

Alternativas Metodológicas para Levantamiento de Datos de Huella de Carbono

**INFORME TÉCNICO ESTADO DEL ARTE NACIONAL E
INTERNACIONAL**

Sobre este informe

Autores: Pia Wiche Latorre (EcoEd), Bárbara Rodríguez Droguett (Universidad de Chile) y Danilo Bianchi Granato (EcoEd).

Revisores: (por orden alfabético de la afiliación)

Gabriela Sabadini, Chile Green Building Council
María Fernanda Aguirre, Chile Green Building Council
Paula Hevia, Chile Green Building Council
Daniel Menares, Ministerio de Energía
Paola Valencia Marticorena, Ministerio de Vivienda y Urbanismo

Este informe fue producido en el marco de la licitación “Estado del arte nacional e internacional de alternativas metodológicas para levantamiento de datos, monitoreo, reporte y verificación y calculadoras de Huella de Carbono” y fue publicado en febrero de 2020.

Cómo citar este archivo:

Wiche, P., Rodríguez, B., Granato, D. Alternativas Metodológicas para Levantamiento de Datos de Huella de Carbono. Publicado por Instituto de la Construcción, 2020. Santiago, Chile.

Notas sobre derechos de autor y marca registrada:

LEED®, CES®, EDGE®, DGNB®, BREEAM®, Passivhaus®, WELL®, The International EPD®, System, UL® Environment, Mexicaniuh® son marcas registradas y de propiedad de sus respectivos dueños.

Los íconos usados en la Figura 7 fueron diseñados por Smashicons, Freepik, Good Ware, monkik, srip, mynamepong, Pause08 y Payungkead y obtenidos de www.flaticon.com.

Los trabajos citados son de propiedad de sus autores.

Contenidos

| | |
|---|----|
| Resumen ejecutivo | vi |
| 1 Introducción..... | 1 |
| 1.1 La Huella de Carbono en el Ciclo de Vida..... | 3 |
| 1.2 Alcance del Informe..... | 4 |
| 1.3 Tipos de aproximaciones metodológicas..... | 6 |
| 2 Metodología para la revisión literaria | 8 |
| 3 Revisión Bibliográfica Internacional | 9 |
| 3.1 Aproximaciones metodológicas..... | 9 |
| 3.2 Objetivo y Alcance..... | 18 |
| 3.3 Inventario..... | 24 |
| 3.4 Impacto..... | 31 |
| 3.5 Interpretación..... | 31 |
| 4 Revisión Bibliográfica Nacional | 34 |
| 4.1 Aproximaciones metodológicas..... | 34 |
| 4.2 Objetivo y alcance | 37 |
| 4.3 Inventario..... | 39 |
| 4.4 Impacto..... | 41 |
| 4.5 Interpretación..... | 41 |
| 5 Diagnóstico | 42 |
| 5.1 Identificar metodologías más aplicables a la realidad nacional | 42 |
| 5.2 Identificación de brechas..... | 42 |
| 5.3 Sector construido y renovaciones | 46 |
| Conclusión | 47 |
| Referencias | 50 |
| Anexo A: Resúmenes descriptivos de los instrumentos revisados..... | 57 |
| Anexo B: Lista de herramientas revisadas en este documento | 66 |
| Anexo C: Lista de reglas por categoría de productos de productos de la construcción | 67 |
| Anexo D: tabla comparativa para el alcance de herramientas analizadas en el informe..... | 70 |
| Anexo E: resumen de estándares internacionales relacionados a la huella de carbono de edificaciones | 71 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Ejemplos de efectos sistémico que las edificaciones tienen sobre el cambio climático..... | 2 |
| Tabla 2. Gases de efecto invernadero con mayor impacto neto sobre el forzamiento radiativo. (Elaboración propia en base a Figura 8.17 de [17])..... | 26 |
| Tabla 3. Herramientas chilenas para cuantificar la sustentabilidad en el sector construcción bajo enfoque de ciclo de vida..... | 36 |
| Tabla 4. Estándares base referenciados en los instrumentos con metodologías de huella de carbono para la edificación..... | 71 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Proporción de la Demanda Energética en Chile 2018, separado por usuario. (Elaboración propia a partir de Balance Energético Nacional 2018 [6])..... | 1 |
| Figura 2. Etapas del ciclo de vida de la construcción. Reproducción de gráfico en ISO 21930..... | 3 |
| Figura 3: Diagrama comparativo entre los elementos de un Análisis de Ciclo de Vida y de una Huella de Carbono..... | 6 |
| Figura 4: Ejemplo de relación entre instrumentos AECO..... | 7 |
| Figura 5: Diagrama de relación entre los conceptos de Análisis de Ciclo de Vida, Reglas por Categoría de Producto, Declaración Ambiental de Producto y Huella de Carbono..... | 10 |
| Figura 6. Relación entre diversas herramientas para la determinación de los impactos ambientales de productos y edificaciones..... | 12 |
| Figura 7: Representación gráfica de las etapas del ciclo de vida de la edificación..... | 15 |
| Figura 8: Diagrama de la relación entre los datos de actividad, factores de emisión, potencial de calentamiento global y la huella de carbono..... | 16 |
| Figura 9: Diagrama de flujo para construcción del Inventario de Carbono y Energía (ICE). Elaborado a partir de [46]..... | 18 |

Índice de Cuadros

| | |
|--|----|
| Cuadro 1: Ejemplo de cálculo de incertidumbre para "Zahorra artificial"..... | 33 |
|--|----|

Glosario

| Término | Definición |
|---|--|
| AEC | : Arquitectura, ingeniería y construcción |
| AECO | : Arquitectos, ingenieros, constructores y propietarios |
| Análisis de ciclo de vida | : Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas, y los impactos ambientales potenciales de un sistema de productos o producto durante su ciclo de vida (ISO 14044:2006) |
| Análisis del inventario del ciclo de vida | : Etapa de evaluación del ciclo de vida que implica recopilar y cuantificar las entradas y salidas de un sistema de producto o producto durante su ciclo de vida (ISO 14044:2006). |
| ICV | |
| Aspecto ambiental | : Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que puede interactuar con el medio ambiente (ISO 14001). |
| Carbono biogénico | : Carbón contenido en la a, material de origen biológico excluyendo el material incrustado en formaciones geológicas y material transformado en material fosilizado (ISO 14067:2018). |
| Categoría de impacto | : Clase que representa a el (los) asunto(s) o problemática(s) de interés para los cuales se puede asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida (ISO 14040:2006). |
| Ciclo de vida | : Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de productos o producto, desde la adquisición de materias primas o su generación a partir de recursos naturales, hasta su eliminación como residuo (ISO 14044:2006). |
| Criterio ambiental de producto | : Requerimientos ambientales que un producto debe cumplir con el objetivo de recibir una etiqueta ambiental (ISO 14024: 1999). |
| Datos primarios | : Valor cuantificado de un proceso o una actividad obtenido a partir de una medición directa o de un cálculo basado en mediciones directas (ISO 14064-1:2018). |
| Datos secundarios | : Datos obtenidos de fuentes diferentes a los datos primarios (ISO 14064-1:2018). |
| Declaración ambiental tipo III | : Declaración ambiental que proporciona datos ambientales cuantificados utilizando parámetros predeterminados y, cuando corresponda, información ambiental adicional (ISO 21930: 2007). |
| Declaración ambiental de producto, DAP | |
| Dióxido de carbono equivalente | : Unidad para comparar la fuerza de radiación de un gas de efecto invernadero con el dióxido de carbono (ISO 14067:2018). |
| CO₂ equivalente, CO₂eq | |
| Ecoetiqueta tipo I | : Programa voluntario, multicriterio y desarrollado por una tercera parte (ISO 14024: 1999). |
| Elemento constructivo | : Parte de una construcción que contiene una combinación definida de productos (NCh 3419). |

| Término | Definición |
|--|--|
| Energía primaria | : Es la energía que se encuentra en la naturaleza antes de ser sometida a procesos de transformación. Esta se encuentra en el carbón, el petróleo, el gas natural, la radiación solar, el agua embalsada o en movimiento, las mareas, el viento, el uranio, calor almacenado en la tierra (geotermia), etc. (Aprendo con Energía, 2020). |
| Enfoque de ciclo de vida | : Forma de actuar que reconoce la manera en que las propias elecciones influyen en cada etapa del proceso, sopesando las ventajas y desventajas sobre la economía, el medio ambiente y la sociedad [1] |
| Evaluación de impacto del ciclo de vida, EICV o análisis de impacto | : Etapa de evaluación del ciclo de vida dirigida a comprender y evaluar la magnitud e importancia de los potenciales impactos ambientales sistema de producto o producto a lo largo de su ciclo de vida (ISO 14044:2006) |
| Factor de emisión | : Coeficiente que relaciona los datos de actividad con la emisión de GEI (ISO 14067). Por ejemplo: Kg de CO ₂ / tonelada de cemento; kg de CH ₄ / Tonelada-kilómetro de camión. |
| Funcionalidad | : característica de idoneidad o utilidad para un objetivo o actividad específicos (ISO 21930: 2007). |
| Gas de efecto invernadero (GEI) | : componente gaseoso de la atmósfera, tanto natural como antropogénico, que absorbe y emite radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes (ISO 14067:2018). |
| Huella de Carbono | : La huella de carbono es la cantidad de gases efecto invernadero – GEI emitidos a la atmósfera por emanación directa o indirecta de un individuo, organización, evento o producto (adaptado de ISO 14067). |
| Huella de carbono organizacional o corporativa | : potencial de calentamiento global de la suma de gases efecto invernadero (GEI) emitidos directa o indirectamente por una organización (adaptado de ISO 14064-1). |
| Huella de carbono de producto | : Suma de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y remociones de GEI en un sistema producto, expresadas como CO ₂ equivalente y basadas en una evaluación del ciclo de vida utilizando la categoría de impacto única de cambio climático (ISO 14067:2018). |
| Inventario de ciclo de vida (ICV) | : Recopilación de las entradas y salidas desde un sistema de producto (adaptado de <i>Análisis del Inventario de Ciclo de Vida</i> en ISO 14044). |
| Inventario de gases de efecto invernadero | : Lista de fuentes y sumideros de GEI y sus emisiones y remociones de GEI cuantificadas (ISO 14064-1:2018). |

| Término | Definición |
|--|--|
| Límites del sistema | : Límite basado en un conjunto de criterios que especifican cuales de los procesos unitarios son parte del sistema en estudio (ISO 14044:2006). |
| Módulo de información | Recopilación de datos utilizada como base para la declaración ambiental tipo III que abarca un proceso unitario o una combinación de procesos unitarios que forman parte del ciclo de vida de un producto (ISO 21930: 2007). |
| Multicriterio | : Que toma en consideración múltiples variables para la evaluación (ISO 14024:1999). |
| Potencial de calentamiento global (PCG o GWP) | : Indicador que mide cuánta energía absorberán las emisiones de 1 ton de gas de efecto invernadero durante un período de tiempo determinado, en relación con las emisiones de 1 ton de dióxido de carbono (CO ₂). Es un indicador creado para comparar el potencial de calentamiento global de distintos gases [2]. |
| | Índice, basado en las propiedades radiativas de los GEI, que mide el forzamiento radiativo después de una emisión de pulso de una unidad de masa de un GEI dado en la atmósfera actual integrado en un horizonte temporal elegido, relativo al del dióxido de carbono (CO ₂) (ISO 14067:2018). |
| Producto de construcción | : Bienes o servicios utilizados durante el ciclo de vida de una construcción (ISO 21930: 2007). |
| Procesos Unitarios | : elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida (ISO 14040:2006). |
| Puerta | : Punto en que el producto o material de sale de la fábrica antes de convertirse en una entrada para un proceso de fabricación posterior o antes que vaya al distribuidor, a otra fábrica o a la obra de construcción (ISO 21930: 2019). |
| Regla por categoría de productos (RCP) | : conjunto de reglas, requisitos y guías específicas para el desarrollo de las declaraciones ambientales tipo III para una o más categorías de producto (ISO 21930: 2007). |
| Sistemas de Certificación de edificios SCE | : También conocidos como esquema de evaluación de impacto(s) de la edificación, se utilizan para evaluar y reconocer edificios que cumplen con ciertos requisitos o estándares de sostenibilidad. Generalmente incluye un programa, un esquema de certificación, guía de referencia y plataforma de apoyo a la certificación (WorldGBC, 2018). |
| Sistema producto | : conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas, y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto (ISO 14067:2018). |

| Término | Definición |
|--------------------------------|--|
| Sitio de construcción | : área determinada del terreno donde se encuentra una construcción o donde se define que se encuentra, y donde se realizan o se llevarán a cabo la(s) obra(s) de construcción y las obras externas asociadas (NCh 3419:2017). |
| Unidad declarada | : cantidad de un producto de construcción que se usa como unidad de referencia en una DAP basada en el ACV, para expresar la información ambiental necesaria para los módulos de información (ISO 21930: 2007). |
| Unidad funcional | : desempeño cuantificado de un sistema de producto para un producto de construcción que se utiliza como unidad de referencia en una DAP basada en el ACV (ISO 21930: 2007). |
| Vida Útil | : Período de tiempo posterior a la instalación durante el cual la construcción o partes de ella, cumplen su función (NCh 3419:2017). |
| Vida útil de referencia | : Periodo de tiempo conocido o esperado de la vida útil de un producto de construcción bajo un conjunto en particular (es decir, un conjunto de referencia) de condiciones de uso, y que pueda formar parte de la estimación de la vida útil bajo otras condiciones de uso. (NCh3423). |

Resumen ejecutivo

Este primer informe de la serie Estado del arte nacional e internacional de alternativas metodológicas para levantamiento de datos, monitoreo, reporte y verificación y calculadoras de Huella de Carbono se enfoca en las metodologías de levantamiento de datos y los efectos que herramientas complementarias tienen sobre ellas dentro del contexto de la producción de una calculadora de huella de carbono y un sistema de certificación para la edificación.

El contexto actual de cambio climático exige esfuerzos en todas las industrias para reducir la huella de carbono de su actividad. Se estima que la construcción aporte cerca del 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero asociados a la producción de energía, pero a pesar de su importancia, la información nacional e internacional sobre sus reales impactos es limitada.

Un conjunto de estándares internacionales, muchos de los cuales han sido adoptados en Chile, establecen un marco de acción para la producción de huellas de carbono en el ciclo de vida completo de la edificación, pero aún permanecen desafíos para lograrlo. Algunos de estos desafíos son la falta de datos de base, el alto costo de realizar la medición (por capacidad humana y el valor de las bases de datos de referencia) y la desconexión de los actores involucrados en cada etapa del ciclo de vida de la construcción.

Existen ejemplos regionales que han resuelto algunos de estos desafíos, como las bases de datos Mexicaniuh (México) y SICV (Brasil), pero su alcance es aún limitado. En la corta historia de Chile en este campo se cuenta también con una primera aproximación con ECOBASE Construcción.

Asimismo, la selección del procedimiento para el levantamiento de datos depende de una serie de decisiones metodológicas, entre las cuales la de mayor nivel es el objetivo de la herramienta que se desea construir. Por un lado, se puede analizar de decisiones de diseño para orientar una edificación de menor intensidad de carbono; por el otro está certificar el desempeño de la edificación, en cuyo caso se puede utilizar reglas por categoría de producto ya existentes para definir los aspectos metodológicos y calidad de los datos a recoger. Cada uno de estos objetivos requiere datos de distinta calidad y procedencia, lo que no los hace mutuamente excluyentes, pero sí varía los costos de la producción de la huella.

Otros aspectos metodológicos, como la definición de la unidad funcional, ya han sido resueltos en el exterior a través de taxonomías de unidad funcional, que podrían ser relevantes en este ejercicio a nivel nacional.

En general se observa que Chile ya cuenta con los estándares de base, reglas por categoría de productos y fuentes de datos primarias o secundarias para levantar los datos del ciclo de vida completo de la edificación, así como los factores de emisión y modelos de impacto para calcular la huella de carbono.

1 Introducción

Las ciudades ocupan solo el 3% de la superficie del planeta, pero representan el 75% de las emisiones de carbono y consumen entre el 60 y 80% de la energía [3].

Se estima que el 36% del uso de energía primaria en el mundo y casi el 40% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) estuvieron asociadas al sector edificación durante el 2018 [4]. De estas emisiones aproximadamente el 50% proviene de la operación de edificaciones [4], [5] y un 15% de la producción de sólo dos productos de construcción: cemento y acero [5]. Debido a esto es que la descarbonización de este sector es una de las estrategias más costo-efectivas de mitigar emisiones [6]. En Chile, el 22% de la energía total consumida se utiliza en la operación de edificaciones, tal como se muestra en la Figura 1 [7].

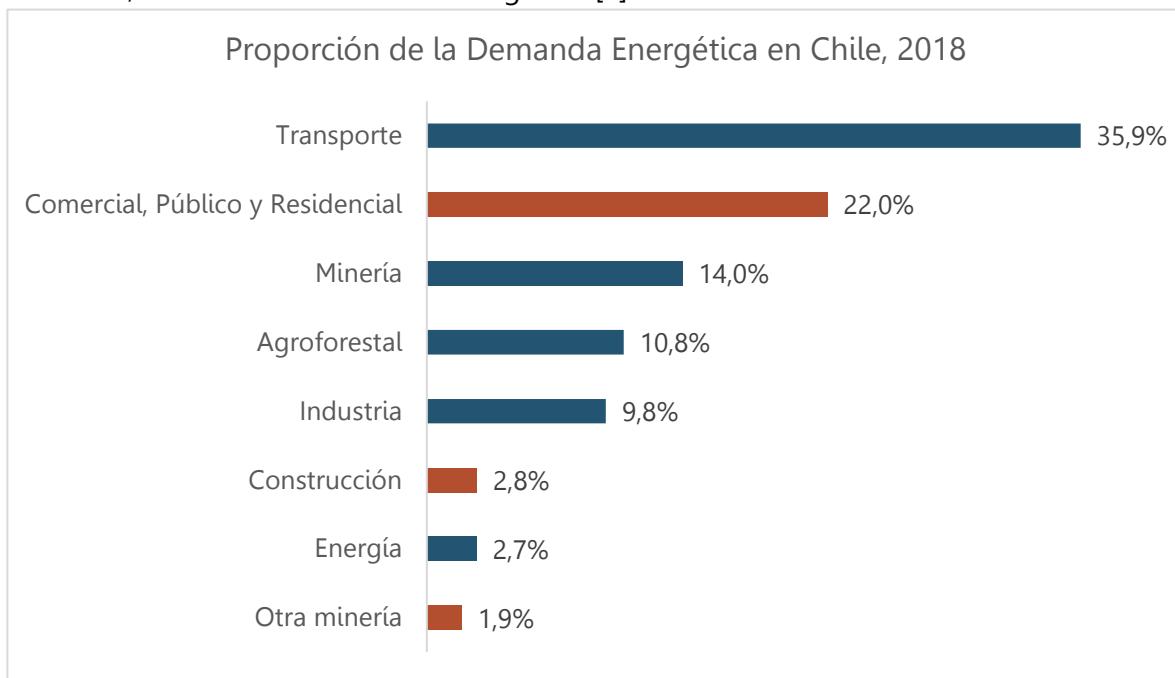


Figura 1. Proporción de la Demanda Energética en Chile 2018, separado por usuario. (Elaboración propia a partir de Balance Energético Nacional 2018 [7]).

El impacto de la edificación ha sido recogido en 136 contribuciones nacionalmente determinadas (NDC) alrededor del mundo [4]. En Chile, el sector de la construcción se cuantifica de forma agregada con el de manufactura dentro del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, constituyendo conjuntamente el 18,7% de la huella de carbono asociada a energía [8].

La mayor cantidad de los datos de huella de carbono asociada a la construcción se toman desde el consumo energético de las edificaciones, reflejando solo el carbono operacional. Actualmente se desconoce la total magnitud del impacto asociado al carbono incorporado de los productos de construcción en otras etapas del ciclo de vida de las edificaciones, producto de la extracción de materiales, su transporte hasta el lugar de edificación, el proceso de construcción y el fin de vida de la obra, incluyendo los impactos de los materiales de construcción importados al país.

Históricamente se ha indicado que dentro del ciclo de vida de la edificación las emisiones durante la operación producto de calefacción, refrigeración y otros usos son mucho mayores a las del carbono incorporado. Sin embargo en años recientes, se observa que las emisiones incorporadas han comenzado a dominar producto de las mejores en eficiencia energética durante la operación a nivel global [9]. Se espera que el carbono incorporado inicial represente el 50% de la huella de carbono de toda la edificación nueva de aquí al 2050 [6].

Por la normativa de construcción chilena, dependiendo de su tipo, la edificación incluye infraestructura de soporte y habilitación del espacio. Desde la perspectiva del Análisis de Ciclo de Vida de Productos, esta infraestructura de soporte podría ser llamada un "coproducto": no necesariamente servirá a la función principal de la edificación, pero es un resultado natural de su construcción. Algunos ejemplos son: calzadas, alumbrado público y calles o la urbanización de terrenos previamente rurales.

Las edificaciones en conjunto tienen también impactos sistémicos sobre el cambio climático por su diseño, localización y uso. Estos impactos son más acentuados en lugares con alta densidad de edificación. En Chile ya se ha alcanzado densidades de 1.000 viviendas por hectárea [10]. Algunos ejemplos de los potenciales impactos sistémicos sobre la adaptación y mitigación del cambio climático generadas por la densificación son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Ejemplos de efectos sistémico que las edificaciones tienen sobre el cambio climático.

| | Actividad | Efecto sobre el cambio climático |
|-------------------|------------------|---|
| Mitigación | Mayor congestión | La reducción de la velocidad aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero de vehículos |
| | Bombeo de agua | Se requiere más energía para mantener presurizada la red de agua potable |
| | Climatización | Se consume más energía para climatizar espacios y hay mayor escape de gases refrigerantes a la atmósfera. |
| Adaptación | Islas de calor | La proximidad entre edificaciones reduce la circulación de aire, creando islas de calor que a su vez aumentan el requerimiento de energía para climatización. |

Es decir, los impactos de la edificación no están solo supeditados a su estructura y uso, sino al impacto sistémico que tienen sobre el funcionamiento de una ciudad.

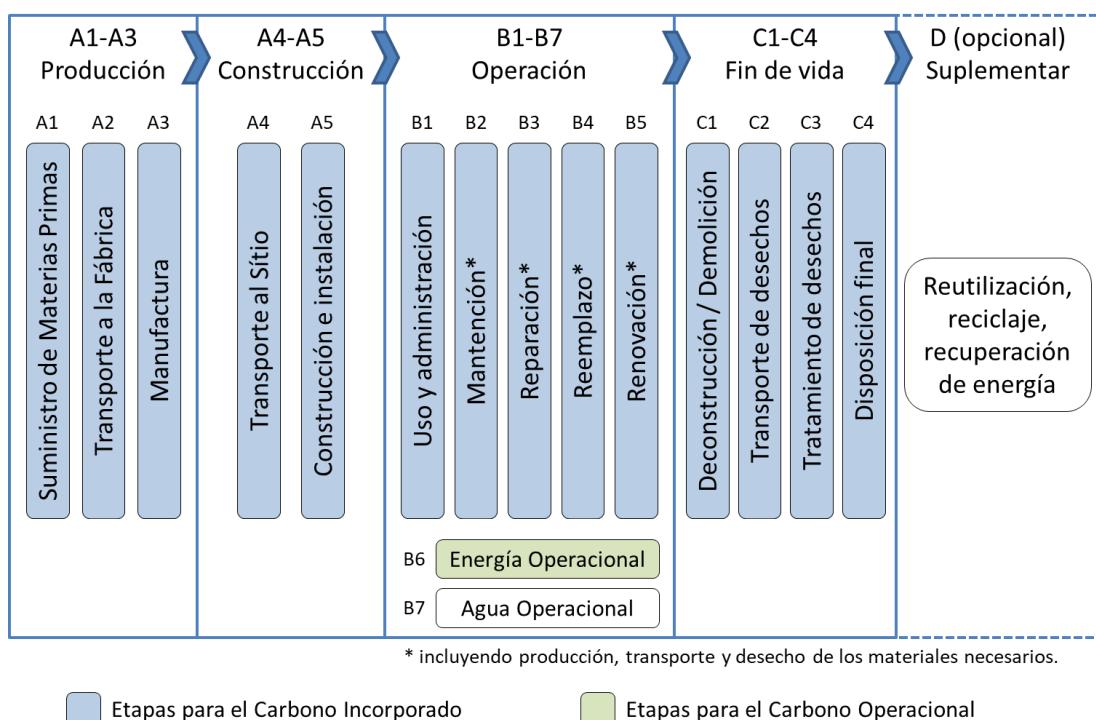
Por otra parte, las edificaciones constituyen artefactos de extensa duración lo que conlleva un impacto significativo a lo largo de su ciclo de vida. Se ha demostrado, por ejemplo, que la renovación reiterada de los sistemas de climatización y de la habilitación interior de una oficina con un ciclo de vida de 60 años conlleva cuatro ciclos de desecho y de reinstalación de productos de construcción. Estas renovaciones resultan en una huella de carbono igual o mayor a la del sistema estructural del edificio [11].

Al mismo tiempo, Chile se ha comprometido a alcanzar la carbono neutralidad al año 2050 y llegar a un peak de emisiones el año 2027 en el marco del Acuerdo de París [12], aunque aún no ha incluido metas específicas para el sector construcción.

Considerando las proyecciones de población e inmigración al país, sumado al aumento de la capacidad adquisitiva de la población, se puede prever un aumento relevante de las ciudades y las edificaciones. Ello plantea un desafío relevante para la reducción de emisiones en un sector tan influyente para las metas nacionales de carbono.

1.1 La Huella de Carbono en el Ciclo de Vida

El *ciclo de vida* de un producto es el conjunto de etapas consecutivas e interconectadas que comienzan con la extracción de las materias primas para producirlo y terminan en el fin de vida útil del producto [13]. Para una edificación, el ciclo de vida empieza con la extracción de arena, ripio, agua y otros materiales, y finaliza con la demolición de la obra y el desecho de los residuos. Para la construcción se ha estandarizado las etapas y sus actividades [14], [15] como se muestra en la Figura 2.



Se reconocen entonces dos fuentes principales de carbono dentro del ciclo de vida de un edificio:

1. **Carbono incorporado:** Emisiones de carbono asociadas a materiales y procesos de construcción en todo el ciclo de vida de un edificio o infraestructura. Se divide comúnmente en carbono incorporado en etapa inicial o de producto, carbono de etapa de funcionamiento y carbono de etapas finales [16]. Ejemplos de fuentes de carbono

incorporado son los productos de construcción iniciales y los utilizados en rehabilitaciones como ventanas y revestimientos, entre otros. El carbono en etapa inicial o de producto es responsable de entre un 35 a 50% de las emisiones totales, dependiendo del uso de la edificación, aproximadamente [4], [17].

2. **Carbono operacional:** es el carbono asociado al uso de energía durante la operación del edificio. Se piensa que el carbono operacional puede llegar a representar el 60% del impacto sobre el cambio climático durante la vida del edificio, estimada en 60 años [4].

Todas estas etapas están orientadas por el diseño de la edificación, que determina su tamaño, materialidad, eficiencia energética, entre otras. Por eso es relevante prestar apoyo para el diseño de edificaciones menos intensivas en carbono desde su diseño.

1.2 Alcance del Informe

La mayoría de las aproximaciones metodológicas a la medición de la huella de carbono del ciclo de vida de las edificaciones y de los productos han sido iniciativas surgidas desde la academia y adoptadas por el sector de productos y edificaciones a través de sistemas de certificación.

Estos sistemas de certificación tienen orígenes públicos o privados, pero coinciden en sus principales metas, lograr el diseño y la operación de edificios menos intensivos en carbono (reflejado usualmente como menos intensivos en energía).

El sector público no se ha visto demasiado involucrado en la determinación de los grandes marcos metodológicos (que vienen de la academia), pero sí ha participado activamente en la implementación, difusión y masificación.

El alcance de este informe es metodologías de levantamiento de datos, por lo que los contenidos desarrollados no están relacionados a los niveles sectorial, edificación y producto, sino más bien a las metodologías de base para lograr el levantamiento de datos para la huella de carbono en el ciclo de vida de la edificación y de los productos de construcción.

El ciclo de vida de la edificación genera múltiples impactos ambientales, sobre el cambio climático, la disponibilidad de agua, la salud de las personas e incluso la toxicidad de los ecosistemas, debido a sus múltiples residuos durante la extracción de materias primas, construcción uso o fin de vida.

Para conocer estos impactos ambientales diversos se puede utilizar distintas metodologías de impacto ambiental. Éstas se diferencian según el tipo de actividades que miden, las partes del ciclo de vida incluidas y los impactos que son considerados.

La **Huella de Carbono**, por ejemplo, mide solamente una categoría de impacto: el potencial de calentamiento global. Este impacto es causado por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Los más comunes son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los gases refrigerantes, pero hay muchos otros gases con un potencial de calentamiento global significativo [18]. Esta es la metodología que se considerará en el resto de este informe y que responde a la necesidad de reducir el impacto de la construcción sobre el Cambio Climático.

Otra metodología mucho más amplia que la huella de carbono es el análisis de ciclo de vida (ACV), cuyos estándares ISO 14040 e ISO 14044 se han transformado en las principales referencias a la hora de establecer metodologías de ciclo de vida para cualquier sector productivo.

Un ACV entrega resultados sobre múltiples impactos ambientales, como toxicidad humana, potencial de acidificación, escasez de recursos y también potencial de calentamiento global. En consecuencia, el análisis de ciclo de vida requiere datos sobre los gases de efecto invernadero bien como muchos otros elementos diferentes, como los productos químicos que se vierten al agua, los residuos inertes, entre otros [13]. En otras palabras, una base de datos para análisis de ciclo de vida requiere mucha más información que una para huella de carbono, porque entrega información sobre más tipos de impacto.

La mayoría de los instrumentos revisados en este estudio tales como Sistemas de Certificación de Edificaciones (SCE), guías de diseño, estándares y bases de datos para el sector construcción sigue el marco metodológico de ACV descrito en estándares tradicionales tales como familia ISO 14040s, ISO 21930 y los europeos EN 15978 y EN 15804. Los dos últimos específicos para Análisis de Ciclo de Vida de Edificaciones (ACVE). Estos distintos estándares permiten abordar los pasos metodológicos de: alcance y objetivo, inventario, impacto e interpretación bajo un enfoque de ciclo de vida completo de la edificación, entregando información sobre varios tipos de impactos ambientales potenciales. Si bien ACV lleva "ciclo de vida" en su nombre, no es la única que entrega resultados sobre él. La huella de carbono también puede entregar resultados en cada una de las etapas del ciclo de vida de la edificación.

La huella de carbono también considera los pasos metodológicos de alcance y objetivo, inventario, análisis de impacto y mitigación en todo el ciclo de vida, pero apenas entregando información sobre la contribución al cambio climático. En resumen, una huella de carbono puede ser vista como un ACV con una única categoría de impacto: potencial de calentamiento global.

Existen varios tipos de metodologías para la huella de carbono, que definen cuáles actividades se consideran para determinar el impacto sobre el cambio climático. Las dos más conocidas son la huella de carbono corporativa y la huella de carbono de producto.

La **huella de carbono corporativa** es una metodología diseñada para comprender cómo las corporaciones influencian el cambio climático. En ella, se define qué actividades se incluirán en el cálculo dependiendo de quién es su dueño. Así, si un holding desea calcular su huella de carbono, debe considerar las huellas de carbono de todas sus subsidiarias. Para ello se usan normalmente los estándares GHG Protocol o ISO 14064, éste último adoptado como norma chilena. Adicionalmente, puede ser calculada a través del programa Huella Chile [19].

La huella de carbono corporativa es diferente de la huella de carbono de productos. A nivel de edificación la huella corporativa suele considerar datos sobre el consumo de energía operacional, pero no del carbono incorporado, salvo excepciones. A nivel sectorial se usa para políticas públicas de reducción del carbono en organizaciones, como es el caso del programa Huella Chile.

La huella de carbono de producto es una metodología que permite visualizar cómo un producto afecta el cambio climático. Para realizarlo, se incluyen todas las actividades que están relacionadas a la producción, uso y desecho de ese producto en particular. Si una empresa constructora desea calcular la huella de carbono de uno de sus edificios, debe incluir solo aquellas actividades que se relacionaron con la construcción de ese edificio, y no de los otros proyectos de su portafolio. En Chile la norma asociada a la huella de carbono de producto es la NCh-ISO 14067. Sin embargo, a nivel mundial existen otros estándares para la huella de carbono de productos, como PAS 2050 y el estándar de productos del GHG Protocol.

El estándar para huella de carbono de producto también puede utilizarse para servicios. De esa forma, se puede calcular la huella de carbono de un edificio y la huella de carbono del servicio de limpieza de vidrios en altura con el mismo estándar. Asimismo, se puede calcular la huella de carbono de un proyecto dentro de la edificación, como por ejemplo una renovación o remodelación. En este informe se considerará que un “producto” puede ser la edificación, un proyecto dentro de ella o un servicio, consistente con la definición de producto de la ISO 14067.

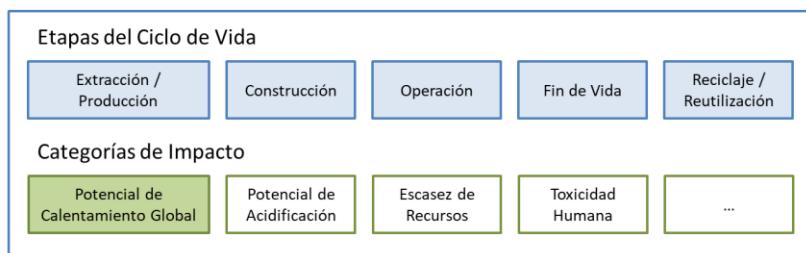
En resumen, en el presente informe, la edificación será considerada como un producto y nos enfocaremos en la medición del potencial de calentamiento global en todo su ciclo de vida. Por lo tanto, una *Huella de Carbono de Producto* en que el producto es una edificación, proyecto de renovación o un servicio asociado.

1.3 Tipos de aproximaciones metodológicas

La huella de carbono en edificación se obtiene como parte del análisis del ciclo de vida (ACV), uno de los métodos más integrales de asistencia al diseño de edificios de alto rendimiento [20].

Una barrera crítica para estimar el carbono incorporado en edificios es la variación en la aplicación de la metodología de ACV en distintos países y casos de estudio, que difieren en las características de cada edificio y los criterios de cada análisis [21], [22]. Las decisiones tomadas durante el ACV, tales como elección de unidad funcional, límites del sistema, datos de inventario, elección del método de evaluación de impacto, etc., influencian fuertemente los resultados finales [23], [24].

Análisis de Ciclo de Vida



Huella de Carbono



Figura 3: Diagrama comparativo entre los elementos de un Análisis de Ciclo de Vida y una Huella de Carbono.

Otro ejercicio complejo practicado por expertos [25], la incorporación del ACV a sistemas de certificación de la sustentabilidad en edificios ha gatillado la aparición de herramientas de análisis simplificado para su uso masivo en la industria, como:

- **Herramientas de asistencia al diseño (Tools):** guías de diseño, estándares prescriptivos y especificaciones, así como también aproximaciones metodológicas basadas en rendimiento (*performance based*); software de cálculo que permiten utilizar datos constructivos para calcular los gases de efecto invernadero totales; guías para acompañar la implementación de metodologías en cualquiera de los otros instrumentos descritos.
- **Bases de Datos (Data):** presentan el consumo de materiales y energía para productos y sistemas constructivos. Existen bases de datos con diferentes alcances de información y procesos de aseguramiento de calidad.
- **Certificaciones de sustentabilidad de edificios (SCEs o GBRS por sus siglas en inglés):** Los SCE incluyen un programa (normalmente con múltiples organizaciones), un esquema de certificación multicriterio (con requisitos que contribuyen a reducir el impacto de la edificación) y guía de referencia (que explica categorías y criterios con indicadores). Destacan LEED, EDGE, DGNB, BREEAM y CES para Chile.
- **Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) o ecoetiquetas tipo III:** se logran con la revisión crítica o verificación de tercera parte a un ACV. Destacan programas internacionales como The Institut Bauen und Umwelt e.V (IBU), The International EPD System y UL Environment.

Es importante notar que la clasificación de estos instrumentos y sus respectivas aproximaciones metodológicas en las categorías antes descritas no es siempre definitiva. Dentro del sector AECO, la mayoría de estos instrumentos se encuentra integrado uno al otro y por lo tanto comparten aproximaciones metodológicas entre sí. Además de eso, los instrumentos tienden a ser parte de un paquete de solución con sistema de certificación, guía metodológica, base de datos y software.

Por ejemplo, la guía para la medición del carbono a lo largo de ciclo de vida de la *Royal Institution of Chartered Surveyors* (RICS), obligatoria para todos los cubicadores profesionales en Reino Unido, se basa en el estándar europeo EN 15978:2011 [17], que a su vez es parte de la familia de estándares europeos EN 15643 [14]. Dicha guía obligatoria además sirve de referencia para la construcción de la base de datos de carbono en edificación RICS y se utiliza en complemento al sistema de certificación de edificación BREEAM en el Reino Unido. Asimismo, BREEAM, recomienda One Click LCA como el software mejor evaluado. Esta relación esta ejemplificada en la ver Figura 4..



Figura 4: Ejemplo de relación entre instrumentos AECO

2 Metodología para la revisión literaria

Se analiza el alcance de distintas *aproximaciones metodológicas* al cálculo de huella de carbono en la edificación en cada una de las subetapas del ciclo de vida completo de la edificación según [15], [26], [27] y en los pasos de un estudio de huella de carbono, descritos a continuación [28]:

1. **Definición de objetivo y alcance:** incluye el objetivo y las razones para llevar a cabo el estudio. El alcance especifica funciones, flujo de referencia, límites del sistema, procedimientos de asignación, requisitos de datos y limitaciones;
2. **Inventario de ciclo de vida:** etapa para la recolección, compilación y cuantificación de las entradas (por ejemplo, insumos o materias primas) y salidas. Por ejemplo, emisiones, o coproductos del ciclo de vida del producto en estudio.
3. **Evaluación del impacto:** Cálculo de los impactos ambientales potenciales asociados al inventario de ciclo de vida de un producto.
4. **Interpretación:** Los resultados de inventario e impactos se interpretan y mejoran para presentar información significativa para tomadores de decisiones.

Este estado del arte se estructura alrededor de estas cuatro etapas, ya que cambios en cualquiera de ellas pueden afectar la metodología de levantamiento de datos de huella de carbono. Esta forma de revisión ha sido utilizada anteriormente [25], [26].

Las *aproximaciones metodológicas* se clasifican como (i) herramienta, (ii) base de datos, (iii) sistema de certificación de edificios (SCEs) o (iv) regla por categoría de productos (RCP) provenientes de un programa de Declaración Ambiental de Productos (DAP). Luego se analizan según la indicación, ausencia u omisión de cada paso metodológico en las diversas aproximaciones se registra según la siguiente nomenclatura:

| | | | | | | | |
|---|-----------|---|----------|---|--------------------------------|---|-------------|
|  | Requerido |  | Opcional |  | Explícitamente no requerido |  | No menciona |
|---|-----------|---|----------|---|--------------------------------|---|-------------|

Los resultados se expresan en una matriz comparativa que se incluye en el Anexo D, un archivo separado de este documento.

3 Revisión Bibliográfica Internacional

3.1 Aproximaciones metodológicas

3.1.1 Estándares

A nivel internacional existen múltiples estándares y herramientas asociadas a la cuantificación de huella de carbono en la construcción. Muchos de ellos son más amplios, dedicados a las declaraciones ambientales de producto. Para comprender la relación entre los estándares y la huella de carbono de la edificación se revisarán algunas definiciones clave, las que también se incluyen en el glosario.

3.1.1.1 Definiciones clave

3.1.1.1.1 Huella de carbono de producto

Suma de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y remociones de GEI en un sistema producto, expresadas como CO₂ equivalente y basadas en un análisis de ciclo de vida utilizando únicamente la categoría de impacto de cambio climático [28].

3.1.1.1.2 Análisis de ciclo de vida

Estudio para comprender los impactos ambientales durante todo el ciclo de vida de un producto. El ACV entrega resultados sobre varias categorías de impacto, una de las cuales es cambio climático. Se puede decir de forma práctica que un ACV “contiene” la huella de carbono del producto analizado [13].

3.1.1.1.3 Declaración ambiental de producto (DAP)

Manifestación que indica los aspectos ambientales de un producto o servicio que proporciona datos ambientales cuantificados utilizando parámetros predeterminados [15].

Estos parámetros predeterminados están definidos en la metodología de análisis de ciclo de vida en las normas ISO 14040 y ISO 14044.

La norma ISO considera que una DAP es lo mismo que una declaración ambiental tipo III.

Son estándares de declaración ambiental de productos de la construcción la ISO 21930 (la versión de 2007 disponible como traducción modificada NCh 3423) y EN 15804. El estándar general para declaraciones ambientales de productos es la ISO 14025.

3.1.1.1.4 Regla por categoría de producto (RCP)

Un conjunto de reglas, requerimientos y guías para desarrollar declaraciones ambientales tipo III (DAP) y comunicación de huella para una o más categorías de producto [15], [29].

Una RCP utiliza los conceptos de ciclo de vida y es la base para definir una DAP o el cálculo de una huella de carbono. Esta relación está ilustrada en la Figura 5.

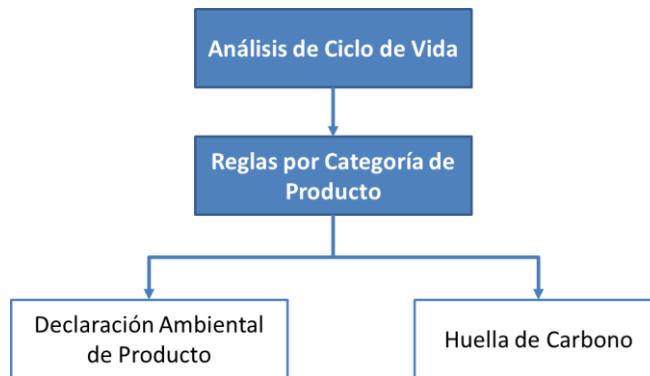


Figura 5: Diagrama de relación entre los conceptos de Análisis de Ciclo de Vida, Reglas por Categoría de Producto, Declaración Ambiental de Producto y Huella de Carbono.

En términos prácticos, la RCP es un documento que especifica la metodología para realizar un análisis de ciclo de vida, de forma que todos estudios que se realicen sobre productos dentro de una misma categoría (productos con la misma función) tengan metodologías similares y, por lo tanto, puedan compararse. Se puede decir que la regla por categoría de producto es una metodología para el levantamiento de datos de ciclo de vida de productos, entre los cuales se cuentan las edificaciones.

Un aspecto clave de una RCP es que identifica cuáles son los procesos del ciclo de vida que deben incluirse en el estudio y también los impactos ambientales que deben reportarse. Estos dos aspectos, además de cuidar la comparabilidad, aseguran que los estudios reportarán todas las etapas importantes o impactantes del ciclo de vida de los productos y así evitan cualquier omisión que pudiera dar una ventaja aparente a un producto sobre otro.

Entre los impactos ambientales que siempre son exigidos está el Cambio Climático, por lo que una regla por categoría de producto también puede servir para orientar una Huella de Carbono (Figura 5). En el Anexo C se puede encontrar varias reglas por categoría de producto apropiadas para edificaciones que pueden ser utilizadas para la producción de huellas de carbono.

El estándar RCP “base” para productos de la construcción es el EN 15804.

3.1.1.2 Aplicación

Actualmente los estándares más populares para la medición de impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de la industria de la construcción son la ISO 21930:2017, los europeos EN 15978:2011 y EN 15804:2012+A2:2019, y el norteamericano ASTM E2921-16.

Todos estos estándares están basados en análisis de ciclo de vida, definido en la familia de normas ISO 14040 (ver Figura 6), y tienden a la producción de declaraciones ambientales. Asimismo, casi todos los estándares, a excepción de ASTM, comparten la segmentación de las etapas del ciclo de vida de la edificación mostrada en la Figura 2 (página 3).

Desde el lado de las normas ambientales, el estándar ISO 14067:2018 para Huella de Carbono de Productos, también basado en la ISO 14040, entrega la metodología para el cálculo de huella de

carbono en productos de cualquier industria. Al igual que los estándares para declaración ambiental de productos, éste se apoya sobre las reglas por categoría de productos.

El estándar europeo EN 15978 es considerado el más completo para la medición de carbono incorporado y medición del impacto a lo largo del ciclo de vida en edificación e infraestructura, motivo por el cual ha sido adoptado en casi todo el mundo [30]. Es parte de la familia de estándares EN 15000, que estipulan cómo medir la sustentabilidad social, ambiental y económica de los edificios de forma integral.

Uno de los aspectos relevantes del estándar EN 15978:2012 es la agrupación de las etapas del ciclo de vida de la edificación en cuatro módulos de información (A, B, C y D) con 16 subetapas, como se muestra en la Figura 2, página 3 (en contraste con la primera versión de la ISO 21930 que definía cuatro etapas con 14 subetapas). Con respecto a la energía operacional, se incluyen dentro de la etapa B6 los sistemas de consumo de energía típicos en la edificación, pero se excluyen cargas internas como equipos eléctricos y otros. Actualmente se ha estandarizado los módulos de información de EN 15978 a ISO 21930 pero con nombres ligeramente diferentes, lo que causa confusión en algunos estudios.

La flexibilidad de este estándar deja espacios abiertos a la interpretación, lo que causa problemas de comparabilidad entre estudios [31], [32]. En consecuencia, la EN 15978 no constituye una "guía práctica" para la industria. Para dar un marco más estructurado a la norma, países y organizaciones hacen sus propias guías de interpretación como RICS en Inglaterra [33] o EBC por la Agencia Internacional de Energía [34].

Los estándares ISO 21930 y EN 15804 establecen reglas por categoría de producto 'base' para DAP de la construcción, cuyo fin es lograr la comparabilidad entre estudios diferentes. Esto ayuda a que los usuarios (consumidores, legisladores, entre otros) discriminen el desempeño ambiental de productos diferentes dentro de una misma categoría. Si bien logran el mismo objetivo, ambas presentan algunas diferencias.

El estándar ISO 21930:2017, es considerado actualmente uno de los métodos más completos para el cálculo de los distintos impactos de un producto a lo largo del ciclo de vida de la edificación [35] y es utilizado como referencia en la mayoría de las herramientas de cálculo de huella de carbono y ACV en arquitectura, ingeniería y construcción.

La norma ISO 21930 establece tanto los lineamientos para las declaraciones ambientales de producto (DAP) como las características de la PCR base para construcción. Está destinada tanto a proveedores de productos de construcción como a usuarios relacionados con el desempeño ambiental de productos de construcción y la comunidad AECO en general.

En un modelo diferente, las normas europeas dividen ambos temas. La norma EN 15804 proporciona una estructura base o conjunto de reglas básicas para garantizar que todas las DAP de los productos, servicios y procesos de construcción se obtienen, verifican y presentan de una forma armonizada, mientras que la norma EN 15978 establece las directrices para las DAP. Una

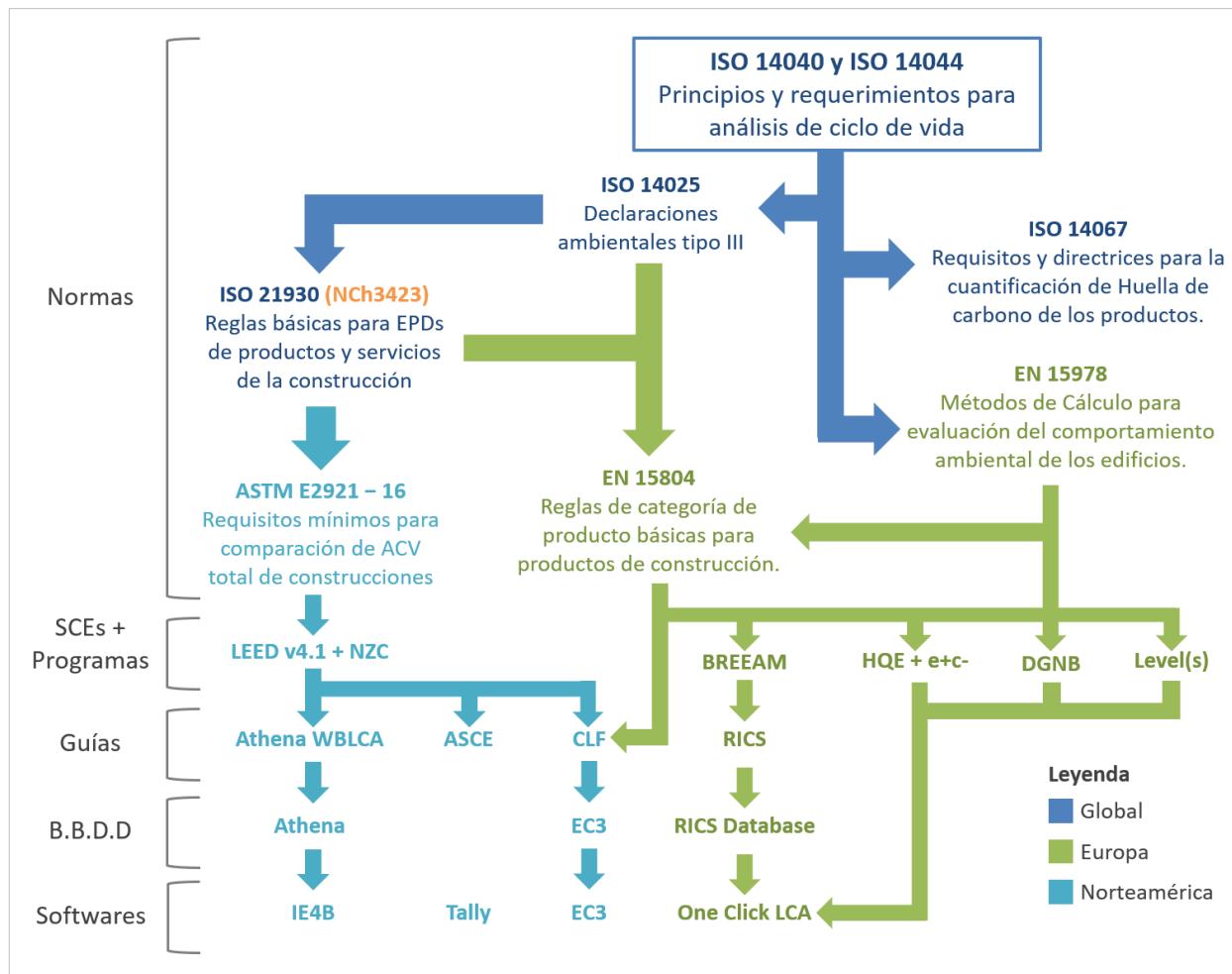


Figura 6. Relación entre diversas herramientas para la determinación de los impactos ambientales de productos y edificaciones.

ventaja de la EN 15804 es su adopción transversal por todos los programas DAP en Europa, que facilita la comparación incluso entre distintos programas de DAP.

Tanto la EN 15804 como la ISO 21930 se actualizan regularmente. Con respecto a la medición del carbono, se observan las siguientes novedades:

- ISO 21930:2017: actualizó la cuantificación del carbono biogénico, entre otros aspectos de la norma, gracias a 10 años de adopción de esta en programas de DAP a nivel global.
- EN 15804:2019: también incorporó el reporte del carbono biogénico y varios cambios relevantes para alinear las DAP europeas a la Huella Ambiental del Producto (*Product Environment Footprint, PEF*) de la Comisión Europea. Además, amplió su alcance a todo el ciclo de vida (módulos de información A al D), requiriendo el cálculo de beneficios del reciclaje en el módulo D. Finalmente, se acordó convertir los datos a formato ILCD¹ [36].

¹ ILCD es un formato de datos creado por Referencia Internacional de Sistema de Datos de Ciclo de Vida, comúnmente usado en softwares de análisis de ciclo de vida.

La norma ASTM E2921-16a proporciona los criterios generales que los equipos de diseño de edificios deben usar para comparar los impactos ambientales del análisis de ciclo de vida entre un diseño de edificio de referencia y un diseño de edificio final. Se utiliza sólo en el contexto norteamericano y surgió producto de la incorporación del enfoque de ciclo de vida de manera progresiva a los sistemas de certificación. Es importante destacar que esta norma es un documento de cuatro páginas sin los detalles necesarios para definir los aspectos metodológicos que cubren las normas ISO 21930 o EN 15804.

El estándar ISO 14067:2018 se enfoca específicamente en la huella de carbono de productos (de cualquier categoría, no solo construcción) y exige la utilización de reglas por categoría de producto (RCP) para la determinación de los impactos.

En consecuencia, la EN 15804, la ISO 21930 o las RCP específicas de productos de la construcción pueden ser usadas en combinación con la ISO 14067 para la determinación de la huella de carbono de productos de la construcción sin las complejidades técnicas y de recolección de datos asociadas a las múltiples categorías de impacto consideradas en el análisis de ciclo de vida, que es la base de los estándares comentados para construcción.

Asimismo, el estándar de productos de GHG Protocol ofrece una alternativa para la producción de huellas de carbono de productos de la construcción. Este estándar está diseñado para evaluar los cambios en el tiempo de la huella de carbono de un producto y no para realizar comparaciones entre productos diferentes. En caso que se desee, el estándar ofrece una sucinta guía para ayudar a la comparación que incluye apoyarse en RCP [37].

3.1.2 Sistemas de Certificación de Edificación

Los Sistemas de Certificación de Edificación (SCE) promueven la adopción de prácticas sustentables a través de un reconocimiento de prácticas de sustentabilidad. Éste es importante a nivel organizacional para diferenciarse en el mercado y lograr mejores fuentes de financiamiento.

Similarmente a los demás instrumentos, los SCEs son actualizados para reflejar los nuevos conocimientos sobre las prácticas prescriptivas y la madurez del mercado en adoptarlas. Un buen ejemplo es LEED v4 que está siendo actualizado a LEED v4.1, aun en piloto. La nueva versión es la primera que adopta métricas de GEI [38] y tiene mayor énfasis en el carbono incorporado [39]. Este estudio del estado del arte se basará en la versión más reciente de los instrumentos analizados, incluso en versión beta, por contener los conocimientos técnicos e industriales más modernos respecto a emisiones de GEI.

Las metodologías utilizadas por los SCE suelen estructurarse bajo las etapas típicas de un estudio de ciclo de vida: definición de alcance y objetivos, inventario de ciclo de vida, impacto e interpretación. Sin embargo, difieren por la elección de sus estándares de referencia. LEED v4.1 hace referencia a ISO 21930 y ASTM [40], mientras que el sistema HQE requiere el uso de productos de construcción que cumplan con estándar ISO 21930 o EN 15804. Esto se muestra en detalle en la matriz comparativa disponible en el Anexo D.

3.1.3 Guías de Asistencia al Diseño

En el contexto de las distintas metodologías establecidas por distintos SCEs aparecen las guías de asistencia al diseño, que explican o fortalecen aspectos no contenidos en los estándares base o incluso en las mismas guías de referencias de los SCEs.

En 2014 el Athena Sustainable Materials Institute² publica una de las primeras guías para desmitificar la dificultad aparente detrás de los créditos de ACV introducidos en los SCEs LEED, Green Globes, IgCC y CALGreen [41]. La American Society of Civil Engineers (ASCE) lanzó una guía de asistencia al diseño específicamente *"para ser utilizada por el equipo de proyecto para definir y modelar el sistema estructural del 'edificio de referencia' tal como se utiliza en los SCEs"* [42]. Finalmente, el Carbon Leadership Forum, lanzó una guía *"para asistir a los profesionales del sector a entender por qué y cómo utilizar el ACV en sus procesos de trabajo"* [27]. Dicha guía fue identificada por un comité de expertos de la industria como un recurso de primera necesidad para lograr la estandarización del ejercicio del ACV en el sector construcción Norteamericano [43].

De esta forma se observa que las distintas organizaciones profesionales y gremiales han desarrollado diversos métodos para orientar a la comunidad AECO y sus especialidades en aspectos de la medición del carbono y también ampliando los aspectos metodológicos establecidos en los estándares bases y SCEs.

3.1.4 Base de Datos

Cada huella de carbono de producto requiere el levantamiento de múltiples (a veces miles de) datos de consumo³ y de emisiones. Si se desea utilizar múltiples huellas de carbono para calcular la huella de un producto agregado, como una edificación, se vuelve necesario la utilización de una base de datos con información de la huella de carbono de los insumos.

Las bases de datos hacen viable la realización de estudios de ciclo de vida (ya sea huella de carbono, análisis de ciclo de vida u otros), porque reducen el tiempo necesario para reunir los datos y el costo de llegar a los resultados. Por referirse al ciclo de vida, debe considerar en cada entrada el ciclo de vida completo o parcial (cuna a la puerta) del material que se describe.

Por ejemplo, la Figura 7 es una representación gráfica del ciclo de vida de la edificación mostrado en la Figura 2 (página 3). En el gráfico, podemos ver que la etapa de producción es compuesta por muchas "sub-huellas" de carbono: extracción de arena hasta la producción de cemento, extracción de mineral hasta la producción de acero, entre otras.

² Esta guía fue incorporada como referencia de buenas prácticas para la integración de EPD a herramientas de análisis de ciclo de vida en edificación, dentro de la Guía de Referencia LEED v4 pág. 522 [95]

³ El consumo puede ser de bienes y/o servicios.

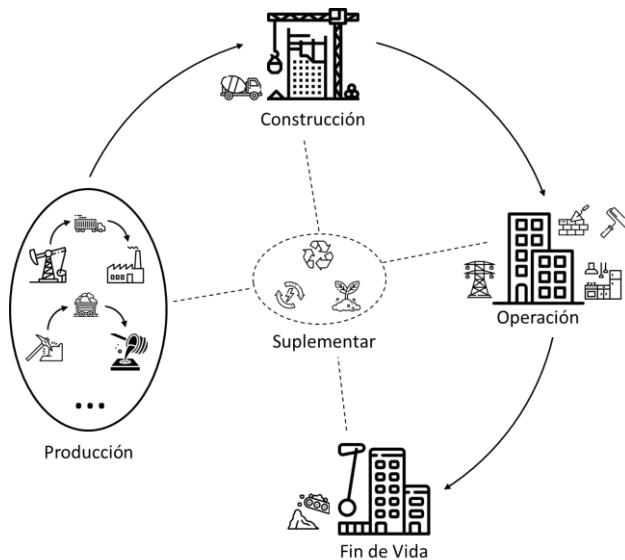


Figura 7: Representación gráfica de las etapas del ciclo de vida de la edificación.

Esto es especialmente importante para materiales complejos, que por sí dependen del ciclo de vida de otros materiales. Un ejemplo es una caldera, que depende del ciclo de vida de los varios metales usados en su producción y, a su vez, es usada en la edificación.

De esta forma, tanto usuarios finales como proveedores pueden sacar provecho de una base de datos con muchas entradas. Asimismo, cuantos más usuarios ocupen la base, ella será más robusta, amplia y actualizada.

3.1.4.1 Almacenamiento de datos de huella de carbono de productos

Una base de datos de huella de carbono debe almacenar al menos tres tipos de datos relevantes:

- **Datos de actividad:** son los datos medibles de la realidad. Por ejemplo: toneladas de cemento, metros cúbicos de agua, o litros de diésel. En este ítem de la base se puede encontrar la cubicación de un edificio, por ejemplo.
- **Factor de emisión:** que entrega la equivalencia entre la actividad y la emisión de un gas de efecto invernadero específico. Por ejemplo, el cemento emite 4,1 gCO₂ por cada kg producido.
- **Potencial de calentamiento global:** es la equivalencia entre la masa de gas de efecto invernadero y su impacto en el cambio climático. Por ejemplo, un kilogramo de metano tiene el poder de calentamiento global de 25 kilogramos de dióxido de carbono (es decir, 25 kgCO₂ 'equivalente').

La Figura 8 muestra como estos tipos de datos se relacionan para calcular la huella de carbono.

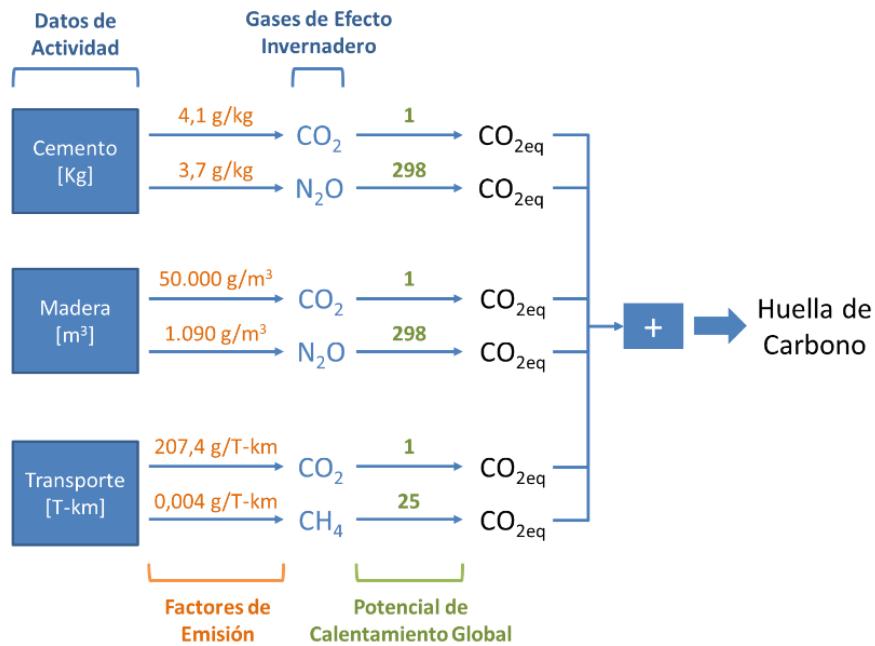


Figura 8: Diagrama de la relación entre los datos de actividad, factores de emisión, potencial de calentamiento global y la huella de carbono.

Las bases de datos se diferencian por los siguientes atributos:

- **Tipos de productos:** una base de datos puede tener datos de ciclo de vida para productos de todo tipo, solo productos de construcción o solo edificaciones.
- **Categorías de Impactos:** algunas bases de datos son solo para carbono, mientras otras incluyen factores de impacto para varios tipos de impactos ambientales en el ciclo de vida.
- **Factores de emisión:** son una consecuencia directa de los tipos de impactos definidos para la base. En el caso de huella de carbono, los datos pueden ser de todos los gases de efecto invernadero considerados por el IPCC o por una subsección de estos. Hay algunas que solamente consideran el CO_2 , mientras otras consideran otros gases de efecto invernadero; algunas incluyen solamente los gases que salen de la utilización de combustibles durante la construcción, mientras otras se amplían a los gases refrigerantes, emisiones de los residuos, entre otras.
- **Extensión del Ciclo de Vida:** Otro punto importante de comparación es la extensión del ciclo de vida considerado en el inventario. Esto incluye la disponibilidad de datos para diferentes etapas del ciclo de vida de la edificación, tanto cuanto cuáles etapas del ciclo de vida son consideradas al generar esta entrada.
- **Fuentes de datos:** datos primarios o secundarios, como estudios de ACV o huella de carbono, estudios sectoriales o datos de declaraciones ambientales de productos.
- **Aseguramiento de la calidad:** pueden ser bases de datos con revisión por un comité de expertos hasta aquellas que son *crowdsourced*.

Estas diferencias explican por qué los resultados que arrojan bases de datos diferentes puedan ser distintos, aunque se refieran a exactamente el mismo proceso. Por ejemplo, una base de datos que sólo tenga información sobre el CO₂ va a arrojar un resultado menor que otra que considere otros gases adicionales. Por eso, tener una base de datos con un inventario completo de GEI permite tener una perspectiva precisa de los impactos al calentamiento global para motivar su gestión bien como generar resultados comparables nacional e internacionalmente.

Es por ello que existen múltiples bases de datos del ciclo de vida de productos de construcción e incluso de edificaciones.

Las bases de datos internacionales para evaluación de impacto ambiental pueden ser nacionales o globales y contener datos de múltiples sectores económicos (genéricas) o estar enfocados en un único sector (producto-específicas).

3.1.4.2 Bases de datos genéricas

La base más amplia es Ecoinvent, que abarca datos de casi 300 geografías⁴ en el mundo y más de 200 clases de actividades económicas [44]. La asociación no genera datos, ella ayuda a curarlos y mantener su calidad. Para tal, empresas y organizaciones envían sus datos para ser publicados y en cambio reciben una revisión editorial que asegura que los datos no contengan errores y sean consistentes con el restante de la base. La asociación es sin fines de lucro, pero tiene un costo para mantener sus actividades de revisión y control de calidad. Este costo afecta fuertemente el precio final de un análisis de ciclo de vida, por lo que es un factor importante que considerar en la elección de las fuentes de datos.

Antes de la creación de Ecoinvent en 2003, países y organizaciones generaban sus propios inventarios para fomentar el cálculo de impactos ambientales.

Un ejemplo son las bases nacionales hechas a partir de tablas input-output que permiten generar links de transacción de cargas ambientales a través de sectores económicos. Ejemplos, son el 3EID de Japón [45] y E3IOT de Europa [46].

En Brasil y México existen bases de datos para Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que incluyen entradas para materiales de construcción, como cemento.

En Inglaterra hay una base de datos específica para materiales de construcción llamada ICE (*Inventory of Carbon and Energy*). Esta base de datos se construye a partir de datos secundarios, los que son curados por un equipo y tratados con un algoritmo, para extraer el carbono contenido de los materiales, como se muestra en la Figura 9 [47].

⁴ Un país puede tener más de una geografía con características climáticas, ambientales y productivas distintas. Chile, por ejemplo, podría ser dividido en Zona Norte, Central y Sur (u otras subdivisiones).

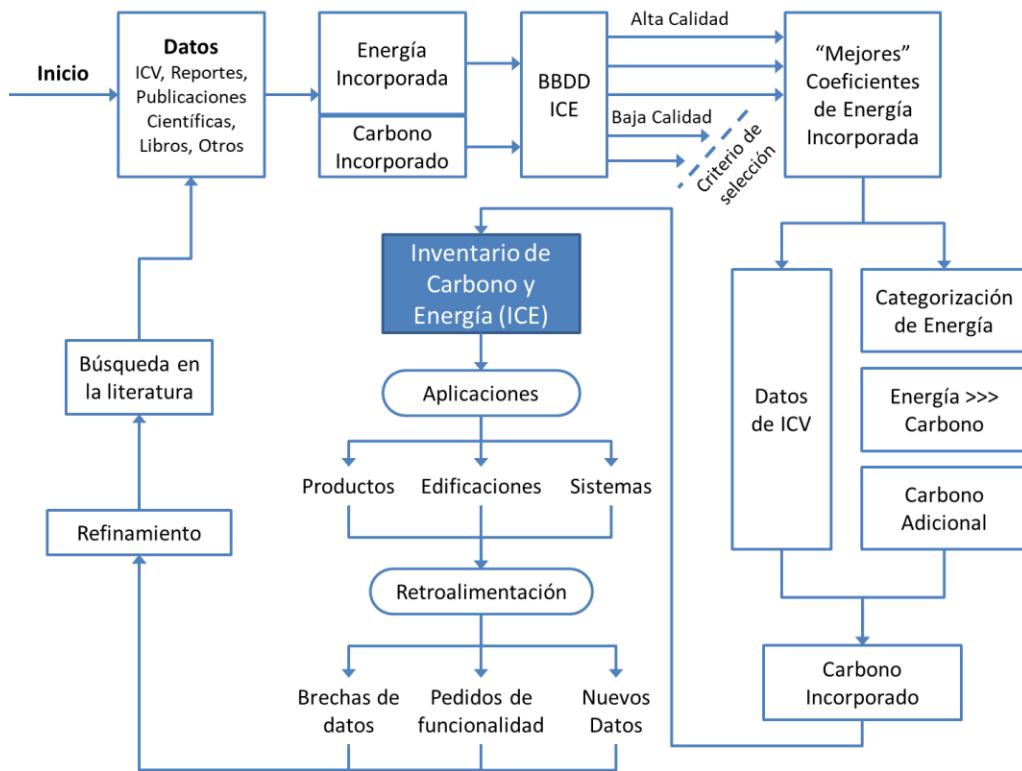


Figura 9: Diagrama de flujo para construcción del *Inventario de Carbono y Energía (ICE)*. Elaborado a partir de [47].

Este proceso de tratamiento de los datos puede ser interesante para la producción de bases de datos locales, en la ausencia de datos primarios.

3.1.4.3 Bases de datos producto-específicas

Organizaciones de industrias también crean bases de datos para divulgar los impactos de sus sectores. Un ejemplo es la *WorldSteel Association* que levanta datos primarios del ciclo de vida de su sector de acuerdo a una metodología que asegura la calidad de datos auto declarados [48].

Para una lista extensiva de las bases de datos de ciclo de vida disponibles, ver la página web de GHG Protocol [49].

3.2 Objetivo y Alcance

En la etapa de definición de objetivo y alcance se definen aspectos críticos de una huella de carbono como la unidad de estudio, el flujo de referencia, los límites del sistema (temporales, geográficos y de procesos), los criterios de exclusión de datos y los usos potenciales de los resultados, entre otros. Esta etapa es la que presenta las mayores diferencias en los distintos tipos de instrumentos.

Cambios en cualquiera de estos aspectos pueden desencadenar diferencias relevantes en los resultados de los estudios [50], [51], los que además no siempre se transparentan [52]. Por eso, para garantizar la calidad de un estudio es esencial que los datos usados hayan sido obtenidos con la misma metodología.

A través del tiempo las herramientas internacionales han avanzado desde un enfoque en parámetros directos de la operación hacia un enfoque de ciclo de vida, pero con aproximaciones distintas. Esta evolución se da a través de una actualización de las metodologías de los mismos sistemas en sus nuevas versiones, como ha ocurrido con LEED v4.1 y BREEAM, o por el desarrollo de programas específicos de Net Zero Carbon, que agregan requerimientos específicos a los sistemas de medición tal como ha ocurrido en Norteamérica y en la UE.

Si bien la mayor parte de estos sistemas de certificación, como LEED, BREEAM o DGNB se basan en el análisis de ciclo de vida, el análisis de impacto bajo un enfoque de ciclo de vida forma parte de uno de los tantos análisis que se desarrollan bajo el esquema de puntuación. Herramientas de asistencia al diseño más recientes tales como Level(s) integran el enfoque de ciclo de vida de forma transversal [53].

Varían también los impactos ambientales considerados. Por ejemplo, la guía de RICS trata la huella de carbono bajo un enfoque de ciclo de vida (carbono incorporado y operacional) más que una medición de ACV completa.

En general estos sistemas describen someramente la definición de objetivos y alcances y utilizan un estándar de referencia para especificar los demás parámetros. La mayoría de los SCEs establecen alcances limitados para el análisis que involucran sistemas estructurales y envolventes, sin embargo, las terminaciones interiores y el mobiliario se excluye explícitamente de la mayoría de los análisis.

3.2.1 Objetivo del estudio

Las herramientas que pueden utilizarse para el cálculo de la huella de carbono en edificaciones varían en su finalidad.

En los estándares (por ejemplo, las ISO y las EN), el objetivo suele ser la *cuantificación* de la huella de carbono, normalmente en el ciclo de vida completo del producto y considerando varios gases de efecto invernadero [14], [15], [28], [37], [54], [55]. Algunos de estos estándares permiten también la *comparación* entre productos diferentes, usualmente cuando se usan reglas por categoría de producto para generar los resultados [14], [15], [28], [37].

Si bien los estándares no lo dicen textualmente, sus objetivos, la preferencia por los datos primarios y sus exigencias sobre la incertidumbre de los resultados tienen como consecuencia que se utilicen de forma masiva para medir los impactos de productos y edificaciones construidas.

En contraste, en la mayoría de los SCEs el objetivo es *orientar la toma de decisiones a nivel de diseño*:

- En EDGE, el objetivo es ofrecer comparaciones financieras para dirigir la toma de decisiones considerando eficiencia en tres aspectos: energía (operacional e incorporada), agua (operacional) y materiales [56];

- El objetivo de los sistemas de certificación LEED es la transformación de la industria de la construcción a través de estrategias diseñadas para lograr siete objetivos: revertir la contribución del sector al cambio climático global, fortalecer el bienestar y la salud humana, proteger y restaurar los recursos hídricos, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, promover ciclos de materiales sustentables y fortalecer la equidad social. Estos objetivos se logran a través de un sistema de evaluación donde cada "crédito" es ponderado según la importancia del objetivo al cual se relacionan [57];
- En el sistema DGNB el objetivo de la evaluación es cuantificar y documentar el rendimiento del edificio de la forma más detallada posible para componentes de construcción y energía del ciclo de vida modelado (LCEM) de la demanda de energía del edificio durante la fase de operación.

Como consecuencia, el objetivo de quien realiza el estudio de huella de carbono o ACV asociados a estos sistemas de certificación suele ser *obtener créditos o puntos* comparando el rendimiento del edificio con el de un caso de referencia (caso base) definido antes de la etapa de construcción. Esto suele realizarse con ACV simplificado⁵ [58].

Así es el caso con LEED v.4 y su crédito MR *Building Life-Cycle Impact Reduction*. En el marco del cumplimiento de este crédito, los estudios de ACV tienen la obligación de reportar el impacto sobre el potencial de calentamiento global. Además, deben considerar "[...] **estructura y envolvente**, con un límite de la cuna a la tumba que incluya módulos A1 a A4, B1 a B7, y C1 a C4, con la finalidad de comparar el edificio propuesto con un edificio de referencia. [...] Asimismo deberán demostrar] un mínimo de 10% de reducción comparado con un edificio de línea base" [57]. En el caso de LEED v4.1, la cantidad de puntos logrados varían según la reducción demostrada [39].

Algo similar ocurre con DGNB versión 2018. El crédito *ENV. 1.1 Building Life Cycle Assessment* que incorpora el ACV, requiere incorporar **todos los sistemas del edificio**, con un límite de la cuna a la tumba que incluya módulos A1 a A4, B1 a B7, y C1 a C4, con la finalidad de comparar el edificio propuesto con un edificio de referencia [59].

3.2.2 Unidad funcional

Los términos equivalencia funcional o unidad funcional se utilizan en los estándares de ACV para describir las funciones clave del objeto de evaluación (que en este caso es un edificio) utilizando un conjunto de criterios objetivos que permita comparar "manzanas con manzanas" [27], asegurando de esta forma la comparabilidad entre estudios.

⁵ En algunas herramientas se hace alusión al "ACV simplificado". Esta jerga sectorial se refiere a (i) un estudio donde se considere una sola etapa del ciclo de vida o (ii) uno donde se considere solo una categoría de impacto (por ejemplo, cambio climático) sobre una o más etapas del ciclo de vida del producto. En ambos casos esto no constituye un análisis de ciclo de vida de acuerdo con la norma ISO 14044, que incluye todas las etapas de ciclo de vida sobre varias categorías de impacto.

Todos los SCEs enfatizan la importancia de comparar resultados solo de edificios con la misma función, pero no especifican como describir el edificio detalladamente, dejando libertad al analista para que describa el edificio de formas diferentes, como se muestra en los ejemplos.

Adicionalmente, muchos de los instrumentos utilizan una unidad declarada en vez de una unidad funcional, que también es descrita con parámetros no armonizados. En general se solicita detallar el uso principal del edificio (comercial, industrial, residencial etc.) e incluir aspectos de calidad, pero no especifican cómo realizarlo.

Todos los SCEs enfatizan la importancia de comparar resultados solo de edificios con la misma función, pero solo solicitan parámetros generales para describirlo. En general se solicita detallar el uso principal del edificio (comercial, industrial, residencial etc.) e incluir aspectos de calidad, pero no especifican cómo realizarlo, dejando libertad al analista para que describa el edificio en menor o mayor detalle, como se muestra en los ejemplos.

- En el caso de EDGE, el sistema permite describir el edificio de manera detallada y personalizada, pero facilita el proceso al usuario ofreciendo una lista predeterminada de tipos de edificaciones (hogares, hoteles, oficinas, hospitales, comercial y educativo) e incluyendo parámetros por defecto para ayudar el dimensionamiento y la toma de decisiones rápida.
- Bajo DGNB, el edificio a evaluar debe describirse en términos de sus cualidades materiales y dependientes del tiempo. Para efectos de la evaluación se utiliza una descripción estandarizada en la hoja de datos de documentación que incluye una descripción clara de la técnica y propiedades funcionales del edificio, el tipo y uso del edificio (por ejemplo, número de usuarios).
- Por otro lado, LEED v4.1 requiere una descripción de la función, área bruta, orientación y uso de energía operacional. Algo similar ocurre con la guía del *Carbon Disclosure Project*, que exige una descripción de las partes del edificio y el terreno a ser analizado [27].

Debido a la complejidad que presentan las edificaciones como objeto de análisis y la dificultad en su estandarización para permitir comparaciones. La industria norteamericana propuso una taxonomía de descripción del edificio en el contexto de la guía práctica realizada por el *Carbon Leadership Forum* [18]. Esta solución surge los diversos sistemas que existen para identificar las partes de una edificación y uniformar el lenguaje para facilitar la comparación de resultados.

- En Reino Unido y Estados Unidos el uso de OMNICLASS para la clasificación de los elementos constructivos permite describir en los mismos términos los alcances de distintos estudios de huella de carbono facilitando la transparencia.
- En Reino Unido coexisten OMNICLASS con el BCIS (*Building Cost Information Service*), que es la indicación de la guía del RICS para describir todas las partes y sistemas constructivos incluidos en el alcance del estudio.
- En Estados Unidos, esta descripción del alcance se realizaría en base al formato UNIFORMAT u OMNICLASS utilizado ampliamente para las especificaciones técnicas y

cubicaciones en edificación. Además de la dificultad de generar definiciones que faciliten la comparación dentro de un SCE, se suma el hecho de que cada sistema solicita aspectos diferentes para identificar la función.

A nivel de materiales, las reglas por categoría de producto (RCP) estipulan claramente cuál es la unidad funcional del sistema de producto, su alcance y las categorías de impacto a considerar, facilitando la comparación de productos de la construcción. En el Anexo C se encuentra una lista referencial de RCP de productos y servicios de la construcción del operador de programa DAP The International EPD System.

3.2.3 Alcance

En el alcance se deben considerar tres elementos centrales:

- Las etapas de ciclo de vida a considerar: donde algunas herramientas solicitan solo parte del ciclo de vida por su objetivo, dificultades técnicas o ausencia de datos;
- El límite geográfico: en el que puede considerarse solo el sitio de la edificación o los terrenos externos afectados; y
- El límite temporal: tanto para la vida útil del edificio como para la selección de datos que se usarán en el estudio.

3.2.3.1 *Etapas del ciclo de vida*

Si bien el análisis de ciclo de vida según ISO 14044 y la huella de carbono según ISO 14067 (así como sus estándares derivados) estipulan el análisis del ciclo de vida completo de los productos, algunas herramientas permiten análisis de menos etapas por motivos prácticos.

En la mayoría de los SCEs, se debe incluir la estructura completa del edificio, envolvente, y fundaciones, pero cada uno varía en las etapas del ciclo de vida a considerar. Aunque algunas de estas etapas son materiales para el estudio, las herramientas las excluyen por su alcance, falta de datos o usabilidad. Esto ocurre principalmente en la fase de uso en qué hay muchos elementos muy específicos y complejos, como un sistema de calefacción central. Otro ejemplo es cuando una herramienta considera solo la energía operacional o cuando solo se considera la etapa de producción de materias primas. Para saber qué etapas del ciclo de vida consideran cada herramienta, ver Anexo D.

- LEED v4.1 otorga créditos por un ACVE⁶ completo de la *estructura y la envolvente*: desde la extracción de recursos, fabricación de productos de construcción, construcción in situ, mantenimiento de productos y reemplazo (donde esté justificado), hasta la deconstrucción, demolición y eliminación. Se incorporan también las superficies subterráneas y estacionamientos adheridos, pero se excluye explícitamente el mobiliario

⁶ Los sistemas de certificación de edificaciones normalmente solicitan resultados de Análisis de Ciclo de Vida (varios impactos diferentes) entre los cuales se encuentra la Huella de Carbono. En los párrafos siguientes se expresa esto como "ACVE" el Análisis de Ciclo de Vida de la Edificación.

de la edificación en el cálculo del carbono incorporado [39], [57]. Módulos considerados: *A1 a A4, B1 a B7, y C1 a C4*.

- DGNB hace referencia a los límites del sistema establecidos en EN 15978, y el alcance del ACVE incluye todos los sistemas constructivos del edificio. Abarca los impactos ambientales de las fases de producción, uso y fin de vida útil y no incluye trabajos externos, como paisajismo, infraestructura verde, pozos sépticos, entre otras [60]. Módulos considerados: *A1 a A4, B1 a B7, y C1 a C4*.
- En el caso de la guía RICS, se debe incluir al menos el 95% de los sistemas constructivos totales del edificio (95% de la masa de materiales utilizados) para realizar un análisis de costo-beneficio [17].
- Otros sistemas de certificación cuantifican el carbono solo en base al consumo de electricidad calculado para la edificación según su diseño pudiendo incluir la energía incorporada en los materiales, como EDGE [56].

En general las bases de datos consideran las etapas “de la cuna a la puerta” para materiales de la construcción por la dificultad de modelar sus etapas de uso y fin de vida [61]. Pero esto no es un problema ya que el material está incorporado en el edificio y sus fines de vida deben ser considerados con el fin de vida del edificio.

3.2.3.2 Alcance geográfico

En general el alcance geográfico se limita a los límites del terreno [17], [27], dejando fuera impactos generados sobre el terreno circundante y los datos de inventario asociados a ellos.

3.2.3.3 Periodo de referencia

Parte de la definición de la unidad funcional para una edificación es la longitud de su vida útil. Esto es relevante porque la vida útil puede definir la cantidad de renovaciones necesarias, el impacto sobre el fin de vida y hasta modelos para proyectar el impacto del edificio bajo escenarios de cambio climático.

El periodo de referencia normalmente se refiere a la antigüedad máxima que se define para incorporar una referencia al estudio, y se usa normalmente para recopilar datos secundarios. En el caso de un edificio, el periodo de referencia también se extiende hacia el futuro, dada la estimación de su vida útil. Este límite temporal es relevante sobre todo al considerar modelos de emisión por energía operacional (cambios en la matriz y demanda energéticas) y escenarios de fin de vida.

- Dentro del sistema DGNB, el período de referencia se establece específicamente para cada esquema DGNB, por ejemplo, 50 años para nuevas oficinas.
- En LEED v4.1, se utiliza un supuesto vida útil de referencia de construcción de al menos 60 años, lo suficiente como para capturar el ciclo de reemplazo de materiales, como sistemas de cubierta y muros cortina.
- El sistema descrito en la guía de referencia RICS además establece un ciclo de vida de 60 años para edificación y 120 años para la infraestructura.

- Level(s) incluye explícitamente la variable de adaptación al cambio climático por medio de un indicador que es la performance térmica del edificio bajo escenarios de cambio climático a 2030 y a 2050.

3.3 Inventario

El inventario de ciclo de vida (ICV) es una compilación y cuantificación de las entradas y salidas de materia y energía desde sistemas productivos.

Normalmente los inventarios de ciclo de vida en bases de datos están estructurados:

- De la cuna a la puerta (Módulos de información A1-A5): desde la extracción de las materias primas hasta la salida de la fábrica del producto estudiado. No considera la logística hasta el cliente final ni el fin de vida, que debe ser modelado al momento de utilizar esta entrada.
- De la cuna a la tumba (Módulos de información A, B y C): el ciclo de vida completo, desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida. Hay que tomar cuidado para no tener doble conteo de impactos al usar datos de productos con la huella calculada de la cuna a la tumba.

De esta forma, cuando deseo conocer los impactos del hormigón, puedo tomar desde la base de datos la información del cemento, barras de refuerzo y aditivos, además de las maquinarias y energía utilizada. A eso se adiciona el fin de vida del hormigón y con ello puedo tener los impactos del ciclo de vida de mi producto objetivo.

Idealmente la recopilación de datos en el inventario sería completa, pero esto normalmente no es posible por diversos motivos como: pérdida o ausencia de registros, dificultad de obtener la información (cuando está en manos de alguien no involucrado en el estudio), desconocimiento, entre otras. Por eso, se debe tener criterios de calidad a la hora de buscar los datos de actividad que son parte del inventario.

La ISO 14067 de huella de carbono establece criterios relevantes a la hora de establecer una metodología de levantamiento de datos [28]:

- **Pertinencia:** seleccionar datos y metodologías apropiadas para la evaluación de las emisiones y remociones de GEI derivadas del producto en estudio
- **Integridad:** se incluyen todas las emisiones y remociones de GEI que contribuyen significativamente a la huella de carbono total o parcial del sistema de producto en estudio. Para ello se establecen criterios de corte.
- **Consistencia:** los supuestos, métodos y datos se aplican de la misma manera en todo el estudio para llegar a conclusiones de acuerdo con el objetivo y alcance.
- **Coherencia:** se aplican metodologías, normas y documentos de orientación ya reconocidos internacionalmente y adoptados para las categorías de productos, a fin de mejorar la comparabilidad.
- **Exactitud:** la cuantificación de huella de carbono es exacta, verificable, pertinente y no engañosa y los sesgos e incertidumbres se reducen en la medida de lo posible.

- **Evitar la doble contabilidad:** se evita cuantificar dos veces la misma emisión o remoción.

El levantamiento de datos para la construcción del inventario depende fuertemente del objetivo del estudio. Si el objetivo es el análisis de las decisiones de diseño del edificio, entonces se puede utilizar información de cubicación total por familia de productos y apoyarse en una base de datos genérica. Por otro lado, si se desea certificar el desempeño de un producto de la construcción (incluyendo la edificación), se deberá levantar datos reales de los consumos de materiales y los procesos constructivos, buscando factores de emisión más ajustados a la realidad.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) ha desarrollado poderosas herramientas para la estimación de los impactos ambientales, como la guía para la producción de Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (INGEI).

En su capítulo sobre recolección de datos [62], se establecen los siguientes criterios:

- Enfocarse en la recolección de datos de categorías clave: las que son mayores (en masa, energía o impacto), son más probables que cambien en el tiempo (por ejemplo, crecimiento acelerado) o la mayor incertidumbre.
- Escoger procedimientos de recolección de datos que mejoren de forma iterativa la calidad del inventario.
- Implementar actividades de recolección de datos que lleven a la mejora continua de los registros en el inventario.
- Recolectar datos a un nivel de detalle apropiado para el método usado.
- Revisar periódicamente las necesidades metodológicas y las actividades de recolección de datos, para mejorar el inventario.
- Establecer acuerdos con los proveedores de datos para generar flujos de información continuos.

Fuentes de datos relevantes para obtener datos de actividad para un inventario de huella de carbono son:

- El instituto nacional de estadísticas;
- Estadísticas internacionales como ONU, Eurostat la AIE, OCDE y el FMI;
- Organizaciones gremiales y expertos sectoriales, nacionales e internacionales;
- Base de datos de factores de emisión del IPCC [63];
- Otras bases de datos de actividad internacionales (Ecoinvent, ICE) o nacionales
- Bibliotecas, artículos técnicos y reportes, así como trabajos de investigación universitarios;
- Declaraciones ambientales de producto;
- Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero de otros países.

3.3.1 Gases considerados

El IPCC ya ha identificado más de 100 gases de efecto invernadero [18]. Los GEI con mayor impacto ambiental son mostrados en la Tabla 2.

El programa de huella de carbono GHG Protocol, exige el reporte de todos los gases identificados por el IPCC al momento de la producción de la huella [64]. Otros programas y bases de datos solo consideran el CO₂ y en algunos otros (como los que utilizan bases de datos de ciclo de vida) se considera un subconjunto de estos gases, de acuerdo con la disponibilidad de información dentro de la base.

Tabla 2. Gases de efecto invernadero con mayor impacto neto sobre el forzamiento radiativo. (Elaboración propia en base a Figura 8.17 de [18])

| Clasificación | Gases |
|--|---|
| Gases de Efecto Invernadero bien mezclados | Dióxido de carbono (CO ₂) Metano (CH ₄) Halocarbonos: Clorofluorocarbonos (CFC), Hidroclorofluorocarbonos (HCFC) Óxido nitroso (N ₂ O) |
| Gases de vida corta | Monóxido de carbono (CO) Óxidos de nitrógeno (NO _x) Compuestos orgánicos volátiles no metano (NMVOC) |
| Aerosoles y precursores | Carbono negro |

3.3.2 Fuentes de datos para el inventario de gases de efecto invernadero en la construcción

La primera gran división en el levantamiento de datos es entre **datos primarios**, que se recolectan directamente desde el objeto del estudio y **datos secundarios**, que entregan información desde fuentes como: bases de datos de ciclo de vida, operadores de programa para Declaraciones Ambientales de Producto, promedios sectoriales, datos calculados y publicaciones académicas, entre otras.

Por ejemplo, en el caso de estándar de producto de GHG Protocol, el estándar exige la utilización de datos primarios para todos los procesos incluidos dentro de los límites del inventario y para todos los procesos que estén bajo su propiedad o control [37].

Un tema relevante que considerar a la hora de recoger datos es la diferencia que se da entre la cubicación de un edificio y su consumo real de materiales. Para estimar los impactos potenciales totales de la edificación se debería considerar el consumo real (los datos primarios), incluyendo las pérdidas que por cualquier motivo hubiese durante el ciclo de vida de la obra.

3.3.2.1 Datos primarios

Como se comentó anteriormente, las reglas por categoría de producto (EN 15804, ISO 21930 o aquellas específicas de producto en programas de DAP) establecen los procesos unitarios que deben considerarse en un inventario de ciclo de vida. Adicionalmente, el impacto ambiental de interés (en este caso Cambio Climático), define qué aspectos ambientales de estos procesos unitarios se incluirán en el inventario. Para el Cambio Climático serían solamente los gases de efecto invernadero.

Para hacer la recolección de datos se pueden utilizar encuestas, formularios (como se hace para la producción del INGEI) o medición directamente en el sitio. Asimismo, se puede aprovechar los formularios en uso en la Unión Europea para su sistema de reporte de DAP.

A partir de la revisión internacional se desprende que las herramientas han avanzado progresivamente hacia el levantamiento de datos locales. Sin embargo, la mayoría de los sistemas utiliza bases de datos existente creadas a partir de programas DAP en otros países o de bases de datos genéricas.

3.3.2.2 Datos secundarios

En varias herramientas de asistencia al diseño y calculadoras las huellas de carbono de edificaciones se definen utilizando solamente datos secundarios. La ventaja de esta decisión metodológica es su rapidez: en pocas horas puede determinarse la huella de carbono del diseño, en vez de pasar una gran cantidad de tiempo recolectando datos primarios. La desventaja es que agrega una alta incertidumbre al resultado y no refleja el real impacto de la edificación, lo que dificulta la integración de los resultados de la edificación con intereses sectoriales, como políticas públicas o inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

Una forma alternativa de enfrentar este balance entre consumo de tiempo y precisión del resultado es usar datos secundarios para descubrir cuáles son los procesos o insumos que aportan más a la huella de carbono del producto final, de forma de enfocar el levantamiento de datos en *esos* procesos, como lo recomienda el estándar de producto del GHG Protocol [37].

En la actualidad han aparecido diversos tipos de bases de datos. Las bases de datos **genéricas** son las que se construyen con datos provenientes de múltiples fuentes, como proyectos de distintas localidades geográficas tales como Ecoinvent, que vienen de proyectos de universidades, levantamientos de datos regionales, etc. Estas bases de datos tienen exigencias metodológicas para armonizar estas fuentes y lograr la compatibilidad entre todas sus entradas. Cuentan con datos nacionales y promedios globales que normalmente son usados como datos secundarios en estudios de ciclo de vida.

El mayor proveedor de base de datos para el ciclo de vida a nivel global es Ecoinvent. La mayoría de los softwares y muchas de las calculadoras de ciclo de vida para la construcción usan sus datos. Esta base de datos tiene procesos rigurosos para el control de la calidad y validez de la información [65].

Normalmente Ecoinvent se utiliza cuando el objetivo es analizar y orientar las decisiones de diseño, como en el caso de la calculadora OneClick LCA. Para la certificación del desempeño de un producto de la construcción el uso de Ecoinvent solo es admisible cuando el dato consultado no se refiere a un dato directo del proceso siendo analizado, es decir, en la ausencia de datos locales o producto-específicos. Por ejemplo, no puedo realizar una DAP para barras de refuerzo en base a la entrada "entradas de refuerzo de acero" que se encuentra en Ecoinvent, pero sí puedo usar Ecoinvent para estimar los impactos de la matriz energética que alimenta el proceso de producción de las barras.

En América Latina hay dos bases de datos de ciclo de vida que contienen inventarios de construcción más ajustados a la realidad local: Mexicanuh® [66] y SICV en Brasil [67]. Esta última es un servicio gratuito ofrecido por el Instituto Brasileño de Información en Ciencia y Tecnología (IBICT) que cuenta con datos generados por IBICT, cuya calidad está garantizada, y por otros usuarios, cuyos inventarios pasan por un proceso de aseguramiento de la calidad, pero que no está garantizada [68].

Las bases de datos **producto-específicas** son todas las que vienen de un sector de categoría de producto en particular (por ejemplo, todas las industrias de acero), o para una categoría de producto en particular en el marco de un programa de EPD. En los últimos años las bases de datos producto-específicas han crecido considerablemente y hoy existen bases de datos que incorporan datos de actividad e incluso los impactos calculados (incluyendo PCG) en distintos programas de construcción.

LEED v4.1 y BREEAM en sus guías de referencia y manuales de apoyo, permiten el uso de fuentes de datos diversas, incluyendo bases de datos de ACV "genéricas" y producto-específicas (de programas de DAP o gremiales) para facilitar la búsqueda de datos [57]. Estos dos sistemas y E+C- permiten también usar los datos de impacto publicados en sistemas locales de certificación de productos.

La desventaja de mezclar fuentes de diferentes bases de datos es que podrían estar construidas con diferentes aproximaciones metodológicas y alcances. La principal consecuencia de esto es que al concatenar las entradas de datos se realice doble conteo o no se consideren etapas específicas del ciclo de vida. Por ejemplo, al modelar un edificio podría usarse una entrada para "cemento" que tenga incorporadas las emisiones hasta el fin de vida. Luego, se agrega la modelación del fin de vida del edificio completo, contando dos veces el fin de vida del cemento (en la entrada para cemento y en el inventario para el edificio).

Otros sistemas de certificación, como el alemán DGNB, requiere un ACVE realizado utilizando datos climáticos locales y proporciona a auditores y consultores acceso a las bases de datos de ESUCO LCA que incluyen datos específicos de la obra o material en estudio, las que son verificadas por expertos externos independientes. Esta base de datos, como es curada por una sola organización, es consistente en sus aspectos metodológicos y por lo tanto debería minimizar el riesgo de doble conteo o vacíos.

Otra alternativa es la utilización de datos provenientes de los diferentes programas de DAP existentes. Esta estrategia ha sido utilizada de forma masiva a través de muchas de las herramientas mencionadas en esta revisión. Se ha demostrado que a pesar de las diferencias metodológicas detrás de cada uno de los programas, la variabilidad entre los distintos resultados no es significativo y son de utilidad para hacer una estimación del carbono total en una edificación [69]. Posteriormente se puede analizar si los resultados de estos programas son compatibles con otras bases de datos, como por ejemplo Ecoinvent.

Al seleccionar una base de datos para uso su uso, un diseñador o consultor debería considerar los siguientes puntos esenciales [34], [37]:

- Representatividad tecnológica: grado de similitud con la tecnología usada;
- Representatividad temporal: grado de similitud al período actual de la actividad;
- Representatividad geográfica: grado de similitud de la geografía actual de la actividad;
- Completitud: grado de representatividad estadística de la actividad relevante. Incluye la proporción de locales para los cuales hay data disponible comparado con el total de locales para una actividad particular. La completitud ayuda a minimizar variaciones estacionales y fluctuaciones normales en la data.
- Confianza: cuán confiables son la fuente, los métodos de colecta y procesos de verificación.

Algunas preguntas son útiles a la hora de evaluar la calidad de una base de datos [37]:

- ¿Los datos son recolectados desde el proceso original (datos primarios) o son calculados/estimados de otras fuentes de datos (datos secundarios)?
- ¿Los datos fueron generados ocupando una metodología consistente?
- ¿Por cuánto tiempo existe la base de datos y cuán masivo es su uso?
- ¿Con qué frecuencia se actualiza la base de datos?
- ¿Cuán recientes son los factores de emisión?
- ¿Se puede calcular incertidumbre a partir de los datos?
- ¿Hay algún riesgo de que la data sea percibida como sesgada? ¿Hubo una revisión independiente de los datos y las metodologías?

Estos parámetros son importantes para evaluar tanto la calidad de la base de datos como de los datos específicos seleccionados para hacer el cálculo.

Si no hay una base de datos de calidad disponible, se recomienda el uso de los datos de una DAP. Sin embargo, puede ser que no exista inventario para sistemas de productos complejos, como maquinarias. Hay la posibilidad de usar datos basados en tablas input-output para equipos que no estén en una base de datos o no poseen una DAP [34].

3.3.3 Asignación de cargas

La asignación de cargas es el proceso por el cual se divide el impacto de un proceso unitario entre sus varios coproductos. Por ejemplo,

- Para una ciudad normalmente existe un sistema de producción de agua potable. La asignación es el proceso por el cual se asigna una parte de esos impactos a los impactos operacionales del consumo de agua del propio edificio;
- Una empresa constructora compra un volumen significativo de madera para dos proyectos diferentes. La asignación divide los impactos de ese material entre ambos proyectos.

La ISO 14067 establece la prioridad del enfoque científico en la huella de carbono, dando preferencia a las ciencias naturales (física, química y biología) en la toma de decisiones. Solo si esto no es posible se pueden usar otros enfoques (desde las ciencias sociales y económicas) o aquellos contenidos en convenciones internacionales pertinentes. Solo si ello no es posible, se pueden tomar decisiones basadas en juicios de valor.

3.3.4 Criterios de corte

La huella de carbono es una metodología que utiliza datos de actividad para estimar los impactos potenciales de un sistema de producto sobre el cambio climático. Para lograr estimar la huella de carbono de forma fiel a la realidad y a la vez de manera económicamente viable, se suele dejar fuera algunos de los datos de actividad, lo que debe ser justificado según los siguientes tres criterios [70]:

- **Masa:** incluir en el estudio todas las entradas que contribuyen más de un porcentaje definido de las entradas de masa al ciclo de vida del producto en estudio.
- **Energía:** asimismo, se deben considerar todas las actividades que reunidas contribuyan más que un cierto porcentaje de la energía
- **Impacto ambiental:** algunas actividades podrían proveer poca masa o energía, pero sí un gran impacto ambiental al sistema en estudio. De la misma forma que los otros tres criterios, se deben incluir todas las entradas que acumulen más de un cierto porcentaje del impacto total.

Por ejemplo, la calculadora hueCO₂ (España) realiza una priorización por magnitud (independiente de la unidad) y otra por presupuesto. Primero se ordenan todos los consumos de una obra (materiales, uso de maquinaria, transporte y energía) de mayor a menor sin importar su unidad de medida. De esa lista se deben incorporar en la huella al menos todos los que sumen el 90% de la cantidad total. Luego se realiza un ejercicio similar, pero con el valor monetario de todas las fuentes consideradas. Nuevamente, se debe incorporar en la huella de carbono al menos los que sumen el 90% del presupuesto obra [71].

3.3.5 Base de datos para el Inventario de Gases de Efecto Invernadero

Con respecto a las bases de datos la definición de objetivos y alcances varía dependiendo del tipo de base de datos. En general se observa que existen bases de datos genéricas y bases de datos específicas para el sector de la construcción. Dentro del segundo grupo existen bases de datos de productos que incluyen un alcance de modulo A1-A3, bases de datos de sistemas totales en el edificio tal como es el caso de las bases de dato RICS y DeQo que agrupan las cubicaciones del sistema estructural más los factores de emisión de las distintas mezclas de hormigón. Dentro de las bases de datos de alcance A1-A3, estas incluyen datos de la industria o datos provenientes de distintos tipos de DAP en programas alrededor del mundo.

3.4 Impacto

Todas las herramientas revisadas consideran obligatorio el reporte de la huella de carbono a través del método de impacto GWP100 desarrollado por el IPCC [18], tanto a nivel de producto como de edificación. Además, pueden solicitar otras categorías de impacto propias del análisis de ciclo de vida (ACV).

Algunos métodos, como ReCiPe, tienen también las alternativas de GWP20 y GWP1000, dependiendo del estilo de análisis, pero la más comúnmente utilizada es GWP100 [72].

3.4.1 Factores de Emisión

Como se muestra en la Figura 8, los factores de emisión son equivalencias prestablecidas entre los datos de actividad y la cantidad de gases de efecto invernadero que salen de un proceso. Esto es útil porque evita tener que medir las emisiones de cada máquina y proceso unitario cada vez que se calcule una huella de carbono.

Los factores de emisión se pueden encontrar en la base de datos de factores de emisión del IPCC [63] y también en fuentes nacionales, como Ministerios de Medio Ambiente.

En la medida en que la base de datos crezca, las huellas de carbono de materiales sirven como factor de emisión local para la huella de carbono de la edificación.

Las herramientas siempre reportan el CO₂ emitido, pero hay más de 100 gases de efecto invernadero que tienen potenciales de calentamiento global (PCG) más poderosos que ese gas.

3.5 Interpretación

La ISO 14067 de huella de carbono establece el criterio de transparencia, que es relevante al realizar la interpretación de los resultados: Todos los temas pertinentes se abordan y documentan de forma abierta, completa y comprensible. Se dan a conocer los supuestos y se hace referencia a las metodologías y fuentes de datos. Cualquier estimación se explica y se evita el sesgo para que el informe represente lo que se pretende [28].

La interpretación siempre estará relacionada al objetivo del estudio, lo que quiere decir que algunos sistemas de certificación usan un *benchmark* y otros entregan puntos de acuerdo con la realización de acciones específicas.[43]

3.5.1 Unidad de reporte

El uso de la unidad de reporte común permite la comparación de líneas base dentro del sector [17]. El desarrollo de líneas base y bases de datos que permitan comparar la huella de carbono de una edificación con otras del sector ha sido dificultado por la aparición de numerosas metodologías de análisis de ciclo de vida [43].

El sistema descrito en la guía de referencia RICS establece que los impactos deben reportarse en unidades de intensidad de carbono tales como $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ haciendo la unidad apropiada y compatible con otras unidades del sector construcción. En LEED v4.1 también se está impulsando la utilización de esta unidad para reportar los resultados de cambio climático.

3.5.2 Gestión de la incertidumbre

Un aspecto importante de la interpretación de una huella de carbono y que es obligatorio para su cálculo es la incertidumbre.

La incertidumbre surge de la calidad de los datos de actividad, factores de emisión o datos sobre emisiones que se utilizan en el inventario. En general los datos primarios tendrán una calidad mayor que los datos secundarios. Para evaluar su calidad se pueden usar los cinco criterios indicados en la sección sobre datos secundarios.

La norma ISO 14067 [28] establece que la interpretación debe incluir una evaluación de la incertidumbre, incluida la aplicación de reglas o intervalos de redondeo y un análisis de sensibilidad de las entradas, salidas y opciones metodológicas significativas (como los procedimientos de asignación).

Además, debe haber una evaluación de los perfiles de uso alternativos en el resultado final (relacionado a la unidad funcional) y la evaluación de la influencia de diferentes escenarios de fin de vida (módulos de información C y D).

En general se utilizan matrices de *pedigree* para la determinación de la incertidumbre de un dato. Estas matrices son una rúbrica donde cada uno de los criterios de calidad (representatividad tecnológica, temporal y geográfica; completitud; confianza) se evalúa según su nivel de calidad (muy buena, buena, neutral o pobre). A cada nivel se le asigna una incertidumbre prestablecida [37], [73] que luego se utiliza para calcular la incertidumbre total de la huella, como se muestra en el ejemplo a continuación.

3.5.2.1 Ejemplo de gestión de la incertidumbre: calculadora hueCO2 (España)

En España se utiliza la plataforma hueCO2 para cálculo de Huella de Carbono durante la fase de diseño de carreteras. Esta plataforma considera para el cálculo tanto los materiales del sistema (masa) como la utilización de maquinaria y transporte (consumo de combustible y tipo). La base de datos contiene entradas para 205 actividades asociadas a la construcción de una carretera, incluyendo su factor de emisión y factor de incertidumbre.

La incertidumbre se define considerando cuatro factores:

- **Fuente:** un atributo cualitativo sobre la fiabilidad de la fuente
- **Geografía:** comparación entre la geografía donde se ha generado el dato y la geografía donde será utilizado.
- **Fecha:** antigüedad del dato
- **Metodología:** calificación dependiendo de la fiabilidad de la metodología.

Cuadro 1: Ejemplo de cálculo de incertidumbre para “Zahorra artificial”.

Cada producto usado para la zahorra artificial tiene un factor de emisión. Se calcula la puntuación media de cada factor de emisión, usando la matriz de pedigree a continuación.

| Puntuación | Criterios | | | |
|------------|----------------------------------|------------------------|-----------|---|
| | Fuente | Correlación Geográfica | Fecha | Metodología de Cálculo |
| 1 | Reconocida y fiable en el sector | Nacional | <5 años | Metodología reconocida (ISO 14040/64, PAS 2050, WBCSD/WRI, ACV, IPCC, DEFRA/DECC, etc.) |
| 2 | Reconocida y fiable en general | Europeo | 5-10 años | Metodología propia validada/verificada por un organismo externo e independiente. |
| 3 | Poco reconocida y fiable | Global/Internacional | >10 años | Metodología propia no reconocida ni verificada. Elaboración propia de HueCO2. |

Con la puntuación media de cada factor de emisión, se hace una media ponderada por la contribución a la huella de carbono.

$$\begin{aligned}
 & \text{Puntuación Zahorra artificial} \\
 & = \frac{2 \times 0,163 + 2 \times 0,176 + 2 \times 0,134 + 2 \times 0,334 + 1,25 \times 11,2 + 1,25 \times 0,478}{12,485} \\
 & = 1,298
 \end{aligned}$$

El resultado es un número de 1 a 3 y la incertidumbre del producto final es dado conforme la siguiente tabla.

| Puntuación Ponderada | Incertidumbre |
|---------------------------------------|---------------|
| Mayor o igual a 1 y menor de 1,5 | ±5% |
| Mayor o igual a 1,5 y menor de 2 | ±10% |
| Mayor o igual a 2 y menor o igual a 3 | ±20% |

Es decir, el rango de valores para la huella de carbono de la zahorra artificial es:

$$12,539 \pm 5\% = 11,236 \text{ a } 13,733 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

4 Revisión Bibliográfica Nacional

En esta sección se revisarán las herramientas producidas en Chile y que se relacionan con la huella de carbono y huella de carbono en edificaciones.

Muchas herramientas nacionales encuentran inspiración y recursos en otras extranjeras, con la necesaria adaptación a la realidad local. Algunas de ellas han sido desarrolladas por la comunidad de la construcción y otras por la comunidad de huella de carbono o análisis de ciclo de vida.

Con el paso de los años, las herramientas nacionales han seguido una trayectoria similar a las extranjeras: desde sistemas enfocados en la energía operacional, hacia la incorporación de la energía incorporada y luego las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, aún no se encuentran herramientas de producción nacional que consideren el ciclo de vida completo de la edificación.

La escasez de datos locales es un desafío nacional para la producción de estas métricas. Este problema normalmente es enfrentado usando datos y factores de emisión extranjeros (por ejemplo, Ecoinvent y factores de emisión del IPCC). Desde la academia y el sector público se generan estudios que ofrecen factores de emisión locales, y aunque su número aún es pequeño, se refieren a temas trascendentales en la determinación de la huella de carbono, como el factor de emisión de la electricidad.

En este capítulo se comentan las herramientas locales y se nombran algunas de las extranjeras que las complementan.

4.1 Aproximaciones metodológicas

4.1.1 Estándares

Chile, a través del Instituto Nacional de Normas y Estandarización (INN) ha adoptado los estándares ISO 14040, 14044 y 14067 de forma idéntica, los que se encuentran vigentes a la fecha de publicación de este informe.

Además, adoptó con modificaciones el estándar ISO 21930:2007 bajo el código NCh 3423⁷. Sin embargo, el nuevo estándar ISO 21930:2017 aún no ha sido adoptado, por lo que las mejoras de este estándar aún no aparecen en normas chilenas.

Adicionalmente a eso, Chile es uno de los pocos países del mundo que tiene un estándar nacional de carbono neutralidad, la NCh 3300, que se encuentra sin actualización desde su publicación en 2014. Esta norma está basada también en la ISO 14040, 14044, 14067 y la PAS 2060 (norma británica para la demostración de la neutralidad de carbono).

⁷ Nótese que el estándar ISO 21930 más actual es de 2017. Sin embargo, la traducción con modificaciones es de la versión de 2007.

4.1.2 Calculadoras

El programa Huella Chile apoya el cálculo de la Huella de Carbono organizacional o corporativa, la que corresponde al potencial de calentamiento global generado por una empresa durante un año calendario en todas sus actividades (productivas, administrativas y anexas). La huella se puede calcular considerando el alcance 1 (emisiones directas), alcance 2 (emisiones indirectas de la energía adquirida) y alcance 3 (otras emisiones indirectas) [19]. Este sistema ya incluye cálculo de incertidumbre [19] usando una matriz de *pedigree*.

En cuanto al uso de la energía, un elemento central a la hora de calcular la huella de carbono en el ciclo de vida, Huella Chile utiliza un factor de emisión para la matriz eléctrica chilena que considera las emisiones directas de la producción de energía (por ejemplo, lo que se emite en la combustión del carbón) pero no el carbono contenido en la infraestructura de generación.

Actualmente el Ministerio de Energía publica la huella de carbono promedio de la electricidad en el Sistema Eléctrico Nacional [74].

Un segundo ejemplo es la calculadora Ábaco, dedicada específicamente al cálculo del carbono incorporado de materiales de construcción y sistemas constructivos. La metodología de cálculo incluye desde la extracción de materias primas hasta la “puerta” del productor (módulos de información A1-A3) [75].

La calculadora está montada sobre dos bases de datos diferentes [75]:

- Base de datos de recursos: es una lista codificada de elementos de uso común en proyectos de construcción, divididos en materiales, maquinaria y mano de obra. A la fecha de publicación de este informe se está operando solo con materiales.
- Base de datos de actividad: una lista codificada de ítems típicos de un presupuesto para construcción.

Ambas contienen los costos, impactos ambientales e impactos sociales de cada ítem.

Desde el punto de vista del levantamiento de datos, esta calculadora se basa en los datos de Ecoinvent 3.0, con una adaptación central: se utiliza la matriz energética chilena del año 2017, con *todos sus impactos de ciclo de vida* de las tecnologías de generación usadas en Chile. Es decir, esta medida de carbono incorporado no solo cuenta las emisiones directas de la producción de las materias primas, sino también las indirectas [75].

En el otro extremo del ciclo de vida se encuentra la aplicación Recylink, que ofrece una estimación de la huella de carbono evitada por sus clientes al reciclar sus residuos de construcción. Este número se calcula en base a factores de emisión referenciales. Los datos que Recylink utiliza son las toneladas de residuos (por tipo) reciclados a través de su sistema⁸.

⁸ Conversación personal entre Pia Wiche y el CEO de Recylink, 29 de Noviembre de 2018.

4.1.3 Contribución Nacionalmente Determinada (NDC)

La actual NDC de Chile considera la estabilización de las emisiones de gases de efecto invernadero al 2027, excluyendo las fijaciones por masa forestal del país [12], un desafío si se considera que en ese periodo la población se estima aumentará en más de 3 millones de habitantes, requiriendo más de un millón de nuevas viviendas (no se encontró la referencia base).

136 países han incluido menciones específicas al sector construcción [4]. Chile por el momento no lo hace.

4.1.4 Sistemas de Certificación de edificación y guías de diseño

La experiencia chilena en certificación de sustentabilidad para edificaciones ha seguido una trayectoria similar a la internacional, iniciando con herramientas para la eficiencia energética operacional y avanzando en complejidad hacia una visión de ciclo de vida que incorpora varios impactos ambientales, como se discutirá a continuación.

En Chile se han implementado de forma exitosa sistemas de certificación para edificaciones internacionales, sirviendo estos como base para la creación de las actuales herramientas locales. Algunos de estos sistemas con las certificaciones LEED y Passivhaus siendo complementado en los últimos años con las certificaciones EDGE y WELL [76].

Además de las certificaciones de origen extranjero que han llegado a Chile, se ha generado de forma local algunas herramientas para fomentar la sustentabilidad en la construcción, con diferentes niveles de complejidad y alcance, las que se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3. Herramientas chilenas para cuantificar la sustentabilidad en el sector construcción bajo enfoque de ciclo de vida.

| Herramienta | Tipo | Objeto | Alcance |
|---------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| CEV | Calificación | Vivienda | Eficiencia energética y calidad del ambiente anterior. |
| CES | Certificación | Edificios de uso público | Enfoque de ciclo de vida para agua y energía operacional (módulos B6 y B7), en línea con estándares ISO 14040, 14044, 14025 y estándares europeos para ACV en edificación EN 15805 y EN 15978 [77]. |
| CVS | Certificación | Vivienda | Enfoque de ciclo de vida para agua, energía y materiales, además de inclusión de impactos ambientales como cambio climático, contaminación lumínica y protección del suelo. |
| DAPCO (no vigente) | Programa de DAP | Materiales de construcción | Declaraciones ambientales de productos de construcción. |
| ECOBASE | Base de datos | Materiales de construcción | Datos del ciclo de vida para todas las categorías de impacto del método ReCiPe. |

Los sistemas de certificación y calificación funcionan con un sistema de “precertificación”,⁹ enfocada en orientar el diseño de la edificación y luego una “certificación” donde se evalúan los requerimientos de la herramienta en el proyecto construido. En esta instancia el levantamiento de información se hace con documentación de respaldo, como guías de despacho, facturas de compra y características técnicas de los equipos instalados, entre otras [77]. Esta lista de documentación constituye un método de levantamiento de información para recoger datos asociados a la huella de carbono. En el Anexo A se encuentran descripciones más detalladas sobre los sistemas de certificación.

El Programa de Declaración Ambiental de Productos para el sector de la Construcción en Chile (DAPCO) utilizó reglas por categoría de producto (RCP) extranjeras luego que sus tres paneles sectoriales (hormigón, acero y madera) concluyeran que el mercado aún requería más madurez en análisis de ciclo de vida para configurarlas.

En general, se usan RCP existentes para la categoría de productos, y en su ausencia, las declaraciones ambientales de productos en Chile siguen el estándar EN 15804 (estándar base).

4.1.5 Base de datos

El esfuerzo nacional más cercano al establecimiento de una base de datos de ciclo de vida para la construcción se realizó con el proyecto ECOBASE Construcción (código INNOVA CORFO 13BPC3-19203), cuyo fin fue establecer los primeros inventarios locales de acceso abierto para el sector de la construcción. Los resultados fueron una guía con una metodología para el desarrollo de los inventarios, protocolo para el uso de datos, así como también el desarrollo de una plataforma online de información con sistema de gestión y cálculo (vías calculadoras integradas) para evaluación de sustentabilidad con metodología ACV, ahora fuera de línea.

4.2 Objetivo y alcance

4.2.1 Objetivo del estudio

Similar al caso internacional, los sistemas de certificación chilenos buscan comparar el desempeño de la edificación a un caso base.

Los sistemas chilenos son multicriterio, pero tienden a considerar los impactos de cada etapa del proceso, es decir, la certificación tiene una visión parcial del ciclo de vida.

Incluso los criterios ambientales que podrían acercarse a una visión integrada del ciclo de vida son voluntarios (y no obligatorios) para la obtención de puntaje. Ejemplos de esto son las certificaciones CES y CVS. En CES sólo se pide el reporte de energía y agua; en CVS existe un parámetro voluntario de elección de materiales en base a DAP que exige solo un 5% de la materialidad de la vivienda. Es dentro de esta DAP que se incluye la huella de carbono.

⁹ La precertificación es opcional para los programas CES y CVS y obligatoria para la CEV.

En el caso de Ábaco, su objetivo es predecir costos económicos, ambientales y sociales en la etapa de diseño de un proyecto de construcción. Este tipo de calculadora es similar a lo que realiza OneClick LCA, con la diferencia que en Ábaco se ha ajustado la base de datos para que considere el mix eléctrico chileno [75].

No existe un sistema integrado para la evaluación de edificaciones. Todos los sistemas analizados se refieren a un subconjunto de ese sector, como edificios de uso público o viviendas.

4.2.2 Unidad funcional

Al igual que en el caso internacional, la experiencia chilena ha separado entre *unidad declarada* para estudios “de la cuna a la puerta” [77], los que normalmente se asocian a materiales de la construcción, y *unidad funcional* para edificaciones.

- CES exige una unidad funcional o declarada para cada uno de los materiales estructurales para cumplir con las opciones 1 y 2 del reporte de energía o agua.
- En el caso de CVS se solicita una unidad declarada para los análisis “de la cuna a la puerta” y una unidad funcional para los análisis “de la cuna a tumba”. Esta certificación además sugiere unidades declaradas en m^2 , m^3 y kg dependiendo de cada tipo de material.
- En el caso del proyecto ECOBASE se establecieron unidades declaradas debido a que todos los productos estudiados correspondían a materiales con aplicaciones variadas e inespecíficas dentro de la edificación, por lo tanto, no quedaban definidos por un desempeño o funcionalidad determinada. En estos casos, la definición de la unidad declarada es equivalente al nombre detallado del material que permite identificarlo como flujo de referencia, más otra información que especifica sus características relevantes.
- Ábaco permite tanto la producción de Análisis de Ciclo de Vida para productos de la construcción o edificaciones.

4.2.3 Alcance

4.2.3.1 Etapas del ciclo de vida

Se desprende de la revisión a los alcances que en general los sistemas locales sólo evalúan el alcance de la cuna a la puerta (modulo A, ver Figura 2, página 3).

- En el caso de CES, la evaluación define como alcance del sistema sólo los elementos estructurales¹⁰ de la edificación para la etapa de producto (modulo A1-A3 según estándar EN 15978).

¹⁰ En el marco del sistema se entienden como elementos estructurales aquellos elementos aislados “tales como cimientos, vigas, columnas, muros, cerchas, que en su conjunto conforman el sistema estructural principal del edificio, cuya función será resistir las cargas gravitacionales y fuerzas laterales” [77], excluyendo elementos de muros cortina y muros interiores no soportantes. En este contexto los principales materiales estructurales son productos de hormigón, acero, albañilería, y madera.

- En el caso del requerimiento voluntario de CVS para la elección de materiales con DAP, estos deben ser parte de *elementos permanentes de la construcción*, es decir, estructura, envolvente o terminaciones evaluados en etapa de producto (según estándar ISO 21930), incluyendo cimientos, muros, estructuras, ventanas y puertas, paneles y placas, cubiertas, terminaciones interiores y terminaciones exteriores. Las DAP de productos suelen realizar el análisis de la cuna a la puerta, por la dificultad de estimar los escenarios de fin de vida.

4.2.3.2 Alcance geográfico

Normalmente los sistemas de certificación tienen como alcance la edificación bajo análisis, pero CVS considera no solo el terreno donde se construirán las viviendas, sino toda el área afectada por el proyecto o que presta servicios a él.

4.3 Inventario

La progresiva medición de la huella de carbono en edificación y del mercado de edificios a futuro depende de datos que pueden informar a su vez a varios programas actualmente vigentes. Por ejemplo, las intensidades de materiales (kg material/m²) se pueden obtener a través de análisis de flujo material en el marco del programa de Economía Circular o tener concordancia con algunas de las actividades descritas a través de la Hoja Gestión Sustentable de Residuos en Construcción. Una mejor descripción del flujo total de productos de construcción y de residuos a lo largo del ciclo de vida clasificado en tipo de material permite fortalecer datos que informan varias de estas iniciativas. Por otra parte, una mejor estandarización en especificaciones y documentación de los proyectos está contenido en los Programas de Industrialización de la Construcción y de Plan BIM y permitiría además facilitar el análisis de la huella de carbono.

La Agencia de Sostenibilidad Energética tiene una guía específica para la auditoría energética en edificaciones que incluye los elementos a ser auditados, equipos necesarios y metodología de cálculo para el consumo [78]. Además, muchas empresas usan la ISO 50001 para sus auditorías energéticas (add ref.). Esta información es relevante ya que corresponde con la recogida de "datos de actividad", los que luego pueden ser incorporados en una calculadora de huella de carbono.

Como ya se ha indicado, los sistemas presentes en Chile tienen múltiples criterios que se apoyan en el levantamiento de datos a partir de varias fuentes.

La mayoría de los sistemas vigentes se enfoca en energía y solo dos motivan la utilización de DAP. Adicionalmente, la CVS cuenta con una variable sobre Gases de Efecto Invernadero, cuyo cumplimiento es voluntario, que incluye tres requerimientos [79]:

- 5.1.2.a Refrigerantes no contaminantes: equipos de climatización con alta eficiencia energética y que usen gases refrigerantes de bajo impacto para el agotamiento de la capa de ozono (Potencial de Agotamiento de Ozono = 0) y cambio climático (PCG ≤ 25).
- 5.1.2.b Maquinaria y vehículos eficientes: referido a la maquinaria de alta potencia usada durante la construcción.

- 5.1.2.c. Aislación térmica no contaminante: un requerimiento específico para espuma rígida de poliuretano.

Estos requerimientos evalúan solo algunas de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la etapa de construcción de una edificación, pero no constituyen una huella de carbono en el ciclo de vida.

La certificación indica cuáles son los métodos de prueba para la obtención del puntaje asociado a la variable, entre las cuales se encuentran: planimetría, fichas técnicas, memoria de cálculo, reportes de inspección en obra y guías de despacho, entre otras [79].

Ábaco utiliza una base de datos extranjera (Ecoinvent) para modelar los materiales. Luego los analistas ingresan los datos locales sobre el material o la edificación, por ejemplo, el área de tablero usado para la construcción de un módulo de aislación [75].

4.3.1 Base de datos para el inventario de gases de efecto invernadero

El proyecto ECOBASE caracterizó 15 sistemas de producto para las cinco familias de productos de construcción más utilizadas en el sector:

1. Mezclas de hormigón: Cemento¹¹, Hormigón H30, Hormigón H40 y Mortero;
2. Acero: perfil promedio y barras;
3. Madera: terciado Plywood, madera estructural, tablero MDF, madera aglomerada, OSB;
4. Albañilería: ladrillo;
5. Yeso cartón: Yeso Cartón ST, Yeso Cartón RF, Yeso Cartón RH.

Cada familia de producto se evaluó de la “cuna a la puerta” es decir sólo para la etapa de producción (módulos de información A1-A3).

Los procesos unitarios¹² incluyeron [80]:

- Adquisición, almacenaje y transferencia de energía;
- Procesamiento de materias primas a productos intermedios y finales;
- Incineración con o sin recuperación de energía;
- Reciclaje y recuperación de materiales de residuos;
- Transporte de materiales, combustible y productos en todas las etapas;
- Procesos de control de la contaminación, incluyendo tratamiento de residuos.

Estos inventarios se construyeron con datos primarios para procesos unitarios que representaran las diversas realidades de la industria de la construcción local. Debido a esto, se trabajó en

¹¹ En el caso del cemento, se utilizaron datos secundarios de la industria local y datos primarios de producto importado.

¹² Elemento más pequeño considerado en el inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida (ISO 14040)

recolectar con cada representante de empresa cada uno de los datos establecidos en una planilla jerarquizados en:

- Insumos materiales y energéticos;
- emisiones directas al aire, agua y suelo;
- residuos o desechos de los procesos, sólidos y líquidos;
- productos y coproductos.

Con el fin de proteger la confidencialidad de los datos de cada empresa, los resultados finales se presentaron como agregaciones y promedios para no revelar los datos primarios específicos entregados por cada entidad. Los datos de una misma tecnología se promediaron horizontalmente, es decir, para cada unidad de proceso se calculó un promedio ponderado para llegar a un inventario representativo de la industria, con el fin de identificar los procesos que más contribuyeron en las salidas y entradas relevantes. Estos promedios fueron calculados en función del volumen de producción de las empresas participantes.

4.4 Impacto

Al igual que en el caso de las herramientas extranjeras, los métodos chilenos calculan el potencial de calentamiento global en base a los datos y factores provistos por el IPCC, correspondientes al método de impacto GWP 100.

4.5 Interpretación

La calificación energética de viviendas (CEV) considera varios criterios para otorgar la calificación, como las características de la envolvente térmica, la inercia térmica y la radiación, entre otros. Los resultados se distribuyen de la A+ a la G dependiendo de su desempeño energético con respecto al estándar, la letra E [81]–[83]. La calificación entrega un porcentaje de ahorro en base a la vivienda estándar, la letra de eficiencia y la demanda energéticas en kWh/m². Además, el sistema cuenta con un “contador de emisiones”, que expresa la calificación energética de la vivienda en términos de CO₂ equivalente [84].

Tanto en los sistemas de certificación CES y CVS el reporte de los datos se establece dentro de un sistema de ecoetiquetado. En el caso de CES bajo ecoetiqueta I y III (DAP) y en el caso de CVS ecoetiqueta tipo III. En ambos casos la interpretación es variada, y depende de las etapas del ciclo de vida consideradas en cada etiqueta.

En Ábaco la interpretación se realiza en base a los resultados económicos, sociales y ambientales de la cuna a la puerta para el caso de materiales. Esta modelación podría llevar a elegir materiales con menos carbono contenido pero que causen mayor carbono operacional. Las principales unidades para el impacto ambiental son la energía contenida y la huella de carbono [75].

5 Diagnóstico

5.1 Identificar metodologías más aplicables a la realidad nacional

Chile cuenta con herramientas que incorporan metodologías para la producción de huella de carbono, como Huella Chile, la NCh 14067 o Ábaco, pero aún no existe una que realice el cálculo sobre todo el ciclo de vida de la edificación.

Dentro de la industria de la construcción local existe un conocimiento incipiente de las normas ISO 21930, EN 15978 y EN 15804 gracias a su incorporación a los principales sistemas de certificación CVS y CES. Además, ya se ha adoptado la NCh 14067 Huella de Carbono de Producto, que permite ordenar el alcance de un estudio de huella de carbono para una edificación. Dentro de la norma se exige la utilización de reglas por categoría de producto (RCP).

Las RCP han sido armonizadas bajo el desarrollo de la norma EN 15804 que entrega la RCP base para ser complementada con la RCP específica. Las RCP de cualquier programa DAP del mundo bajo el marco del programa de armonización global de las RCP pueden ser adoptadas en cualquier localidad. En Chile ya existen a través del programa de declaraciones ambientales de producto "International EPD System" que tiene operación en América Latina. Para más información de las RCP del EPD System vigentes que aplican a esta industria se puede revisar el Anexo C.

De esta forma, se cuenta con un marco ordenador completo para la producción de Huellas de Carbono de la edificación.

5.2 Identificación de brechas

5.2.1 Objetivo del estudio

Las herramientas revisadas tienen dos focos potenciales: el análisis de decisiones de diseño y la certificación del desempeño de un producto de construcción.

En el caso de las certificaciones chilenas, estas muestran un sistema de tres etapas: pre-certificación, para orientar el diseño; certificación, para certificar la obra ya construida y algunas incluyen una etapa de operación, para certificar el desempeño de la obra durante la fase de uso.

El objetivo de la herramienta afecta la metodología de levantamiento de datos utilizada. Mientras el análisis de decisiones de diseño se puede realizar en con la cubicación y bases de datos genéricas, la certificación del desempeño de un producto (incluyendo una edificación) requiere datos primarios relacionados con la obra, como los consumos reales que se dieron.

5.2.1.1 Estandarización de la unidad funcional

Otro aspecto importante que resaltar es la forma de definir la unidad funcional, o de establecer una descripción que haga comparables los resultados de huella. En Chile no existe un sistema genérico como OMNICLASS para caracterizar una edificación y por lo tanto se dificulta la definición de la unidad funcional para comparar resultados de huella de carbono.

Los distintos instrumentos internacionales revisados en este informe se caracterizan por la interoperabilidad con otros sistemas software, herramientas de asistencia al diseño ya existentes en el mercado y los formatos de documentación de diseño establecidos en cada país de origen. Esto es posible debido a la estandarización que existe en la producción del diseño en países extranjeros lo que permite entre otras cosas establecer reglas homogéneas para el reporte y descripción de los sistemas en la edificación, un aspecto critico en la etapa de definición de alcances y objetivos.

5.2.1.2 *Etapas del ciclo de vida*

Una gran dificultad a la hora de definir una base de datos en el ciclo de vida es definir los límites del sistema: el conjunto de etapas que serán consideradas dentro del estudio. En el caso local, se observa que la gran mayoría de los instrumentos considera el carbono incorporado solo de la etapa de producción de materias primas (módulos de información A1-A3). Para avanzar en las etapas de edificación, uso y fin de vida, se puede considerar el marco ofrecido por la ISO 21930 y mostrado en la Figura 2, página 3 de este informe.

Metodologías más recientes, como la Certificación Vivienda Sustentable (CVS) incorporan algunos requerimientos con enfoque de ciclo de vida, pero no existe aún un instrumento que solicite la huella de carbono completa de productos, servicios o edificaciones.

La plataforma Ábaco y anteriormente la base de datos ECOBASE entregan información sobre el carbono contenido de los materiales, pero no integran de forma automática ese material en la edificación. La exclusión de etapas del ciclo de vida puede afectar la decisión de uso de un material sobre otro, desviándose del objetivo (reducir la huella de carbono en todo el ciclo de vida de la *edificación*).

Una incipiente industria de declaraciones ambientales de producto abarca el cálculo de huellas de carbono de productos en su ciclo de vida, pero aún no a nivel de edificación.

Tal vez la herramienta actualmente vigente y de producción nacional que se acerca más a una huella de carbono en el ciclo de vida sea Huella Chile, pero su alcance por el momento es corporativo, no de producto.

Existen diversas brechas propias de la industria de la construcción local que impiden la aplicación de un enfoque más integrado para el análisis de todas las etapas del ciclo de vida de la edificación.

En primer lugar, la fragmentación de la cadena de producción de las edificaciones y la infraestructura conlleva a que distintos actores se hagan cargo de etapas separadas que se desarrollan de forma disgregada. Por ejemplo, el diseño a cargo de propietarios, diseñadores e ingenieros, construcción a cargo de una constructora con su propia documentación, administradores a cargo de la operación.

En segundo lugar, el uso de documentos físicos y la falta de un repositorio compartido provoca la fragmentación de la documentación de cada etapa y sus respectivos datos, que no se

transfieren entre distintos actores. Una consecuencia de esto es que si una inmobiliaria o inversionista desean calcular la huella de carbono de un edificio será muy difícil obtener todos los datos de actividad necesarios para realizarla.

Los sistemas de la edificación pasan por distintos y numerosos ciclos de renovación lo que conlleva a un alto impacto sobre la huella de carbono total de la misma a lo largo de un ciclo de vida estándar de 60 años. El método de evaluación de huella de carbono debiese incluir una estimación a priori del número de renovaciones a lo largo del ciclo de vida de la edificación.

5.2.1.3 Alcance

En Chile no existe un formato unificador para describir los sistemas constructivos utilizados en edificación del estilo de OMNICLASS, UNIFORMAT o BCIS. La ausencia de este formato puede dificultar la comparación de resultados entre distintos proyectos, restando valor a la calculadora para la edificación al no poder entregar un benchmark preciso.

5.2.2 Datos

En Chile ya existen metodologías para el levantamiento de datos de gases de efecto invernadero a nivel sectorial (INGEI), de producto (RCP) y de edificación (NCh 3423, ISO 21930:2007) para el ciclo de vida de la edificación, pero aún resta el acceso a datos de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en todo su ciclo de vida.

La experiencia hasta el momento ha estado centrada en datos sobre consumo energético, y solo recientemente se ha incluido la medición del carbono incorporado para algunos elementos de la edificación (como el uso de espumas en la CVS).

Un aspecto relevante a considerar con respecto a los datos es la variedad de gases de efecto invernadero que se consideran para el cálculo. Actualmente la estimación de la demanda energética suele transformarse solo a CO₂, sin considerar la emisión de otros gases. Solo la consideración de espumas y sistemas de climatización en CVS considera otros gases con alto potencial de calentamiento global.

Asimismo, en Chile se utilizan bases de datos extranjeras, como Ecoinvent, para realizar huellas de carbono. Para aumentar la disponibilidad de información más ajustada a la realidad latinoamericana, se podría explorar la base de datos Mexicanuuh (Mexico) o SICV (Brasil).

5.2.2.1 Reglas por categoría de producto

Las reglas por categoría de producto (RCP) para edificaciones conforme a norma EN 15804 actualmente vigentes pueden no estar adecuadas a las condiciones geoclimáticas, de norma constructiva o de mercado nacional. Asimismo, es posible que aún no existan RCP para ciertos productos que se estimen prioritarios.

Esta brecha puede resolverse participando activamente de la actualización de las RCP existentes para el sector construcción en los años venideros, proponiendo nuevas RCP en los programas de DAP existentes, o con el establecimiento de un programa nacional de declaración ambiental de

productos (DAP) que establezca sus propias RCP. En cualquier caso, se debe procurar mantener la comparabilidad de los productos, incluso entre programas de DAP diferentes.

De escoger la segunda opción, se abre una nueva brecha, que es la de la poca capacidad instalada en el país para la producción de Reglas por Categoría de Producto. Abrir un nuevo programa de DAP requeriría una fuerte inversión en creación de capacidad nacional. Esta serviría para aumentar el nivel técnico y la cantidad de expertos nacionales en esta área, dinamizando el mercado y haciéndolo más accesible para todas las empresas.

5.2.2.2 Barreras de acceso

El desarrollo de DAP tiene un alto costo monetario y temporal para las empresas, explicado por la poca oferta de profesionales capaces de realizarlo y el alto costo de las bases de datos de referencia, necesarias dada la pequeña cantidad de datos locales disponibles. Asimismo, el beneficio de una DAP para la industria aún es poco claro, lo que explicaría la poca penetración que este instrumento ha tenido en Chile a pesar de su promoción por más de ocho años en el mercado local.

Mientras una DAP requiere un equipo técnico de alta calificación que sea capaz de realizar análisis de ciclo de vida, que es escaso en el país, el mercado de huellas de carbono está más poblado y es más dinámico, a pesar de la pequeña cantidad de empresas que hasta el momento están participando de él.

5.2.2.3 Metadatos

Los metadatos son las informaciones sobre los datos presentes en la base de datos. Asegurar la calidad y la transparencia de los factores de emisión es importante debido a que la huella de carbono es central en todos los SCE. Una solución para esto es tener buenos metadatos de cada factor, donde se indique su fuente y el año de actualización, una lista actualizada de los gases que se consideran en los registros de la base y cuál tier se usó para calcularlos.

Una estructura de metadatos abiertos que los usuarios puedan consultar y verificar puede ayudar a reducir los costos de revisión y actualización a través de la gestión comunitaria. En el caso de Brasil y su plataforma de datos de ciclo de vida, la organización que la aloja (IBICT) tiene un equipo dedicado a realizar el aseguramiento de los datos de la plataforma.

5.2.3 Evaluación del efecto sistémico

Cada casa y edificio constituye una célula dentro del gran tejido urbano; cada edificación opera de forma independiente, pero puede interactuar con otras para generar fenómenos emergentes y positivos para la huella de carbono nacional. Una brecha general es la poca incorporación de los impactos causados por la interacción entre las edificaciones.

Por el momento no se considera en las metodologías el impacto que una obra pueda tener en el incremento de huella de carbono del transporte (por tránsito lento) o contribución a la demanda energética del sistema eléctrico nacional a través de net-metering, entre otras.

5.2.4 Incertidumbre

Si bien algunas plataformas y metodologías han considerado el cálculo de la incertidumbre, no se observa que su cálculo y reporte sea un requerimiento explícito en las certificaciones más recientes de Chile. En contraste, los estándares internacionales (ISO y EN) sí exigen el reporte de la incertidumbre, e incluso algunos limitan el nivel de incertidumbre en los resultados, como en el ejemplo de la calculadora hueCO₂.

Dentro de una calculadora, el valor de la incertidumbre tiende a ser el mismo para todos los casos de uso. En Chile, por la variedad de climas y geografías, una determinada fuente de datos puede ser geográficamente adecuada para un tipo de edificación e inadecuada para otro. Por eso, calcular dinámicamente la incertidumbre según el dato utilizado y el caso de aplicación es un trabajo de investigación interesante y que podría ayudar a generar estimaciones más confiables de la huella de carbono de edificaciones.

5.3 Sector construido y renovaciones

Para alcanzar la carbono neutralidad del sector al año 2050 se debe generar metodología no solo para los edificios que serán construidos, sino todos los que están actualmente en operación. Si bien ya no se puede afectar mucho su carbono incorporado, sí se pueden realizar renovaciones que aumenten su eficiencia energética.

Conclusión

La revisión de instrumentos internacionales demuestra que muchos de los SCEs, estándares y bases de datos siguen la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) descrita en estándares tradicionales, lo que conlleva una alta complejidad de implementación dada la variedad de datos y modelos de impacto requeridos para realizarla. Dado que la huella de carbono es una categoría de impacto dentro de las muchas disponibles en un ACV, enfocarse solo en este impacto simplifica el levantamiento de datos y el cálculo del impacto ambiental.

La transición desde sistemas de certificación de un criterio a aquellos multicriterio y también una transición hacia sistemas con enfoque de ciclo de vida (LEED v4.1, BREEAM, Net Zero Carbon) es una tendencia tanto para los sistemas extranjeros como los nacionales. Chile se encuentra actualmente en un punto intermedio de esta transición, con sistemas multicriterio, pero cuyos criterios no necesariamente están armonizados alrededor del ciclo de vida completo de la edificación.

A nivel internacional, la huella de carbono se analiza tanto a nivel de edificio como de producto para todas las herramientas analizadas, pero varía su forma de plantear el estudio para las cuatro etapas: objetivo y alcance, análisis de inventario, análisis de impacto e interpretación de resultados, lo que tiene efectos sobre la metodología de levantamiento de datos.

A nivel macro, los sistemas para la medición de la huella de carbono cubiertos en esta revisión tienen dos grandes tipos de objetivos:

- Análisis de decisiones de diseño: Apoyar el diseño más sustentable;
- Certificar el desempeño de un producto de construcción o una edificación.

Es relevante que los sistemas de certificación chilenos contemplen ambos objetivos, pero para la definición de una metodología de estimación de la huella de carbono de la edificación ambos significan dos formas diferentes de realizarla, especialmente en lo referente a los datos a levantar.

Si se define que la huella es para apoyar el análisis de decisiones de diseño en edificaciones, entonces se puede utilizar los datos de cubicación y una base de datos robusta, aunque no nacional (como Ecoinvent) para estimar los impactos. Si por otro lado el objetivo es certificar el desempeño, el levantamiento debe considerar los consumos reales productos de construcción y materiales en la edificación (incluyendo pérdidas) y se requiere factores de emisión locales.

No existe hasta ahora un sistema de *certificación* de huella de carbono de productos (incluyendo edificios) que considere todas las emisiones de GEI en el ciclo de vida completo de la edificación, ya sea como parte de un análisis de ciclo de vida o individualmente como huella de carbono.

Para efectos de la comparación de los resultados de la edificación con un estándar o con otras edificaciones similares se puede adoptar un estándar de descripción, como lo son UNIFORMAT u OMNICLASS. Este punto es uno de los principales desafíos de los sistemas de certificación extranjeros y es un punto que se debe resolver para lograr la comparabilidad en el sistema.

En el siguiente nivel, se encuentran diferencias en las etapas del ciclo de vida de la edificación que se consideran para entregar una certificación o medir el impacto ambiental. Muchos de los sistemas solo consideran la extracción de materias primas y generación de productos para la edificación (módulos de información A1-A3, ISO 21930). Para evitar la transferencia de cargas a otros puntos del ciclo de vida y conocer los impactos tanto del carbono incorporado como el operacional, es necesario que la metodología de levantamiento de datos para huella de carbono considere todo el ciclo de vida: producción de materias primas y construcción (módulo A), operación de la edificación (B), y fin de vida (C). Si se desea promover también el uso de materiales reciclados en la industria, será de utilidad considerar también el módulo de reciclaje y reutilización (D), completando de esta forma todas las etapas del ciclo de vida descritas en la EN 15978 e ISO 21930.

Para lograr ese objetivo se requieren datos locales de calidad y de bajo costo. La producción de datos locales es particularmente importante si se tienen en consideración la diversidad de climas, sistemas constructivos, arquitecturas, estándares y fuentes de los materiales existentes en Chile.

Actualmente en Chile existen en el mercado productos con análisis de ciclo de vida y DAP con el enfoque "de la cuna a la puerta" de algunos materiales prioritarios (cemento y barras de refuerzo), correspondientes a la etapa de producción (módulos de información A1-A3 de la EN 15978). Por supuesto, la brecha principal aquí es la reducida cantidad de estas DAP y sus consecuentes huellas de carbono. La ausencia de datos locales se resuelve en la práctica usando factores de emisión genéricos de fuentes confiables como el IPCC, bases de datos genéricas como Ecoinvent, bases de datos producto-específicas o artículos académicos.

La base de factores de emisión del IPCC puede ser una interesante fuente de información para la determinación de la huella de carbono de edificaciones en Chile. Gracias a los registros aduaneros y la identificación del origen de los materiales de construcción importados a Chile, se puede conocer la cantidad de material utilizado. En la base de datos del IPCC se encuentran los factores de emisión de elementos tan relevantes como el cemento y acero producidos en China (solo para CO₂).

Para efectos de información nacional, Chile ya cuenta con formularios de solicitud de información sobre emisiones de GEI para industrias prioritarias, que se pueden potenciar cerrando acuerdos de colaboración con asociaciones gremiales o actores relevantes de la industria.

En el extranjero ya se ha visto la tendencia a la producción de datos locales y al aprovechamiento de los datos generados por los programas de DAP. Asimismo, grandes programas como Ecoinvent fomentan la producción de datos nacionales. Esta forma de levantamiento de información puede ser también útil para robustecer la capacidad local en análisis de ciclo de vida y huella de carbono de producto, que por el momento es limitada. Además, datos locales y producto-específicos de la industria local permitiría valorar la industria, así como dar mayor precisión a la medición de huella de carbono incorporado y operacional.

Además de la falta de datos de huella de carbono de materiales, para lograr la huella de carbono en el ciclo de vida de la edificación las principales brechas son la desconexión documental entre los diversos actores que participan del ciclo de vida de una edificación, la falta de capacidad técnica instalada en el país para la producción de huellas de carbono de ciclo de vida de alta calidad y el costo de producción de este tipo de métricas.

Finalmente, es necesario considerar la elección de un indicador único que sea congruente con las unidades de medición tradicionales de la industria AECO, como la intensidad de carbono por área construida ($\text{kg CO}_2\text{eq/m}^2$). Ya sea para el fomento de un mejor diseño como para la certificación, el uso del área es un denominador conocido por la industria y fácil de comunicar que ya está siendo usado en otros esquemas de certificación. Este indicador es también compatible con el método de impacto por excelencia para la huella de carbono: GWP100.

En Chile ya existe el marco normativo para realizar huellas de carbono del ciclo de vida completo de la edificación a través de las normas NCh 3423, NCh-ISO 14067 y las reglas por categoría de producto internacionales que sean compatibles con la norma EN 15804 (ver Anexo C). Las metodologías de recolección de datos están descritas en las RCP de cada material y se pueden apoyar con las herramientas desarrolladas para el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Para oficializar el uso de la metodología más actualizada de huella de carbono en construcción solo sería necesario adoptar la ISO 21930:2017.

Finalmente, con el objetivo de alcanzar las metas de carbono neutralidad del sector, los autores consideran importante encontrar herramientas para motivar al mercado a producir esta información, ya sea a través de certificaciones voluntarias u otro tipo de instrumentos regulatorios (por ejemplo, impuestos verdes).

Referencias

- [1] Programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente (PNUMA), "¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida?," p. 28, 2004, doi: 10.1126/science.274.5294.1921.
- [2] US EPA, "Understanding Global Warming Potentials | Greenhouse Gas (GHG) Emissions | US EPA," *US EPA*, 2020. .
- [3] Organización de las Naciones Unidas, "Objetivo del Desarrollo Sostenible 11: Ciudades." [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>. [Accessed: 27-Jan-2020].
- [4] Global ABC, IEA, and UNEP, *2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. 2019.
- [5] International Energy Agency (IEA), "Material efficiency in clean energy transitions," Paris, 2019.
- [6] World Green Building Council (WorldGBC), "Bringing embodied carbon upfront," London, 2019.
- [7] Comisión Nacional de Energía, "Balance nacional de energía – Energía Abierta." [Online]. Available: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [8] Ministerio del Medio Ambiente, "Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile 1990-2016," in *Tercer informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático*, Santiago, Chile, 2018, p. 762.
- [9] M. Röck *et al.*, "Embodied GHG emissions of buildings - The hidden challenge for effective climate change mitigation," *Appl. Energy*, no. June, p. 114107, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114107.
- [10] R. Forray and M. Vicuña, "Opinión: Cuidado con las confusiones sobre la densidad," *Plataforma Urbana*, 2014. [Online]. Available: <http://www.plataformaurbana.cl/archive/2014/11/12/opinion-cuidado-con-las-confusiones-sobre-la-densidad/>. [Accessed: 27-Jan-2020].
- [11] B. X. Rodriguez, H. W. Lee, K. Simonen, and M. Huang, "LCA for Low Carbon Construction: Embodied Carbon Estimates of Mechanical, Electrical, Plumbing and Tenant Improvements," Seattle, WA, 2019.
- [12] Climate Action Tracker, "Pledges And Targets: Chile," 2019. [Online]. Available: <https://climateactiontracker.org/countries/chile/pledges-and-targets/>. [Accessed: 22-Jan-2020].
- [13] The International Standards Organisation, "ISO 14040:2006 Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia." 2006.
- [14] European Standards Organisation, "EN 15978:2012. Sostenibilidad en la construcción.

Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo." 2012.

- [15] The International Standards Organisation, "ISO 21930:2017 Sustainability in buildings and civil engineering works - Core rules for environmental product declarations of construction products and services." International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [16] World Green Building Council (WorldGBC), "Reducción de las emisiones de carbono: Acción coordinada del sector de la edificación y la construcción para hacer frente a las emisiones de carbono incorporado - Resumen Ejecutivo," London, United Kingdom, 2019.
- [17] Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS), "Whole life carbon assessment for the built environment," p. 41, 2017.
- [18] J. Huang, B. Mendoza, J. S. Daniel, C. J. Nielsen, L. Rotstayn, and O. Wild, "Anthropogenic and natural radiative forcing," *Clim. Chang. 2013 Phys. Sci. Basis Work. Gr. I Contrib. to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang.*, vol. 9781107057, pp. 659–740, 2013, doi: 10.1017/CBO9781107415324.018.
- [19] Programa HuellaChile, "Manual de Usuario Herramienta de Cálculo de Gases de Efecto Invernadero Organizacional." 2016.
- [20] Athena Sustainable Materials Institute, "Athena Guide to Whole-Building LCA in Green Building Programs," 2014.
- [21] D. Wolff, A. Duffy, and G. Hammond, "Comparative Analysis of Life Cycle Inventory Techniques and Development of a Quantitative Uncertainty Analysis Procedure." 2013.
- [22] M. Buyle, J. Braet, and A. Audenaert, "Life cycle assessment in the construction sector: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, pp. 379–388, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.001.
- [23] P. Van Den Heede and N. De Belie, "Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 431–442, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004.
- [24] G. P. Hammond and C. I. Jones, "Embodied energy and carbon in construction materials," *Proc. Inst. Civ. Eng. Energy*, vol. 161, no. 2, pp. 87–98, 2008, doi: 10.1680/ener.2008.161.2.87.
- [25] J. Giesekam, J. R. Barrett, and P. Taylor, "Construction sector views on low carbon building materials," *Build. Res. Inf.*, vol. 44, no. 4, pp. 423–444, 2016, doi: 10.1080/09613218.2016.1086872.
- [26] B. X. Rodriguez, K. Simonen, M. Huang, and C. De Wolf, "A taxonomy for Whole Building Life Cycle Assessment (WBLCA)," *Smart Sustain. Built Environ.*, vol. 8, no. 3, pp. 190–205, 2019, doi: 10.1108/SASBE-06-2018-0034.
- [27] Carbon Leadership Forum (CLF), "Life Cycle Assessment of Buildings: A Practice Guide," 2018.

- [28] The International Standards Organisation, "ISO 14067:2018 Gases de efecto invernadero - Huella de carbono de productos - Requisitos y directrices para cuantificación." 2018.
- [29] The International Standards Organisation, "ISO/TS 14027:2017 Etiquetas y declaraciones ambientales - Desarrollo de reglas de categoría de producto." 2017.
- [30] Bionova Ltd, "The Embodied Carbon Review," 2018. [Online]. Available: www.embodiedcarbonreview.com.
- [31] BRE Centre for Sustainable Products, "Assessing the environmental impacts of construction – understanding European Standards and their implications," pp. 1–16, 2016.
- [32] C. De Wolf, F. Pomponi, and A. Moncaster, "Implementing Whole Life Carbon in Buildings," *Int. Soc. Ind. Ecol.*, no. May, 2016.
- [33] Royal Institute of British Architects (RIBA), "Embodied and whole life carbon assessment for architects," 2018.
- [34] T. Lützkendorf, M. Balouktsi, and R. Frischknecht, "Guideline for Design Professionals and Consultants Part 1: Basics for the Assessment of Embodied Energy and Embodied GHG Emissions Energy in Buildings and Communities Programme." 2016.
- [35] T. R. Miller, J. Gregory, and R. Kirchain, "Critical Issues When Comparing Whole Building & Building Product Environmental Performance," no. October, 2016.
- [36] PRé Sustainability, "What the revised EN 15804 EPD standard means for you." [Online]. Available: <https://www.pre-sustainability.com/news/what-the-revised-en15804-epd-standard-means-for-you>. [Accessed: 31-Jan-2020].
- [37] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and World Resources Institute (WRI), "Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard," pp. 1–148, 2011.
- [38] K. Stark and US Green Building Council, "What's next for LEED: v4.1, recertification and LEED Zero," 2019. [Online]. Available: <http://plus.usgbc.org/whats-next-for-leed-v4-1-recertification-and-leed-zero/>. [Accessed: 21-Feb-2020].
- [39] US Green Building Council (USGBC), "LEED v4.1 - Building Design and Construction Guide." 2020.
- [40] US Green Building Council (USGBC), "LEED v4.1 Building Design +Construction," *LEED v4.1*. [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/leed/v41#bdc>. [Accessed: 20-Feb-2020].
- [41] Athena, "Athena Guide to Whole-building LCA in Green Building Programs Contributing Authors," 2014.
- [42] American Society of Civil Engineering (ASCE), "Guide to Definition of the Reference Building Structure and Strategies in Whole Building Life Cycle Assessment," 2017.
- [43] K. Simonen, B. Rodriguez, L. Strain, and E. McDade, "Embodied Carbon Benchmark Study: LCA for Low Carbon Construction," University of Washington, Seattle, WA, 2017.

- [44] Ecoinvent, "New Data in ecoinvent 3.6," 2019. [Online]. Available: <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-36/new-data-in-ecoinvent-36.html>. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [45] National Institute for Environmental Studies, "What is the 3EID?," 2012. [Online]. Available: http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/eng/page/what_is_3eid.htm. [Accessed: 02-Feb-2020].
- [46] Department of Industrial Ecology Leiden University, "European Environmentally Extended Input-Output Table (E3IOT)," 2015. [Online]. Available: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-e3iot>. [Accessed: 02-Feb-2020].
- [47] Circular Ecology, "Embodied Energy and Embodied Carbon - The ICE Database." [Online]. Available: <http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html#.Xk6CvWhKhPZ>. [Accessed: 20-Feb-2020].
- [48] World Steel, *Life cycle inventory methodology report*. 2017.
- [49] Greenhouse Gas Protocol, "Life Cycle Databases." [Online]. Available: <https://ghgprotocol.org/life-cycle-databases>. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [50] F. Pomponi and A. Moncaster, "Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say?," *J. Environ. Manage.*, vol. 181, pp. 687–700, 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.08.036.
- [51] C. K. Chau, T. M. Leung, and W. Y. Ng, "A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings," *Appl. Energy*, vol. 143, pp. 395–413, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.APENERGY.2015.01.023.
- [52] R. Azari and N. Abbasabadi, "Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends," *Energy Build.*, vol. 168, pp. 225–235, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.003.
- [53] N. Dodd, M. Cordella, M. Traverso, and S. Donatello, "Level(s) - A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. Parts 1 and 2: Introduction to Level(s) and how it works," 2017.
- [54] European Standards Organisation, "EN 15804:2012. Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products," no. February. p. 70, 2012.
- [55] The International Standards Organisation, "ISO 14044:2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines," *ISO 14044:2006*, vol. 2006, no. 7. pp. 652–668, 2006, doi: 10.1007/s11367-011-0297-3.
- [56] International Finance Corporation (IFC), "EDGE Methodology Report," 2016, doi: 10.1016/S1470-2045(14)70057-9.
- [57] US Green Building Council (USGBC), "LEED v4 for Building Design and Construction," 2019.

- [58] T. Bruce-Hyrkäs, P. Pasanen, and R. Castro, "Overview of Whole Building Life-Cycle Assessment for Green Building Certification and Ecodesign through Industry Surveys and Interviews," *Procedia CIRP*, vol. 69, pp. 178–183, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROCIR.2017.11.127.
- [59] German Sustainable Building Council (DGNB), "Life Cycle Assessments: A Guide on Using the LCA," 2018.
- [60] German Sustainable Building Council (DGNB), "DGNB criterion ENV 1.1 - Life Cycle Impact Assessment." DGNB, pp. 1–66, 2014.
- [61] K. Simonen, B. X. Rodriguez, and C. De Wolf, "Benchmarking the Embodied Carbon of Buildings," *Technol. Archit. Des.*, vol. 1, no. 2, pp. 208–218, 2017, doi: 10.1080/24751448.2017.1354623.
- [62] H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe, "Approaches to data collection," IGES, Japan., 2006.
- [63] Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), "Emission Factor Database." [Online]. Available: https://www.ipcc-ccip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php. [Accessed: 31-Jan-2020].
- [64] WRI and WBCSD, "Required Greenhouse Gases in Inventories: Accounting and reporting standard amendment," *Greenh. gas Protoc.*, no. Scope 3, pp. 1–9, 2013.
- [65] B. P. Wedema *et al.*, "Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3)," *St. Gall. ecoinvent Cent.*, vol. 3, no. 1, 2013.
- [66] CADIS, "Mexicaniuh." [Online]. Available: <http://mexicaniuh.net/CadisBootstrap/mexicaniuh.php>. [Accessed: 03-Feb-2020].
- [67] Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), "SICV - Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida." [Online]. Available: <http://sicv.acv.ibict.br/Node/>. [Accessed: 03-Feb-2020].
- [68] Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), "Política de Privacidade," vol. 18, pp. 1–8.
- [69] K. Simonen, M. Huang, V. Rybl, and B. Waldman, "Embodied Carbon in the EC3 Tool: Beta Methodology Report," 2019.
- [70] The International Standards Organisation, "INTERNATIONAL STANDARD assessment — Requirements and guidelines," *ISO 14044:2006*, vol. 2006, no. 7, pp. 652–668, 2006, doi: 10.1007/s11367-011-0297-3.
- [71] Tecniberia, "Guía de Usuario HueCO2." 2014.
- [72] M. Gillenwater, "What is a Global Warming Potential? And which one do I use? - GHG and Carbon Accounting, Auditing, Management & Training," *Greenhouse Gas Management Institute*, 2010. [Online]. Available: <https://ghginstitute.org/2010/06/28/what-is-a-global->

warming-potential/. [Accessed: 03-Feb-2020].

- [73] B. P. Weidema and M. S. Wesnæs, "Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators," *J. Clean. Prod.*, vol. 4, no. 3–4, pp. 167–174, Jan. 1996, doi: 10.1016/S0959-6526(96)00043-1.
- [74] Comisión Nacional de Energía, "Factores de Emisión – Energía Abierta," 2019. [Online]. Available: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>. [Accessed: 23-Feb-2020].
- [75] C. Muñoz, M. Vega, A. Rocha, G. Cereceda, A. Molina, and P. González, "Eco-efficiency tool for the decrease of the environmental load in the life cycle of buildings ÁBACO-Chile," 2020.
- [76] CDT, "Guia Desarrollo Sustentable de Proyectos Inmobiliarios," 2015.
- [77] Instituto de la Construcción, *Certificación Edificio Sustentable. Manual Evaluación y Calificación*. Santiago, 2014.
- [78] Agencia de Sostenibilidad Energética and Ministerio de Energía, "Guía Metodológica de Auditoría Energética en Edificación," 2019.
- [79] Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, "Manual de Aplicación de la Certificación Vivienda Sustentable," Santiago, Chile, 2019.
- [80] IDIEM and Fundación Chile, "Manual de Uso de la Calculadora ECOBASE," 2014.
- [81] Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, "¿Qué es la CEV? | Calificacion Energetica de Viviendas." [Online]. Available: <https://www.calificacionenergetica.cl/que-evalua-la-calificacion-energetica-de-viviendas/>. [Accessed: 29-Jan-2020].
- [82] Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, "Cómo se Obtiene la Letra de la CEV." [Online]. Available: <https://www.calificacionenergetica.cl/como-se-obtiene-la-letra-de-la-calificacion-energetica/>. [Accessed: 29-Jan-2020].
- [83] Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, "Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile." Ministerio de Vivienda y Urbanismo, p. 254, 2019.
- [84] Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU, "Contador de Emisiones | Calificacion Energetica de Viviendas." [Online]. Available: <https://www.calificacionenergetica.cl/contador-de-emisiones/>. [Accessed: 29-Jan-2020].
- [85] US Green Building Council (USGBC), "LEED v4.1," 2019. [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/leed/v41>. [Accessed: 24-Feb-2020].
- [86] E. Hughes and US Green Building Council (USGBC), "How LEED v4.1 addresses embodied carbon," 2019. [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/articles/how-leed-v41-addresses-embodied-carbon>. [Accessed: 24-Feb-2020].
- [87] USGBC, "LEED v4.1 Building Design and Construction: Tracked Changes," Washington D.C., 2020.

- [88] M. Ramanujam and US Green Building Council (USGBC), "Going all in: USGBC creates net zero certification," 2018. [Online]. Available: [https://www.usgbc.org/articles/going-all-usgbc-creates-netzero-certification](https://www.usgbc.org/articles/going-all-usgbc-creates-net-zero-certification). [Accessed: 24-Feb-2020].
- [89] US Green Building Council (USGBC), "LEED Zero Program Guide," Washington D.C., 2019.
- [90] ILFI, "Living Building Challenge 4.0: A Visionary Path to a Regenerative Future," Seattle, WA, 2019.
- [91] International Living Future Institute (ILFI), "Embodied Carbon Guidance: A Resource for Calculating and Reducing Embodied Carbon," Seattle, WA, 2019.
- [92] International Living Future Institute (ILFI), "Zero Carbon Certification," 2020. [Online]. Available: <https://living-future.org/zero-carbon-certification/>. [Accessed: 24-Feb-2020].
- [93] BRE, "BREEAM Non-Domestic Buildings Technical Manual." BRE Global, Watford, p. 401, 2014.
- [94] IFC, "EDGE Materials Embodied Energy: Methodology and Results v2.2," 2016.
- [95] US Green Building Council (USGBC), "LEED Reference Guide Correction #100002215 - Europe ACP LCA," 2018. [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/leedaddenda/100002215>. [Accessed: 24-Feb-2020].

Anexo A: Resúmenes descriptivos de los instrumentos revisados

Estándares de ACV de edificación que se utilizan comúnmente por las herramientas para el cálculo de carbono de ciclo de vida

ASTM E2921a Standard Practice for Minimum Criteria for Comparing Whole Building Life Cycle Assessments for Use with Building Codes, Standards, and Rating System. Este estándar proporciona los criterios que los equipos de diseño deben usar para comparar los impactos ambientales asociados de un diseño de edificio de referencia en comparación a un diseño de edificio final, incluidas las adiciones a los edificios existentes donde corresponda. Para más información <https://www.astm.org/Standards/E2921.htm>.

BS/EN 15978:2011 Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo. Esta norma europea detalla el método de cálculo, basado en análisis de ciclo de vida (ACV), para evaluar el desempeño ambiental de un edificio y proporciona los medios para informar y comunicar el resultado de la evaluación. El estándar es aplicable a edificios nuevos y existentes y proyectos de renovación.

La norma describe entre otras cosas: la descripción del objeto de evaluación; el límite del sistema que se aplica a nivel del edificio; el procedimiento que se utilizará para el análisis de inventario; la lista de indicadores y procedimientos para el cálculo de estos indicadores; los requisitos para la presentación de los resultados en informes y comunicación; y los requisitos para los datos necesarios para el cálculo. Para más información <https://standards.globalspec.com/>.

BS/EN 15804:2012 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. Esta norma europea proporciona las reglas de categoría de producto (RCP) básicas para declaraciones ambientales tipo III (DAP) para cualquier producto o servicio de construcción. La RCP base define entre otros elementos: los parámetros que se declaran y la forma en que se analizan e informan, las etapas del ciclo de vida de un producto que se consideran en la DAP y qué procesos deben incluirse en las etapas del ciclo de vida. Para más información <https://standards.globalspec.com/>.

ISO 21930:2017 *Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services.* Esta norma internacional proporciona los principios, especificaciones y requisitos para desarrollar una DAP para productos y servicios de construcción. Este documento complementa la norma ISO 14025 al proporcionar requisitos específicos para la DAP de productos y servicios de construcción.

Como RCP base para productos de construcción, elementos de construcción y sistemas técnicos integrados incluye entre otras cosas: Las reglas para calcular el análisis del inventario del ciclo de vida (ICV), los indicadores ambientales predeterminados y los resultados de la evaluación del

impacto del ciclo de vida (EICV) que se informan a la DAP; describe qué etapas del ciclo de vida se consideran en un tipo particular de DAP, qué procesos deben incluirse en las etapas del ciclo de vida y cómo las etapas se subdividen en módulos de información. Para más información <https://standards.globalspec.com/>

CERTIFICACION DE EDIFICIOS

LEED v 4.1 Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) es el sistema de certificación de edificios desarrollado por el United States Green Building Council (USGBC). Durante el año 2019 se publicaron los borradores de los sistemas en su actualización LEED v 4.1 que actualmente se encuentra en pilotaje.

LEED v 4.1 evoluciona v4 para permitir una mayor implementación y un mayor enfoque en el desempeño. La versión 4.1 incluye indicadores de costo y de GEI, por primera vez en la historia del sistema [85].

El crédito de reducción del impacto del ciclo de vida del edificio experimentó cambios importantes y ahora incluye la evaluación del ciclo de vida del edificio, para recompensar el progreso incremental mientras se prioriza la reducción de emisiones de GEI [86]. Dentro de estas opciones incrementales se incluyen las opciones de: Conducir un ACV de la estructura y envolvente de la edificación (1 punto); Conducir un ACV de la estructura y envolvente de la edificación que demuestre al menos un 5% de reducción de GWP y dos otras categorías de impacto (2 puntos); Conducir un ACV de la estructura y envolvente de la edificación que demuestre al menos un 10% de reducción de GWP y dos otras categorías de impacto (3 puntos); Incorporar la reutilización de edificación y recuperación de materiales en la estructura y envolvente del diseño propuesto, demostrando al menos un 20% de reducción de GWP y al menos un 10% de reducción en otras dos categorías de impacto (4 puntos) [87]. Para más información <https://www.usgbc.org/leed/v41>

Programa Net Zero Carbono (2018) El año 2018, el USGBC lanza el programa de certificación Net Zero a través del cual un edificio puede obtener la certificación si demuestra alguno o uno de los siguientes: cero emisiones de carbono netas, cero consumo energético o de agua neto, o cero producción de residuos neta [88].

A través del Programa Net Zero Carbon, un proyecto registrado bajo alguno de los productos LEED v4.1 puede obtener la certificación si opera con emisiones netas de carbono cero en el transcurso de un año. El objetivo es proporcionar una contabilidad transparente del balance de carbono causado por el consumo de energía y de las emisiones compensadas y evitadas por transporte de los ocupantes. En el futuro se espera que la certificación se expanda para incorporar GEI causado por el consumo de agua, la generación de residuos y el carbono incorporado de materiales utilizados[89]. Para más información <https://www.usgbc.org/programs/leed-zero>

Living Building Challenge (LBC 4.0) y Energy Petal LBC 4.0 es desarrollada por el International Living Future Institute (ILFI) desde el año 2006 para subir el estándar de los SCEs tradicionales a un sistema de certificación enfocado en el diseño regenerativo. El sistema se estructura en base a "pétalos" que representan las distintas áreas de desempeño del edificio.

Actualmente, el sistema cuenta con diez imperativos básicos que abordan los principios fundamentales de cada pétalo. Todos los imperativos básicos son necesarios para la certificación de pétalos, y juntos constituyen los requisitos de la nueva certificación de edificios ecológicos básicos [90].

Los edificios nuevos y existentes deben demostrar una reducción del 20% en el carbono incorporado de los materiales estructurales (estructura, fundaciones y envolvente) en comparación con un caso línea base equivalente. Los edificios existentes pueden contar los materiales instaladas contra el 20% requerido. Todos los proyectos deben seleccionar materiales interiores con emisiones de carbono incorporadas por debajo de la línea de base de la industria para las categorías de productos para los cuales existan datos [91].

Zero Carbon Desarrollada por el International Living Future Institute (ILFI) es el primer estándar certificado por tercera parte de cero carbono a nivel mundial. Este programa es una herramienta de amplio alcance para destacar edificaciones diseñadas y operadas para reducir emisiones de carbono [92]. Bajo este estándar el 100% del consumo energético durante la operación debe ser reemplazado por energía renovable en el sitio o fuera del sitio de ubicación del proyecto, pero adicionalmente el 100% de los impactos de emisiones incorporadas del proyecto deben ser reportados y compensados [92].

Durante un período de un año, los edificios deben alcanzar un nivel de eficiencia energética establecido. La edificación nueva no puede utilizar la combustión en el sitio. El 100% del uso de energía del proyecto debe compensarse con energía renovable dentro o fuera del sitio anualmente. El proyecto debe proporcionar energías renovables compensatorias fuera del sitio que tengan el equivalente a 15 años de potencia del proyecto, proporcionar adicionalidad y tener una integridad de propiedad duradera asociada con el proyecto.

El carbono incorporado asociado a la construcción y los materiales instalados en el proyecto no pueden exceder 500 kgCO₂e/m² [91].

BREEAM Building Research Establishment Environmental Assessment Method: es el sistema de certificación de edificios desarrollado por Building Research Establishment (BRE).

Dentro de la última versión de BREEAM UK New Construction (2018) se solicita llevar a cabo un ACV al principio del proceso de diseño del edificio utilizando un software ACV especializado, comparando los resultados con un proyecto de referencia y evaluando diferentes opciones de diseño para reducir los impactos. Este ejercicio representa más de la mitad de los créditos en la categoría 'Materiales' del esquema de certificación.

Además, la contribución de la categoría "Materiales" al resultado general de BREEAM (su ponderación) ha aumentado al 15%, la segunda categoría más alta ponderada [93]. Este aumento pondera esta categoría en solo un 1% menos que "Energía", la categoría de carbono operativo.

DGNB Criterion Office version (2018): El sistema Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) es el sistema de certificación de edificios desarrollado por el German Sustainable Building Council (GSBC).

DGNB siempre se ha centrado en integrar el ACV de forma significativa en sus requisitos, y la versión 2018 da más pasos para promover este tipo de análisis como el camino hacia la medición del impacto real[59].

Durante el año 2018 lanzaron "DGNB Framework for Carbon Neutral Buildings and Sites" que incluye tres partes principales: 1. Reglas de contabilidad de carbono que definen reglas de cálculo consistentes para edificios y sitios, 2. Reglas de divulgación de carbono con reglas específicas sobre el tipo y el contenido de la comunicación con el cliente y 3. Reglas de gestión de carbono que establecen una hoja de ruta para operación de construcción de carbono neutral ("Klimaschutzfahrplan") que demuestra un balance neto de carbono cero para el último 2050, utilizando una trayectoria lineal a cero desde hoy en adelante.

HQE E+C: Sistema de etiquetado voluntario y experimentación para nuevas construcciones (residencial y terciario) lanzado en noviembre de 2016 por el Estado francés. Esta certificación adopta un enfoque de ciclo de vida en la medición de carbono. La primera etapa de este enfoque se desarrolla como una fase de prueba, que comisiona a las empresas para construir edificios con mayor rendimiento que el status quo.

En particular, el rendimiento de carbono del edificio (Emisiones de GEI) tiene en cuenta:

- Uso de energía en operación medido con el indicador de energía Eges.
- Carbono incorporado en productos de construcción y equipo medido con el indicador Eges PCE.
- 2 niveles diferentes de rendimiento de carbono pueden ser obtenido: Carbone 1 o 2.

Level(s) (2017). Lanzado por la Comisión Europea, la primera versión de su Level(s) tiene como objetivo crear un lenguaje común para la sustentabilidad en edificios en Europa y establecer enfoques del ciclo de vida como la corriente principal. Level(s) es una herramienta clave dentro del Paquete de la UE para la economía circular, y junto al WorldGBC están trabajando con los GBCs y socios para desarrollar una hoja de ruta que describirá las acciones necesarias para convertir este sistema voluntario a un instrumento regulador. Level(s) incluye un enfoque paso a paso para realizar un ACV de acuerdo con los objetivos de la política europea y los enfoques nacionales existentes.

Level(s) es un sistema de reporte para construcciones sustentables que asocia la performance de cada edificación con los objetivos de las políticas públicas europeas. El sistema tiene como

objetivo ayudar a las industrias de la construcción e inmobiliaria a reducir el impacto ambiental en las edificaciones que diseñan, construyen, invierten y ocupan.

El marco tiene como objetivo proporcionar un punto de partida fácil centrándose en un número reducido de indicadores.

- El marco aborda la evaluación de los edificios "Emisiones de gases de efecto invernadero y rendimiento de circularidad en dos de sus seis "macroobjetivos":
- Macroobjetivo 1: emisiones de gases de efecto invernadero. a lo largo del ciclo de vida de un edificio
- Macroobjetivo 2: eficiente en recursos y circular ciclos de vida material

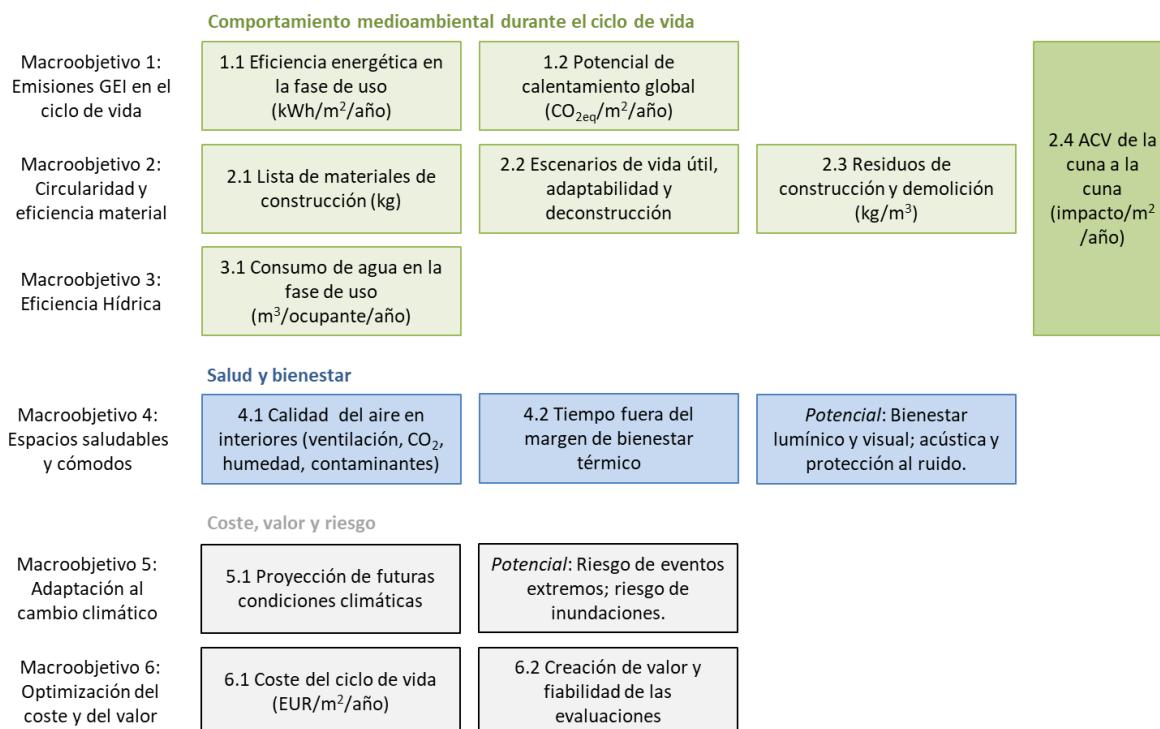


Figura A1-1: Vista simplificada de los objetivos e indicadores del sistema Level(s) (reproducción de [53]).

Level(s) tiene tres elementos interesantes. Primero, reconoce los distintos niveles de comprensión de la industria sobre el ciclo de vida. Por ende, divide los indicadores prioritarios de forma a construir lentamente la capacidad de reporte. Al simplificar los indicadores, facilita el ingreso de actores por tener una menor barrera de entrada a la vez que ya colecta datos útiles de gestión, como el uso de energía. Segundo, incluye indicadores más allá de los impactos ambientales, pero que también afectan a estos. Por ejemplo, mejorar el bienestar térmico puede empeorar el uso de energía. Esto hace con que las mejoras tengan una perspectiva sistémica que incluye bienestar, costos y riesgos. Tercero, incluye explícitamente la variable de adaptación al cambio climático a través de proyecciones a condiciones futuras. Es decir, no considera solamente el impacto *actual* o en *business as usual*, pero también considera el impacto pensando en cambios significativos en

las necesidades y forma de uso de la edificación. Esto permite hacer planes y ajustes más realistas para optimizar la edificación a todas las décadas que tendrá que operar.

Estas diferencias influencian las necesidades de datos. Por un lado, aumentan la demanda de datos para medir bienestar y el requerimiento de modelos para modelar proyecciones.

Por otro lado, simplifican la base de datos ya que permiten una construcción gradual que se complejizaría de acuerdo a la necesidad y aceptación de la industria. Por ejemplo, se podría empezar midiendo los GEI producto del uso de energía operacional juntamente con calidad del aire, datos fácilmente disponibles por la industria, a medida que se construye un inventario más completo de materiales para medir el carbono incorporado.

Certificación Edificio Sustentable (CES): Este sistema de certificación multicriterio fue desarrollado por el Instituto de la Construcción (IC) con el apoyo y la participación de más de 13 instituciones públicas y privadas, reunidos con el objetivo de incentivar el diseño, la construcción y operación de edificios con criterios de sustentabilidad.

El sistema de Certificación Edificio Sustentable y su Manual de Evaluación y Calificación, son resultados del proyecto "Diseño e implementación de Sistema Nacional de Certificación de Calidad Ambiental y Eficiencia Energética para Edificios de Uso Público". Código INNOVA CORFO Chile 12BPC2-13432 que fue apoyado por el Ministerio de Obras Públicas, la Cámara Chilena de la Construcción, el Colegio de Arquitectos de Chile y el propio IC, que hasta hoy actúa como entidad administradora del sistema.

La Certificación está orientada a edificios públicos, en particular aquellos con fines de educación, salud, servicios, seguridad y social (con excepciones), de forma similar a la certificación EDGE [56]. El programa considera certificaciones separadas para las fases de diseño, construcción y operación de edificios nuevos, en construcción o con proyectos de mejoramiento [77], con foco en los elementos estructurales de la edificación para la etapa de producto¹³ (modulo A1-A3 según estándar EN 15978).

Fue lanzado el año 2014, y a la fecha se registran más de 40 proyectos certificados y otros 30 en proceso de pre-certificación.

Certificación Vivienda Sustentable: El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), junto al Ministerio de Energía, han implementado este sistema, el que será lanzado en marzo de 2020.

El sistema se basa en la Calificación Energética de Viviendas y agrega múltiples criterios adicionales para orientar el diseño y regular la operación de nuevas viviendas.

¹³ En el marco del sistema se entienden como elementos estructurales aquellos elementos aislados "tales como cimientos, vigas, columnas, muros, cerchas, que en su conjunto conforman el sistema estructural principal del edificio, cuya función será resistir las cargas gravitacionales y fuerzas laterales" [77], excluyendo elementos de muros cortina y muros interiores no soportantes. En este contexto los principales materiales estructurales son productos de hormigón, acero, albañilería, y madera.

GUIAS de DISEÑO

Carbon Leadership Forum (CLF) LCA Practice Guide (2018) Guía para la medición del carbono incorporado desarrollada por el Foro de Liderazgo del Carbono es un primer que describe paso a paso el proceso de un ACV para el público general, adicionalmente incluye un documento de orientación técnica y un ejemplo de la "casa de jengibre" para entender la relación entre cubicación de material y carbono incorporado.

El desarrollo de la Guía de práctica de LCA fue parte de un proyecto más amplio de construcción con bajas emisiones de carbono financiado por la Fundación Charles Pankow, Skanska USA y el Departamento de Calidad Ambiental de Oregon (DEQ) en 2016. La Guía de práctica siguió el Estudio de referencia de carbono incorporado de CLF, que identificó una necesidad en la industria de orientación estandarizada y accesible sobre cómo llevar a cabo un ACV para el edificio.

RICS (2017): Este documento informativo orienta el cálculo de carbono incorporado desde la cuna hasta la puerta asociados con un proyecto. Introduce el concepto de "Carbono de ciclo de vida" (WLC), entendido como el equivalente al carbono incorporado de las guías y sistemas de Norteamérica. Esta guía exige un enfoque de toda la vida para reducir las emisiones de carbono dentro del entorno construido. Establece principios obligatorios específicos y orientación de apoyo para la interpretación e implementación de la metodología EN 15978. Está destinado principalmente a audiencia del Reino Unido, sin embargo, los ajustes geográficos se destacan para permitir que los requisitos y la orientación se apliquen en otros países. Esta guía sirve como base a la guía de "Carbono de ciclo de vida" (WLC) de la RIBA (Asociación de Arquitectos de UK).

ASCE Guide: La "*Guide to Definition of the Reference Building Structure and Strategies in Whole Building Life Cycle Assessment*" es un documento especial preparado por la Asociation of Structural and Civil Engineers (ASCE), Institute Sustainability Committee y establece los requerimientos específicos para evaluar el carbono incorporado en los sistemas estructurales. Este documento forma parte fundamental del Structural Engineering Challenge 2050, que busca que los ingenieros estructurales, entiendan, reduzcan y eliminen las emisiones de carbono asociadas al carbono incorporado al 2050.

ATHENA WBLCA Guide: The Athena Sustainable Materials Institute is the pioneer of whole-building life cycle assessment (LCA) in North America. We have been a key force behind a steady uptake of LCA by the manufacturers of construction materials and, more recently, by an increasing number of building designers. Since our launch in 1997 (to advance research work that began in 1991), we have been pursuing a common-good mandate to bring rigorous quantification to sustainability in the built environment. We work with product manufacturers, trade associations, green building associations, and architectural and engineering firms to help quantify environmental impacts and to demystify and assist teams with LCA.

PROGRAMAS DE DAP (Nivel de Productos)

Climate Declaration: Desarrollada por el International EPD (SE/ANZ/TU/LA) una declaración climática es un documento voluntario que declara las emisiones de gases de efecto invernadero de un producto bajo un enfoque de ciclo de vida. Bajo el Sistema International EPD System, este tipo de declaración puede crearse y publicarse si la compañía adicionalmente ha publicado una DAP verificada del mismo producto. Las emisiones de GEI, también llamada huella de carbono, proviene de la categoría de impacto de potencial de calentamiento global de una DAP publicada en el mismo programa de declaración.

Programa de Declaración Ambiental de Productos DAPCO: El programa de declaración ambiental de productos estuvo vigente durante los años 2012-2016, y fue el primer programa chileno de ecoetiquetas tipo III para el sector de la construcción. Fue administrado por IDIEM y CDT, con los objetivo de fortalecer y desarrollar la construcción sustentable a través de la producción de DAP, favorecer tanto la demanda como la fabricación de productos de construcción de menor impacto ambiental, elaborar una base de datos con información ambiental actualizada y representativa de la fabricación de los productos de construcción de uso en Chile y desarrollar un proyecto educativo pionero en el sector de la construcción en Chile, que buscó instaurar el enfoque de ciclo de vida transversal a todas las industrias e involucrando a todos los actores.

The International EPD System es un programa global para declaración ambiental de productos basada en ISO 14025 y EN 15804, con presencia en 45 países, incluyendo Chile. El programa cuenta con más de 1100 DAP en todo el mundo, con 3 DAP vigentes en Chile para acero, barras de refuerzo y perfiles de acero.

BASES DE DATOS

RICS Building Carbon Database: Desarrollada por originalmente por el Waste & Resources Action Programme (WRAP) y el Consejo de Construcción Verde del Reino Unido (UKGBC) para analizar datos de carbono incorporado para edificios completos. A través de la página web, el objetivo de la base de datos es permitir a los usuarios identificar dónde se pueden realizar las reducciones de emisiones de carbono durante todas las etapas del ciclo de vida de un edificio. Para las organizaciones que envían sus datos, la base de datos es de uso gratuito y el registro está disponible. Para acceder a los datos, los usuarios deben ingresar datos de proyectos de construcción en la base de datos (proyectos teóricos y completados), lo que a su vez permite a los usuarios estimar o comparar las emisiones de carbono de toda la vida. Para más información: <https://wlcarbon.rics.org/Default.aspx>.

DeQO Database: Es una base de datos de sistemas estructurales de más de 200 proyectos de ingeniería creada en el contexto de una disertación de doctorado del MIT y en colaboración con ASCE y CLF. La herramienta interactiva en línea, llamada deQo (base de datos de salidas de cantidad incorporada) proporciona datos confiables sobre el potencial de calentamiento global de los edificios (GWP, medido en kgCO₂eq/m² y obtenido al multiplicar las dos variables claves

de intensidad de material y coeficiente de carbono). Entendida como una iniciativa a largo plazo, se ofrece un marco para crear una base de datos en línea interactiva y en crecimiento que permita a arquitectos, ingenieros e investigadores ingresar y comparar sus proyectos. Para más información: <https://www.carbondeqo.com/>

3EID Es la sigla en inglés para Datos de Energía Incorporada e Intensidad de Emisión (http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/eng/page/what_is_3eid.htm). Está creada con tablas Input-Output para Japón y fue publicada en 2002 y actualizada en 2005.

Los impactos ambientales son calculados para una unidad de producción de 1 millón de yenes por sector. La base representa 400 sectores y puede generar relaciones económicas entre sectores por una matriz de transacciones anuales. Considera Energía y los principales GEI: CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs y SF₆.

Emerging Economies Construction Dataset (el set de datos "EDGE") La Certificación *Excellence in Design for Greater Efficiencies* (EDGE®) es una herramienta de diseño de edificios, un sistema de certificación, estándar verde global, y software disponible en más de 150 países [56].

EDGE evalúa de la energía incorporada de la edificación completa a través de una base de datos denominada *Emerging Economies Construction Dataset* (the "EDGE Dataset"). Esta incluye los datos de energía incorporada para productos de construcción comúnmente utilizados tales como albañilería, mezclas de hormigón, elementos de hormigón prefabricados, tejas, productos en base a tierra, pisos, aislación, productos de yeso, metal, madera, cristal y ventanas. No tiene datos de impacto precisos de los productos de construcción en todas las regiones donde se aplica [94].

EDGE Dataset es una base de datos genérica basada en energía incorporada, que se considera un indicador más representativo entre economías emergentes a nivel global.

Bath Inventory of Carbon and Energy (ICE v3): Es una de las primeras bases de datos de energía y carbono incorporada para productos de construcción disponible de manera gratuita. Fue desarrollada por el Dr. Craig Jones y Geoff Hammond, en el Equipo de Investigación de Energía Sostenible (SERT) en 2005, a partir de una extensa revisión de la literatura.

Se ha actualizado en 2011 y 2019. Ha sido descargada por más de 25,000 profesionales de todo el mundo. Para más información: http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html#.XKX_oJhKhPY

ECOBASE: Metodología para el desarrollo de inventarios, base de datos, y calculadora: Corresponde al proyecto INNOVA CORFO cod. 13BPC3-19203, conocido como "ECOBASE Construcción". Tuvo como objetivo el desarrollo de una metodología para la recolección de datos y desarrollo de inventarios; metodología de evaluación de impacto y protocolo para el uso de datos, así como también el desarrollo de una plataforma online de información con sistema de gestión y cálculo (vías calculadoras integradas) para evaluación de sustentabilidad con metodología ACV, que permitió al oferente proveer el bien público.

Anexo B: Lista de herramientas revisadas en este documento

| Categoría/ Nombre del instrumento | Fecha | Autor |
|---|-------|---|
| GUIAS de DISEÑO | | |
| CLF LCA Practice Guide | 2018 | Carbon Leadership Forum (CLF) |
| RICS | 2018 | Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS) |
| ASCE Guide | 2017 | Structural Engineering Institute de la American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI) |
| ESTANDARES | | |
| ASTM E2921- 16 a | 2013 | ASTM |
| BS/EN 15978 | 2011 | EN |
| BS/EN 15804 | 2012 | EN |
| ISO 21930 | 2010 | ISO |
| CERTIFICACION DE EDIFICIOS | | |
| LEED v4.1 - Net Zero Carbon Program | 2014 | USGBC |
| BREEAM | 2016 | BRE Global Ltd |
| DGNB - Framework for Net Zero | 2018 | GSBC |
| HQE + EC | 2016 | CSTB HQE |
| Level(s) + Macroobjectives 1 y 2 | 2012 | GSBC |
| PROGRAMAS EPD DAP (Nivel de Productos) | | |
| International EPD (SE/ANZ/TU/LA) | 2010 | IES |
| BASES DE DATOS | | |
| RICS Bldg Carbon Database (ex WRAP) | 2019 | RICS & UKGBC |
| EDGE Dataset | 2016 | IFC |
| ICE v3.0 | 2019 | University of Bath. Sustainable Energy Research Team |
| DeQO Database | 2018 | MIT |

Anexo C: Lista de reglas por categoría de productos de productos de la construcción

En esta lista se encuentran las RCP relacionadas a la edificación del programa International EPD System, con presencia en Chile, y algunos ejemplos de programas norteamericanos.

| Programa | Categoría | RCP y vínculo |
|---------------------------|---------------------------|---|
| INTER-NATIONAL EPD System | Productos de construcción | <p>54 PCR 2019:01 Construction products and construction services (EN 15804:A1)</p> <p>0 Sub-PCR-A Mortars applied to a surface (construction product)</p> <p>0 Sub-PCR-B Synthetic carpet yarn (construction product)</p> <p>0 Sub-PCR-C Acoustical systems solutions (construction product)</p> <p>0 Sub-PCR-D Bricks, blocks, tiles, flagstone of clay and siliceous earths</p> <p>0 Sub-PCR-E Wood and wood-based products for use in construction (EN 16485)</p> <p>0 Sub-PCR-F Resilient, textile and laminate floor coverings (EN 16810)</p> <p>0 Sub-PCR-G Concrete and concrete elements (EN 16757)</p> <p>0 Sub-PCR-H Cement and building limes (EN 16908)</p> <p>0 Sub-PCR-I Thermal insulation products (EN 16783)</p> <p>0 Sub-PCR-J Instant boiling and chilled drinking water dispensers (permanently installed)</p> <p>0 Sub-PCR-K Rehabilitation Services of highways, streets and roads (complementary to PCR 2012:01)</p> <p>0 Sub-PCR-L Ceramic tiles (EN 17160)</p> <p>0 Under development - Flexible sheets for waterproofing (prEN 17388)</p> <p>0 Under development - Road materials: Bituminous Mixtures (prEN 17392)</p> <p>0 Under development - Sub-PCR Building hardware (CEN Product TC PCR)</p> <p>0 Under development - Sub-PCR Buried plastics piping systems (pressure and non-pressure) (prEN 16903)</p> <p>0 Under development - Sub-PCR Flat glass products used in buildings and other construction works (EN 17074)</p> <p>0 Under development - Sub-PCR Gypsum-based construction Products (prEN 17328)</p> <p>0 Under development - Sub-PCR Masonry products (CEN Product TC PCR)</p> <p>0 Under development - Sub-PCR Masonry products (CEN Product TC PCR)</p> <p>0 Under development - Sub-PCR Plastics piping systems inside buildings (pressure and non-pressure) (prEN 16904)</p> <p>0 Under development - Sub-PCR Steel and Aluminium structural products, and other metal products, for use in construction works (CEN Product TC PCR)</p> <p>0 Under development - Sub-PCR Windows and pedestrian doorsets (prEN 17213)</p> <p>54 PCR 2019:14 Construction products (EN 15804:A2)</p> <p>0 c-PCR-004 Resilient, textile and laminate floor coverings (EN 16810)</p> <p>0 c-PCR-005 Thermal Insulation products (EN 16783)</p> |

| | |
|---------------------------------------|---|
| | 0 c-PCR-006 Wood and wood-based products for use in construction (EN 16485) |
| | 373 c-PCR-002 Ceramic tiles (EN 17160) |
| | 374 c-PCR-001 Cement and building lime (EN 16908) |
| | 375 c-PCR-003 Concrete and concrete elements (EN 16757) |
| | 54211 Under development - c-PCR Rehabilitation services of highways, streets and roads |
| | PCRs not based on Basic Modules |
| | 387 Prefabricated buildings |
| | 1533 Asphalt mixtures (Europe, Australia) |
| Infra-estructura y edificios | 53 PCR Basic Module: Constructions |
| | 531 Buildings |
| | 53211 Highways, streets and roads (except elevated highways) |
| | 53212 Railways |
| | 53221 Bridges, elevated highways and tunnels |
| Metal, plástico & productos de vidrio | 14 PCR Basic Module: Metal ores |
| | 15 PCR Basic Module: Stone, clay and sand |
| | 15 Under development - Kaolin and clay products |
| | 152 Micronized stone from quarry |
| | 36 PCR Basic Module: Rubber and plastic products |
| | 31420 Boards, blocks, panels, sheets of plastics, or in composite system, for structural application (non-construction) |
| | 36490 Closable flexible plastic packaging |
| | 36490 Dispensing systems |
| | 36950 Air ducts, substantial materials (non-construction product) |
| | 37 PCR Basic Module: Glass and glass products and other nonmetallic products n.e.c. |
| | 37117 Shower enclosures |
| | 41 PCR Basic Module: Basic metals |
| | 4112 Being updated - Basic iron or steel products & special steels, except construction products (expired 2019-07-01) |
| | 42 PCR Basic Module: Fabricated metal products, except machinery and equipment |
| | 412 Fabricated steel products, except construction products, machinery and equipment |
| | 36950 Air ducts, substantial materials (non-construction product) |
| | 42999 Anodized aluminium actuator and ferrul for spraying and atomization systems (expired 2017-04-03; being replaced) |
| | 317 Packaging (PCR not based on Basic Modules) |
| | 361 Tires (PCR not based on Basic Modules) |
| Maquinaria y equipamiento | 43 PCR Basic Module: General purpose machinery |

| | |
|--|--|
| | <u>4322 Pumps for liquids; liquid elevators; mixers (valid until 2019-11-18)</u> |
| | <u>4354 Being updated - Lifts (elevators)</u> |
| Productos químicos | <u>35490 Efficient heat transfer fluids for heating and cooling</u> |
| Servicios | <u>69 PCR Basic Module: Electricity, gas and water distribution (on own account)</u> <u>853 Professional cleaning services of buildings</u> <u>94 PCR Basic Module: Sewage and waste collection, treatment and disposal and other environmental protection services</u> <u>942 Solid waste disposal services</u> <u>94413 Site remediation and clean-up services, soil and groundwater</u> <u>971 Under development - Professional laundry and cleaning services of items (PCRs not based on Basic Modules)</u> |
| SCSglobal | <u>Steel for construction in North America</u> |
| National Asphalt Pavement Association | <u>PCR for Asphalt</u> |
| NSF International | <u>PCR for concrete</u> |

Anexo D: tabla comparativa para el alcance de herramientas analizadas en el informe.

Dado el tamaño de la tabla, esta se anexa como archivo adjunto a este documento.

Anexo E: resumen de estándares internacionales relacionados a la huella de carbono de edificaciones

Tabla 4. Estándares base referenciados en los instrumentos con metodologías de huella de carbono para la edificación.

| Nombre estándar | Aplicación |
|--|---|
| ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. | Estandarizar la estructura de las fases de un estudio de análisis de ciclo de vida, declarar la metodología de ACV, sus limitaciones y condiciones de uso. |
| ISO 14044:2006 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. | |
| ISO 14067:2018 Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para cuantificación | Definir las reglas para cálculos de Huella de Carbono de Producto total y parcial. |
| EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo. | Proporcionar las reglas de cálculo para la evaluación de análisis de ciclo de vida de edificios nuevos y existentes. |
| EN 15804:2012+A2:2019 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción. | Entregar los requerimientos mínimos para las reglas por categoría de producto que se usen para declaración ambiental de productos de construcción en base a análisis de ciclo de vida. Proporciona la RCP base para todos los programas DAP de Europa. |
| ISO 21930:2017 Sostenibilidad en la construcción de edificios. Declaración ambiental de productos de construcción. | Al igual que la EN 15804, esta norma define los requerimientos mínimos para RCP de productos de la construcción. Adicionalmente establece los contenidos de la DAP y la forma de expresarlos. |
| ASTM E2921-16a Criterios mínimos para comparar análisis de ciclo de vida de la edificación completa en el marco de sistemas de certificación, normas y estándares de edificios. | Esta norma proporciona criterios que los equipos de diseño de edificios deben usar para comparar los impactos ambientales del análisis de ciclo de vida entre un diseño de edificio de referencia y un diseño de edificio final. Se utiliza sólo en Norteamérica. |