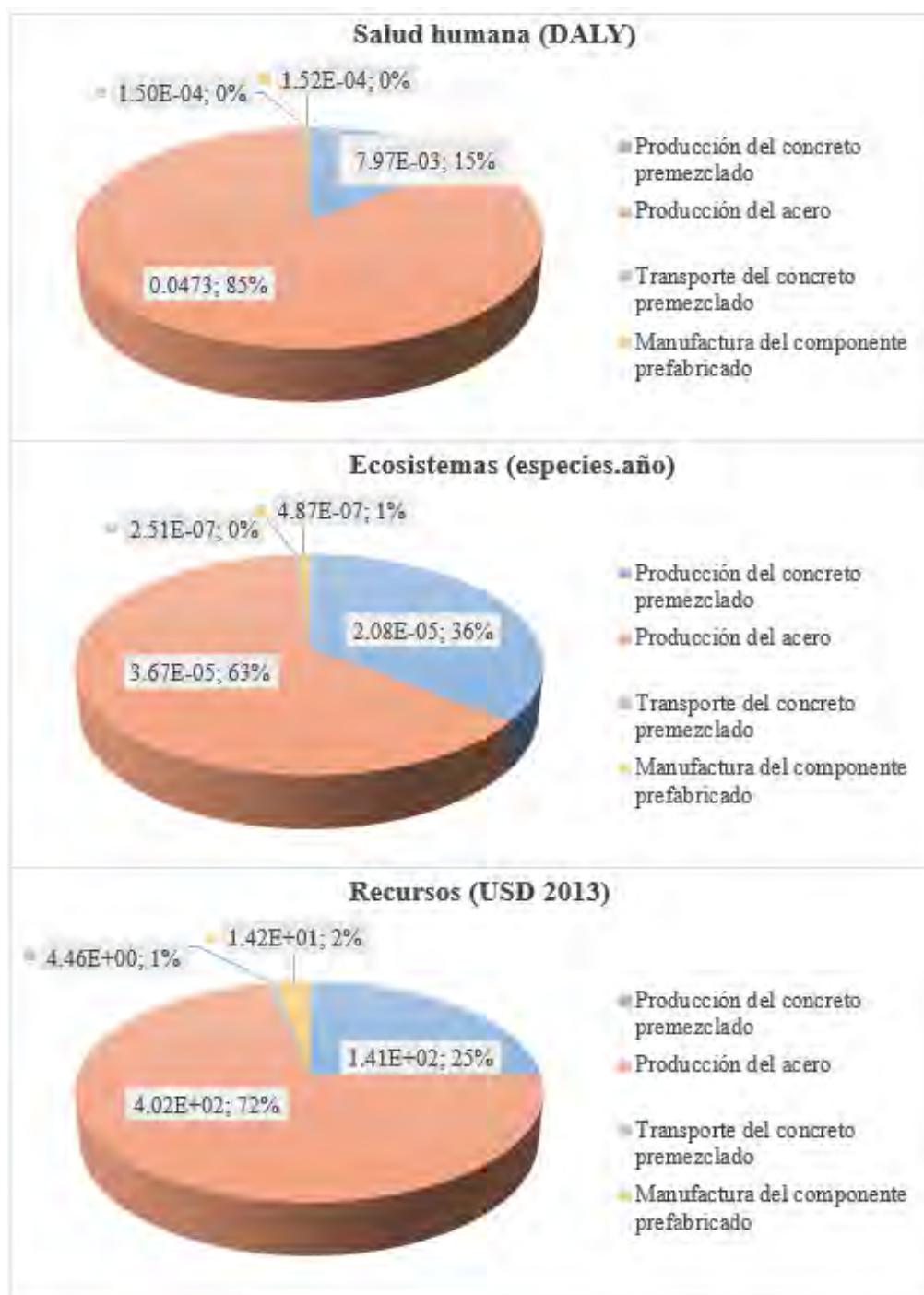
*Contribución de las entradas de la etapa evaluada a las respectivas categorías de daño: salud humana, ecosistemas y recursos*



#### 4.2.5. Consolidado por etapas

**Figura 38**

*Contribución al daño generado sobre la salud humana, ecosistemas y recursos por cada etapa definida en el ACV del caso de estudio*



## Capítulo V: Discusión de resultados

**5.1.** Con base en los resultados expuestos en los incisos anteriores, se evidencia de que la producción del cemento portland representa casi el 40% de la huella de carbono global y el 98 % de la huella de carbono asociada a la fase de producción del concreto premezclado. Al comparar estos resultados con métricas asociadas a investigaciones antecedentes, se observó algunas coincidencias en la representatividad porcentual de este material, respecto a las categorías de impacto evaluadas. Como muestra de ello, Nielsen (2008) sostiene que la manufactura del cemento portland puede llegar a representar más del 80% de la huella de carbono generada durante la producción del concreto. Peng & Sui Pheng (2011), de otro lado, mencionan que la producción del cemento portland contribuye con valores cercanos al 26 % del total de emisiones de CO<sub>2eq</sub> de un componente prefabricado.

Al contrastar los resultados obtenidos del caso de estudio con los presentados por cada autor de la referencia, se evidencia que, los primeros son, en promedio, 16 puntos porcentuales más altos. En ese contexto, se considera que, si bien distintos factores podrían estar influyendo en ello, tal es el caso de las especificaciones técnicas del prefabricado o la selección de la unidad funcional, lo que mayor relevancia podría tener son los límites del sistema considerados para modelar el inventario del cemento. En particular, para la columna prefabricada del caso de estudio, se seleccionó del inventario Ecoinvent la entrada material *Cement,Portland{PE}/cement production, Portland/APOS,U*. Esta última presenta las siguientes consideraciones: la tecnología de producción del cemento es representativa del Perú, el inicio de la actividad se da con la recepción de las materias primas en planta, la actividad termina con la producción a granel de cemento, sin incluir el empaquetado y desestimando la generación de residuos. En contraste, las investigaciones realizadas Nielsen (2008) y Peng y Sui Pheng (2011), consideran una tecnología



de producción industrial del cemento distinta: danesa y china, respectivamente. Asimismo, es altamente probable que los límites de su sistema de ACV, no excluyan la explotación de canteras, y posterior extracción de materias primas que se precisan para la producción de cemento.

**5.2.** El proceso de manufactura de las varillas de acero de refuerzo es el que mayor impacto tiene sobre la huella de carbono global y las tres áreas de daño evaluadas: salud humana (97.9%), ecosistemas (96.16%) y recursos (95.8%). En ese contexto, es fundamental considerar en la producción el empleo de materias primas provenientes del reciclaje, ya que aportan con la reducción, tanto de la huella de carbono, como la energética. En concreto, Gan et al. (2017) sostiene que, si se construyese la estructura de un edificio empleando únicamente acero, tal que el 80% de sus materias primas fuesen recicladas, se lograría reducir sus emisiones de GEI hasta en un 60%. En consecuencia, se convertiría en un sistema constructivo más sustentable que un edificio de concreto armado convencional.

Ahora bien, las emisiones asociadas a este proceso se determinaron de dos formas; la primera de ellas se hizo en la metodología, empleando los factores de emisión propuestos por Lawson (1996) para cada GEI y por kg de acero virgen producido. Posterior a ello, en el capítulo de resultados, se presentó la huella de carbono obtenida a partir de la selección de la entrada material "*Reinforcing Steel {RoW} | production | APOS, U*" del inventario Ecoinvent. En el primer caso, se transformaron las emisiones de cada GEI mediante sus potenciales de calentamiento global con horizonte temporal de 100 años, y se obtuvo una huella de carbono equivalente a 10960 kgCO<sub>2eq</sub>. En segundo lugar, se obtuvo del proceso modelado en SimaPro unas emisiones de 8187 kgCO<sub>2eq</sub>.

Al contrastarse ambas métricas, es posible establecer que el modelo ambiental de SimaPro estima unas emisiones 25% inferiores. Con respecto a ello, es importante acotar que, si bien la descripción de la entrada en SimaPro no especifica si se consideró un porcentaje de materia prima reciclada en el modelo del inventario, se podría presumir sí, dado el porcentaje de reducción de emisiones obtenido. Como referencia de ello, se puede citar nuevamente a Gan et al. (2017), que asoció una reducción del 60% en las emisiones GEI con el empleo de 80% de materia prima reciclada en la producción del acero. Entonces, realizando una proporción directa, se presume que al haberse obtenido una reducción del 25% en las emisiones, el inventario de Ecoinvent podría estar considerando, aproximadamente, el empleo de 30% de materia prima reciclada.

**5.3.** A partir del consolidado presentado por cada etapa que conforma el ACV, es posible establecer que las etapas productivas, tanto del acero como del concreto premezclado, son las que mayor impacto tienen sobre el PCG y las tres categorías de daño, respectivamente. Estos resultados parecen coherentes al contrastarse con lo expuesto por Wen et al. (2015); este último señala que la producción de concreto y acero, son los principales contribuyentes con la huella energética y de carbono de los edificios prefabricados. En ese contexto, se podría establecer una relación análoga con respecto a los componentes prefabricados, que forman parte de la edificación.

## Capítulo VI: Conclusiones y perspectivas a futuro

### 6.1. Conclusiones

La presente investigación tuvo por finalidad evaluar los impactos ambientales asociados a la producción de una columna prefabricada de concreto armado, componente estructural que es empleado en proyectos de edificación del país. El análisis fue realizado empleando el software para LCA SimaPro 9.3 y el inventario de Ecoinvent.

Con base en los resultados obtenidos para las fases del ACV, se determinó que la producción del acero contribuye con el 59% de la huella de carbono total, y con más del 60% sobre las tres categorías de daño evaluadas. Por tanto, es la fase que mayor impacto ambiental genera, siendo el proceso productivo de las varillas de refuerzo el más incidente, tanto sobre la fase, como sobre huella de carbono total (56.6%). De otro lado, la producción del cemento portland representa casi el 40% de la huella de carbono total y el 98 % de la huella de carbono asociada a la fase de producción del concreto premezclado. Asimismo, representa más del 90% de las emisiones de GEI asociadas a la fase de extracción y transformación de materias primas. En relación con lo expuesto anteriormente, tanto para el acero de refuerzo como para el cemento portland, es evidente que los esfuerzos de investigaciones futuras para la mitigación de impactos, deben conducirse hacia el estudio de materiales alternativos y/o la optimización de la eficiencia en los procesos industriales. De acuerdo con Teng (2018), la industria de la prefabricación puede lograr una reducción en sus huellas de carbono y energética, del 16% y 50%, respectivamente, si se incorpora el eco-diseño en la producción de materiales para edificios.

Para la etapa de transporte del concreto premezclado hacia la planta de prefabricación, se evidencia que los procesos de producción y combustión de diésel son los que más repercuten sobre el PCG y categorías de daño. En general, aun cuando esta etapa aporte con un valor porcentual inferior al 2% de la huella de carbono total, es importante precisar que las distancias de viaje asumidas fueron mínimas, ya que el escenario de producción real implica que la planta de prefabricados cuente con su propia unidad de concreto premezclado, para así garantizar un suministro constante. Además, es importante precisar que los límites definidos para el ACV del caso de estudio, excluyen del análisis a las etapas posteriores a la manufactura del prefabricado en planta, tal es el caso del transporte del componente a su locación de montaje final. A propósito de ello, Jaillon & Poon (2008) sostienen que el consumo de energía debido al transporte de los componentes prefabricados hacia el sitio de la edificación, podría llegar a incrementar las emisiones de GEI y el consumo energético en un 12%.

A pesar de que la fase de manufactura del componente prefabricado en planta contribuya con menos del 2% del PCG total, se considera propicio resaltar que el proceso de curado a vapor aporta con el 93% de la huella de carbono asociada a la fase y con más del 80% sobre las tres categorías de daño evaluadas. En adición a ello, al analizar las entradas materiales al proceso, se observa que el consumo y combustión de gas natural representan el 71% de las emisiones de GEI. Con base en los resultados expuestos, se considera oportuno sugerir un escenario de reducción de emisiones, a partir de la selección de una caldera de consumo eficiente y/o la investigación alrededor de algún producto químico o aditivo que agilice el proceso de curado, logrando así reducir la duración del mismo. A modo de ejemplo, Ferrari et al. (2017) enfatiza en que el empleo de nuevos aditivos, conocidos como silicatos hidratados nanométricos (MeSH), tienen la

capacidad de eliminar completamente el proceso de curado a vapor si se adicionan en dosis del 2 al 5% del peso del cemento. Todo ello, sin comprometer la resistencia temprana ni durabilidad del concreto prefabricado.

Al analizarse los resultados del AICV, empleando un enfoque de puntos finales, y para todas las etapas consideradas dentro de los límites del sistema, se resaltan ciertas tendencias de las categorías de impacto sobre las de daño. Por ejemplo, para la salud humana, las categorías de impacto con mayor incidencia son el cambio climático, la formación de material particulado y la toxicidad carcinogénica humana, siendo esta última característica para los procesos de producción del acero, tanto de las varillas de refuerzo como del encofrado metálico. De otro lado, se observa que el calentamiento global impacta fundamentalmente sobre los ecosistemas terrestres, mientras que, la escasez de recursos fósiles es la que mayor nivel de daño suscita sobre los recursos.

Con base en el análisis macro realizado por etapas, es posible establecer que la contribución al PCG de los procesos de transporte del concreto premezclado y manufactura del concreto prefabricado en planta, son en realidad ínfimos si se contrastan con las etapas productivas del concreto y acero. El escenario es muy similar al analizarse por nivel de daño sobre las categorías de salud humana, ecosistemas y recursos.

El alcance de este trabajo estuvo limitado a un enfoque de ACV de la cuna a la puerta, en donde se identificó las fases y procesos críticos, en cuanto a impacto ambiental respecta. No obstante, podría ser adecuado ampliar los límites del sistema para investigaciones posteriores, de tal manera en que se considere desde el suministro a nivel de transporte del prefabricado a obra,

hasta el montaje, operación, uso de la edificación una vez construida y el fin de su vida útil. De acuerdo con Onat et al. (2014), centrándose en etapas específicas del ciclo de vida, la investigación indica que la etapa de uso y operación es responsable de la mayor parte de los problemas medioambientales de las construcciones prefabricadas.

## **6.2. Perspectivas a futuro**

Considerando la fuerte incidencia del cemento portland en el PCG de la segunda fase con mayor huella de carbono del ACV (producción del concreto premezclado), se recomienda ampliar la investigación alrededor de alternativas que permitan reducir su impacto ambiental. En los últimos años se han desarrollado enfoques que plantean reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria cementera, tal es el caso del empleo de materiales cementicios suplementarios, como las cenizas volantes. Estos materiales permiten lograr el reemplazo parcial del cemento portland en la mezcla de concreto. De acuerdo con Faludi (2012), se puede reducir del 11 % al 14 % de las emisiones de GEI en la producción de concreto, si se reemplaza al menos el 25 % del cemento portland por cenizas volantes. Por otro lado, se tiene también otras investigaciones dirigidas a la sustitución parcial de combustibles fósiles por fuentes de energía renovables, y recientemente, el empleo de nanotecnología en los materiales cementicios suplementarios. De acuerdo con Poudyal & Adhikari (2021), la nanotecnología tendrá un papel fundamental en cuanto concierne neutralizar las propiedades no deseables de los materiales cementicios, permitiendo así un mayor porcentaje de reemplazo de cemento portland en la mezcla de concreto. Entonces, promover la investigación alrededor de la nanotecnología es relevante, aún más dentro de la industria de la prefabricación, que no admite valores porcentuales importantes de materiales que puedan desempeñarse como sustitutos del cemento portland. Entre otras razones, se alude a que el reemplazo importante de las

cantidades de cemento en la mezcla de concreto, podrían afectar las propiedades requeridas para acelerar el proceso de desencofrado en planta, y con ello, retrasar la producción. Por otro lado, es importante enfatizar en que producir un concreto más sustentable, implica también tomar en consideración durante el eco-diseño su accesibilidad en materia de costos, para que pueda ser escalable en el mercado. Ighalo & Adeniyi (2020) sostienen que la implementación comercial de las nuevas técnicas de reducción de los impactos ambientales asociados a la producción de cemento, solo serán posibles cuando exista una sinergia real entre los ámbitos social, económico y ambiental. En general, lograr esta sinergia podría ser complejo, más aún si el análisis se conduce hacia la evaluación detallada de ciertas categorías de impacto o niveles de daño sobre las áreas protegidas. Al evaluar la alternativa de sustitución de los combustibles fósiles por fuentes de energía renovable en la producción del cemento, Tomatis et al. (2020) sostiene que indudablemente el impacto ambiental se reduciría, sobre todo para las categorías de cambio climático (48% menos), escasez de recursos fósiles (75% menos), formación de ozono fotoquímico (92% menos) y ecotoxicidad terrestre (79% menos). Sin embargo, existe una contraparte, y es que construir la infraestructura necesaria para generar la demanda de energía limpia precisada por la industria cementera, involucraría una afección importante sobre otras categorías. Por ejemplo, la ocupación de terreno podría duplicarse, las emisiones de compuestos cancerogénicos incrementarían en 102%, y la escasez de metales y minerales en un 6%. Con base en lo expuesto, es posible establecer que evaluar la contraparte de una medida de mitigación de impactos puede ser tan relevante como el planteamiento de la misma, siendo fundamental procurar un balance positivo.

La producción del acero es la fase con la contribución más elevada al PCC y a las categorías de daño asociadas al caso de estudio. Particularmente, el proceso de fabricación de las varillas de

refuerzo tiene la mayor incidencia sobre la referida fase. En ese sentido, aperturar una línea de investigación alrededor del acero de refuerzo empleado en la prefabricación, no solo es sugerente si no propicio. Existe un abanico de investigaciones conducidas alrededor de la reducción del impacto ambiental asociado al acero de refuerzo, desde el empleo de valores porcentuales elevados de materias primas recicladas, hasta materiales alternativos que podrían posibilitar su sustitución. Al respecto, Lapko & Urbánski, (2015), señalan que las barras de polímeros reforzados con fibras (FRP) representan una opción como sustitutos del acero de refuerzo, además de ser una alternativa más duradera, pues su química evita la oxidación a lo largo de su vida útil. Similarmente, los polímeros reforzados con fibras de basalto (BFRP), han demostrado generar 93% menos emisiones de CO<sub>2</sub> y consumir 68% menos energía en su proceso de manufactura, que una barra de acero de refuerzo convencional (Garg & Shrivastava, 2019). Ahora bien, la mención de las alternativas previas se volvería más interesante si se diseñara un material que lograra aunar sus características particulares, es decir, extender la vida útil del material al evitar su oxidación prematura en el tiempo y sostener la reducción porcentual en las huellas de carbono y energética.

Por otra parte, si bien el proceso de fabricación del encofrado metálico contribuye en menor medida al PCC de la fase, y por ende, del ACV del caso de estudio, se considera adecuado realizar ciertas precisiones y sugerencias. En primer lugar, las emisiones reales fueron reducidas por un factor de número de usos, ya que, a diferencia de las varillas de refuerzo, que quedan embebidas en el componente prefabricado, el encofrado puede ser empleado alrededor de 300 veces a lo largo de su vida útil. No obstante, este factor, empleado la reducción de emisiones, no sería el mismo si se tratase de un material distinto al acero. De acuerdo con Taher Ahmed et al. (2014), la selección adecuada del material de encofrado no solo condiciona el costo del proyecto, si no que también la velocidad, seguridad, calidad e impacto ambiental, que resulta menor al seleccionarse encofrados



de acero. La razón fundamental es que generan menor cantidad de residuos de construcción, pueden reutilizarse un número importante de veces y pueden incorporar en su fabricación un porcentaje elevado de materia prima reciclada. En contraste, el empleo de otros sistemas de encofrados, tal es el caso de la madera, suele generar hasta el 27.5% de los residuos de construcción de un proyecto (Karke & Kumathekar, 2005). En este contexto, se sugiere sostener el empleo de encofrados de acero para la industria de prefabricados, procurando que los porcentajes de materias primas recicladas sean los máximos. Asimismo, se recomienda profundizar en la investigación alrededor de otros tipos de encofrados metálicos, tal es el caso del aluminio, o de materiales compuestos, como los fenólicos.

Tal y como fue abordado en el inciso 2.1. del estado del arte, el componente prefabricado del caso de estudio forma parte de un sistema estructural que se ensambla mediante conexiones húmedas. Ahora, si bien estas últimas no afectan las ventajas ambientales implícitas en la adopción de un sistema prefabricado, sí poseen dos desventajas desde el punto de vista ambiental: los elementos prefabricados de la estructura no pueden ser reparados o reemplazados ante alguna eventualidad sísmica, y la estructura debe ser demolida sin posibilidad de desmontaje o recuperación total al término de su vida útil. En ese sentido, lo ideal sería propiciar la construcción empleando conexiones secas, no obstante, hasta la actualidad, pese a existir un recuento importante de investigación científica, aún no hay suficientes evidencias empíricas ni normativas que avalen su adoptabilidad en regiones sísmicas. Aún con este panorama inicial, se sugiere ampliar la investigación alrededor de los sistemas prefabricados desmontables y sus ventajas en el marco de la sostenibilidad. Dhakal (2017) sostiene que el diseño de edificaciones en la actualidad no contempla la fase final de su vida útil, pues cuando se vuelven obsoletos en su función, estos

tienden a ser demolidos. Sin embargo, este tipo de demolición, carente de planificación la etapa inicial de diseño, conlleva a la irrecuperabilidad de materiales de construcción no renovables, y con ello, contradice la filosofía de edificación sostenible.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A2G Climate Partners. (2015). De la COP20/CMP10 al mundo: Manual de Cálculo y Neutralización de GEI para las COP/CMP. [www.atwog.com](http://www.atwog.com).
2. ACI 318-02. (2002). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02). In American Concrete Institute.
3. Alfaro, O., Céspedes, B., Castillo, J., & Quiroz, F. (2020). Sistemas prefabricados peruanos como estrategia frente al Covid-19. Revista CONSTRUCTIVO.
4. Angulo, W. (2017). El 70 % de viviendas en Lima son informales y vulnerables a un terremoto. Revista CAPECO.
5. Arellano, E., Mejía, J., & Mulgado, V. (2015). Manual de Calidad en Procedimientos de Prefabricación de ANIPPAC para Plantas de Concreto Prefabricado Presforzado.
6. ASTM C1602. (2018). Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.
7. ASTM C494. (2019). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.
8. Balsano, J., Parra, R., & Jiménez, P. (2005). Estimación del consumo energético y de la emisión de CO<sub>2</sub> asociados a la producción, uso y disposición final de ventanas de PVC, aluminio y madera. In Laboratorio de Modelización Ambiental.
9. Bari, N.A.A.; Abdullah, N.A.; Yusuff, R.; Ismail, N.; Jaapar, A. Environmental awareness and benefits of industrialized building systems (IBS). Procedia-Soc. Behav. Sci. 2012, 50, 392–404.

10. Bedoya, C., & Dzul, L. (2015). Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project. *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(2), 99–108. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732015000200002>.
11. Bedriñana, L. A., Tani, M., Kono, S., and Nishiyama, M. (2020). “Seismic Behavior of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Walls with Internal and External Dampers.” The 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, 2i – 0059.
12. Blismas, N., Pasquire, C., & Gibb, A. (2006). Benefit evaluation for off-site production in construction. *Construction Management Economy*, 24, 121–130.
13. Boyd, N.; Khalfan, M.M.; Maqsood, T. Off-site construction of apartment buildings. *J. Archit. Eng.* 2013, 19, 51–57.
14. Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26(January 2018), 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>
15. Cao, X., Li, X., Zhu, Y., & Zhang, Z. (2015). A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China. *Journal of Cleaner Production*, 109, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.120>
16. Caparó, A. (2017). Diseño de Mezclas de Concreto de Alta Resistencia para Elementos Prefabricados y/o Pretensados Utilizando Adiciones Minerales y Aditivos en Edades Tempranas Mediante Curado a Vapor y Curado Adiabático en la Ciudad de Arequipa <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/6854>.
17. Cárdenas, J. L. (2021). Proceso productivo de una columna prefabricada en la unidad de prefabricados de PREANSA.

18. CEPLAN. (2016). El rostro de la informalidad en el Perú. Centro Nacional de Planeamiento Estratégico.
19. Chen, Y., Okudan, G. E., & Riley, D. R. (2010). Decision support for construction method selection in concrete buildings: Prefabrication adoption and optimization. *Automation in Construction*, 19(6).
20. Collado, R. (2010). Diseño de Puente Grúa de 5 Toneladas. Universidad de Ciencias Aplicadas Mittweida.
21. Comerio, M. C., and Blecher, H. E. (2010). “Estimating downtime from data on residential buildings after the Northridge and Loma Prieta earthquakes.” *Earthquake Spectra*, 26(4), 951–965.
22. CSI/ECRA. (2009). Development of state of the art-technology in cement manufacturing: trying to look ahead.
23. Davies, Waldron.; Harnisch, Jochen.; Lucon, Oswaldo.; Mckibbon, Scott.; Saile, Sharon.; Wagner, Fabian y Walsh, M. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. CAPÍTULO 3: Combustión Móvil. In *Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*.
24. De Carvalho, A. C. (2001). Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. In *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona*. Universidad Politécnica de Cataluña.
25. Elliott, K. S., Davies, G., Ferreira, M., Gorgun, H., and Mahdi, A. (2003). “Can precast concrete structures be designed as semi-rigid frames? Part 1—The experimental evidence.” *Struct. Eng.*, 81(16), 14–27.

26. Estrada, J. (2014). Propuesta de un Plan de Manejo de los Desechos Sólidos Generados en las Áreas de Producción y Laboratorio en una Planta de Concreto Premezclado en la República de Guatemala.<http://emecanica.ingenieria.usac.edu.gt/sitio/wp-content/subidas>.
27. Faludi, J.; Lepech, M.D.; Loisos, G. Using life cycle assessment methods to guide architectural decision-making for sustainable prefabricated modular buildings. *J. Green Build.* 2012, 7, 151–170.
28. Fleischman, R. B., Restrepo, J. I., Pampanin, S., Maffei, J. R., Seeber, K., and Zahn, F. A. (2014). “Damage evaluations of precast concrete structures in the 2010-2011 Canterbury earthquake sequence.” *Earthquake Spectra*, 30(1), 277–306.
29. Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, Koehler A, Pennington D, Suh S (2009) Recent developments in life cycle assessment. *J Environ Manag* 91(1):1–21.
30. Fong, W. K., Sotos, M., Doust, M., Schultz, S., Marques, A., & Deng-Beck, C. (2016). Protocolo global para inventarios de emisión de gases de efecto invernadero a escala comunitaria. In *Word resources intitute C40 Cities Climate Leadership Group Iclei: Local Goverments For Sustainability (Vol. 40, Issue ICLEI)*.
31. Gan, V. J. L., Chan, C. M., Tse, K. T., Lo, I. M. C., & Cheng, J. C. P. (2017). A comparative analysis of embodied carbon in high-rise buildings regarding different design parameters. *Journal of Cleaner Production*, 161, 663–675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.156>.
32. Garg, N., & Shrivastava, S. (2019). Environmental and Economic Comparison of FRP Reinforcements and Steel Reinforcements in Concrete Beams Based on Design Strength Parameter. *UK IERI Concrete Congress*, 8.

33. Girgin, S. C., Misir, I. S., & Kahraman, S. (2017). Experimental Cyclic Behavior of Precast Hybrid Beam-Column Connections with Welded Components. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(2), 229–245. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0190-y>.
34. Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016). Introduction to LCA with SimaPro. In © 2002-2016 PRé. Some rights reserved. (Issue January).
35. Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, De Schryver A, Struijs J, van Zelm R (2009) ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: characterisation, first edition. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, The Netherlands.
36. Gómez, D., Watterson, J., Americano, B., Ha, C., Marland, G., Matsika, E., Namayanga, L. N., Osman-Elasha, B., Kalenga, J., Treanton, K., & Quadrelli, R. (2006). Chapter 2: Stationary combustion. In 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. 2). <https://doi.org/10.1007/BF00914340>
37. Habert, G., & Rousell, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, 31(6).
38. Heinonen, J., Säynäjoki, A., Junnonen, J.-M., Pöyry, A., & Junnila, S. (2016). Pre-use phase LCA of a multi-story residential building: Can greenhouse gas emissions be used as a more general environmental performance Indicator. *Building and Environment*, 95(1), 116–125.
39. Hussain Khahro, S., Ahmed Memon, N., Tauha Hussain, A., & Memon, Z. A. (2019). Adoption of Prefabrication in Small Scale Construction Projects. *Civil Engineering*

Journal, 5(5), 1099–1104. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091314>.

40. ICH, P. (2014). Seminario Prefabricados de Hormigon 2014. [https://www.youtube.com/watch?v=\\_mejuVLQOKA&t=393s](https://www.youtube.com/watch?v=_mejuVLQOKA&t=393s)
41. Ighalo, J. O., & Adeniyi, A. G. (2020). A perspective on environmental sustainability in the cement industry. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 2, 161–164.
42. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, A. C. (2016). Normativa Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014: Cementantes Hidráulicos. In Building industry hydraulic cements- Specifications and testing methods. *Asuntos Internacionales* (2018).
43. Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2013). Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
44. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks:1990-2019, & EPA. (2019). Overview of Greenhouse Gases. United States Environmental Protection Agency (EPA).
45. ISO 14040. (2006). Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
46. Jaillon, L.; Poon, C.S. Sustainable construction aspects of using prefabrication in dense urban environment: A Hong Kong case study. *Constr. Manag. Econ.* 2008, 26, 953–966.
47. Jiang, Y., Zhao, D., Wang, D., & Xing, Y. (2019). Sustainable performance of buildings through modular prefabrication in the construction phase: A comparative study. *Sustainability* (Switzerland), 11(5658), 15. <https://doi.org/10.3390/su11205658>.
48. Kamali, M., & Hewage, K. (2016). Life cycle performance of modular buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1171–1183.



49. Karke, S., & Kumathekar, M. B. (2005). Comparison of the use of Traditional and Modern Formwork Systems. *Civil Engineering Systems and Sustainable Innovations* ISBN: 978-93-83083-78-7, September, 348–354.
50. Khasreen, M. M., Banfill, P. F. G., & Menzies, G. F. (2009). Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: A review. *Sustainability*, 1(3), 674–701. <https://doi.org/10.3390/su1030674>
51. Lapko, A., & Urbánski, M. (2015). Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar. *ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING*, 5, 223–230.
52. Larsena, K., & Gunnarsson-Östling, U. (2009). Climate change scenarios and citizen-participation: Mitigation and adaptation perspectives in constructing sustainable futures. *Habitat International*, 33(3), 260–266. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2008.10.007>
53. Li, L. (2015). Technology System of Industrialized Housing and Energy-Saving and Pollutants- Reduction Benefits Analysis Based on Construction. Chongqing University.
54. Li, Q., Long, R., & Chen, H. (2018). Differences and influencing factors for Chinese urban resident willingness to pay for green housings: Evidence from five first-tier cities in China. *Applied Energy*, 229, 299–313.
55. 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 Buildings*, 66, 165–176.
56. Ministerio de Energía y Minas, & Dirección De Estudios Y Promoción Eléctrica. (2019). Anuario Ejecutivo De Electricidad (Issue Suministro). [www.minem.gob.pe](http://www.minem.gob.pe)

57. Ministerio de Energía y Minas Viceministerio de Energía, & Dirección General de Eficiencia Energética. (2017). Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero año 2014- Sector Energía. Combustión Estacionaria. [https://infocarbono.minam.gob.pe/wpcontent/uploads/2017/09/RAGEI\\_COMBUSTION-ESTACIONARIA\\_VERSION-FINAL.pdf](https://infocarbono.minam.gob.pe/wpcontent/uploads/2017/09/RAGEI_COMBUSTION-ESTACIONARIA_VERSION-FINAL.pdf).
58. Ministerio de Transportes y Comunicaciones: Resolucion Directorial N° 002-2006-MTC/15. (2006). Clasificación Vehicular y Estadarización de Características Registrables Vehiculares. Diario Oficial El Peruano. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/338049/1\\_0\\_1743\\_.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/338049/1_0_1743_.pdf)
59. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, Oficina de Estudios Estadísticos y Económicos, & Dirección General de Estadística e Informática. (2020). Panorama Económico Nacional y el Sector Construcción. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
60. Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM). (2017). Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional SEIN.
61. Nielsen, C. V. (2008). Carbon footprint of concrete buildings seen in the life cycle perspective. Proc. of NRMCA 2008 Concrete Technology Forum, 1–14.
62. Ninanya, S., & Melgar, E. (2016). Empleo De Nuevas Tecnologías Para El Desarrollo De Altas Resistencias Iniciales En Concretos Prefabricados.
63. NORMA E.060 CONCRETO ARMADO. (2020). NORMA E.060 CONCRETO ARMADO (p.205). [www.gob.pe/sencico](http://www.gob.pe/sencico).

64. Onat, N.C.; Kucukvar, M.; Tatari, O. Scope-based carbon footprint analysis of US residential and commercial buildings: An input–output hybrid life cycle assessment approach. *Build. Environ.* 2014, 72, 53–62.
65. Peng, W., & Sui Pheng, L. (2011). Managing the Embodied Carbon of Precast Concrete Columns. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1192–1199. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000287](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000287)
66. Poudyal, L., & Adhikari, K. (2021). Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. *Resources, Environment and Sustainability*, 4(2021), 5. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100024>.
67. Programa de Estudios e Investigaciones en Energía. (2010). Agencia Chilena de Eficiencia Energética: Guía Para la Calificación de Consultores en Eficiencia Energética.
68. Rashid, A. F., & Yusoff, S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 244–248.
69. Redacción 360 En Concreto-Comunidad. (2020). Efecto De Las Adiciones Minerales En El Concreto. *Redacción 360 En Concreto*.
70. Rohden, A. B., & Garcez, M. R. (2018). Increasing the sustainability potential of a reinforced concrete building through design strategies: Case study. *Case Studies in Construction Materials*, Published by Elsevier Ltd, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00174>.
71. Sánchez, E., Bernal, J., Moragues, A., & León, N. (2016). Propiedades reológicas y mecánicas de un hormigón autocompactante con adición de nano-sílice y micro-sílice.

- Revista de La Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de La Construcción, 6(1), 1–14. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i1.111>
72. SOQUIMIC. (2019). Hoja de datos técnicos: Finishcrete 50 Desmoldante para encofrados de madera y metal (p. 1).
73. Taher Ahmed, M., Zakaria, R., Mohamad Zin, R., & Hussien Ahmed, R. (2014). Environmental performance for two formwork system types: Conventional formwork & steel formwork system. *Applied Mechanics and Materials*, 525(February), 509–511.
74. Tam, V. W. Y., Tam, C. M., Zeng, S. X., & Ng, W. C. Y. (2007). Towards adoption of prefabrication in construction. *Building Environmental*, 42, 3642–3654.
75. Teng, Y.; Li, K.; Pan, W.; Ng, T. Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies. *Build. Environ.* 2018, 132, 125–136.
76. Tomatis, M., Jeswani, H. K., Standford, L., & Asapagic, A. (2020). Assessing the environmental sustainability of an emerging energy technology: Solar thermal calcination for cement production. *Science of the Total Environment*, 742.
77. UNEP. (2009). BUILDINGS AND CLIMATE CHANGE: Summary for Decision-Makers. In United Nations Environment Programme. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4781-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4781-7_2)
78. Urbina, C. (2001). Técnicas De La Construcción. Slidshare.
79. Valdivia, E., & Valdivia, M. (2014). Investigación del efecto del óxido de silicio en la determinación del porcentaje de agregado en los cementos puzolanicos utilizando el método de difracción de rayos x. In Universidad Nacional De San Agustín Facultad De

Ingeniería De Procesos Escuela Profesional De Ingeniería  
Química.<http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/574>.

80. Vasishtha, T. (2020). Comparative Life Cycle Assessment (Lca) And Life Cycle Cost Analysis (Lcca) Of Precast And Cast-In-Place Buildings In United States.
81. Ventura, A., Idir, R., Marceau, S., Van Schoors, L., Andrianandraina, A., & Van Der Werf, H. (2012). How to use LCA to assess materials as eco-design parameters in construction projects? International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, 89–96.
82. Yi S, Kurisu KH, Hanaki K (2011) Life cycle impact assessment and interpretation of municipal solid waste management scenarios based on the midpoint and endpoint approaches. *Int J Life Cycle Assess* 16(7):652–668.
83. Zhang, X., & Skitmore, M. (2012). Industrialized housing in China: a coin with two sides. *International Journal of Strategic Property Management*, 16(2), 143–157.

## ANEXO 1

### Especificaciones técnicas del mezclador de doble eje horizontal JS500| HAMAC

Modelo		JS500	JS750	JS1000	JS1500	JS2000	JS3000	JS3500	JS4000
(L) Volumen De Hormigón Compactado		500L	750L	1000L	1500L	2000L	3000L	3500L	4000L
(L) Volumen De Agregados Secos		800L	1200L	1600L	2400L	3200L	4800L	5600L	6400L
Capacidad Teórica ( En Condiciones Ideales De Trabajo)		≥25m³/H	≥37.5m³/H	≥50m³/H	≥75m³/H	≥100m³/H	≥150m³/H	≥180m³/H	≥200m³/H
Mm Tamaño Máximo De Agregados Para Mezclar ( Guijeros /Gravas)		60/80	60/80	60/80	80/100	80/100	80/120	80/120	80/120
Ciclo De Trabajo (S)		72	72	60	60	60	60	60	60
Peso Total (Kgs)		4000	5500	8700	11300	15000	11450	12000	19000
(M) Altura De Descarga		1.7-3.8	1.7-3.8	1.7-3.8	1.7-3.8	1.7-3.8	1.7-3.8	1.7-3.8	3.8
Escarador	Velocidad	35r/Min	26r/Min	29.5r/Min	24.5r/Min	24.5r/Min	21r/Min	21r/Min	21r/Min
Cantidad	2x7	2x7	2x8	2x8	2x8	2x10	2x10	2x11	2x12
Motor (Modelo De La Mezcladora)	Model	Y180M-4	Y200L-4	Y180M-4	Y225M-6	Y250M-6	Y280M-6	Y280M-6	Y315S-6
	Power	18.5kw	30kw	2x18.5kw	2x30kw	2X37kw	2X55kw	2X55kw	2X55kw
Motor Del Elevador De Cangiones	Model	YEZ1325-4-B5	YEZ132M-4-B5	YEZ160L-4	YEZ180L-4	YEJ180L-4	Y25M-4	Y25M-4	Y25M-4
	Power	5.5KW	7.5KW	15KW	18.5KW	22KW	2 x 55 Kw	2 x55 Kw	2 x 75 Kw
Potencia De La Bomba	Power	1.1KW	1.1KW	3KW	3KW	4KW	5KW	5KW	5KW

## ANEXO 2

### Especificaciones técnicas del 8 CBM Camión Mezclador De Hormigón | HAMAC

Capacidad	8m3
Chasis Marca	FAW / FOTON / DFAC
Démission Chasis (Mm)	8300 × 2470 × 2850
Distancia Entre Ejes (Mm)	3850 + 1300,4150 + 1300
Número De Ejes	3
Frente Track (Mm)	1980
Trasera Track (Mm)	1860/1880
Voladizo Delantero (Mm)	1250/2300
Voladizo Trasero (Mm)	1250/2850
Ángulo De Aproximación / Ángulo De Salida	34 / 15,34 / 13
Número De Neumáticos	10
Tamaño De Los Neumáticos	10.00-20,11.00-20
Placa Del Número De Primavera	9 10
Combustible	Diesel
Norma De Gases Del Motor	Nacional IV
Marca Del Motor	YUCHAI
Poder	215kw / 290hp
Motor Velocidad Nominal (R / Min)	2800
Ralentí Del Motor (R / Min)	700 ~ 750
Embrague	Biplate Secos Conjunta Constante
Tipo De Transmisiones	Transission Transmisión Por Cardán
Modo Conductor	Tracción Trasera
Forma Volviendo	Dirección Asistida Hidráulica
Freno De Servicio	Freno De Aire
De Frenado De Estacionamiento	De Frenado Del Freno De Aire
Max. Velocidad (Km / H)	85
Démission Concrete Camión De Mezcla (Mm)	8700,9550 × 2500 × 3760,3880
Mezcla Volumen (M³)	8
Tasa De Alimentación (M³ / Min)	≥2
Descargando Tasa Remanente	≤0.1%
El Modo De Suministro De Agua	La Presión Del Aire De Suministro
Volumen Del Tanque De Agua (L)	200
Radiador	24v Refrigerado Por Aire
Caja Reductora	Fuxin
Motor	Interpump
Bomba Hidráulica	Interpump

## ANEXO 3

Especificaciones técnicas del desmoldante Finishcrete 50 | SOQUIMIC





## FINISHCRETE 50

### DESMOLDANTE PARA ENCOFRADO DE MADERA Y METAL

#### 1. DESCRIPCIÓN

*FINISHCRETE 50*. Es un desmoldante que forma una barrera química resistente al agua. La formulación química no daña ni mancha el concreto. El uso de *FINISHCRETE 50* produce un concreto con apariencia limpia, sin residuos que se transfieran a la cara vista del concreto (superficie).

#### 2. VENTAJAS Y BENEFICIOS

- Facilita un desencofrado rápido y limpio.
- Su acción química no daña el concreto.
- Produce un concreto de apariencia limpia.
- Deja el concreto sin manchas, y con menos porosidad en cuanto a cantidad y tamaño.
- Alarga la vida de los encofrados de acero, aluminio y madera.
- Se puede aplicar en los encofrados hasta días antes de colocar el concreto.
- Fácil de aplicar.
- Tiempos de aplicación flexibles.
- No inflamable.

#### 3. DATOS TÉCNICOS

<b>Apariencia</b>	Líquido
<b>Color</b>	Ámbar

#### 4. NORMA / ESPECIFICACIONES

*FINISHCRETE 50*, cumple con los requisitos de la norma ASTM C309 Tipo 1.

#### 5. DOSIFICACIÓN

*FINISHCRETE 50*, rinde de 6.7 m<sup>2</sup> /kg a 9.8 m<sup>2</sup> /kg (100 g/m<sup>2</sup> a 150 g/m<sup>2</sup>) en superficies con terminado liso.

El rendimiento varía dependiendo de la rugosidad y textura de la superficie. Se debe evitar el exceso de material, aplicaciones gruesas que pueden dificultar la remoción del producto.

#### 6. APLICACIÓN

Aplique una capa ligera con un aspersor, brocha o rodillo. Para mejores resultados, recubra los encofrados con *FINISHCRETE 50* antes de colocar el concreto. Evite la aplicación excesiva del producto. Después de 2 aplicaciones, se pueden obtener buenos resultados.

#### PRETENSADO Y PREFABRICADOS:

- El rápido secado del *FINISHCRETE 50* permite colocar el acero inmediatamente, sin peligro de dañar el recubrimiento de acero.
- Limpie y elimine cualquier exceso de *FINISHCRETE 50* que tengan los encofrados. Recoja todo exceso de los encofrados.
- Aplique sobre los encofrados abundantemente antes de almacenarlos, para así evitar la formación de óxidos.
- Para poner los encofrados nuevamente en servicio, limpie la superficie y vuelva a recubrir con *FINISHCRETE 50*.

#### MANTENIMIENTO DE EQUIPOS:

- Limpie el equipo de aspersión, las brochas y los rodillos con agua y detergente antes de que se sequen.

#### 7. RENDIMIENTO

El cubrimiento puede variar según la presión y el tamaño de la boquilla del aspersor y de la porosidad del encofrado.

	m <sup>2</sup> / litro
<b>Encofrados de madera</b>	17 - 22
<b>Encofrados metálicos</b>	40 - 50
<b>Aglomerado normal</b>	25 - 30
<b>Aglomerado plastificado</b>	40 - 50

#### 8. RECOMENDACIÓN

- Encofrado de acero, madera, fibra de vidrio y cartón.
- Plantas de pretensado, prefabricado en general.
- Evite la colocación excesiva del producto en los encofrados.
- No permita la congelación de *FINISHCRETE 50*.
- Los encofrados revestidos con *FINISHCRETE 50* deben estar secos para que se pueda obtener un buen acabado del concreto; de otra forma se producirá un aspecto ligeramente polvoriento.
- Cuando se vayan a aplicar recubrimientos o selladores sobre concreto en contacto con encofrados recubiertos con *FINISHCRETE 50*, se debe hacer una prueba de adherencia antes de la aplicación. Consulte al representante técnico.
- El usuario es responsable por aplicar el producto de manera apropiada. La asesoría del personal técnico en la obra es únicamente para hacer recomendaciones técnicas, y no para fines de supervisión ni de control de calidad.

Para mayor información, contactarse con su representante técnico de SOQUIMIC S.A.C.

#### 9. PRESENTACIÓN

*FINISHCRETE 50*, se suministra en:

- Garrafas de 20 litros.
- Cilindros de 208 litros.
- Tanques de 1000 litros.

#### 10. ALMACENAMIENTO

La vida útil del *FINISHCRETE 50* en almacenamiento es de 12 meses como mínimo, si se almacena en su envase original y bien cerrado, bajo condiciones óptimas.

Almacene a temperaturas superiores de 5°C.

Para mayor información contactarse con su representante técnico de SOQUIMIC SAC.

## FINISHCRETE 50

### DESMOLDANTE PARA ENCOFRADO DE MADERA Y METAL

#### 11. INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

FINISHCRETE 50 contiene destilados de petróleo.

##### RIESGOS:

Vapor y líquido combustible. Puede causar irritación cutánea, ocular y respiratoria. La ingestión del producto puede causar irritación de la boca, la garganta y del estómago, con náusea y dolor abdominal. La inhalación deliberada de los contenidos puede ser peligrosa o letal.

##### PRECAUCIONES:

Mantenga el producto fuera del alcance de los niños. Manténgalo alejado del calor, llamas y fuentes de ignición. El vapor del producto es más pesado que el aire. No realice trabajos de corte o soldadura cerca de recipientes vacíos. Los recipientes vacíos pueden contener vapores explosivos o residuos peligrosos. Mantenga el recipiente cerrado. Utilícelo únicamente con ventilación adecuada. Evite el contacto con la piel, los ojos y la ropa. Lávese muy bien después de manipularlo. No inhale los vapores de este producto.

##### PRIMEROS AXILIOS

En caso de contacto con los ojos, lávese a fondo con un chorro continuo de agua durante un mínimo de 15 minutos. Busque atención médica de inmediato. En caso de contacto con la piel, lávese las áreas afectadas con agua y jabón. Si la inhalación del producto le ocasiona malestar físico, salga al aire libre. Si el malestar persiste o si se le dificulta la respiración o si ingiere el producto, busque atención médica de inmediato.

Para mayor información, consulte las Hojas de Datos de Seguridad del material (MSDS).

#### 12. OBSERVACIONES

Para información adicional sobre este producto o para su uso en el desarrollo de mezclas de concreto con características especiales de desempeño, consulte a su representante técnico de SOQUIMIC S.A.C.

Los datos presentes en esta hoja técnica son referenciales.

## ANEXO 4

### Especificaciones técnicas de la Pulverizadora 4 tiempos FH-25 1.1HP tipo mochila | Panther

#### **Pulverizadora 4 tiempos FH-25 1.1HP tipo mochila Panther**

Por su comprobada versatilidad, es indicado para aplicaciones de pesticidas en los cultivos de café, cacao, tabaco, banana, té, algodón, arroz, maní, papas, melones, uvas, ananás, cítricos, etc. También puede ser utilizado en la desinfección de construcciones rurales, control de plagas.

#### **Especificaciones Técnicas:**

- Modelo: FH-25
- Capacidad de tanque: 30L
- Potencia: 1.1HP
- 500PSI
- Motor Honda GX-25
- Peso: 12kg

## ANEXO 5

Especificaciones técnicas del vibrador ENAR eléctrico dingo chicote de 4m y cabezal de

1”



[www.amyeco.mx](http://www.amyeco.mx)



**"Construyendo Emociones a la  
Altura de su Confianza"**



**VIBRADOR ENAR ELECTRICO  
DINGO CHICOTE DE 4 M Y  
CABEZAL DE 1"**



**VIBRADORES  
ELECTICOS  
PARA CONCRETO**

**Signe nos**  
Amyeco Andamios  
maquinaria y equipo  
para construcción



Modelo: VEED-424



Ficha técnica



## SOLUCIONES-AMYECO EN EQUIPOS DE CONSTRUCCIÓN

Vibrador de hormigón portátil eléctrico DINGO. Motor muy manejable por su ligero peso. Dispone de correa para su transporte.

Motor de alta potencia para el manejo de toda gama de diámetros de vibradores AX (de 1") y longitudes de transmisiones TDX (de 4 m). Manguera reforzada para un uso intenso. Asas para su fácil manejo y protección del cuerpo del motor. Carcasa de alta resistencia.

Modelo	DINGO-TDX4M-AX40
TIPO	ELECTRICO
POTENCIA (HP)	3
VOLTAJE (V)	115
FRECUENCIA (Hz)	60
RPM	18000 (EN VACIO)
PESO(Kg)	5.2
CHICOTE TDX4M	
LONGITUD (m)	4
PESO (Kg)	5
CABEZAL AX40	
DIAMETRO (Pulg)	1"
LONGITUD (mm)	300
RENDIMIENTO (m <sup>3</sup> /h)	15
VIBRACIONES (v.p.m)	1350

Todas las especificaciones están sujetas a cambio sin previo aviso

ÚLTIMA TECNOLOGÍA PARA  
VIBRADO DE CONCRETO

IDEAL PARA UN ALTO VOLUMEN  
DE VIBRADO

DISEÑADO PARA LARGAS JORNADAS DE  
TRABAJO



## ANEXO 6

### Especificaciones técnicas Vibrador externo AR 34 | Wacker Neuson

	AR34/6/042*	AR34/6/250*
Oscilaciones 1/min	6.000	6.000
Frecuencia Hz	200	200
Fuerza centrífuga estándar kN	6,98	6,98
Fuerza centrífuga máx. kN	6,98	6,98
Tensión nominal 3~ V	42	250
Corriente nominal A	9	1,7
Potencia del motor kW	0,4	0,4
L x A x H mm	244 x 151 x 134	244 x 151 x 134
Peso kg	5,9	5,9
Fijación	120 x 120 mm	120 x 120 mm

MCMXVII



## ANEXO 7

Especificaciones técnicas Generador de Vapor Modelo AB | Servitec





# Generador de Vapor Modelo AB



## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

PRODUCCIÓN DE VAPOR (Kg/h)	50	100
POTENCIA (Kcal/h)	29000	65000
(kW)	33,7	75,6
PRESIÓN DE TRABAJO (Bar)	5,5	5,5
(DN)	1/2"	1/2"
CONSUMO MÁXIMO GAS NATURAL (Mc/h)	3,5	7
CONSUMO MÁXIMO GASOIL (Kg/h)	2,9	6,5

## DIMENSIONES

A (cm)	95	95
B (cm)	140	140
PLATAFORMA (cm)	60x75	60x75
CHIMENEA (cm)	14	14
PESO (Kg)	300	350

# Generador de Vapor Modelo AB

## VERSIÓN I.- (SIN TANQUE)

Generador de vapor compacto, de reducidas dimensiones, montado en plataforma de chapa de acero inoxidable. Tamaño total 60 x 75 cm. con una altura máxima de 140 cm.

Rápida puesta en marcha. Alto rendimiento (mínimo 92%). Cuatro pasos de humo, con pasaje de humos revestido en chapa de acero inoxidable.

Dado que la descarga está situada al fondo, permite una fácil limpieza del cuerpo de la caldera.

Completo con grifería, sondas de control de nivel, bomba de agua eléctrica monofásica o trifásica y panel de control electrónico.

## VERSIÓN II.- (CON TANQUE)

Todo lo incluido en la Versión I, además de **tanque de alimentación y tanque de recuperación de condensados en acero inoxidable**, que incluye grifería, electroválvula, termómetro y termostato.

## VERSIÓN III.- (INOX)

Todo lo incluido en la Versión II (tanque de alimentación y tanque de recuperación de condensados en acero inoxidable), además de toda la **grifería y accesorios en acero inoxidable**.

Accesorios opcionales:

*Kit de Humos*

*Kit de Escape Automático*

*Kit de Potencia y Apagado Automático*

*Bomba de agua eléctrica para alta temperatura*