

# ETSAM vs. GWP

## Potencial de Calentamiento Global en la Arquitectura

Héctor Agudo García





UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

**Héctor Agudo García**

*ETSAM vs. GWP*

*Potencial de Calentamiento Global en la arquitectura*

*ETSAM vs. GWP*

*Potencial de Calentamiento Global en la arquitectura*

*Estudiante*

Héctor Agudo García

Expediente 18005

*Tutor*

Eduardo Lahoz Ruíz

Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas

*Aula TFG 8*

Héctor Navarro Martínez, *coordinador/a*

Enrique Moreno Perez, *adjunto/a*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

# ÍNDICE

RESUMEN .....	5
ABSTRACT .....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
Motivación personal .....	7
Hipótesis y objetivos.....	7
Lista de acrónimos .....	8
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	9
1.1. Sostenibilidad .....	9
1.1.1. Sector de la construcción.....	9
1.1.2. Reglamento de Productos de Construcción.....	10
1.1.3. Certificaciones de sostenibilidad ambiental.....	13
1.2. Análisis del Ciclo de Vida .....	17
1.2.1. Ciclo de vida de los productos .....	17
1.2.2. Análisis del ciclo de vida .....	18
1.2.3. Relevancia de la evaluación ambiental en la construcción.....	21
1.2.4. Herramientas, bases de datos y metodologías para el ACV.....	26
1.3. Global Warming Potential .....	28
1.3.1. Potencial de Calentamiento Global (PCG).....	28
1.3.2. Relevancia del GWP en el sector de la construcción .....	30
1.3.3. Evaluación del GWP como estrategia de sostenibilidad.....	32
CAPÍTULO 2. CASO DE ESTUDIO .....	34
2.1. Panel composite de aluminio.....	34
2.2. Pabellón Nuevo de la ETSAM. Rehabilitación de la fachada .....	35
CAPÍTULO 3. INVESTIGACIÓN NORMATIVA.....	38
3.1. CEN Workshop “Carbon Bill of the Refurbishment of Buildings” .....	38
3.2. Entrevista a experto.....	38
CAPÍTULO 4. ESTUDIO 1: ESTUDIOS DE ACV. ANÁLISIS CRÍTICO-COMPARATIVO .....	43
4.2. OpenLCA.....	44
4.2.1. Análisis del Ciclo de Vida.....	44
4.2.2. Resultados e interpretación .....	50
4.3. Granta EduPack 2023 R2. Eco Audit Tool.....	52
4.3.1. Análisis del Ciclo de Vida.....	52
4.3.2. Resultados e interpretación .....	55
4.4. CYPE. Módulo de ACV.....	56
4.4.1. Análisis del Ciclo de Vida.....	57

4.4.2. Resultados e interpretación .....	57
4.5. Comparación de resultados.....	58
4.5.1. Comparación de resultados con OpenLCA y EPD .....	59
4.5.2. Comparación de resultados con Eco Audit y EPD.....	61
4.5.3. Comparación de resultados con CYPE y EPD .....	62
4.6. Análisis crítico-comparativo de los programas .....	62
4.6.1. OpenLCA .....	62
4.6.2. Eco Audit (Granta EduPack).....	65
4.6.3. CYPE .....	67
4.7. Conclusión de los estudios de ACV.....	68
4.8. Conclusión del análisis de programas.....	69
CAPÍTULO 5. ESTUDIO 2: ESTUDIOS DE ACV CON ALUMINIO RECICLADO .....	71
5.1. Panel composite con 50% de aluminio reciclado .....	71
5.1.1. Análisis del Ciclo de Vida.....	71
5.1.2. Resultados .....	77
5.2. Panel composite con 100% de aluminio reciclado .....	77
5.2.1. Análisis del Ciclo de Vida.....	77
5.2.2. Resultados .....	83
5.3. Análisis de resultados.....	84
5.4. Conclusión del Estudio 2.....	85
CAPÍTULO 6. ESTUDIO 3: EVALUACIÓN AMBIENTAL DE TRES PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN DE FACHADA .....	86
6.1. Sistema propuesto para la rehabilitación.....	86
6.1.1. Revestimiento de paneles composite de aluminio.....	86
6.1.2. Revestimiento de piedra caliza .....	91
6.2. Metodología para la evaluación ambiental .....	91
6.2.2. Resultados e interpretación .....	98
6.3. Conclusión del Estudio 3.....	100
CONCLUSIONES.....	101
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	103
FUENTES .....	104
Bibliografía y recursos digitales.....	104
Procedencia de las ilustraciones.....	107

# RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado plantea la hipótesis de que el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), con apoyo de software, es una herramienta fundamental para el diseño arquitectónico sostenible, permitiendo establecer esta práctica en la formación del arquitecto ante la inclusión del Potencial de Calentamiento Global en la normativa europea. Los objetivos son identificar puntos críticos de impacto en productos de construcción, estudiar mejoras sostenibles y aplicar estas estrategias para optimizar el diseño.

Ante el contexto actual, donde el impacto ambiental del sector de la construcción alcanza el 30% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, se han actualizado y desarrollado normativas como la actualización del Reglamento de Productos de Construcción, que introduce las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) obligatorias; la revisada Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios, que introduce la declaración del PCG en el sector; y la próxima inclusión del ACV en el CTE español.

La metodología consiste en: i) realización de ACV con tres softwares (OpenLCA, Granta EduPack, CYPE) y su posterior análisis; ii) estudios de ACV sobre paneles composite con aluminio reciclado; y iii) una evaluación ambiental de propuestas de rehabilitación para la fachada del Pabellón Nuevo de la ETSAM.

Como conclusión, el trabajo reafirma que el ACV, llevado a cabo con las herramientas apropiadas y con ayuda de las DAP, es crucial para evaluar las estrategias sostenibles e introducirlas correctamente en la educación del arquitecto y en el diseño arquitectónico.

## Palabras clave

Sostenibilidad · Análisis del Ciclo de vida (ACV) · Evaluación ambiental

Potencial de Calentamiento Global · Carbono incorporado · Declaración Ambiental de Producto (DAP)

# ABSTRACT

This Bachelor's Final Project proposes the hypothesis that Life Cycle Assessment (LCA), supported by software tools, is an essential instrument for sustainable architectural design, enabling the integration of this practice into architectural education in response to the inclusion of Global Warming Potential (GWP) in European regulations. The objectives are to identify critical impact points in construction products, study sustainable improvements, and apply these strategies to optimize design.

Given the current context, in which the construction sector accounts for 30% of global CO<sub>2</sub> emissions, regulations have been updated and developed, such as the revision of the Construction Products Regulation with mandatory Environmental Product Declarations (EPD); the revised Energy Performance of Buildings Directive, which introduces GWP reporting in the sector; and the upcoming inclusion of LCA in the Spanish Technical Building Code (CTE).

The methodology consists of: (i) performing LCAs using three software tools (OpenLCA, Granta EduPack, CYPE) and analyzing the results; (ii) conducting LCA studies composite panels made with recycled aluminum; and (iii) an environmental assessment of refurbishment proposals for the facade of the ETSAM New Pavilion.

In conclusion, this work reaffirms that LCA, carried out with appropriate tools and supported by EPDs, is crucial for evaluating sustainable strategies and properly introducing them both in architectural education and in design practice.

## Keywords

Sustainability · Life Cycle Assessment (LCA) · Environmental Assessment

Global Warming Potential (GWP) · Embodied Carbon · Environmental Product Declaration (EPD)

# INTRODUCCIÓN

## Motivación personal

A lo largo de la carrera tuve muchas dudas sobre el tema que quería desarrollar en mi Trabajo de Fin de Grado. No lograba decidirme ni encontrar algo que realmente me motivara.

Sin embargo, cuando mi tutor me propuso trabajar sobre sostenibilidad, la idea me convenció de inmediato. A medida que me fui adentrando en el mundo de las normativas, las declaraciones y la evaluación ambiental, descubrí una faceta de la arquitectura que hasta entonces no conocía.

Este proceso me permitió comprender la importancia de proyectar de forma responsable y consciente, y despertó en mí un verdadero interés por integrar la sostenibilidad como un pilar esencial en la práctica profesional.

## Hipótesis y objetivos

La hipótesis de partida es que, ante la creciente emergencia climática, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), con el apoyo de programas informáticos, es posible establecer una metodología para facilitar la comprensión del ACV y del Potencial de Calentamiento Global en la evaluación ambiental y aplicarla a la práctica arquitectónica desde la formación del arquitecto.

La aplicación sistemática de esta metodología es indispensable para la formulación e implementación de estrategias sostenibles eficaces, tanto complejas como sencillas, derivando en mejoras ambientales cuantificables y optimizando la toma de decisiones en el proceso de diseño arquitectónico.

En base a la hipótesis, se establecen varios objetivos:

1. Identificar los puntos críticos de impacto ambiental en un panel composite de aluminio, mediante el uso de herramientas de ACV, para posteriormente establecer la estrategia sostenible más adecuada para reducir sus emisiones de carbono incorporado.
2. Evaluar las mejoras ambientales, en el GWP del panel, derivadas de la implantación de dichas estrategias sostenibles a nivel de producto.
3. Desarrollar las estrategias estudiadas e implementarlas en el ámbito de los edificios, estableciendo el marco para optimizar la toma de decisiones de diseño sostenible. Se utilizará el Pabellón Nuevo de la ETSAM como caso práctico, estudiando una rehabilitación baja en carbono incorporado de la fachada.

El enfoque de los estudios, para llevar a cabo dichos objetivos, será el de usar el Análisis del Ciclo de Vida como una herramienta en el proceso de diseño sostenible de la arquitectura. De forma paralela, se establece un cuarto objetivo:

4. Determinar, a nivel educativo, cuáles son los más indicados para introducir los conceptos de sostenibilidad y Potencial de Calentamiento Global en el plan de estudios de la ETSAM, ante la inminente actualización del Código Técnico de la Edificación.

## Lista de acrónimos

- ACP: Alternative Compliance Paths (Vías Alternativas de Cumplimiento)
- ACV: Análisis del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment, LCA)
- BIM: Modelado de Información de Construcción (Building Information Modeling)
- BSA: Building Sustainability Assessment (Evaluación de la Sostenibilidad de Edificios)
- CML: Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (Centro de Ciencias Ambientales de Leiden)
- DAP / EPD: Declaración Ambiental de Producto (Environmental Product Declaration)
- DoP: Declaración de Prestaciones (Declaration of Performance)
- EICV: Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)
- EPBD: Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (Energy Performance of Buildings Directive)
- ESPR: Reglamento de Diseño Ecológico para Productos Sostenibles (Ecodesign for Sustainable Products Regulation)
- GBCe: Green Building Council España
- GEI: Gases de Efecto Invernadero (Greenhouse Gases, GHG)
- ICV: Inventario del Ciclo de Vida (Life Cycle Inventory, LCI)
- LCC: Coste del Ciclo de Vida (Life Cycle Costing)
- PCG / GWP: Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential)
- RPC / CPR: Reglamento de Productos de Construcción (Construction Products Regulation)

# CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

## 1.1. Sostenibilidad

La sostenibilidad es el principio que busca “satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades propias” (Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, 1987, p. 43). Pero no es tan sencillo como limitar el uso de recursos o reducir el gasto energético, pues la sostenibilidad conlleva asegurar el crecimiento económico y el desarrollo social en la actualidad, al tiempo que busca proteger el medio ambiente.

El concepto fue introducido por primera vez en el Informe Brundtland, publicado en 1987 para las Naciones Unidas. En él, se analizaban las políticas actuales que actuaban sobre el desarrollo económico globalizador, y se replanteaban para buscar soluciones a los problemas medioambientales derivados, como el alto uso de los recursos naturales.

Estas políticas se desarrollaron hasta el año 2000, donde en la Cumbre del Milenio se establecen los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), ocho propósitos del desarrollo humano. El “Objetivo 7: Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente” (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2000), incorporaba aquellos principios basados en el desarrollo sostenible en las políticas nacionales, marcando metas para la protección del medio ambiente y la diversidad biológica, y garantizar la mejora de la calidad de vida a la población sin acceso a recursos y servicios básicos.

En 2015 fueron establecidos los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) por la Asamblea General de las Naciones Unidas, y suponen una evolución en los Objetivos de Desarrollo del Milenio. Se trata de 17 objetivos relacionados entre sí y diseñados como un “plan para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos” (Naciones Unidas, 2017) con la intención de ser alcanzados en el año 2030. Aunque algunos objetivos están directamente ligados al medio ambiente, el clima y los ecosistemas, todos ellos están interconectados entre sí, por lo que el concepto de sostenibilidad es abarcado desde todos los ámbitos.

### 1.1.1. Sector de la construcción

En el sector de la construcción, la sostenibilidad se basa en considerar el proyecto, ejecución, mantenimiento y demolición de los edificios y demás construcciones con el objetivo de minimizar su impacto ambiental y optimizar los recursos naturales, haciendo uso de materiales sostenibles y fuentes no contaminantes.

Pero esto no siempre es suficiente. El sector es el responsable de más de un tercio de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, comprendiendo todos los procesos que intervienen en la construcción, desde la extracción de los materiales hasta el tratamiento de los desechos generados. A nivel mundial, tal y como indica L. Boucher<sup>1</sup> en su artículo “¿Cómo reducir el carbono incorporado de los edificios?”, el sector de la construcción representa hasta el 40% del total de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) llegando en 2024 hasta casi 11 Gt de CO<sub>2</sub> según los datos del informe “Global Status Report for Buildings and Construction 2024/25”<sup>2</sup>. En cuanto al consumo energético, los edificios son los responsables de hasta el 37% de la demanda de energía total a nivel global, según la misma fuente.

<sup>1</sup> Boucher, L. (2021, junio). *¿Cómo reducir el carbono incorporado de los edificios?* Green Building Council España.

<sup>2</sup> United Nations Environment Programme. (2025). *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: Not just another brick in the wall - The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast.* Paris.

Todo esto ha llevado a la creación de legislaciones que regulen y establezcan marcos donde implementar criterios de sostenibilidad, como el Reglamento (UE) 2024/3110 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, que establece reglas armonizadas para la circulación de productos de construcción en el mercado único de la Unión Europea.

### 1.1.1.1. Construcción sostenible

La construcción sostenible debe tener en cuenta el ciclo de vida de los materiales, pues el carbono incorporado en la extracción de las materias y posterior elaboración de los productos de construcción es el responsable de casi la mitad de las emisiones del sector. Entre estos materiales destaca el hormigón, siendo el cemento el responsable de casi la mitad de estas emisiones.

La adecuada elección de los materiales y su uso eficiente y responsable es uno de los principios fundamentales de la sostenibilidad en la construcción. Como Bjorn Berge<sup>3</sup> argumenta en su libro *"The Ecology of Building Materials"*, la elección de las materias no solo incide en la contaminación, sino que puede llegar a tener grandes efectos sociales y económicos.

Por ejemplo, el uso de materias locales elimina gran parte de las emisiones gastadas en el transporte y en la producción de los productos, pues se deja de depender de la producción a gran escala. Los materiales locales permiten una mejor adaptación a las condiciones climáticas, mejorando la eficiencia energética y facilitando el mantenimiento y reutilización de los recursos. Todo esto supone también un incentivo para la producción local, y por lo tanto un fortalecimiento de la economía regional.

El uso de recursos renovables, y la reutilización y reciclaje de los materiales a lo largo de su ciclo de vida es otro de los grandes pilares de la construcción sostenible. Las emisiones contaminantes se ven enormemente reducidas gracias al reciclaje de los materiales, debido a que este proceso conlleva menos gasto energético, menor uso de agua y ahorro de materias primas comparado con las fases del proceso de producción de los materiales. Esto también incluye a las emisiones resultantes de la gestión y eliminación de residuos.

El diseño arquitectónico también desempeña un papel fundamental en la sostenibilidad y en la reducción del impacto ambiental. La implementación de medidas pasivas de captación de luz, la orientación, o la ventilación cruzada hacen que las construcciones requieran de menos sistemas mecánicos de climatización. Un diseño basado en la flexibilidad de espacios y adaptabilidad de los edificios permite futuras reformas sin la necesidad de nuevos recursos o generar residuos. El uso de técnicas constructivas que permitan el fácil reciclaje o reutilización de los materiales al final de su vida útil es clave para la reducción de emisiones, como se ha explicado anteriormente.

## 1.1.2. Reglamento de Productos de Construcción

El Reglamento (UE) 2024/3110 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, habitualmente conocido como Reglamento de Productos de Construcción (RPC), fue originalmente establecido en 2011 como una legislación que busca estandarizar los requisitos de seguridad, rendimiento e impacto ambiental para los productos de construcción en toda la Unión Europea. Su objetivo es facilitar la libre circulación de dichos productos en el Mercado Único mediante normas armonizadas.

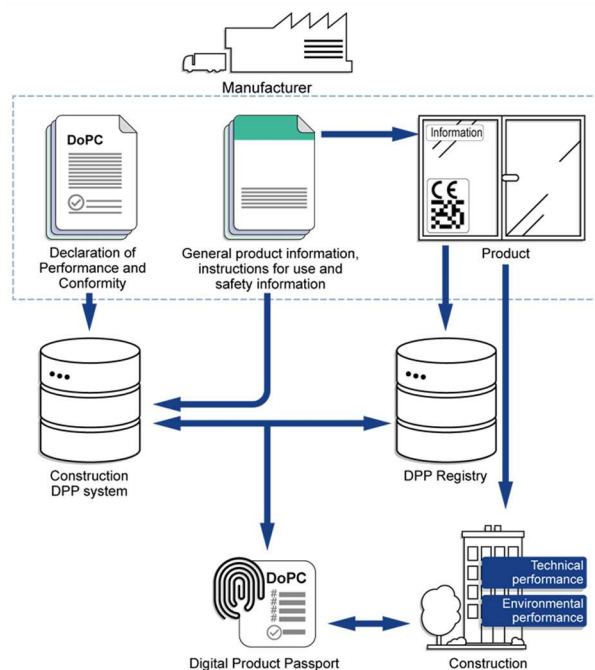
Con su actualización en 2024, el CPR (por sus siglas en inglés) aborda los retos ambientales actuales y refuerza la sostenibilidad y transparencia en el sector. Introduce importantes medidas

---

<sup>3</sup> Berge, B. (2009). *The Ecology of Building Materials*. 2aEd. Oxford: Architectural Press.

para garantizar, y facilitar, el cumplimiento de normas de seguridad y medioambiente más estrictas:

- Pasaportes Digitales de Productos (DPP): serán los principales repositorios digitales donde se almacenarán datos técnicos y ambientales estandarizados sobre el ciclo de vida de los materiales, promoviendo la sostenibilidad y mejorando la trazabilidad y transparencia de los productos. Su función será facilitar a organismos reguladores o partes interesadas, como arquitectos o empresas de construcción, el acceso a las verificaciones de cumplimiento de la normativa.
- Declaración de Prestaciones (DoP): Existente desde el 2011, antes solo requería documentación técnica sobre rendimiento, pruebas e inspecciones periódicas para garantizar su calidad y durabilidad. Ahora también, a la par, se debe incluir declaraciones e información detallada sobre estándares ambientales.
- Marcado CE mejorado: Incluye información sobre rendimiento técnico y sostenibilidad, garantizando el cumplimiento normativo.
- Declaración Ambiental de Producto: Los fabricantes deben detallar indicadores como emisiones de CO<sub>2</sub> y consumo energético. En el futuro, se incluirán métricas como reciclabilidad y toxicidad, proporcionando una visión integral del ciclo de vida de cada producto.



1.1. Proceso de digitalización mediante DPP

Esta actualización del CPR se alinea con las normas de sostenibilidad de la UE como el Reglamento de Diseño Ecológico para Productos Sostenibles (ESPR)<sup>4</sup> y la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD)<sup>5</sup>, e introduce nuevos requisitos para las Declaraciones Ambientales de Producto cuyas reglas se establecen en la norma UNE-EN 15804<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> Reglamento (UE) 2024/1781 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024.

<sup>5</sup> Directiva (UE) 2024/1275 del parlamento europeo y del consejo, de 24 de abril de 2024.

<sup>6</sup> UNE-EN 15804:2012+A2:2020: Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.

### 1.1.2.1. Características esenciales de la sostenibilidad ambiental

Entre estos cambios, destaca la integración de la sostenibilidad en las normas actuales europeas, pues obliga a los fabricantes, para 2030, a declarar 13 indicadores básicos de la sostenibilidad ambiental establecidos en el ANEXO II del RPC. Para el 2032, se prevé añadir 6 indicadores adicionales de sostenibilidad ambiental.

Estos indicadores, llamados “características esenciales de la sostenibilidad ambiental”, indicados en el ANEXO II del RPC, se corresponden con las categorías de impacto establecidas en la norma UNE-EN 15804, y son:

- Efectos sobre el cambio climático – total (1), combustibles fósiles (2), biogénico (3), y uso del suelo y cambio del uso del suelo (4).
- Agotamiento de la capa de ozono (5).
- Potencial de acidificación (6).
- Eutrofización – del agua dulce (7), del agua marina (8) y terrestre (9).
- Ozono fotoquímico (10).
- Agotamiento de los recursos abióticos – minerales y metales (11) y combustibles fósiles (12).
- Consumo de agua (13).

Impactos adicionales:

- Materia particulada (14).
- Radiaciones ionizantes - salud humana (15).
- Ecotoxicidad - agua dulce (16).
- Toxicidad humana – efectos cancerígenos (17) y efectos no cancerígenos (18).
- Impactos relacionados con el uso del suelo (19).

La declaración de estos datos ambientales será progresivamente obligatoria para todos los productos de construcción, y se incluirán en las Declaraciones de Prestaciones (DoP). Esta documentación técnica incluirá los cálculos ambientales durante el ciclo de vida el producto, basados en la metodología indicada en la norma UNE-EN 15804, y deben ser verificados y validados. Estas Declaraciones de Prestaciones, a su vez, irán incluidas en el Pasaporte Digital de Producto.

### 1.1.2.2. Declaraciones Ambientales de Producto

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP), conocidas internacionalmente como “*Environmental Product Declaration*” (EPD), son declaraciones ambientales tipo III según la norma UNE-EN ISO 14025<sup>7</sup>. Esta norma las define como “*Declaración ambiental que proporciona datos ambientales cuantificados utilizando parámetros predeterminados y, cuando corresponda, información ambiental adicional*” (Asociación Española de Normalización [UNE], 2019). Su objetivo principal es comunicar información sobre el desempeño ambiental de un producto. Para aquellos productos y servicios relacionados con el sector de la construcción, estas declaraciones se basan en la previamente mencionada norma UNE-EN 15804, donde se establecen las Reglas de Categoría de Producto, de forma que las DAP sean compatibles en toda Europa y comparables entre ellas.

---

<sup>7</sup> Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos. (UNE-EN ISO 14025:2006)

Estas declaraciones se basan en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) conforme a las normas ISO 14040<sup>8</sup> e UNE-EN ISO 14044<sup>9</sup>, evaluando los impactos ambientales del producto desde la extracción de las materias primas hasta su fin de vida, o en determinadas fases. Los indicadores aparecen desglosados por etapas de vida o módulos, según la norma UNE-EN 15804, y habitualmente se presentan en forma de gráficos o tablas. Deben ser informes coherentes y transparentes, y deben estar verificados independientemente por organizaciones acreditadas.

Al ser declaraciones ambientales tipo III, su carácter es totalmente voluntario, y aunque el RPC no exige específicamente emitirlos, pueden ser de gran utilidad. Una DAP certificada, siguiendo la norma UNE-EN 15804, incluye exactamente los mismos indicadores ambientales que el Reglamento requiere, por lo que estas ofrecen la estructura y los datos necesarios para cumplir los requisitos del RPC y elaborar las Declaraciones Ambientales obligatorias que se incluirán en las Declaraciones de Prestaciones.

A los arquitectos este Reglamento nos toca de lleno, pues se prevé que para el 2026 el CTE sufra una actualización en el CTE, la sección DB HSA (sostenibilidad ambiental). Se introduce el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a los proyectos de arquitectura en España, por lo que será necesaria la información sobre los impactos ambientales incluidos en las DAP.

### 1.1.3. Certificaciones de sostenibilidad ambiental

Desde que en 1987 se introdujera el concepto de desarrollo sostenible fue apareciendo una creciente conciencia ambiental y una necesidad de responder a los impactos negativos que el ser humano provoca en el planeta. En ese contexto, donde la sostenibilidad iba ganando protagonismo en casi todos los ámbitos, surgió la necesidad de contar con herramientas capaces de medir, comparar y verificar la respuesta de los diversos sectores económicos a los criterios de sostenibilidad ambiental.

Fueron apareciendo sistemas de evaluación y reconocimiento que establecían estándares ambientales dirigidos a las actividades de cada sector y ofrecían información clara sobre el desempeño ambiental. Esto provocó que los productos y servicios con dichas certificaciones fuesen mejor valorados por el mercado y los consumidores, por lo que las empresas vieron en la sostenibilidad una oportunidad de innovar y ganar dinero.

En el sector de la construcción, por supuesto, también se desarrollaron estas herramientas, a las cuales comúnmente nos referimos como “certificaciones de sostenibilidad ambiental”. El objetivo de estas certificaciones es promover las prácticas más sostenibles, no solo reduciendo el consumo energético o utilizando materiales menos contaminantes, sino que adoptan una visión que abarca todo el ciclo de vida del edificio o de sus componentes. El diseño, la elección de materiales sostenibles, la gestión de residuos, el uso del agua, o incluso el bienestar de los usuarios, son algunos de los estándares que se evalúan.

Aunque, como he mencionado, las empresas ven en estas certificaciones una oportunidad económica y un negocio, esto incentiva la innovación en el sector. Obtener una certificación de sostenibilidad ambiental mejora la imagen de una empresa y, por lo tanto, atrae a clientes e inversores. Esto viene acompañado de un impulso en el desarrollo de tecnologías y en el uso de prácticas sostenibles, y se mejora la colaboración entre diferentes sectores, pues obtener una certificación muchas veces requiere de la participación de diferentes organizaciones, promoviendo la sostenibilidad en todos los ámbitos.

Estas certificaciones no constituyen una normativa obligatoria ni tienen carácter legal, su cumplimiento es totalmente voluntario, pero su obtención puede traer beneficios a nivel económico, social y ambiental. Además, proporcionan una metodología estandarizada que, a

<sup>8</sup> Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (UNE-EN ISO 14040:2006).

<sup>9</sup> Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. (UNE-EN ISO 14044:2006).

nivel nacional e internacional, establece un marco definido en criterios de sostenibilidad. Esto facilita y mejora el desempeño ambiental, ayudando cumplir con los estándares ambientales de cada país o región y contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad y estrategias ambientales globales.

### **1.1.3.1. Métodos de evaluación de las certificaciones de sostenibilidad ambiental**

Entre los certificados de sostenibilidad más reconocidos a nivel mundial en la industria de la construcción destacan BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) y LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). Ambas se crearon en los años 90, y aunque presentan diferencias en su estructura y enfoque, la metodología principal en ambos se basa en la evaluación por categorías y obtención de puntos basado en criterios relacionados con la sostenibilidad.

Usan diversos softwares y herramientas informáticas para realizar las metodologías de Evaluación de Sostenibilidad de Edificaciones (BSA), aunque se destaca la integración de estas en la metodología BIM (Building Information Modelling) como base para realizar simulaciones energéticas, análisis de iluminación natural, estudios de confort térmico y ACV desde las etapas tempranas del diseño.

BREEAM, lanzada en Inglaterra en 1990, se creó en el contexto europeo y se centra en factores ambientales, sociales y económicos durante la gestión del proyecto. Tiene como objetivo minimizar los efectos negativos de la construcción en el medio ambiente a lo largo del ciclo de vida de las construcciones. En su última versión, se evalúan los impactos en 10 categorías distintas durante todas las fases del edificio, y los esquemas de puntuación varían según el uso y la tipología de este. Las categorías son:

- Gestión.
- Salud y bienestar.
- Energía.
- Transporte.
- Agua.
- Materiales.
- Residuos.
- Uso del suelo y ecología.
- Contaminación.
- Innovación.

La puntuación final se obtiene mediante unos créditos ponderados de cada categoría pudiendo obtener las calificaciones “Correcto” (30% de los requisitos cumplidos), “Bueno” (45% de los requisitos cumplidos), “Muy bueno” (55% de los requisitos cumplidos), “Excelente” (70% de los requisitos cumplidos) y “Excepcional” (más del 85% de los requisitos cumplidos) (Hamed & Elsaadany, 2014).

Para la evaluación se tienen en cuenta la importancia ambiental relativa de estas, destacando en la categoría de “Transporte” el uso de medidas de transporte sostenibles, o en la categoría “Materiales” los impactos medioambientales de los productos de construcción, basándose en el Análisis del Ciclo de Vida. Cabe señalar que las DAP o EPD son reconocidas y valoradas durante la evaluación, así como la certificación UNE-EN ISO 14001 como evidencia de buenas prácticas ambientales.

En 2010, BREEAM fue introducido en España convirtiéndose en una herramienta de evaluación ambiental adaptada a las normativas y regulaciones locales, haciendo uso de documentos técnicos específicos y el Código Técnico de la Edificación (CTE), así como otras normativas medioambientales.

Un ejemplo de un proyecto con certificado BREEAM España es el Campus Tecnológico Cortizo, en Padrón. Reconocido por BREEAM España como el edificio más sostenible de nueva construcción, tiene la calificación máxima gracias al uso de materiales reciclados como el aluminio, una amplia extensión de zonas verdes que abarcan 45.000m<sup>2</sup> y una reducción del consumo energético del 86% (Martínez-Risco, 2024).



1.2. Campus tecnológico Cortizo, A Coruña.

El sistema LEED, por otra parte, fue desarrollado en Estados Unidos por la institución U.S. Green Building Council (USGBC) en 1994. A diferencia de BREEAM, su metodología se enfoca en la evaluación del diseño ecológico y rendimiento energético del proyecto, adaptando sus esquemas a los diferentes usos y tipologías de las construcciones. La estructura de LEED V4 se basa, al igual que BREEAM, en la obtención de créditos a partir de 43 criterios relacionados con la sostenibilidad, divididos en 7 categorías diferentes (Hamed & Elsaadany, 2014):

- Energía y Atmósfera (EA)
- Eficiencia en el uso del agua (WE)
- Sitios Sostenibles (SS)
- Materiales y Recursos (MR)
- Calidad del Ambiente Interior (IEQ)
- Innovación y Diseño (ID)
- Prioridad Regional (RP)

La puntuación se obtiene mediante el cálculo en puntos, teniendo cada criterio un valor mínimo de un punto. Al igual que otras certificaciones de sostenibilidad, cada criterio y categoría no se evalúa ni puntúa de igual forma, otorgando mayor importancia a los criterios relacionados con la eficiencia energética y el impacto ambiental. Uno de los criterios, “reducción del impacto del ciclo de vida del edificio”, está relacionado con el ACV, y de igual forma que BREEAM, la posesión de declaraciones ambientales como las EPD puntúa en la evaluación.

Para conseguir la puntuación de cada criterio, no es posible cumplir parcialmente sus requisitos, sino que deben cumplirse todos a excepción de los criterios de “reducción del uso de agua” (en la categoría WE), optimización del rendimiento energético (en la categoría EA) y energía renovable en el sitio (también en la categoría EA), pudiendo en estos obtener un número de puntos parcial según el grado de cumplimiento. Las calificaciones finales, obtenidas por acumulación de puntos, pueden ser “Certificado” (obtención de 40-49 puntos), “Plata” (50-59 puntos), “Oro” (60-79 puntos), “Platino” (más de 80 puntos obtenidos) (Hamed & Elsaadany, 2014).

La metodología LEED permite adaptarse a las características de cada país mediante las Global Alternative Compliance Paths (ACP) debido a su presencia internacional. En España, ha sido adaptada al contexto y al CTE, siendo el organismo Green Building Council España (GBCe) el que gestiona y facilita el proceso de certificación en el territorio.

Un ejemplo de certificación LEED en España es el edificio Oxseo, en Madrid, un edificio de oficinas el cual obtuvo la calificación Platino en LEED BD+C (Diseño y Construcción de Edificios Nuevos y Renovaciones Mayores). El edificio cuenta con una gran fachada estructural, que actúa como protector solar a la vez que maximiza la entrada de luz natural, y junto a los eficientes sistemas de climatización y la iluminación LED, consigue disminuir el consumo energético hasta en un 40% (Construible, 2018). El diseño destaca por la flexibilidad de los espacios y su capacidad de adaptarse a empresas y personas, otorgando un gran bienestar a estas.



1.3. Edificio Oxseo, Madrid.

### 1.1.3.2. Limitaciones en la evaluación de la sostenibilidad ambiental

El carbono incorporado, que abarca todas las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción, transporte, construcción y fin de vida de los materiales de un edificio, es un componente crítico de la sostenibilidad ambiental. A pesar de su significativa contribución al cambio climático, muchas de las certificaciones de edificios sostenibles existentes tienden a priorizar la eficiencia energética durante la fase operativa, dejando un margen considerable para una mayor integración y valoración del impacto de los materiales desde su origen.

Certificaciones como LEED o BREEAM, aunque asignan un porcentaje de la puntuación al uso de materiales que tienen una EPD como ya se ha comentado anteriormente, los impactos en dicha declaración no se tienen en cuenta, tal y como se concluye en el estudio de Amiri et al. (2021)<sup>10</sup>, donde se realiza el ACV de edificios con certificaciones LEED y se comparan los resultados.

Esto puede influir negativamente en la elección sostenible en los materiales, pues se priorizan para la evaluación aquellos que cuentan con una EPD, o información sobre su composición, por encima de materiales con menor huella de carbono, gracias a su bajo contenido en carbono incorporado, que no cuenten con dicha declaración ambiental.

<sup>10</sup> Amiri, A., Emami, N., Ottelin, J., Sorvari, J., Marteinsson, B., Heinonen, J., & Junnila, S. (2021). Embodied emissions of buildings - A forgotten factor in green building certificates. *Energy And Buildings*, 241, 110962.

## 1.2. Análisis del Ciclo de Vida

### 1.2.1. Ciclo de vida de los productos

El ciclo de vida es el conjunto de etapas consecutivas que atraviesa un producto, proceso o servicio desde su inicio hasta su final. Su análisis se lleva a cabo para evaluar el impacto ambiental de un producto, desde la extracción de la materia prima hasta la eliminación del producto, cuantificando el uso de materiales, energía y emisiones.

Las fases del ciclo de vida de un producto incluyen:

- i) La extracción y procesamiento de materias primas, donde se obtienen y preparan los materiales.
- ii) La fabricación, etapa en la que los materiales se transforman en el producto final.
- iii) La distribución y el transporte, que llevan el producto desde la fábrica hasta el consumidor.
- iv) El uso, período durante el cual el producto cumple su función.
- v) La fase de fin de vida, que implica su eliminación o gestión.

Tradicionalmente, este ciclo ha seguido un modelo lineal de "extraer, fabricar, usar y desechar", generando un consumo insostenible de recursos y una acumulación de residuos.

#### 1.2.1.1. Economía circular

La Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular<sup>11</sup>, la economía circular como:

Sistema económico en el que el valor de los productos, materiales y demás recursos de la economía dura el mayor tiempo posible, potenciando su uso eficiente en la producción y el consumo, reduciendo de este modo el impacto medioambiental de su uso, y reduciendo al mínimo los residuos y la liberación de sustancias peligrosas en todas las fases del ciclo de vida, en su caso mediante la aplicación de la jerarquía de residuos. (Ley 7/2022, de 8 de abril, art. 2)

Es, por tanto, un modelo de producción y consumo basado en mantener los recursos, como productos, materiales o servicios, en uso durante el mayor tiempo posible. Su propósito es extraer el máximo valor de estos mientras están en uso, y al terminar su vida útil, recuperarlos y regenerarlos, cerrando así su ciclo de vida.

---

<sup>11</sup> BOE núm. 85, de 09/04/2022.



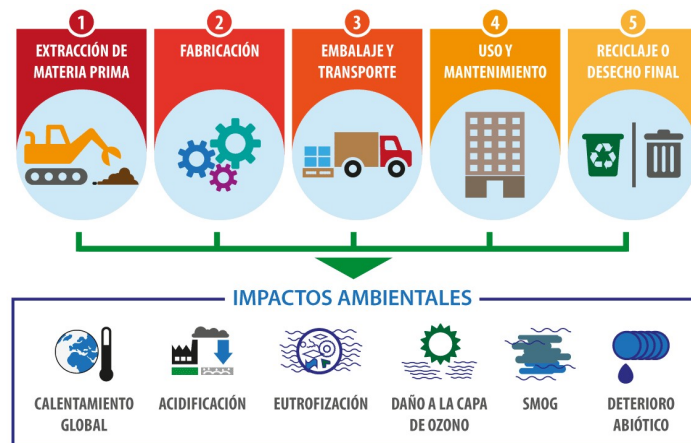
1.4. Modelo de economía circular

La economía circular se contrapone al modelo lineal tradicional de "extraer, fabricar, usar y desechar". Mantiene los productos y materiales presentes en el mercado alargando su vida útil para reducir la extracción de nuevas materias primas y minimizar la generación de residuos. Además, el concepto de diseño tiene un papel fundamental, pues la creación de nuevos productos con materiales reciclados o reutilizados, o el diseño de nuevos sistemas para que sus componentes puedan ser fácilmente reemplazados, otorgan al producto una mayor vida útil.

### 1.2.2. Análisis del ciclo de vida

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología de evaluación ambiental de los productos, materiales o servicios en cada una de las etapas de su ciclo de vida, desde la adquisición de la materia prima hasta su disposición final, como se ha explicado anteriormente.

Su propósito es cuantificar el uso de materias, energía y emisiones para valorar los impactos ambientales, lo que permite identificar oportunidades y establecer estrategias sostenibles de una forma analítica. Además, realizando el ACV de forma comparativa entre diferentes productos, se pueden cuantificar las mejoras ambientales y los beneficios asociados a estrategias como la economía circular.



1.5. Etapas del ciclo de vida de un producto

La elaboración del análisis del ciclo de vida en productos relacionados con el sector de la construcción se rige fundamentalmente por un marco normativo internacional, y europeo, que garantiza la rigurosidad y comparabilidad de los resultados del estudio.

### **1.2.2.1. Normativa y fases del ACV**

En primer lugar, las normas UNE-EN ISO 14040 y UNE-EN ISO 14044 establecen los principios y directrices a seguir para realizar el estudio del impacto medioambiental de un producto o servicio en general utilizando la metodología del ACV. De acuerdo con estas normas, estos estudios se componen de 4 fases interconectadas:

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

En esta etapa, por un lado, define claramente el propósito del estudio, el uso que se va a dar de él y los motivos para realizarlo, a la vez que se establece posterior aplicación de los resultados, a quien van dirigidos, su carácter público o privado, etc.

Por otro lado, se define el alcance del estudio, es decir, el sistema a estudiar y sus límites, de forma que garantice la compatibilidad con el objetivo definido. Incluye:

- Sistema del producto. Es el conjunto de procesos relacionados con el producto a estudiar necesarios para que este realice su función, es decir, las etapas de su ciclo de vida.
- Las funciones del sistema del producto y la unidad funcional a estudiar.
- Los límites del sistema. Se determinan los procesos de cada etapa del ciclo de vida que se incluirán en el estudio, como por ejemplo "de la cuna a la tumba" (desde la extracción de materias primas hasta la disposición final) o "de la cuna a la puerta" (desde la extracción hasta la salida de la fábrica).
- Los procedimientos de asignación. Se trata de dividir las cargas ambientales del producto que se va a estudiar entre sus diferentes componentes, diferenciando las diferentes entradas (materias primas, energía) y salidas (emisiones, residuos) para cada uno.
- Las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impacto. Dependerá del sector económico al que pertenece el producto a estudiar.
- Requisitos relativos a los datos. Calidad, fuente y precisión de los datos utilizados.
- Las suposiciones realizadas para el estudio.
- Las limitaciones durante el desarrollo del estudio.
- Los requisitos iniciales de calidad de los datos. También se podrán especificar datos para definir los límites geográficos, temporales o incluso tecnológicos.
- El tipo de revisión crítica, si la hay.
- El tipo y formato del informe requerido para el estudio.

## **2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)**

En esta fase se recopilan y cuantifican los datos de todas las entradas y salidas relevantes del sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida, dentro de los límites definidos en la fase anterior.

En las entradas se incluyen las materias primas, la energía y los recursos consumidos en cada etapa del ciclo de vida del producto. Las salidas establecen las emisiones al aire, las emisiones al agua, residuos sólidos, etc.

La calidad de estos datos, y de las fuentes utilizadas para su recopilación, son importantes para otorgar fiabilidad al estudio. Además, pueden modificar los requisitos y limitaciones del estudio, pues, aunque el ACV se haga por fases, estas están interconectadas.

## **3. Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida (EICV)**

En esta fase se cuantifican impactos ambientales del sistema mediante los resultados obtenidos en el ICV. Para ello, se asocian los datos del inventario con las categorías de impacto establecidas y sus indicadores, y se evalúan mediante la metodología elegida según el objetivo y alcance del estudio. En resumen, es la fase donde se caracterizan los resultados del ACV. Consta de varias etapas según la norma UNE-EN ISO 14040:

- i) Selección de categorías de impacto. En esta fase, se eligen las áreas ambientales para su evaluación. Por ejemplo, el cambio climático.
- ii) Clasificación. Los datos del inventario (emisiones, consumo de recursos, etc) se asignan a las categorías de impacto establecidas.
- iii) Caracterización. En esta fase se utilizan factores de caracterización para convertir los datos del inventario en indicadores de cada categoría, reflejando la contribución relativa de diferentes sustancias al impacto ambiental. Por ejemplo, el factor de caracterización del cambio climático es Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés), y se indica en kg CO<sub>2</sub> equivalente.
- iv) Normalización. Se trata de una fase opcional. En ella, los resultados de la caracterización se dividen por un factor de normalización para convertirlos en unidades neutras, expresando así resultados de un área geográfica y tiempo determinados y hacerlos más comparables.
- v) Ponderación. También es una fase opcional, en la cual los resultados normalizados se multiplican por un factor de ponderación para convertirlos en una unidad común, para sumarlos, y obtener una única puntuación del impacto ambiental del sistema.

## **4. Interpretación de los resultados.**

Se analizan los resultados del ICV y del EICV conjuntamente, en relación con el objetivo y alcance del estudio, y se desarrollará el tipo de informe establecido en la primera fase.

En definitiva, las cuatro fases del ACV conforman una herramienta que permite una evaluación exhaustiva de los impactos ambientales relacionados con las etapas del ciclo de vida de un producto. Gracias a la normativa existente, esta metodología se convierte en un proceso sistematizado que logra adaptarse a los diferentes sectores económicos y ámbitos, para establecer estrategias en favor del medio ambiente e impulsar modelos más sostenibles.



1.6. Etapas de un ACV según la norma UNE-EN ISO 14040.

### 1.2.3. Relevancia de la evaluación ambiental en la construcción

Como se ha mencionado anteriormente, el sector de la construcción emite grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y GEI durante todo el proceso constructivo, además de consumir intensivamente recursos naturales. Es responsable de una gran parte de la demanda total de energía a nivel global durante el periodo operativo de los edificios, y, al acabar la vida útil de las construcciones, el sector genera grandes volúmenes de residuos, de los cuales ni la mitad serán reciclados o reutilizados.

En este contexto, el ACV se erige como una herramienta esencial para el desarrollo sostenible del sector. A pesar de las dificultades que tiene aplicar la metodología a un edificio completo derivadas de sus múltiples componentes, su análisis es fundamental si se divide en todos sus productos y materiales. Esto permite a diseñadores y fabricantes identificar las etapas con mayor impacto ambiental, y, por lo tanto, se determinan las áreas donde ciertas modificaciones en el diseño de los productos conllevan a mejoras ambientales, como la reducción en el consumo de materias y energía, emisión de gases contaminantes y generación de residuos.

Por otro lado, el ACV no solo supone mejoras sostenibles en el proceso constructivo, pues al utilizar los resultados de la metodología de manera comparativa entre diferentes materiales o métodos de producción, también permite la identificación de errores e ineficiencias asociados a oportunidades económicas.

Al cuantificar y comparar los impactos de cada proceso, se pueden detectar puntos críticos donde se producen pérdidas de recursos o consumo ineficiente de energía, entre otros. Esta información permite el desarrollo de nuevas tecnologías que, corrigiendo y optimizando todas las fases del ciclo de vida de los productos de construcción, como su fabricación, transporte, mantenimiento y gestión tras acabar su vida útil, mejoran la eficiencia en el consumo de recursos y reducen las emisiones contaminantes.

En resumen, las oportunidades económicas derivadas de la interpretación de los resultados del ACV conllevan la implementación de estrategias sostenibles en las construcciones. Una mejora en el sistema de producción, un mejor diseño de los productos según su función, o el desarrollo de nuevas tecnologías energéticamente eficientes, hacen que los edificios, como conjunto de sus productos, sean más sostenibles con el medio ambiente.

### 1.2.3.1. Aplicación del ACV en productos de construcción. UNE-EN 15804.

Para la evaluación ambiental de productos y servicios relacionados con el sector de la construcción específicamente ha de aplicarse la norma UNE-EN 15804. Esta norma es una Regla de Categoría de Producto (RCP), adapta y complementa el marco normativo general para realizar el ACV establecido por las normas UNE-EN ISO 14040 e UNE-EN ISO 14044.

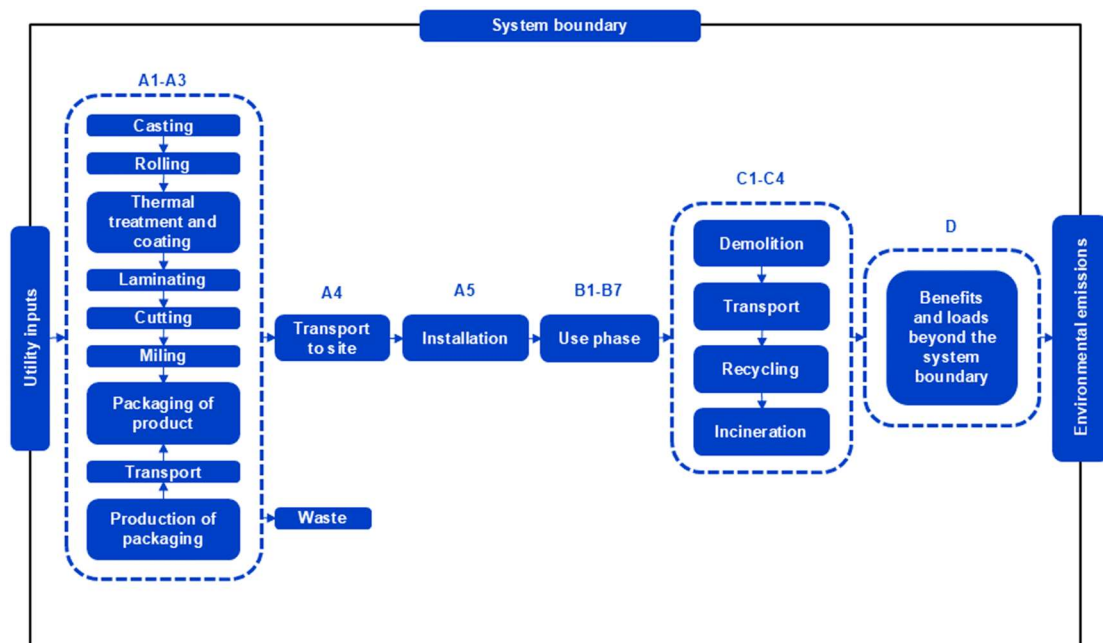
Para ello, esta norma establece las reglas básicas para la categoría de producto de construcción a seguir para la realización de la evaluación ambiental de productos de construcción. Define las variables para realizar el ACV, la calidad de los datos, la metodología de EICV que debe usarse, que indicadores se deben declarar, y como se estructura la Declaración Ambiental de Producto resultante y que información ambiental debe incluir.

Esto permite identificar patrones, limitaciones, omisiones o suposiciones para que, siguiendo una metodología y enfoques específicos, los estudios realizados puedan ser comparados entre sí, además de facilitar la recopilación de los datos necesarios y la comunicación de los resultados a las partes interesadas.

Dentro de los principales criterios a establecer es la definición del objetivo y del alcance. La definición del objetivo dependerá más al uso que se le dará al estudio, por lo que no existe un consenso sobre este. Los arquitectos, por ejemplo, tendrán el propósito de comparar diversos materiales o sistemas para el diseño de una construcción.

El alcance del estudio en productos de construcción, sin embargo, sí que tiene unas premisas establecidas para facilitar la comparabilidad entre estudios y la recopilación de datos. Por ejemplo, en cuanto a los límites del sistema del producto estudiado, al tratarse de materiales de construcción, se suelen excluir del análisis los procesos no relacionados con su fabricación, pues se asume que no son significativas. Esto se debe a que las mayores cargas ambientales se asocian a la etapa de fabricación del producto, tal y como se indica Dossche et al. (2017).

También suelen quedar fuera de los límites del sistema procesos como la fabricación de la maquinaria utilizada para la producción de la unidad estudiada, los impactos ambientales generados por sedes y oficinas, así como por su personal y trabajadores, o los procesos relacionados con el reciclaje de residuos generados.



1.7. Diagrama de límites del sistema de la DAP de ALUCOBOND A2.

La norma EN 15804 establece que los módulos A1-A3 (etapa del producto) deben declararse en las DAP obligatoriamente, junto a los módulos C1-C4 (etapa de fin de vida) y D (beneficios y cargas más allá del límite del sistema), quedando estos últimos exentos si el producto reúne 3 requisitos marcados en la norma. Adicionalmente, pueden declararse el resto de los módulos opcionales, según la DAP y el enfoque de esta. Además, indica que procesos de cada etapa deben incluirse en el estudio.

La unidad funcional, por lo general, se establece según el tipo de producto y el objetivo del estudio. Si se comparan dos materiales deben definirse unidades funcionales idénticas tal como establecen las normas UNE-EN ISO 14040 e UNE-EN ISO 14044. Si el estudio no es comparativo, la unidad funcional deberá regirse por Reglas de Categoría de Producto (PCR) como marca la norma UNE-EN ISO 14025, en este caso, las establecidas en la norma UNE-EN 15804 para productos de construcción.

Como alternativa a la unidad funcional, puede definirse una unidad declarada, como dice la norma UNE-EN 15804, cuando:

Debe aplicarse la unidad declarada si no puede definirse una unidad funcional; por ejemplo, en el caso en que la función del producto no se pueda describir inequívocamente, ya que puede utilizarse de formas diferentes en las obras de construcción, o cuando la función precisa del producto o de los escenarios a nivel de edificio no se declare o no se conozca. (Asociación Española de Normalización [UNE], 2020)

En este caso, debe aplicarse uno de los tipos unitarios definidos en la misma norma. El tipo de DAP (cuna a puerta, cuna a puerta con opciones, cuna a tumba, etc.) se basará en la unidad funcional o en la unidad declarada.

La vida útil de referencia de la unidad se suele establecer en 50 años, asumiendo ese tiempo como la duración media de un edificio ya que la norma no fija un periodo temporal obligatorio, aunque si especifica que debe cubrir la etapa de uso del producto. Las categorías de impacto en el sector de la construcción, como se ha explicado anteriormente, vienen establecidas en la misma norma.

En cuanto al análisis del inventario, se deben seguir las directrices proporcionadas por la norma UNE-EN ISO 14044 para la recopilación de datos, procedimientos de cálculos y la asignación de los flujos de entrada y las emisiones de salida.

En general, en cuanto a la calidad de los datos genéricos utilizados para el ACV, la norma UNE-EN 15804 establece esquemas para determinar la calidad de estos, además de otros requisitos a aplicar para su uso, y proporciona un enlace web para la descarga de los flujos básicos para el estudio.

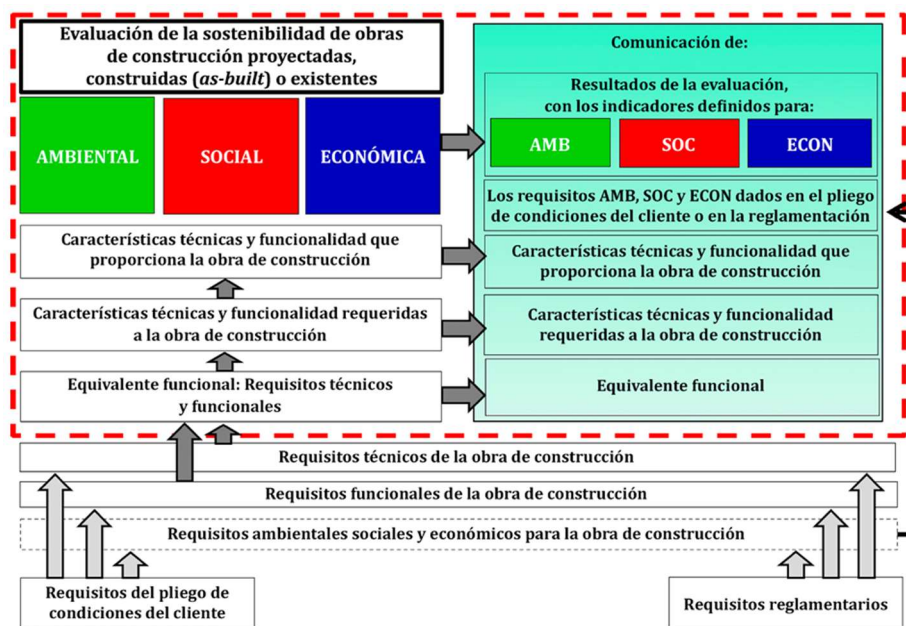
Las metodologías de EICV que se utilizan están relacionadas con las categorías de impacto estudiadas y se usarán diferentes para cada una de dichas categorías. Además, la norma UNE-EN 15804 indica, y proporciona mediante un enlace web, que modelos de caracterización aplicar para cada categoría de impacto, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 14044.

### 1.2.3.2. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. UNE-EN 15978.

La normativa para evaluación ambiental de los edificios viene marcada por la norma UNE-EN 15643<sup>12</sup>. Esta norma establece el marco general para la evaluación de la sostenibilidad en general de las obras de construcción, incluyendo edificios e infraestructuras de ingeniería civil.

Dicha norma adopta una perspectiva más amplia de la sostenibilidad, pues considera el comportamiento ambiental (impactos en el medio ambiente), el comportamiento económico (costes y beneficios económicos) y el comportamiento social (aspectos relacionados con la calidad de vida, seguridad, etc.) de los edificios a lo largo de su ciclo de vida. Además, define un conjunto de indicadores para la evaluación de cada uno de los comportamientos mencionados.

En resumen, la norma UNE-EN 15643 establece el contexto para la evaluación general de la sostenibilidad en obras de construcción, tanto las características de la unidad estudiada como los objetivos de la evaluación.



1.8. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios.

En cuanto a la evaluación del comportamiento ambiental de los edificios, es la norma UNE-EN 15978<sup>13</sup> la que proporciona el marco normativo y la metodología de cálculo de los impactos ambientales basada en el Análisis del Ciclo de Vida. La evaluación se basa en la agregación de los impactos de todos los productos, procesos, y servicios de construcción utilizados en el edificio. La norma establece unos pasos a seguir para llevar a cabo los cálculos de la evaluación:

- i) Establecer la finalidad de la evaluación, así como su alcance y uso previsto.
- ii) Especificar el objeto de la evaluación. En esta fase se definen:

<sup>12</sup> Sostenibilidad en la construcción. Marco para la evaluación de los edificios y las obras de ingeniería civil. (UNE-EN 15643:2021).

<sup>13</sup> Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo. (UNE-EN 15978:2012).

- Equivalente funcional (tipología del edificio, perfil de uso, vida útil requerida).
- Periodo de estudio de referencia (puede ser distinto a la vida útil requerida según el alcance de la evaluación).
- Límite del sistema (los procesos del ciclo de vida incluidos y excluidos del estudio, dependiendo de si es obra nueva o edificio existente).
- Modelo del edificio (descripción de las partes físicas, así como los procesos en la construcción y los consumos en la etapa de servicio)

- iii) Desarrollar los escenarios. Se describen las características temporales del objeto y los escenarios que se llevan a cabo en cada etapa del ciclo de vida acorde con los límites del sistema. También se detallan, mediante hipótesis o datos reales, los procesos que dependen de la vida útil del edificio o supuestos a futuro.

Para los escenarios de la etapa de producto (A1-A3), se utiliza la información de las DAP de producto, basadas en la norma UNE-EN 15804. De no disponer de esta información, dichos escenarios deben definirse para los módulos de cuna a puerta. Para los módulos A4 y A5, se usarán los datos de las DAP siempre que el escenario definido en estas sea aplicable al escenario definido en la evaluación del edificio. Los escenarios del resto de etapas se desarrollarán según lo indicado en la norma.

- iv) Cuantificación. Se cuantifica la cantidad, neta y bruta, de todos los elementos que constituyen el edificio, de acuerdo con la descripción del objeto de evaluación. De la misma forma, se cuantificará el uso de energía y agua en servicio.

El tipo de datos para la cuantificación se elegirá según el alcance y uso de la evaluación, así como el momento de la evaluación dentro del proceso del ciclo de vida del edificio (diseño, proyecto, construcción, etapa de uso, fin de vida).

- v) Selección de datos ambientales. Se obtendrán los datos ambientales proporcionados por las DAP y se adaptarán a los escenarios establecidos para la evaluación del edificio.
- vi) Cálculo de los indicadores ambientales. Se cuantifica el impacto ambiental del objeto de la evaluación durante su ciclo de vida, representados mediante los indicadores de categoría de impacto del EICV de acuerdo con la ya anulada norma UNE-EN 15804.

Es importante aclarar que estos indicadores no coinciden con los obligados actualmente en las DAP, al estar esta norma anulada por la norma UNE-EN 15804, su actualización.

También se cuantifica el uso de recursos, basado en los flujos de entrada del ICV, y los residuos y flujos de salida, expresados por los indicadores establecidos por la norma.

El cálculo de los valores de cada indicador, para cada módulo de las etapas del ciclo de vida, se realiza empleando el principio de cálculo matricial indicado en la norma.

- vii) Informe de los resultados. El informe deberá incluir la información establecida en cada una de las etapas de la evaluación, desde el alcance y uso previsto, hasta la comunicación de los resultados de la evaluación presentados mediante los indicadores.

- viii) Verificación de los resultados.

Es necesario recordar que, como se ha mencionado antes, esta norma no se alinea con los indicadores de impacto ambiental marcados por la norma UNE-EN 15804, pues esta última fue publicada en 2019, mientras que la norma UNE-EN 15978 se publicó en 2011.

Actualmente existe un proyecto de norma en fase de tramitación, la norma prEN 15978<sup>14</sup>, que sustituirá a la versión actual con el objetivo de mejorar y consolidar los principios de la evaluación ambiental, a la vez que se alinea con las normas actuales y otros reglamentos de la Unión Europea. En esta revisión, uno de los cambios es el reporte de la información ambiental mediante los indicadores de categoría de impacto de acuerdo con la actual norma UNE-EN 15804, donde se incluyen, entre otros indicadores, las 4 subcategorías de Potencial de Calentamiento Global (GWP).

## **1.2.4. Herramientas, bases de datos y metodologías para el ACV**

En las últimas décadas se han desarrollado herramientas informáticas y softwares especializados en el ACV, las cuales se han convertido en instrumentos indispensables para profesionales que buscan cuantificar los impactos ambientales, y demás interesados en realizar el estudio de un ACV.

Muchas de estas herramientas permiten modelar, simular y comparar diferentes escenarios de los procesos que intervienen en la construcción. Otras, más básicas o gratuitas, aunque no tienen tanto alcance, permiten la simplificación, modelado del sistema y el cálculo de dichos impactos y su cuantificación. También, si así se desea, pueden generar informes técnicos gráficos.

### **1.2.4.1. Softwares de ACV**

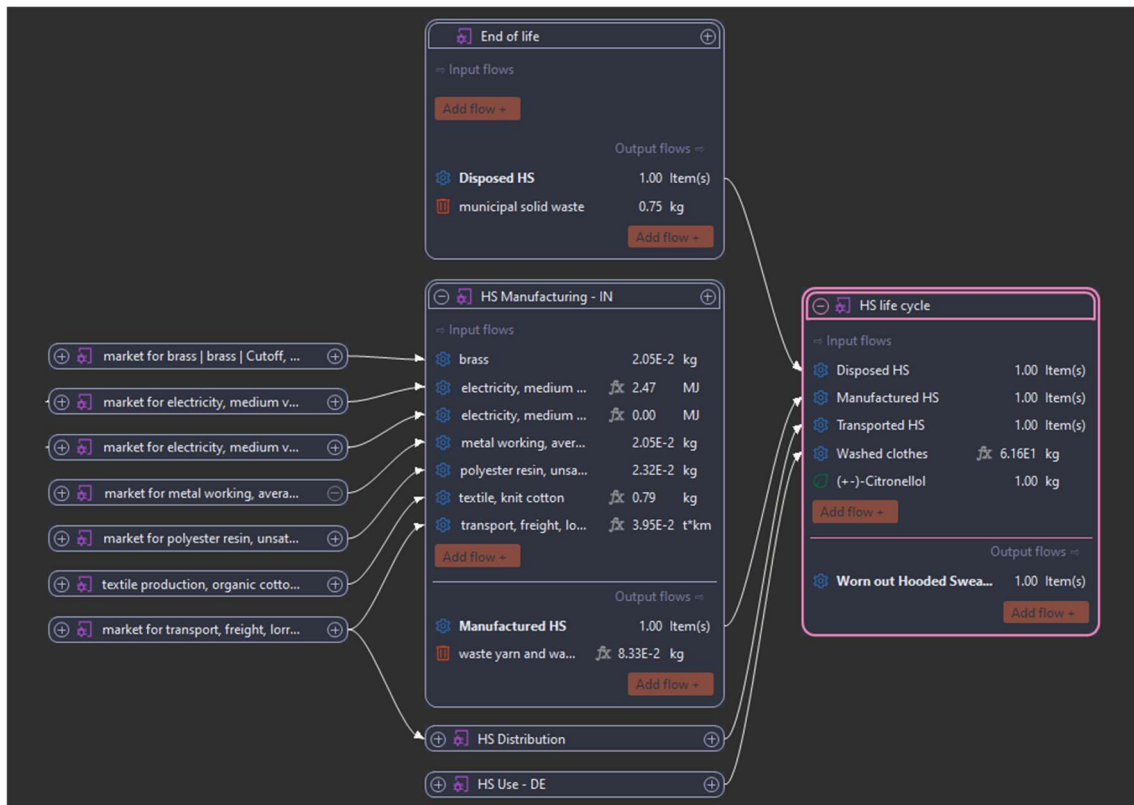
Para el análisis del ciclo de vida de un producto, los softwares usados necesitan de parámetros establecidos por la metodología de evaluación de impactos elegida. elección del software de ACV para su cálculo dependerá de las necesidades específicas del usuario, así como del tipo de productos o procesos que se van a evaluar o el sector al que pertenecen dichos productos o procesos.

En determinados casos, el presupuesto disponible supone también un determinante a la hora de elegir software, pues el precio de estos varía desde miles de euros hasta programas gratuitos. Algunos de los más destacados son:

- SimaPro: Es un software con un enfoque genérico, es decir, no se centra en ningún sector en concreto. Permite modelar sistemas complejos y realizar diferentes tipos de análisis, como ACV, huella de carbono, huella hídrica y análisis de costos del ciclo de vida (LCC, por sus siglas en inglés).
- Sphera LCA for Experts: Antes conocido como GaBi, es un software también de enfoque genérico, capaz de realizar ACV y LCC. destaca por su robusta base de datos y sus potentes herramientas de modelado.
- OpenLCA: aunque menos usado, destaca por ser un software de código abierto, es decir, es gratuito y puede ser mejorado por cualquiera. Admite gran cantidad de base de datos y metodologías para la realización del ACV.

---

<sup>14</sup> Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Requisitos y recomendaciones. (PNE-prEN 15978).



1.9. Ejemplo de modelado gráfico de un sistema de ACV mediante OpenLCA.

En general, todos ellos permiten realizar el análisis del ACV automatizando la entrada de datos y los cálculos, y aunque no están diseñados específicamente para el sector de la construcción, la gran cantidad de bases de datos disponibles permiten a estos softwares modelar los sistemas y procesos necesarios para llevar a cabo la metodología marcada por la normativa (en este caso UNE-EN ISO 14040 e UNE-EN ISO 14044).

#### 1.2.4.2. Bases de datos de ACV

Las bases de datos son los repositorios de la información necesaria para simular el sistema establecido en el estudio del ACV. Contienen los datos promedio para una amplia gama de materiales, fuentes de energía y procesos. Se distinguen principalmente dos tipos:

- Bases de datos ICV. Proporcionan los datos, ya sean específicos o genéricos, sobre las entradas (materias primas extraídas, energía consumida, recursos consumidos) y salidas (emisiones, residuos generados) de los diversos procesos del ciclo de vida de un producto. Se usan en la fase de ICV.
- Bases de metodologías. Aunque no son exactamente bases de datos, proporcionan los factores de caracterización para calcular los impactos ambientales de las diferentes emisiones y usos de los recursos. Se utilizan en la fase de evaluación del impacto del ACV.

En general, las bases de datos disponibles en los softwares de ACV suelen incorporar tanto los datos de entradas y salidas del ICV como las metodologías del EICV, y cada software suele estar conectada a bases de datos por defecto.

Es importante la elección adecuada de la base de datos para el ACV, pues esta dependerá de las necesidades específicas del estudio, el tipo de producto que se evaluará, la ubicación geográfica, e incluso el presupuesto. También se ha de tener en cuenta la calidad de los datos y la compatibilidad con el sistema y el software que se usará. Las más usadas son Ecoinvent<sup>15</sup> o Sphera Managed LCA Content (antes conocida como GaBi Database)<sup>16</sup>, por su gran calidad de datos y amplia cobertura de estos, por su fácil acceso desde los softwares de ACV y por su periódica actualización.

### **1.2.4.3. Metodologías de Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida**

Como se ha explicado anteriormente, en la fase de Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida se evalúa la magnitud de los impactos ambientales del sistema. Para ello, se emplea un método de evaluación que transforma los datos del ICV en información sobre las diferentes categorías de impacto ambiental establecidas mediante factores de caracterización.

La metodología usada variará según el objetivo del estudio y de las categorías de impacto ambiental establecidas, pues no todas las categorías se evalúan con todos los métodos disponibles, ni se desarrollan todas las fases del EICV. Un ejemplo es la metodología CML, que se enfoca en los indicadores de punto medio requeridos en las normas UNE-EN 15978 y UNE-EN 15804.

## **1.3. Global Warming Potential**

### **1.3.1. Potencial de Calentamiento Global (PCG)**

El Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) es la unidad de medida utilizada para cuantificar y comparar la cantidad de calor que un gas de efecto invernadero atrapa en la atmósfera en un período específico (generalmente 100 años) en relación con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En resumen, permite cuantificar y comparar el impacto climático de diferentes gases.

En el ámbito de la arquitectura, el GWP es esencial para evaluar el carbono incorporado en los materiales y procesos constructivos de los productos y edificios, lo que permite tomar decisiones de diseño basadas en la sostenibilidad durante las fases tempranas del proyecto. Este carbono incorporado representa las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la extracción, fabricación, transporte, instalación y mantenimiento de los materiales de construcción. El GWP se utiliza para medir y rastrear estas emisiones, expresándolas en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq.).

#### **1.3.1.1. El Potencial de Calentamiento Global en el ACV**

Como se ha explicado anteriormente, el GWP está relacionado con el ACV, pues es el indicador que cuantifica, durante el EICV, el impacto ambiental de un producto de construcción, o de un edificio completo. El concepto abarca todas las emisiones de carbono, tanto operativas como

---

<sup>15</sup> <https://ecoinvent.org/database/>

<sup>16</sup> <https://sphera.com/solutions/product-stewardship/life-cycle-assessment-software-and-data/>

incorporadas, durante todas las etapas del ciclo de vida, y es utilizado como unidad de medida común para medir el impacto ambiental de diferentes Gases de Efecto Invernadero, pues no todos estos gases tienen la misma capacidad de retener la radiación infrarroja ni persisten en la atmósfera durante el mismo tiempo. También, mediante la comparación entre productos, procesos, en incluso entre sectores, se pueden identificar oportunidades de reducción de emisiones de gases.

Los factores de caracterización del GWP varían según los gases evaluados, pues como se ha mencionado antes, estos no tienen el mismo Potencial de Calentamiento Global. Por definición, el CO<sub>2</sub> tiene un GWP de 1, es decir, 1kg de CO<sub>2</sub> emite 1 kg CO<sub>2</sub> eq., mientras que, por ejemplo, el metano (CH<sub>4</sub>), según el informe de Greenhouse Gas Protocol "*IPCC Global Warming Potential Values*"<sup>17</sup>, tiene un factor de entre 25 y 28 según el análisis, es decir, 1 kg de CH<sub>4</sub> puede llegar a emitir 25 kg CO<sub>2</sub> eq.

Estos factores han sido calculados y analizados según las características del gas, ya que su mayor o menor capacidad de captación de energía en la atmósfera, o la mayor o menor duración de su vida útil, deben verse reflejadas. Según la misma fuente, los gases más significativos y que contribuyen más al calentamiento global, ya sea por su alta concentración, su larga vida en la atmósfera o su elevado Potencial de Calentamiento Global, aparecen representados en la siguiente ilustración.

Common chemical name or industrial designation	Chemical formula	GWP values for 100-year time horizon		
		Fourth Assessment Report (AR4)	Fifth Assessment Report (AR5)	Sixth Assessment Report (AR6)
<b>Major Greenhouse Gases</b>				
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	1	1	1
Methane – non-fossil	CH <sub>4</sub>	25	28	27.0
Methane – fossil	CH <sub>4</sub>	N/A	30	29.8
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	298	265	273
Nitrogen trifluoride	NF <sub>3</sub>	17,200	16,100	17,400
Sulfur hexafluoride	SF <sub>6</sub>	22,800	23,500	24,300

1.10. Gases con mayor contribución en el calentamiento global y sus valores de GWP.

Para una evaluación más precisa del GWP, especialmente en el sector de la construcción, se desglosa en las siguientes categorías según la norma UNE-EN 15804:

- Potencial de calentamiento global de los combustibles fósiles (GWP-fossil): Se trata de las emisiones derivadas de la combustión de combustibles fósiles como el petróleo, gas natural y carbón.
- Potencial de calentamiento global biogénico (GWP-biogenic): Son las emisiones y absorciones relacionadas con el carbono de origen biológico, como la biomasa o la madera.
- Potencial de calentamiento global del uso del suelo y cambio del uso del suelo (GWP-LULUC): Se trata de las emisiones asociadas al uso del suelo y cambios en el uso del suelo, como la deforestación o la conversión de tierras agrícolas.
- Potencial total de calentamiento global (GWP-total): Es la suma de las tres categorías anteriores.

<sup>17</sup> Greenhouse Gas Protocol. (2024). *IPCC Global Warming Potential Values*.

### 1.3.2. Relevancia del GWP en el sector de la construcción

El sector de la construcción, como ya se ha explicado, es uno de los mayores emisores de GEI en el mundo, ya que, a lo largo del ciclo de vida de cualquier producto, material o proceso involucrado en la construcción, se emite dióxido de carbono, tanto operacional como incorporado. En 2023, los edificios fueron los responsables del 34% de emisiones de dióxido de carbono globales, llegándose a emitir hasta casi 13 Gt de CO<sub>2</sub> según los datos del informe del informe “*Global Status Report for Buildings and Construction 2024/25*”.

Según los datos de la misma fuente, del total de esta cantidad, aproximadamente el 22% se trata de emisiones de carbono incorporado, de las cuales entre el 80-90% se corresponden con la extracción de materias primas y fabricación de materiales y productos de construcción (módulos A1-A3 de la norma UNE-EN 15804). De entre los materiales, destacan el cemento, responsable de casi la mitad de estas emisiones, o el acero y el hierro, llegando hasta un cuarto de las emisiones de carbono incorporado en el sector.

Es por esto por lo que existen numerosas normativas enfocadas en la descarbonización del sector, como la recientemente revisada Directiva de Eficiencia Energética en Edificios DIRECTIVA (UE) 2024/1275 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 24 de abril de 2024 (EPBD, por sus siglas en inglés), la cual, tras su revisión, ha puesto por objetivo descarbonización del sector. Establece que para 2030, se reduzcan las emisiones de GEI hasta el 55%, y para 2050 llegar a la meta de carbono neutro, establecida por la UE, considerando tanto las emisiones de carbono incorporado como las emisiones operativas.

La Directiva marca que el cálculo del GWP a lo largo del ciclo de vida de los edificios nuevos, a partir de 2028, debe hacerse según la metodología establecida en la norma UNE-EN 15978, y debe comunicarse como un indicador expresado en kg CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup> a lo largo de un período de referencia de 50 años. Además, planea establecer valores límite para el GWP acumulado a lo largo del ciclo de vida, que serán evaluados junto a las hojas de ruta nacionales requeridas. A partir de 2030, se aplicará esta Directiva a todos los edificios.

De la misma forma se pretende, para 2026, que incluya en el CTE un nuevo Documento Básico sobre sostenibilidad ambiental. Este nuevo documento pretende incorporar, transponiendo las indicaciones de la Directiva, el Potencial de Calentamiento Global y el Análisis del Ciclo de Vida de manera declarativa en la edificación española, reforzando la sostenibilidad en la normativa.

#### 1.3.2.1. Marco común de la Unión Europea Level(s)

“Level(s)” es el marco común de la Unión Europea para la evaluación del comportamiento en materia de sostenibilidad de los edificios residenciales y de oficinas. Desarrollado por la Comisión Europea, su objetivo principal es promover una construcción más sostenible y circular en toda la UE, facilitando la medición y el reporte del rendimiento ambiental, social y económico de los edificios a lo largo de su ciclo de vida. Su aplicación proporciona un lenguaje común gracias a un enfoque armonizado.

Se basa en un marco, de carácter voluntario, de indicadores básicos de sostenibilidad aplicables a los proyectos de construcción agrupados en 6 “macroobjetivos” (Dodd et al., 2021). Estos indicadores abarcan todos los aspectos del comportamiento de los edificios, desde las emisiones contaminantes o empleo sostenible de los recursos, hasta la optimización del coste de vida. Entre estos indicadores, se encuentra el 1.2. Potencial de calentamiento global.

El indicador 1.2 de Level(s): Potencial de calentamiento global (PCG) del ciclo de vida<sup>18</sup>, es el indicador que mide las emisiones de GEI durante el ciclo de vida del edificio. El documento indicador 1.2 de Level(s): Potencial de calentamiento global (PCG) del ciclo de vida, se apoya en los principios del ACV y en las normas relacionadas, como la UNE-EN 15804 y UNE-EN 15978, y a modo de manual, explica cómo utilizar este indicador en 3 niveles distintos dependiendo de la fase del proyecto, y a realizar el ACV para su evaluación. Gracias a estos niveles, la evaluación de los edificios adquiere una gran flexibilidad, permitiendo la toma de decisiones basadas en la sostenibilidad en el ciclo de la vida del edificio.

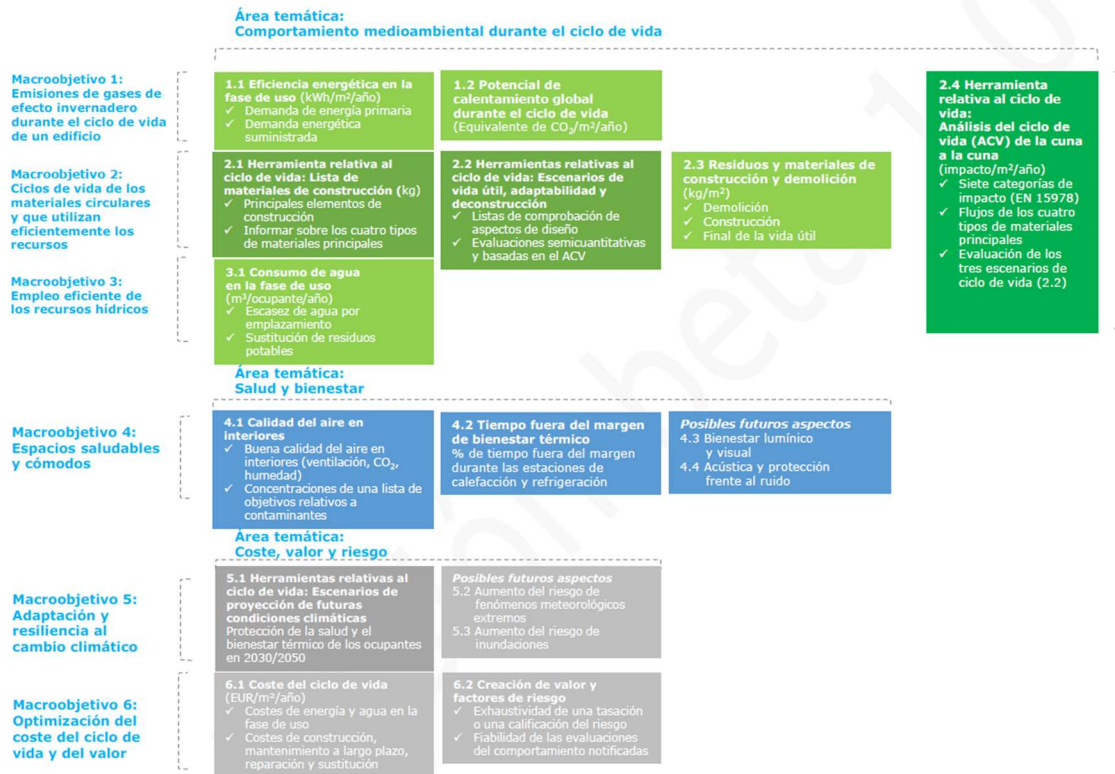


Gráfico 2.1. Visión general del marco Level(s)

### 1.11. Visión general del marco Level(s)

En resumen, Level(s) es una herramienta que proporciona instrucciones y criterios para la evaluación ambiental de los edificios más allá de las normas previamente explicadas. Además, la EPBD (DIRECTIVA (UE) 2024/1275 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 24 de abril de 2024) establece el indicador 1.2 como el documento a seguir para la definición de los elementos del edificio, y como herramienta para proporcionar la información ambiental del Global Warming Potential en los edificios nuevos.

#### 1.3.2.2. Carbon Bill Workshop

En el contexto de la descarbonización, resulta fundamental contar con herramientas que permitan cuantificar y valorar económicamente el impacto climático de las intervenciones sobre edificios existentes. En este sentido, el enfoque de la “carbon bill”, desarrollado en el grupo de

<sup>18</sup> Dodd, N., Donatello, S., & Cordella, M. (2021). Indicador 1.2 de Level(s): Potencial de calentamiento global (PCG) del ciclo de vida. Manual del usuario: Información introductoria, instrucciones y orientaciones (versión 1.1). Comisión Europea, Centro Común de Investigación.

trabajo “*Carbon bill of the refurbishment of buildings*”, propone una metodología para calcular el coste asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a lo largo del ciclo de vida del edificio, con el objetivo de fomentar rehabilitaciones que reduzcan emisiones netas a lo largo del tiempo.

Este cálculo tiene en cuenta tanto las emisiones embebidas en los materiales y procesos constructivos como las emisiones operativas derivadas del uso del edificio. Al centrarse específicamente en el caso de rehabilitaciones, la “*carbon bill*” compara el escenario actual con el escenario tras la intervención, expresando la diferencia en términos monetarios mediante la aplicación del precio del carbono en el mercado europeo.

Esta herramienta no solo permite identificar estrategias de diseño más eficientes desde el punto de vista climático, sino que también facilita la toma de decisiones alineadas con el principio de “quien contamina paga” bajo un enfoque positivo que premia la reducción de la huella de carbono.

Este planteamiento se enmarca en el esquema europeo Level(s), que, como ya se ha explicado anteriormente, establece seis macroobjetivos de sostenibilidad para el entorno construido, siendo el primero de ellos el control de las emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida del edificio. Además, se alinea con los objetivos de la Directiva (UE) 2024/1275 sobre el rendimiento energético de los edificios (EPBD), que establece la obligatoriedad progresiva de incorporar el análisis del carbono embebido en las nuevas construcciones y rehabilitaciones, promoviendo así decisiones basadas en el impacto climático total y no solo en la eficiencia energética operativa.

### 1.3.3. Evaluación del GWP como estrategia de sostenibilidad

La creciente conciencia sobre la urgencia del cambio climático ha posicionado al Potencial de Calentamiento Global (GWP) como un indicador clave en la evaluación de la sostenibilidad de los materiales y procesos, como ya se ha explicado anteriormente. Normativas como el Reglamento de Productos de Construcción Reglamento (UE) 2024/3110 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, Directiva de Eficiencia Energética en Edificios DIRECTIVA (UE) 2024/1275 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 24 de abril de 2024 o el próximo DB del Código Técnico de la Edificación enfocado en la sostenibilidad ambiental, son instrumentos legislativos fundamentales que impulsan la integración del GWP en el sector de la construcción.

No obstante, el hecho de que existan estas legislaciones no garantiza por sí mismo el éxito de las estrategias de sostenibilidad. La efectividad de cualquier enfoque basado en el GWP depende sobre todo de la precisión en su evaluación y los correctos objetivos de esta. Una evaluación incorrecta del GWP puede llevar a decisiones que, lejos de reducir el impacto climático, lo incrementen inadvertidamente.

Un ejemplo, como demuestra el estudio de Amiri et al. (2021) es el caso de las certificaciones de sostenibilidad, que valoran la elección de materiales que cuenten con una EPD antes que los materiales con bajas emisiones de GEI pero sin EPD. Esto provoca que, materiales bajos en huella de carbono, u otros impactos ambientales, puedan no ser elegidos mientras que materiales con mayor impacto ambiental, que tengan una Declaración Ambiental de Producto, sí tengan asignado un valor en la puntuación final, produciéndose así una mala evaluación ambiental en detrimento de las estrategias sostenibles.

Por otro lado, la correcta elección de los materiales también requiere de criterios específicos para cada tipo de elemento constructivo, y de las características necesarias para cada parte del edificio. Por ejemplo, como estudia Dierikx (2025)<sup>19</sup>, las envolventes de madera, al tener menor

---

<sup>19</sup> Dierikx, R. (2025). Global warming potential of multi-story timber buildings. *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 1-71.

conductividad térmica que el hormigón o el acero, necesitan de menos aislamiento térmico, lo que reduce las emisiones incorporadas en el ciclo de vida. Pero, por otra parte, al tener menor masa térmica, no absorbe ni libera calor con rapidez, lo que lleva al sobrecalentamiento de los interiores haciendo necesaria mayor uso de sistemas de refrigeración, lo que termina suponiendo un gran aumento de las emisiones operacionales en climas cálidos.

De la misma forma, los requerimientos estructurales necesarios en los edificios requieren del uso de materiales con mejores propiedades físicas, como el hormigón armado o el acero, junto a materiales bajos en carbono en partes del edificio donde estas cargas estructurales no son tan existentes.

Es por esto que es importante realizar un ACV completo para identificar los “puntos calientes” y establecer las mejores estrategias de diseño a lo largo de todo el ciclo de vida. Siguiendo con el estudio de Dierikx (2025), realizando el ACV a edificios construidos con madera, y a sus equivalentes si se hubiese usado hormigón y acero, resultando en un GWP mucho más bajo en las construcciones de madera durante la etapa de producto en comparación con el acero o el hormigón. Estos valores incluso se mejoran en la etapa de fin de vida, donde al incinerar la madera para recuperar su energía, aunque se libere el CO<sub>2</sub> “secuestrado”, se obtiene mayor reducción de GWP al sustituir a fuentes fósiles para la producción de energía.

En resumen, la evaluación ambiental no debe reducirse a datos o resultados de bajas emisiones, este proceso requiere de las mejores decisiones según las necesidades del edificio, sobre todo tras el final de su vida útil. Es por eso que, la evaluación ambiental como herramienta de identificación de oportunidades de estrategias sostenibles, debe responder ante multitud de criterios de diseño, junto a estudios de ACV y la información ambiental declarada, para que el GWP sea un indicador fiable y eficaz en la transición hacia una construcción verdaderamente sostenible.

## CAPÍTULO 2. CASO DE ESTUDIO

La sostenibilidad se ha consolidado como un pilar estratégico en el sector de la arquitectura y la construcción, impulsada por la necesidad de descarbonizar el sector. Esto significa reducir drásticamente las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a lo largo de todo el ciclo de vida de una edificación, desde su diseño hasta su deconstrucción. Aquí, el Potencial de Calentamiento Global (GWP) se convierte en un indicador esencial, ofreciéndonos un valor concreto (en kg de CO<sup>2</sup> equivalente) para cada material, revelando su contribución directa al cambio climático. Conocer el GWP de los productos que usamos es el primer paso práctico para tomar decisiones más informadas y responsables.

Este caso de estudio se centrará en la aplicación práctica de la evaluación ambiental como herramienta para identificar las oportunidades de aplicación de estrategias sostenibles, siguiendo la metodología de ACV proporcionada por las normas UNE-EN ISO14040/14044, las Reglas de Categoría de Producto incluidas en la norma EN15804 y el marco común europeo Level(s) para el indicador 1.2 Potencial de Calentamiento Global.

Se realizará un ejemplo práctico de Análisis del Ciclo de Vida de un panel composite de aluminio, identificando cuál es el material que contribuye más al GWP y estableciendo una estrategia para reducir su huella de carbono y la emisión de GEI. Tras ello, se evaluará la eficacia de la estrategia elegida aplicándola a un hipotético estudio preliminar para la rehabilitación de la fachada del Pabellón Nuevo de la ETSAM.

### 2.1. Panel composite de aluminio

Los paneles composite de aluminio son un material de construcción tipo sándwich, de un espesor generalmente de 4 mm, compuesto por tres capas: dos láminas exteriores de aluminio y un núcleo central. Su fabricación es continua, uniendo estas capas con adhesivo, ya sea mediante un film o impregnado en el núcleo durante la extrusión. Para proteger el acabado durante el transporte y la instalación, un film protector recubre la cara vista.

El núcleo de estos paneles es clave para su comportamiento frente al fuego y está hecho de polímeros de baja densidad (LDPE) con distinta cantidad de carga mineral:

- PE (Polietileno): El más económico, pero no tiene propiedades ignífugas y tiene un elevado poder calorífico. Se usa en edificaciones donde la evacuación en caso de incendio es muy rápida.
- FR (Fire Retardant): Incorpora carga mineral, lo que mejora su comportamiento frente al fuego. Es más rígido y pesado que el PE, pero con menor poder calorífico.
- A2: Con una carga mineral muy elevada, presentando un poder calorífico muy bajo. Tiene rigidez similar al FR y es el más pesado.

Aunque pueden usarse otros metales, las pieles exteriores más comunes son de aluminio, en aleaciones 5000 o 3000, con 0.5 mm de espesor y hasta 2000 mm de ancho. Las propiedades que este metal proporciona al panel son variadas:

- Ligereza: el aluminio tiene una densidad relativa a 2,7 kg/cm<sup>3</sup>, facilitando la manipulación del panel reduciendo su peso.

- Flexibilidad de diseño: Aunque las láminas de aluminio son rígidas, el metal es maleable, ofreciendo una gran libertad para crear formas arquitectónicas complejas y diseños personalizados.
- Durabilidad y resistencia a la corrosión: El aluminio forma de manera natural una capa de óxido que lo protege de la corrosión, lo hace que los paneles sean muy resistentes a los factores ambientales.
- Amplia variedad de acabados estéticos: El aluminio puede ser lacado (con diferentes capas de pintura), anodizado, o tratado para imitar texturas como madera, piedra, o incluso crear efectos espejo o tornasolados. Esto ofrece una enorme paleta de colores y texturas para la estética de las fachadas.
- Reciclabilidad: El aluminio es 100% reciclable sin perder sus propiedades, lo que lo convierte en un material con un gran potencial de circularidad y contribuye a la sostenibilidad del proyecto una vez que el edificio llega al final de su vida útil.

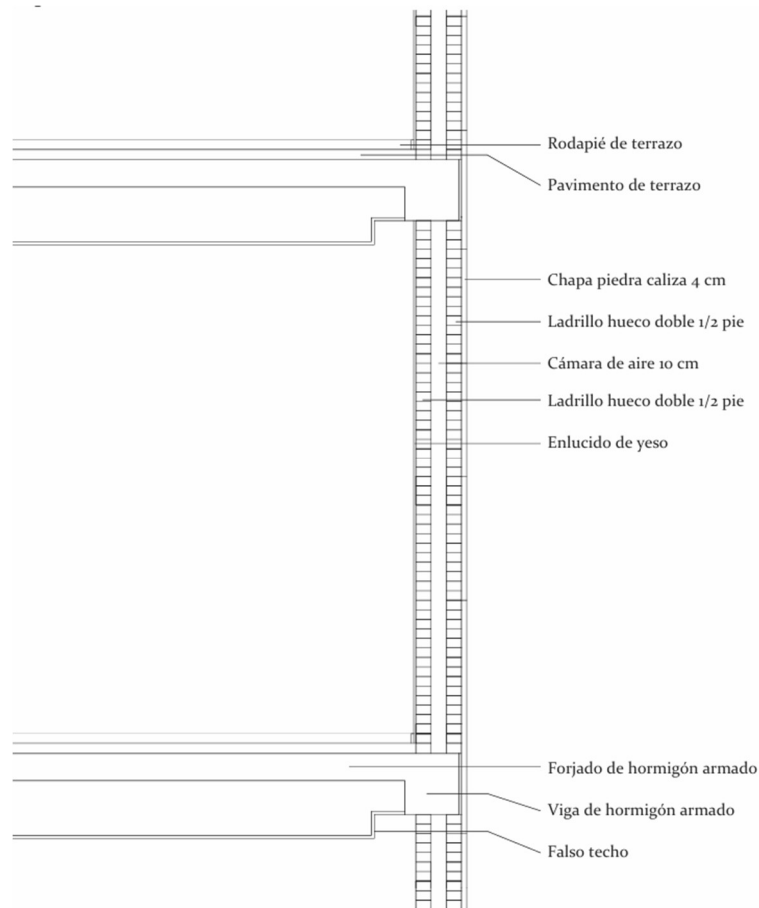
## 2.2. Pabellón Nuevo de la ETSAM. Rehabilitación de la fachada.

Como caso práctico, para evaluar la estrategia de construcción sostenible derivada de los estudios de ACV, se propone una hipotética rehabilitación de la envolvente del Pabellón Nuevo de la ETSAM. Esta propuesta viene motivada por los resultados de los estudios de Burgos R. (2022)<sup>20</sup>, que a partir del estudio y la monitorización, concluye afirmando que debido a los numerosos puentes térmicos en el edificio, este no alcanza las temperaturas óptimas en días fríos, lo que resulta en un aumento de las emisiones operativas para mantener la temperatura necesaria. Termina el estudio proponiendo una rehabilitación basada en un SATE con revestimiento de piedra caliza, reduciendo las emisiones operativas a la vez que se mantiene la apariencia exterior actual.

Para determinar cómo son los cerramientos del Pabellón Nuevo de la ETSAM, se ha consultado Moya, L. & de Luxán, M. (2008). En dicha bibliografía, se establece que todas las fachadas del edificio tienen la misma solución constructiva, basada en dos muros de fábrica de ladrillo hueco doble de 1/2 pie, separados por una cámara de aire de 10cm.

---

<sup>20</sup> Burgos Bayo, Raquel (2022). *Hacia la transición ecológica del pabellón nuevo : ETSAM*. Trabajo Fin de Grado / Proyecto Fin de Carrera, E.T.S. Arquitectura (UPM).



2.1. Sección del cerramiento del Pabellón Nuevo de la ETSAM.

El revestimiento exterior está formado por un aplacado de piedra caliza<sup>21</sup>, fijada a la hoja de ladrillo y a la estructura, mientras que el interior es un enlucido de yeso. Basándose en los planos y detalles de los módulos del cerramiento, proporcionados por la misma fuente, se ha estimado que la superficie total de fachada opaca, revestida de piedra caliza, es de 2.233,89m<sup>2</sup>.



2.2. Fachada oeste del Pabellón Nuevo de la ETSAM.

<sup>21</sup> Calcarenita comercialmente denominada Arenisca de Novelda.



2.3. Fachada sur del Pabellón Nuevo de la ETSAM.

## CAPÍTULO 3. INVESTIGACIÓN NORMATIVA.

### 3.1. CEN Workshop “Carbon Bill of the Refurbishment of Buildings”

Para el desarrollo de los estudios de evaluación ambiental, he contactado con el secretario del Grupo de Trabajo (UNE) “Carbon bill of the refurbishment of buildings”, comentado en el Estado del Conocimiento, para mi posible incorporación en él. El propósito era participar, en la medida de lo posible, en dicho grupo para adquirir la mayor información y experiencia práctica.

Se realizó una entrevista con el secretario, Aitor Aragón, donde se me confirmó la posibilidad de adherirme al grupo de manera no participativa, asistiendo a las reuniones próximas y pudiendo usar la información adquirida.

Por desgracia, por el limitado tiempo, no se han podido aplicar los conocimientos en este trabajo. Pero, me ha servido para acceder a normas y entender como se está tratando el Potencial de Calentamiento Global y fomentando su reducción en la arquitectura.

### 3.2. Entrevista a experto

Para la realización de los estudios de ACV, primero he realizado una entrevista a José Antonio Tenorio Ríos, Científico Titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en España, adscrito al Departamento de Construcción del Instituto Eduardo Torroja.



3.1. José Antonio Tenorio Ríos

En sus más de 20 años de trayectoria en el CSIC, ha trabajado en diversos temas relacionados con la ciencia y tecnología de la construcción y la sostenibilidad. En una primera etapa, colaboró activamente en el desarrollo del Código Técnico de la Edificación español. Actualmente, se dedica al desarrollo de proyectos, prestando especial atención a la transferencia de resultados de investigación.

También está involucrado en proyectos de investigación enfocados en la energía y sostenibilidad, como almacenamiento de energía a baja temperatura, desarrollos urbanos para la adaptación al cambio climático, o datos y bases de datos para la evaluación de la sostenibilidad (EPDs: OpenDAP e InData). Es por esto que la información adquirida de la entrevista me ha sido de gran ayuda para entender las normas de evaluación de la sostenibilidad, cómo funciona la metodología y que programas y bases de datos usar para realizar mis estudios de ACV.

### 3.2.1.1. Entrevista

Las preguntas y respuestas de la entrevista se han estructurado en ámbitos: Análisis del Ciclo de Vida, Global Warming Potential y Declaraciones Ambientales de Producto.

#### Análisis del ciclo de vida

**Cuando se realiza un ACV para un edificio, ¿cómo se deciden los límites del sistema y qué criterios se utilizan para justificar la inclusión o exclusión de ciertas etapas del ciclo de vida?**

Para realizar el ACV de un edificio completo se coge un grupo de productos que suponga aproximadamente el 80% del impacto. Es decir, es suficiente con coger la estructura, las instalaciones y parte de las instalaciones, no toda la fachada, la cubierta y algunos cerramientos. De esta forma se establece el límite espacial del sistema. El límite temporal del sistema se establece haciendo el análisis a lo largo de la vida útil del edificio.

En cuanto a las etapas del ciclo de vida, a escala de producto las etapas del ciclo de vida se encuentran en las DAP, según la norma de producto EN 15804.

Pero a escala de edificio, el análisis se convierte en un conjunto de declaraciones, más o menos compatibles. Y hay que tener también la energía operacional, la energía embebida, etc. Y todo esto se rige con la norma EN 15978.

**¿Qué tan importante considera que es la distinción entre indicadores de punto medio y punto final, y cómo influye esa distinción en la interpretación de los resultados del ACV?**

Pues a nivel de producto, no sé si es absolutamente relevante el considerar unos u otros. Depende del propio método de evaluación utilizado, siendo lo más utilizados en investigación ser ReCiPe, 15804, y demás. En la norma EN 15804 están establecidos los indicadores que deben declararse por cada etapa.

**¿Cómo selecciona la metodología de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) más adecuada para un estudio específico, y qué factores influyen en esa decisión?**

Eso exactamente no lo sé, yo no lo he hecho nunca. Eso depende de cada experto que lo hace. Pero si te puedo decir que, por ejemplo, si coges dos declaraciones ambientales de producto hechas por dos consultores distintos, los resultados no son los mismos.

Y eso es por lo que te he dicho antes, depende del método usado, y también de la base de datos utilizada. Ahora mismo las más usadas son GaBi y ECOINVENT.

### **¿Cuál es el estado actual de softwares informáticos y bases de datos aplicables al ACV?**

Libres y gratuitos hay pocos. Hay uno que se llama OpenLCA, que se puede utilizar. Que está bien, a nivel de producto está bien. Había una antigua que se llamaba Rivalice, también. Lo que pasa es que muchas de ellas son de pago, tanto bases de datos como los softwares para el análisis.

### **¿Cómo comunica eficazmente los resultados de un ACV, que a menudo son complejos y con incertidumbres, a un público no especializado? Por ejemplo: tablas con los resultados, gráficas...**

Hay normas B2B y B2C que te dicen la comunicación, pero en general, a nivel de producto, se comunica como se ve en las Declaraciones Ambientales de Producto. Cuando estás en el nivel del edificio, la forma de comunicar los resultados es una lista de indicadores ambientales.

En esto se va a cambiar todo mucho porque el nuevo Reglamento de Productos de Construcción de aquí a algún tiempo va a requerir incluir, de hecho, ya lo requiere, todos los datos ambientales. O sea, además de las Declaraciones Ambientales del Producto, los datos ambientales tendrán que estar reportados en el Pasaporte Digital de Producto.

Y el tema de la comunicación no es sencillo. Porque la forma de comunicar hasta ahora ha sido a través de una Declaración Ambiental de Producto o una EPD. Entonces, para digitalizar eso, a nivel europeo, se hace en una plataforma que se llama Eco Platform, cuyo sistema se basa en un grupo de trabajo que se llama ILCD+EPD.

### **¿Y cómo surgió este formato?**

Para este formato se eligieron los mismos sistemas que hizo el Joint Research Council (JRC), es decir, el sistema ILCD. A este sistema, que vale para cualquier tipo de producto, no solo de construcción, se le unieron una serie de parámetros que eran de las Declaraciones Ambientales de Producto.

Actualmente, en temas de estandarización de datos, hay unas normas ISO que tratan sobre esto, de cómo se ordenan los datos. Además, los sistemas BIM ya están leyendo de estas fuentes, con lo cual ya son compatibles.

### Global Warming Potential

### **¿Cuál es el estado actual de cómo se tiene en cuenta el GWP en la edificación? En el ámbito de normativa y certificado de productos, si es suficiente o escaso, etc...**

Ahora mismo, en España, no se exige tener en cuenta el GWP. Pero ahora se está preparando un nuevo Documento Básico del CTE y lo que van a hacer es pedir que se declare el GWP como único indicador en la edificación. Esto tiene bastante interés, porque al final, cuando tú en el tiempo vas a conseguir ahorros (de GWP), sobre todo en rehabilitación, esos ahorros se pueden monetizar.

**¿Hay algún valor umbral de GWP en la normativa actual que indique como de bueno es, o como de malo, el resultado obtenido?**

La normativa actual no te pone límites. Los únicos límites de alguna forma, y todos no son estrictos, son los que se están viendo a través de los sellos de sostenibilidad como LEED o BREEAM, que si tienen en cuenta este tipo de valores.

Pero hoy por hoy, en cuanto a normativa, no es obligatorio como tal, ni hay valores umbrales. De aquí a un tiempo sí que lo va a ser.

**¿Crees que hacen falta más políticas o regulaciones que incentiven la reducción del GWP en los productos y procesos industriales?**

No, porque cuando utilizas un producto reciclado o tiene contenido reciclado, en su Declaración Ambiental de Producto eso se nota, y bajas la huella de carbono. Lo que pasa es que, igual que a nivel de edificio no se está midiendo, las empresas sí que tienen que declarar las emisiones. O sea, no hace falta incentivar porque sí que se está teniendo en cuenta la normativa. De hecho, solo tienes que ver el esfuerzo que está haciendo, por ejemplo, el mercado de los cementos para reducir ambientalmente sus huellas. Hay ya cementos que son carbono neutro. Lo que pasa es que vale un dineral la tonelada, y no puedes pagar eso por tonelada de cemento.

**Al realizar un ACV de un edificio, ¿qué desafíos específicos se presentan al calcular el GWP asociado a los materiales de construcción, y cómo se pueden abordar estos desafíos?**

Principalmente, que la metodología no es homogénea. De hecho, Europa se está gastando muchísimo dinero en cambiar las reglas del juego mediante el proceso Acquis, que es un proceso para revisar las normas armonizadas de cada uno de los productos de construcción, para que sean más o menos homogéneos y equiparables. Ya lleva muchos hechos, pero una tarea ardua.

**Bueno, ya se ha comentado un poco. ¿Normativa futuro? Aparte del nuevo Reglamento de Productos de Construcción, y como has comentado, el Código Técnico. ¿Se va a hacer algo más?**

Así es, el nuevo Documento Básico de Sostenibilidad del CTE, que no sé si ya está disponible.

Y en general, lo que están haciendo ha sido que, de todos los productos, sacar un grupo reducido. El resto lo que hacen es tenerlo en cuenta en el cálculo, de forma directa, de forma que no tengas que buscar datos.

Yo creo que este nuevo Documento lo que va a hacer es de ariete para que se tenga más en cuenta el que se pueda declarar un producto mejor o peor. Porque realmente tiene muy poca importancia ya que no es obligatorio llegar a un límite, aunque ya lo será con el tiempo, y luego que los datos tampoco son fiables. Con lo cual hasta que no haya datos fiables...

Declaraciones Ambientales de Producto

**¿Qué es OpenDAP y cuál es su estado actual?**

OpenDAP es un proyecto mío que empezamos hace 15 años. Se trata de una base de datos abierta y gratuita con datos españoles ordenados según el sistema ILCD+EPD.

Actualmente, no hay demasiadas EPD. Hay muchos datos genéricos, también datos de proyectos de investigación y declaraciones que nosotros generamos.

A futuro continuaremos con OpenDAP, porque lo bueno que tiene el ILCD+EPD es que es un contenedor de información ambiental. Una EPD no son solo los valores, es toda la información. Y eso es algo que el sistema ISO no tiene en cuenta, ni lo tendrá el Pasaporte Digital de Producto o la Declaración de Prestaciones, por lo que hay muchísima más información que tiene que estar en algún sitio ordenada, como es OpenDAP.

**¿Qué son las EPD sectoriales y en que se diferencian con las EPD de producto? ¿Es conveniente usarlas o tenerlas como referencia para el ACV? ¿Y a que se deben las discrepancias entre ellas?**

Las EPD sectoriales es que hay un grupo de fabricantes, una asociación que se ponen de acuerdo y ofrecen valores conjuntos. Y ya empieza a haber fabricantes, que quieren la suya propia porque es mejor que la sectorial.

Porque una sectorial lo que intenta es hacer un número conjunto de muchos puntos. Por ejemplo, las ventanas de aluminio se hacen en muchas fábricas, y la ventana de aluminio puede ser de muchas gamas distintas. Y cada ventana se compone de marco, vidrio y demás componentes. Pero al final, cada fábrica es diferente y tiene unos valores diferentes, aun usando el mismo aluminio. O incluso que alguna gama venga de otro país. Entonces, el número conjunto de la declaración sectorial es mucho menos afinado que la declaración particular de una ventana de una fábrica determinada.

En general, lo ideal es usar datos de declaraciones particulares de fabricantes. Incluso del producto determinado.

## CAPÍTULO 4. ESTUDIO 1: ESTUDIOS DE ACV. ANÁLISIS CRÍTICO-COMPARATIVO

Comprender el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es importante para tomar las mejores decisiones sostenibles. El objetivo principal de este estudio es identificar y cuantificar los impactos en el indicador ambiental del Potencial de Calentamiento Global (GWP) a lo largo de todo el ciclo de vida de los paneles composite de aluminio. Esto incluye desde la extracción de la materia prima de los componentes hasta el final de la vida útil del panel.

Para lograrlo, se realizarán tres estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) paralelos, de un panel composite de aluminio, mediante tres herramientas distintas: OpenLCA, Eco Audit Tool de Granta EduPack y el módulo de ACV de CYPE. Esta metodología permitirá una validación cruzada de los resultados y una comprensión más profunda de la influencia de cada material, y de cada etapa del ciclo de vida, en la huella de carbono del producto final.

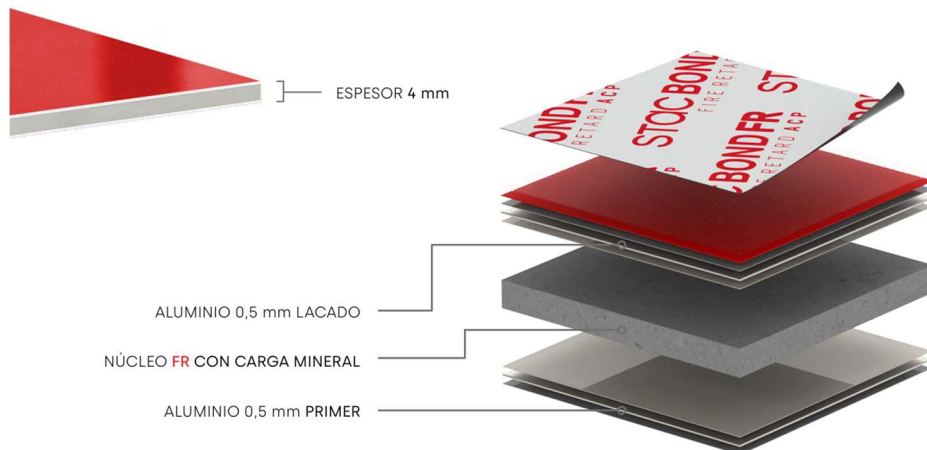
Posteriormente a la realización de los ACV, se llevará a cabo un análisis comparativo de las ventajas y limitaciones de cada software, incluyendo la evaluación de su facilidad de uso, la profundidad de sus bases de datos, su capacidad de personalización y su idoneidad para diferentes tipos de proyectos. El objetivo final es proporcionar una evaluación clara de sus usos y aplicaciones.

### 4.1.1.1. Elección del panel composite de aluminio

Para llevar a cabo el estudio primero se ha de elegir un panel composite de aluminio mediante la comparación de Declaraciones Ambientales de Producto de diferentes fabricantes, con el objetivo de seleccionar un panel cuya DAP proporcione la información más adecuada para el posterior estudio.

Se han comparado las DAP de los paneles composite STACBOND (PE-FR-A2), Larson (FR-A2) y ALUCOBOND (A2-PLUS) y se ha elegido el Panel Composite STACBOND FR para la realización del estudio por varios motivos:

- La descripción del producto está perfectamente detallada. Se indica cuanta cantidad, en kilogramos, de cada material y componente se incluyen en el panel y en el estudio.
- Aunque los escenarios están descritos de forma sencilla y sin especificaciones, la información es clara y suficiente para el estudio.
- Un punto clave en la elección es que el panel no tiene contenido reciclado de ningún material, lo que permitirá evaluar los impactos ambientales de la producción primaria de los materiales.
- La empresa ha realizado una DAP de la bobina de aluminio, lo que permite comparar ambas DAP y establecer el impacto de la producción de aluminio.
- La decisión de usar el modelo FR, frente a los demás, se debe a la composición del núcleo, pues su modelado para los ACV ofrecerá la dificultad necesaria para llegar a los límites de cada programa.



4.1. Despiece de Panel Composite STACBOND®FR

## 4.2. OpenLCA

El estudio se ha llevado a cabo con el programa informático OpenLCA, una herramienta de código abierto y gratuita desarrollada por GreenDelta para la realización del ACV. El programa está diseñado para implementar esta metodología estándar, permitiendo al usuario definir el objetivo y alcance del estudio, construir el inventario del ciclo de vida (ICV) con datos de entrada y salida y realizar la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) utilizando las bases de datos y métodos de impacto disponibles.

### 4.2.1. Análisis del Ciclo de Vida

Para realizar el Análisis del Ciclo de Vida con OpenLCA, se han seguido las normas internacionales UNE-EN ISO 14040 e UNE-EN ISO 14044, que establecen los principios y el marco metodológico, así como los requisitos y directrices para llevar a cabo un ACV.

Adicionalmente, el estudio se ha guiado por las especificaciones y Reglas de Categoría de Producto (RCP) establecidas en la norma UNE-EN 15804, fundamental para los productos de la construcción, asegurando la armonización de la evaluación y la comparabilidad de los resultados.

#### 4.2.1.1. Definición del objetivo y el alcance

##### Objetivo del estudio

El objetivo es el análisis del Potencial de Calentamiento Global de revestimientos de fachada para la realización de un TFG. Los resultados se harán públicos en el Archivo Digital UPM, y estarán a libre disposición del público. Este estudio del ACV entre productos de construcción no pretende ser una Declaración Ambiental de Producto real ni profesional, ni tener validez.

##### Alcance

Función principal: revestimiento de fachada.

Unidad declarada: revestimiento de 1 m<sup>2</sup> de fachada de un edificio de uso docente considerando una vida útil del edificio de 50 años.

Descripción del producto analizado: Para el estudio, se utilizan las características del Panel Composite STACBOND FR de 4mm de espesor, especificadas en su DAP<sup>22</sup>. Está compuesto por una lámina de aluminio 5005 de 0,5mm de espesor lacada con una pintura PVDF 70/30 (70% de fluoruro de polivinilideno (PVDF) y un 30% de resina acrílica), un núcleo de resinas termoplásticas (polietileno de baja densidad y compuestos retardantes de llama), y una lámina interior de aluminio 3105/3005 de 0,5mm de espesor.

El peso total de 1 m<sup>2</sup> de panel es de 9.3 kg, la densidad del núcleo es de 1,50±0,15 g/cm<sup>3</sup> y la densidad de las aleaciones de aluminio es de 2700 kg/m<sup>3</sup>.

De la misma forma, se estudiará el impacto producido por los materiales de embalaje, tal y como vienen especificados en la EPD.

Componentes del producto	Por 1 m <sup>2</sup>		
	Peso, kg	Material post-consumidor, % de peso	Material renovable, % del peso
Núcleo mineral	5,24E+00	0,00%	0,00%
Aluminio	3,67E+00	0,00%	0,00%
Laca	2,31E-01	0,00%	0,00%
Adhesivo	1,60E-01	0,00%	0,00%
TOTAL	9,30E+00	0,00%	0,00%

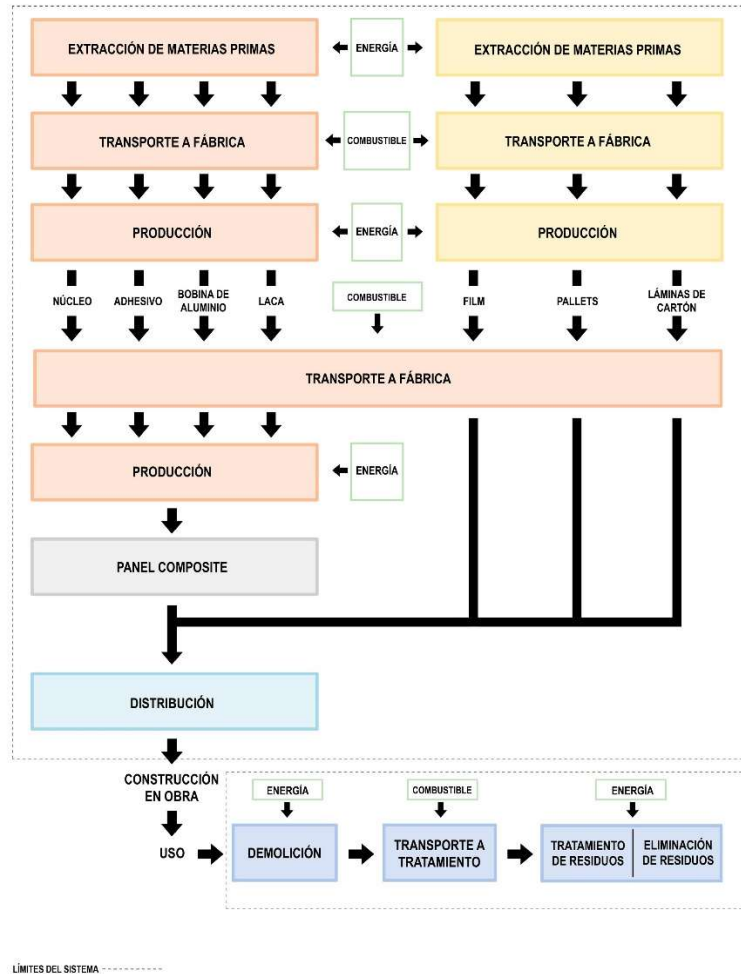
Materiales de embalaje	Peso, kg	Peso-% (frente al producto)
Film	1,01E+00	10,84%
Madera	2,86E-04	0,00%
Cartón	4,68E-02	0,50%
TOTAL	1,05E+00	11,34%

#### 4.2. Información de contenidos del Panel Composite STACBOND FR.

Vida útil de referencia: no es relevante para los escenarios estudiados y los límites del sistema.

Límites del sistema: Basándome en la norma EN15804, se estudian los módulos A1-A3 (etapa de producto), A4 (transporte a obra) y C1-C4 (etapa de fin de vida) del ciclo de vida, en un enfoque de "cuna a puerta con opciones", omitiendo el módulo D ya que no se dispone de los datos necesarios para su estudio. Se omite el módulo A5 (proceso de construcción - instalación) por ausencia de consumo de energía insignificante y falta de datos de procesos relacionados.

<sup>22</sup> STAC. (2018). EPD-IES-0001289:004 (S-P-01289): Composite panels STACBOND®PE, STACBOND®FR and STACBOND®A2. The International EPD® System.



4.3. Diagrama del sistema.

Suposiciones de partida: Solo se incluyen en el estudio los procesos directamente relacionados con la producción, proceso de construcción y fin de vida del producto, quedando fuera del sistema procesos relacionados con la producción de la maquinaria usada, impacto de las infraestructuras y personal, etc.

Limitaciones y calidad de los datos: la base de datos utilizada es ELCD 3.2. Debido a que es una base de datos genéricos, y muchos de los procesos que intervienen en el ACV del objeto de estudio no se encuentran en la base de datos utilizada, dichos datos se obtienen de bases de datos alternativas (como GaBi Database), o se cambian por procesos genéricos existentes en la base de datos usada.

También es importante aclarar que estos datos tienen una representatividad temporal limitada, pues los años de recolección varían notablemente, pudiendo afectar a la calidad general de los resultados.

De igual forma, la localización de los datos es también importante para la calidad de los resultados, pues la situación geográfica puede variar en aspectos como la disponibilidad de recursos, la producción de energía, el uso de tecnologías, e incluso aspectos políticos. Debido a la limitación en la obtención de datos y procesos, estos tienen una variabilidad notable, aunque casi todos se han recogido en el ámbito europeo.

#### 4.2.1.2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)

Para realizar el inventario se ha recopilado información principalmente de la Declaración Ambiental de Producto del Panel Composite STACBOND FR, y en menor medida de otros fabricantes para la información no especificada en la mencionada DAP. También se tienen en cuenta los datos agregados a los procesos, o sistemas de productos, de la base de datos utilizada.

Para el análisis y la construcción del inventario se han asumido diferentes hipótesis y decisiones debido a la falta de datos, como se ha explicado anteriormente:

- Láminas de aluminio: al especificarse en la DAP que el uso de material secundario (SM) es 0, se asume que el aluminio usado en el panel procede de producción primaria en su totalidad.
- Núcleo de resinas termoplásticas: ante la ausencia de datos relacionados con los “compuestos retardantes de llama”, se utiliza únicamente el proceso de producción de PE-LD granulado, asumiendo una proporción del 30% de este material. A su vez, se tiene en cuenta la electricidad utilizada en su extrusión para formar el núcleo.
- Adhesivo: al no especificarse el adhesivo usado en el panel composite, se asume que se trata de un film adhesivo de polietileno de baja densidad.
- Madera: al no especificarse el tipo de madera, se asume que es madera de pino.
- Cartón: se usa un proceso genérico de producción de cartón con un 54% de fibras recuperadas.
- En general, para el resto de los materiales, se usan procesos genéricos para su producción, a falta de procesos y datos exactos.
- Mix eléctrico. Se usa un mix eléctrico para bajo voltaje genérico, diferente al del fabricante.
- La energía usada como recurso en los módulos A1 y A2 se considera incorporada en la información de los procesos de producción y transporte de los materiales hasta la fábrica. Solo se pone como entrada la energía usada en el módulo A3, cuyo dato proviene de la EPD.
- Transporte: ante la falta de camiones EURO 5 en la base de datos, se ha utilizado un proceso genérico de mix de camiones EURO 1, 2, 3, 4.
- El uso de agua fresca como recurso en los módulos A1 y A2 se considera incorporada en la información de los procesos de producción y transporte de los materiales hasta la fábrica. Para el resto de los módulos, los datos provienen de la EPD.

#### Fases del inventario:

- Fase 1. Construcción del inventario: Para los módulos A1-A3 se han recopilado datos de la EPD sobre los materiales y procesos llevados a cabo para la producción del panel composite. También se han tenido en cuenta los recursos usados durante esta etapa, como la energía o el uso de agua.
- Fase 2. Módulo A4: Se considera una distancia para el transporte a obra de 400km, desde la fábrica en Parandones, León, hasta la ETSAM, Madrid. La localización de la fábrica se ha extraído de la EPD.
- Fase 4. Módulo C1: La energía usada en el desmantelamiento de los paneles se ha extraído de la EPD.
- Fase 5. Módulo C2: El transporte se realiza a lo largo de 50km según los datos de la EPD.
- Fase 6. Módulos C3-C4: Se considera una tasa de reciclaje del 89%, y el 11% restante termina en vertedero, según los datos de la EPD. Al no encontrar datasets con datos del reciclaje del polietileno de baja densidad, se asume solo el reciclaje del aluminio.
- Fase 7. Modelado del sistema: Se establecen las entradas de materiales y recursos en el inventario haciendo uso de las bases de datos. Para algunos materiales se ha

requerido de la construcción de sistemas de producto específicos para la producción de dichos materiales. Estos “subsistemas”, modelados de forma independiente, fueron integrados posteriormente como entradas al sistema del panel composite.

En el caso del PVDF 70/30, formado por fluoruro de polivinilideno y resina acrílica, su sistema se construye mediante los procesos de producción de ambas sustancias, en una proporción del 70% y 30% respectivamente.

En el caso del film adhesivo, el sistema se modela mediante el proceso de producción del polietileno de baja densidad granulado y su posterior proceso de extrusión.

En la siguiente tabla se muestran las entradas de los materiales considerados en el estudio, para 1m<sup>2</sup> de panel composite, especificando a que procesos de la base de datos corresponden.

MATERIAL / ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	BASE DE DATOS	UNIDADES	CANTIDAD
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (NÚCLEO) / PE-LD	Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant	ELCD 3.2.	kg	1,572
LÁMINA DE ALUMINIO	1) Aluminium ingot mix (high purity), single route, at plant, primary production, aluminium casting, 2.7 g/cm <sup>3</sup> , >99% Al 2) Aluminium sheet rolling, single route, at plant, primary production, aluminium, 2.7 g/cm <sup>3</sup>	1) GaBi 2) GaBi	kg	3,67
FLUORURO DE POLIVINILIDENO (LACA) / PVDF 70/30	1) Polyvinylidene fluoride (PVDF), production mix, at plant, polymerisation of vinyl fluoride, 1.76 g/cm <sup>3</sup> 2) Acrylic resin, Production mix, at plant, Technology mix	1) GaBi 2) Ecoinvent	kg	0,231
ADHESIVO	1) Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant 2) Film extrusion (blowing), production mix, at plant, plastic extrusion, for PP, PE, PVC, PET and PS	1) ELCD 3.2. 2) GaBi	kg	0,16
FILM	Plastic, stretch film, production mix, at plant, raw material production, plastic extrusion, thickness: 30 µm, grammage: 0,02754 kg/m <sup>2</sup>	GaBi	m <sup>2</sup>	1,01
MADERA	Pine wood, production mix, at saw mill, timber, 40% water content	GaBi	kg	0,00029
CARTÓN	Cartonboard sheets; mixed technology; production mix, at plant; 46% primary fibre, 54% recovered fibre (en)	ELCD 3.2.	kg	0,0468
<i>Se ha optado por no traducir las descripciones para facilitar su búsqueda en las bases de datos correspondientes.</i>				
<i>*1) y 2) es el orden de los procesos en los sistemas de producto específicos para la producción esos materiales.</i>				

Tabla 4.1. Entradas del inventario del ACV, por módulos.

En la siguiente tabla se muestran las entradas de los procesos relacionados con la energía, el agua y el transporte, especificando a que procesos de la base de datos corresponden.

ENTRADA	DESCRIPCIÓN	BASE DE DATOS	UNIDADES	CANTIDAD
ENERGÍA	Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, < 1kV	ELCD 3.2.	MJ	A1-A3: 1,294 A4: 0 C1: 0,178

				C2: 0 C3-C4: 4,452
TRANSPORTE	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload	ELCD 3.2.	kg*km	A1-A3: 0 A4: 9,3*400 C1: 0 C2: 9,3*50 C3-C4: 0
AGUA FRESCA	Elementary flows/Resource/from water	ELCD 3.2.	m <sup>3</sup>	A1-A3: 0,000169 A4: 0 C1: 0,000127 C2: 0,000095 C3-C4: 0,0175
<i>Se ha optado por no traducir las descripciones para facilitar su búsqueda en las bases de datos correspondientes.</i>				

Tabla 4.2. Entradas de recursos del inventario del ACV, por módulos.

Como se ha comentado anteriormente, la calidad de los datos del inventario puede afectar a los resultados. Es necesario aclarar los límites de los datos de los procesos utilizados para modelar el sistema, pues es muy importante que estos contengan la información necesaria para que el estudio realmente abarque un sistema de “cuna a tumba”.

Para ello se especifica, gracias a la descripción incorporada en los datasets de los procesos utilizados, cuales de estos incluyen los datos anteriores a la producción del material, en un alcance “cuna a puerta” (extracción de materias primas, transporte, etc.), o por el contrario no se incluyen, con un alcance “puerta a puerta”.

También, como se ha explicado anteriormente, la localización geográfica ha de tenerse en cuenta para la calidad del estudio, pues conlleva diversos factores que afectan a este. Ignorar la especificidad geográfica puede conducir a resultados, interpretaciones y conclusiones erróneos.

Las especificaciones previas se detallan mediante la siguiente tabla, junto a los materiales y datos correspondientes:

MATERIAL / ABREVIATURA	PROCESO*	ALCANCE	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (NÚCLEO) / PE-LD	Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant	“Cuna a puerta”, especificado en su descripción.	Europa
LÁMINA DE ALUMINIO	1) Aluminium ingot mix (high purity), single route, at plant, primary production, aluminium casting, 2.7 g/cm <sup>3</sup> , >99% Al 2) Aluminium sheet rolling, single route, at plant, primary production, aluminium, 2.7 g/cm <sup>3</sup>	1) “Cuna a puerta”, especificado en su descripción. 2) Es el proceso de laminación, los datos de la materia y recursos son los de 1).	Europa
FLUORURO DE POLIVINILIDENO (LACA) / PVDF 70/30	1) Polyvinylidene fluoride (PVDF), production mix, at plant, polymerisation of vinyl fluoride, 1.76 g/cm <sup>3</sup> 2) Acrylic resin, Production mix, at plant, Technology mix	1) “Cuna a puerta”, especificado en su descripción. 2) “Cuna a puerta”, especificado en su descripción.	1) Mundial 2) Europa
ADHESIVO	1) Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant 2) Film extrusion (blowing), production mix, at plant, plastic	1) “Cuna a puerta”, especificado en su descripción. 2) Es el proceso de extrusión, los datos de la	1) Europa 2) Europa

	extrusion, for PP, PE, PVC, PET and PS	materia y recursos son los de 1).	
FILM	Plastic, stretch film, production mix, at plant, raw material production, plastic extrusion, thickness: 30 µm, grammage: 0,02754 kg/m2	"Cuna a puerta", especificado en su descripción.	Europa
MADERA	Pine wood, production mix, at saw mill, timber, 40% water content	Incluye el transporte del tronco tras su tala, pero no la extracción de la madera.	Alemania
CARTÓN	Cartonboard sheets; mixed technology; production mix, at plant; 46% primary fibre, 54% recovered fibre (en)	"Cuna a puerta", especificado en su descripción.	Europa
ENERGÍA	Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, < 1kV		Europa
TRANSPORTE	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload		Europa
<p><i>Se ha optado por no traducir el nombre de cada proceso para facilitar su búsqueda en las bases de datos correspondientes.</i></p> <p><i>*Aunque el proceso contenga términos como que "at plant" o "at saw mill ", en la descripción incluida en el dataset especifican que alcance tienen los datos incorporados.</i></p>			

Tabla 4.3. Especificaciones de las entradas de recursos del inventario del ACV, por módulos.

#### 4.2.1.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

Para el EICV se escogen las categorías de impacto según los parámetros ambientales básicos, siendo estos los indicadores obligados por la norma EN 15804.

Como este estudio se ha centrado exclusivamente en la evaluación del Potencial de Calentamiento Global (GWP) como único indicador de impacto ambiental, la metodología usada para la clasificación y caracterización de dicho impacto es la incorporada en la base de datos ELCD 3.2., llamada "EN 15804 +A2 Method", la cual implementa el conjunto de factores de caracterización del modelo base de 100 años del IPCC tal y como indica la norma para dicho indicador.

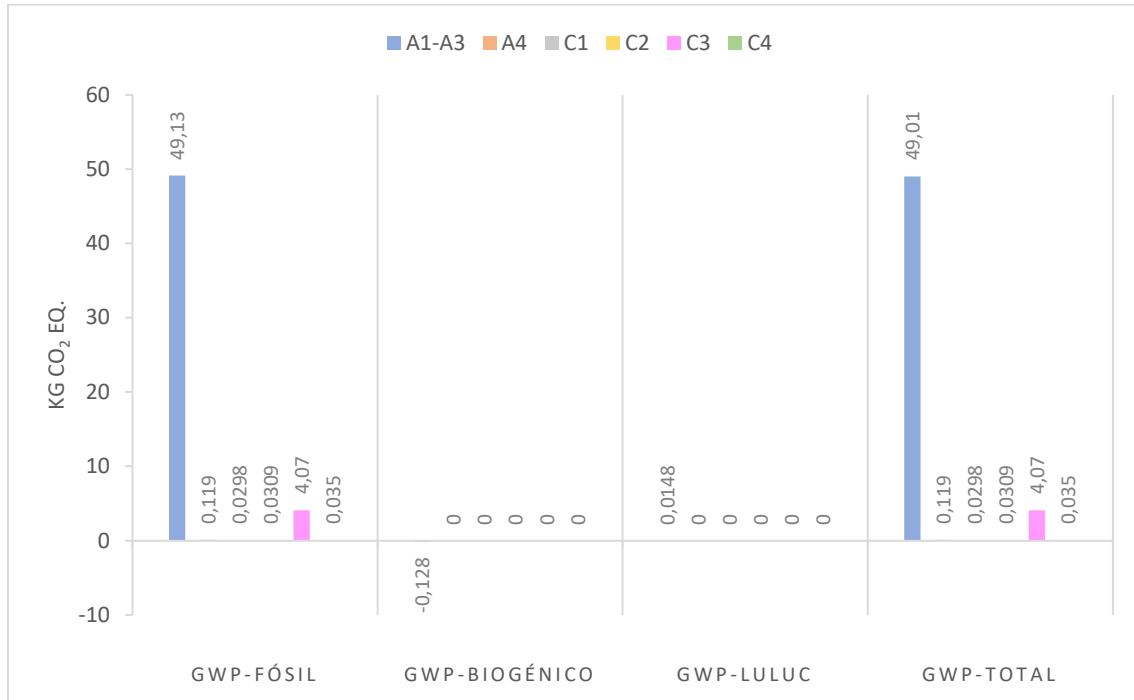
#### 4.2.2. Resultados e interpretación

Como se expone en la definición del objetivo, el propósito de la realización de este ACV es el análisis del Potencial de Calentamiento Global de un panel composite como recubrimiento de fachada. Por ello, los resultados del ACV, presentes en la siguiente tabla, solo proporcionan los indicadores de GWP (fósil, biogénico, LULUC y total), de acuerdo con el alcance definido.

INDICADOR	UNIDAD	A1-A3	A4	C1	C2	C3	C4
GWP-FÓSIL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	4,913e+1	1,19e-1	2,98e-2	3,09e-2	4,07	3,5e-2
GWP-BIOGÉNICO	Kg CO <sub>2</sub> eq.	-1,28e-1	0	0	0	0	0
GWP-LULUC	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,48e-2	0	0	0	0	0
GWP-TOTAL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	4,901e+1	1,19e-1	2,98e-2	3,09e-2	4,07	3,5e-2

Tabla 4.4. Resultados del ACV con OpenLCA. Impactos de GWP por módulo estudiado.

Para interpretación de estos resultados se ha hecho la siguiente gráfica con los resultados a lo largo de la etapa de vida del panel composite, dividida en los indicadores de GWP.



4.4. Comparación de impactos de GWP por módulo estudiado.

Como se puede observar, es en el indicador GWP-fósil donde encontramos la mayor emisión de gases de efecto invernadero debido al uso de fuentes fósiles.

De todas las etapas, destaca la fase de producción (A1-A3), donde se emiten hasta 49,13 kg CO<sub>2</sub> eq. siendo la mayor contribuyente al GWP-fósil. A esta fase le sigue el módulo C3, donde se producen los procesos de reciclaje y tratamiento de residuos, siendo el segundo mayor contribuyente al emitir 4,07 kg CO<sub>2</sub> eq.

El resto de los módulos tienen una contribución significativamente menor, pues se basan en procesos de transporte o donde solo se hace uso de electricidad para maquinaria.

En cuanto al GWP-biogénico, como ya se ha explicado, indica las emisiones o absorciones de carbono de fuentes biológicas. Por ejemplo, al usar biomasa para la producción de un material o componente, en el proceso de crecimiento de dicha biomasa se ha absorbido carbono, por lo que en el ACV ese material tendrá valores negativos en este indicador.

Debido a esto, es normal que en la fase de producción (A1-A3) sea donde menor GWP-biogénico se haya contabilizado, pues es en esta fase donde los materiales con contenido biogénico se han fabricado, como puede ser la madera de los pallets, o la fibra del cartón. En el resto de los módulos, al no hacerse uso de biomasa ni otros productos con contenido biogénico, el resultado es 0.

En el indicador GWP-LULUC, al igual que el resto de los indicadores, también destaca la fase de producción (A1-A3), donde se producen emisiones derivadas del uso del suelo y los cambios en el uso del suelo. Por ejemplo, los procesos relacionados con la extracción de las fibras de cartón, o los procesos del cambio del suelo para la minería de la bauxita, utilizada en la producción de aluminio.

También, procesos relacionados con la tala de árboles y la extracción de madera, que suponen uso del suelo y cambios en el uso del suelo, contribuyen a las emisiones de GWP-LULUC. Pero en este caso, debido al alcance del proceso utilizado en el sistema para la madera, no se ha contabilizado las emisiones de su extracción.

En los valores de GWP-total, es donde apreciamos los porcentajes. La etapa de producto es donde se producen el 91,98% de emisiones totales. Seguido, el módulo de tratamiento de residuos, donde se contabiliza un 89% de material reciclado, supone el 7,63% de emisiones totales.

Además, desglosando los porcentajes de contribución de cada proceso mediante el software, se observa que el 82,55% de las emisiones de GWP-total en la etapa de producto se debidas a la producción de aluminio primario, llegando a los 40,53 kg CO<sub>2</sub> eq. Estas emisiones suponen el 75,94% de GWP-total en todo el ciclo de vida del panel. El segundo material con más emisiones es el polietileno de baja densidad, con un porcentaje del 7,33% del GWP-total con 3,60 kg CO<sub>2</sub> eq. emitidos.

### 4.3. Granta EduPack 2023 R2. Eco Audit Tool.

Eco Audit Tool es una herramienta incorporada en el software Granta EduPack, desarrollado por Ansys, diseñada para calcular el uso de energía y la huella de CO<sub>2</sub> de uno o varios productos, componentes, materiales, etc. a lo largo de cada fase de su ciclo de vida de forma simplificada.

Al igual que el software que la incorpora, esta herramienta está enfocada a la enseñanza en el ámbito académico. Su propósito es enseñar, de manera práctica, los principios de la sostenibilidad y que es el Análisis del Ciclo de Vida, interpretando los resultados e identificando los puntos del ciclo de vida donde es necesario tomar decisiones con criterios basados en el ecodiseño.

#### 4.3.1. Análisis del Ciclo de Vida

Se ha llevado a cabo el ACV de un panel composite mediante la herramienta Eco Audit Tool de Granta EduPack. Para realizar el análisis se ha utilizado "*Granta EduPack Eco Audit Tool A White Paper*"<sup>23</sup>, un documento técnico publicado por Ansys (la compañía dueña del software) que describe en detalle la metodología, los supuestos, las bases de datos y el funcionamiento interno de la herramienta Eco Audit dentro del software Granta EduPack. Aunque este documento no es un manual de usuario, incluye ejemplos prácticos, por lo que se ha usado a modo de guía para el estudio.

Es necesario aclarar que no se han seguido las directrices y metodología del ACV, ya que dicha herramienta no sigue la metodología de las normas UNE-EN ISO 14040/14044 para un ACV detallado, ni las especificaciones de la EN 15804 para EPD certificadas. El objetivo de esta

<sup>23</sup> Ashby, M., Coulter, P., Ball, N., & Bream, C. (2021). *Granta EduPack Eco Audit Tool- A White Paper*. Ansys, Inc.

herramienta, como ya se ha comentado, es proporcionar una perspectiva rápida sobre la sostenibilidad y los impactos ambientales de los productos y materiales estudiados.

#### 4.3.1.1. Definición del producto

Para el estudio, se utilizan las características del Panel Composite STACBOND FR 4mm de espesor. Está compuesto por una lámina de aluminio 5005 de 0,5mm de espesor lacada con una pintura PVDF 70/30 (70% de fluoruro de polivinilideno (PVDF) y un 30% de resina acrílica), un núcleo de resinas termoplásticas (polietileno de baja densidad y compuestos retardantes de llama), y una lámina interior de aluminio 3105/3005 de 0,5mm de espesor.

El peso total de 1 m<sup>2</sup> de panel es de 9.3 kg, la densidad del núcleo es de 1,50±0,15 g/cm<sup>3</sup> y la densidad de las aleaciones de aluminio es de 2700 kg/m<sup>3</sup>.

El estudio se realizará sobre 1m<sup>2</sup> de dicho panel.

De la misma forma, se estudiará el impacto producido por los materiales de embalaje, tal y como vienen especificados en la EPD.

La composición del producto estudiado se encuentra en la ilustración 4.4.

#### 4.3.1.2. Materiales, fabricación y fin de vida

Se establecen, a modo de inventario, todos los materiales que componen el producto y su sistema de embalaje. Para ello, se ha recopilado información principalmente de la Declaración Ambiental de Producto del Panel Composite STACBOND FR. Como la base de datos del software es limitada y no aparecen todos los materiales necesarios, se asumen diferentes decisiones para llevar a cabo el estudio.

- Láminas de aluminio: al no especificarse en la EPD si las láminas contienen algún porcentaje de aluminio reciclado se asume que el 100% del aluminio es virgen, de producción primaria.
- Núcleo de resinas termoplásticas: ante la ausencia de datos relacionados con los “compuestos retardantes de llama”, se utiliza únicamente el proceso de producción de PE-LD granulado, asumiendo una proporción del 30% de este material. A su vez, se tiene en cuenta la electricidad utilizada en su extrusión para formar el núcleo.
- Lacado PVDF 70/30: ante la ausencia de datos relacionados con la resina acrílica usada en el lacado, se utiliza exclusivamente fluoruro de polivinilideno (PVDF) para el compuesto
- Adhesivo: al no especificarse el adhesivo usado en el panel composite, se asume que se trata de un film adhesivo de polietileno de baja densidad. De la misma forma que el núcleo, se utiliza el material “PE-LD (molding and extrusion)”.
- Madera: al no especificarse el tipo de madera, se asume que es madera de pino.
- Cartón: para equiparlo al proceso usado en el ACV con OpenLCA, se asume que el “Cardboard” tiene una parte reutilizada.
- Para el resto de los componentes del panel, se usan los materiales genéricos de la base de datos del software indicados en la tabla 4.5.
- Los procesos establecidos para la fabricación de cada material, y del producto, son los procesos genéricos incluidos en la base de datos del software. Ante la falta de procesos exactos para cada material, se sustituyen

Los procesos de fabricación de los materiales, de la misma forma, se obtienen de la base de datos el software. Como estos son limitados, también se establecen suposiciones para el estudio:

- Unión: para la unión de los materiales, se opta por el proceso "Adhesivos de curado por calor", siendo este el más parecido al proceso de laminación térmica junto a la película adhesiva que se usa en la fabricación de los paneles composite.
- Lacado: se usa el proceso "pintura", al ser este el que más se asemeja al lacado del PVDF.
- Los procesos de producción, al no estar en la base de datos del software y no poder seleccionarse ningún otro, no computan para el cálculo de energía usada y CO<sub>2</sub> emitido.
- Para el resto de los materiales, se usan procesos genéricos de la base de datos.
- Debido a la falta de datos específicos, e asume que no hay porcentaje de material eliminado en los procesos.

COMPONENTE	MATERIAL	% REICLADO	M (KG)/PIEZA	UDS.	M (KG) TOTAL PROCESADA	PROCESO
LACADO	PVDF (homopolymer, molding and extrusion)	Virgen (0%)	0,231	1	0,231	Pintura
LÁMINA DE ALUMINIO EXT.	Aluminum, 5005, H14	Virgen (0%)	1,85	1	1,85	Extrusión, laminado
NÚCLEO	PE-LD (molding and extrusion)	Virgen (0%)	1,572	1	1,572	Extrusión de polímeros
LÁMINA DE ALUMINIO INT.	Aluminum, 3105, H14	Virgen (0%)	1,85	1	1,85	Extrusión, laminado
ADHESIVO	PE-LD (molding and extrusion)	Virgen (0%)	0,16	1	0,16	Extrusión de polímeros
FILM EMBALAJE	PE-LLD (molding and extrusion)	Virgen (0%)	1,01	1	1,01	Extrusión de polímeros
MADERA	Pine (pinus resinosa) (l)	Virgen (0%)	0,00029	1	0,00029	Corte y recorte
CARTÓN	Cardboard	Parte reutilizada	0,0467	1	0,0467	Corte y recorte
UNIÓN						Adhesivos de curado por calor
<i>Se ha optado por no traducir el nombre de los materiales para facilitar su búsqueda en el programa.</i>						

Tabla 4.5. Inventario de materiales del ACV realizado con Eco Audit.

El transporte a obra se lleva a cabo mediante un camión 16-32 t, EURO 5, tal y como se especifica en la EPD.

En la fase de uso, no se contabilizan cargas ni emisiones para una vida útil del producto de 50 años.

Para los escenarios de fin de vida, se establece que una tasa de reciclaje del 89% para el aluminio y el núcleo, y el 11% restante termina en vertedero, según los datos de la EPD.

### 4.3.2. Resultados e interpretación

La herramienta Eco Audit ofrece el impacto ambiental medido en la energía usada, en MJ, y la huella de carbono, en kg de CO<sub>2</sub>, a lo largo del ciclo de vida del producto. Es importante aclarar, como se ha explicado anteriormente, esta herramienta no sigue la metodología de ACV proporcionada por las normas ISO14040/14044, o las RCP de la norma EN15804, por lo que los resultados no proporcionan la información en base a los indicadores de impacto ambiental básicos, obligados por esta última norma.

Tampoco se proporcionan los resultados agrupados en los módulos tal cual vienen indicados en la norma, aunque se puede establecer relaciones para su comparación:

- La fase de MATERIAL equivale a los módulos A1-A3 (etapa del producto) de los componentes.
- La fase de FABRICACIÓN equivale al módulo A3 (fabricación).
- La fase de TRANSPORTE equivale al módulo A4 (transporte a obra).
- La fase de USO equivale a toda la etapa de uso, siendo los módulos B1-B7.
- En la fase de ELIMINACIÓN encontramos solo los módulos C3 (tratamiento de residuos) y C4 (eliminación de residuos) de la etapa de fin de vida, pues no se pueden establecer inputs en relación con los módulos C1 y C2 de dicha etapa.
- Por último, la fase de POTENCIAL DE FIN DE VIDA equivale al módulo D (beneficios y cargas más allá del límite del sistema).

FASE	ENERGÍA (MJ)	ENERGÍA (%)	HUELLA DE CO <sub>2</sub> (KG)	HUELLA DE CO <sub>2</sub> (%)
MATERIAL	889	90,4	55,7	85,1
FABRICACIÓN	83,7	8,5	9,04	13,8
TRANSPORTE	7,79	0,8	0,511	0,8
USO	0	0,0	0	0,0
ELIMINACIÓN	2,97	0,3	0,208	0,3
TOTAL (PARA PRIMERA VIDA)	983	100	65,4	100
POTENCIAL DE FIN DE VIDA	-715		-36,44	

Tabla 4.6. Resultados del ACV con Eco Audit. Energía usada y huella de CO<sub>2</sub> por etapa del ciclo de vida.

Como el objetivo del estudio es el análisis del GWP, solo se desglosarán los resultados relacionados con la huella de carbono, medida en kg de CO<sub>2</sub>.

COMPONENTE	UNIDADES (HUELLA DE CO <sub>2</sub> )	MATERIAL	FABRICACIÓN DEL PANEL	TRANSPORTE	ELIMINACIÓN	POTENCIAL DE FIN DE VIDA
LACA	kg	3,7	0	0,018	0,0032	0
LÁMINA DE ALUMINIO EXT.	kg	23	1,1	0,14	0,083	-17
NÚCLEO	kg	3,3	0,72	0,12	0,022	-1,386
LÁMINA DE ALUMINIO INT.	kg	23	1,1	0,14	0,083	-17
ADHESIVO	kg	0,33	0,073	0,012	0,0022	0
FILM EMBALAJE	kg	2	0,48	0,077	0,014	0
MADERA	kg	0,00007	0	0,000022	0,0000041	0
CARTÓN	kg	0,04	0	0,0036	0,00066	0

<b>UNIÓN</b>	kg	4,7
<b>PROCESO DE LACADO</b>	kg	0,98

Tabla 4.7. Resultados del ACV con Eco Audit desglosados por componente desglosada. Huella de carbono.

Como se observa en las tablas 4.6 y 4.7, la mayor huella de carbono se concentra en la fase de materiales, que engloba los impactos asociados a la extracción de materias primas y la fabricación de los materiales, llegando a suponer el 85,1% del total de la huella de carbono en el ciclo de vida del producto.

Destacan por su impacto los materiales principales del panel, es decir, el aluminio y el núcleo, emitiendo 46 kg y 3,3 kg de CO<sub>2</sub> respectivamente.

La siguiente fase con mayor impacto ambiental es la fase de fabricación, donde se llevan a cabo los procesos para fabricar el producto analizado. Es en esta fase donde se contabilizan los impactos de los procesos de unión y lacado.

En esta fase destaca también el aluminio, con una huella de carbono de 2,2kg emitidos. Destaca también la emisión del proceso de unión, con una huella de carbono de 4,7kg.

La madera y el cartón no tienen impacto ambiental debido a la falta del proceso, tal y como se estableció en las suposiciones de partida al inicio del inventario.

En las fases de transporte a obra y eliminación es donde menos impacto se reporta, suponiendo el 0,8% del total de huella de carbono.

En el caso del transporte a obra, la información proporcionada por el desglose no supone una información necesaria, pues se trata de un solo producto en el mismo medio de transporte.

La fase de uso, al no necesitar el panel ninguna fuente de energía para su funcionamiento, suponiendo una vida útil de 50 años sin procesos de mantenimiento ni reemplazo, reporta un impacto del 0% del total.

La última fase, potencial de fin de vida, reporta los impactos negativos debidos a los procesos de reciclaje del aluminio y del núcleo de polietileno de baja densidad. Estos impactos negativos, usando el aluminio y el polietileno reciclado, suponen una reducción de la huella de carbono de hasta un 26% en la producción del aluminio y un 42% en la producción del polietileno de baja densidad.

#### **4.4. CYPE. Módulo de ACV.**

Impacto ambiental-Análisis del Ciclo de Vida es uno de los módulos incluidos en los programas Arquímedes y Generador de Presupuestos, de CYPE. Esta herramienta calcula los impactos ambientales de una obra durante las etapas de producto y proceso de construcción, es decir, los módulos A1-A3, A4 y A5.

Al tratarse de un ACV, esta herramienta sigue la metodología proporcionada por las normas ISO14040/14044, y proporciona los resultados según los 7 indicadores de impacto ambiental presentes en la anulada norma EN15804:2012<sup>24</sup>, al igual que el uso de recursos.

De la misma forma, el programa Generador de Precios, también de CYPE, proporciona la misma información ambiental de los productos incluidos en él. Al seleccionar un producto, se ofrecerán los impactos ambientales por unidad de medida de dicho producto.

#### 4.4.1. Análisis del Ciclo de Vida

Aunque como se ha mencionado en el párrafo anterior esta herramienta sigue la metodología proporcionada por las normas ISO14040/14044, para usarla no es necesario que el usuario realice las 4 fases del ACV, pues la herramienta ofrece los resultados en función de los productos incluidos en las partidas de obra y las mediciones. Por lo tanto, solo basta con seleccionar 1 unidad del producto para ver su impacto ambiental, proporcionado por el informe de ACV.

En el caso del programa Generador de Precios, es casi el mismo procedimiento. Al seleccionar el producto, se proporciona la misma información ambiental por unidad.

##### 4.4.1.1. Definición del producto

Para el estudio, se utilizan las características del Panel Composite STACBOND FR de 4mm de espesor. Está compuesto por una lámina de aluminio 5005 de 0,5mm de espesor lacada con una pintura PVDF 70/30 (70% de fluoruro de polivinilideno (PVDF) y un 30% de resina acrílica), un núcleo de resinas termoplásticas (polietileno de baja densidad y compuestos retardantes de llama), y una lámina interior de aluminio 3105/3005 de 0,5mm de espesor.

El estudio se realizará sobre 1m<sup>2</sup> de dicho panel.

En ambos programas, se selecciona el producto "Revestimiento exterior de fachada ventilada, de paneles composite. Sistema CORTIZO.", en cuya descripción se especifica que el panel usado es el Panel Composite STACBOND FR descrito en el párrafo anterior.

Cabe aclarar que el producto seleccionado en el programa incluye el sistema de montaje, subestructura, por lo que estos tendrán un impacto en los resultados.

#### 4.4.2. Resultados e interpretación

Aunque el módulo ACV de CYPE Arquímedes, y los impactos ambientales que proporciona Generador de Precios, incluyen los indicadores de impacto ambiental comentados anteriormente, para la consecución de los objetivos de este trabajo, se ha priorizado y se presentarán exclusivamente los resultados relativos al Potencial de Calentamiento Global (GWP).

INDICADOR	UNIDAD	A1-A2-A3	A4	A5	ENERGÍA TOTAL Y EMISIONES
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	53,708	0,238	0,051	53,997

Tabla 4.8 . Resultados del ACV obtenidos con el módulo de ACV de CYPE.

<sup>24</sup> Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de productos básicas para productos de construcción. (UNE-EN 15804:2012). Anulada por UNE-EN 15804:2012+A12014.

Se puede observar que es en la etapa de producto donde se encuentra la mayor cantidad de kg CO<sub>2</sub> eq., pues es donde se contabilizan las emisiones de extracción de materiales, transporte a fábrica y fabricación de los productos.

En estos resultados también observamos que hay emisiones en el módulo A5, etapa de proceso de construcción-instalación. Esto se debe a la energía usada para el montaje de la fachada, pues como se ha explicado anteriormente, el producto del que se hace el estudio incluye la subestructura y sistemas de anclaje del panel composite.

## 4.5. Comparación de resultados

Para la comparación de resultados entre los diferentes programas usados, proporcionados en las tablas 4.4, 4.6 y 4.8, se muestran también la información ambiental de los indicadores de GWP (fósil, biogénico, LULUC y total) proporcionada por la EPD del Panel Composite STACBOND FR, de la que se han sacados los datos técnicos del panel composite del que se han realizado los estudios.

EPD STACBOND®FR

INDICADOR	Unidad	A1-A3	C1	C2	C3	C4	D
GWP-FÓSIL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	4,14e+1	7,03e-3	5,63e-2	9,52e-1	7,40e-2	-2,56e+1
GWP-BIOGÉNICO	Kg CO <sub>2</sub> eq.	-1,62e-1	2,21e-4	5,07e-5	2,99e-2	6,55e-4	1,30e-1
GWP-LULUC	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,47e-1	1,66e-5	2,21e-5	2,25e-3	2,12e-6	-3,64e-1
GWP-TOTAL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	4,13e+1	7,27e-3	5,64e-2	9,84e-1	7,46e-2	-2,59e+1

Tabla 4.9. Impactos ambientales obtenidos de la EPD del Panel Composite STACBOND FR.

RESULTADOS ACV CON OPENLCA

INDICADOR	Unidad	A1-A3	A4	C1	C2	C3	C4
GWP-FÓSIL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	4,913e+1	1,19e-1	2,98e-2	3,09e-2	4,07	3,5e-2
GWP-BIOGÉNICO	Kg CO <sub>2</sub> eq.	-1,28e-1	0	0	0	0	0
GWP-LULUC	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,48e-2	0	0	0	0	0
GWP-TOTAL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	4,901e+1	1,19e-1	2,98e-2	3,09e-2	4,07	3,5e-2

Tabla 4.4. Resultados del ACV con OpenLCA. Impactos de GWP por módulo estudiado.

RESULTADOS ACV CON ECO AUDIT

FASE	Energía (MJ)	Energía (%)	Huella de CO <sub>2</sub> (kg)	Huella de CO <sub>2</sub> (%)
MATERIAL	1.19e+03	90,3	63,3	83,8
FABRICACIÓN	110	8,3	11	14,6
TRANSPORTE	12.1	0,9	0,791	1,0
USO	0	0,0	0	0,0
ELIMINACIÓN	6.04	0,5	0,423	0,6
TOTAL (PARA PRIMERA VIDA)	1.32e+03	100	75.6	100
POTENCIAL DE FIN DE VIDA	-715		-39.9	

Tabla 4.6. Resultados del ACV con Eco Audit. Energía usada y huella de CO<sub>2</sub> por etapa del ciclo de vida.

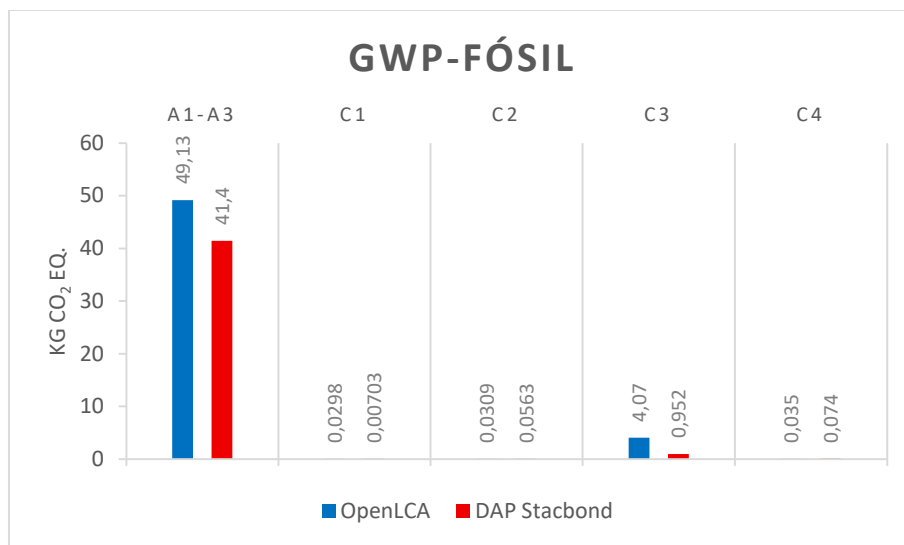
**RESULTADOS ACV CON CYPE**

INDICADOR	Unidad	A1-A2-A3	A4	A5	Energía total y emisiones
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	53,708	0,238	0,051	53,997

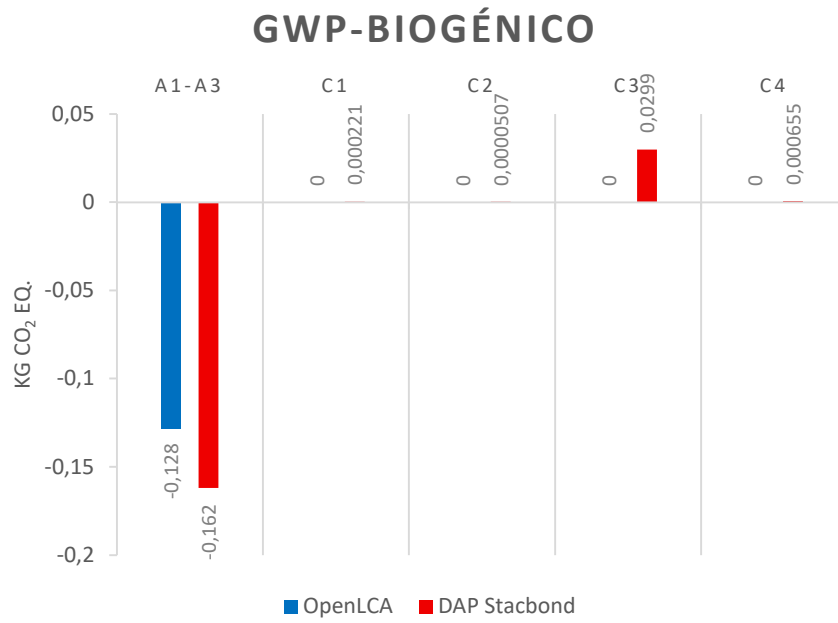
Tabla 4.8. Resultados del ACV obtenidos con el módulo de ACV de CYPE.

**4.5.1. Comparación de resultados con OpenLCA y EPD.**

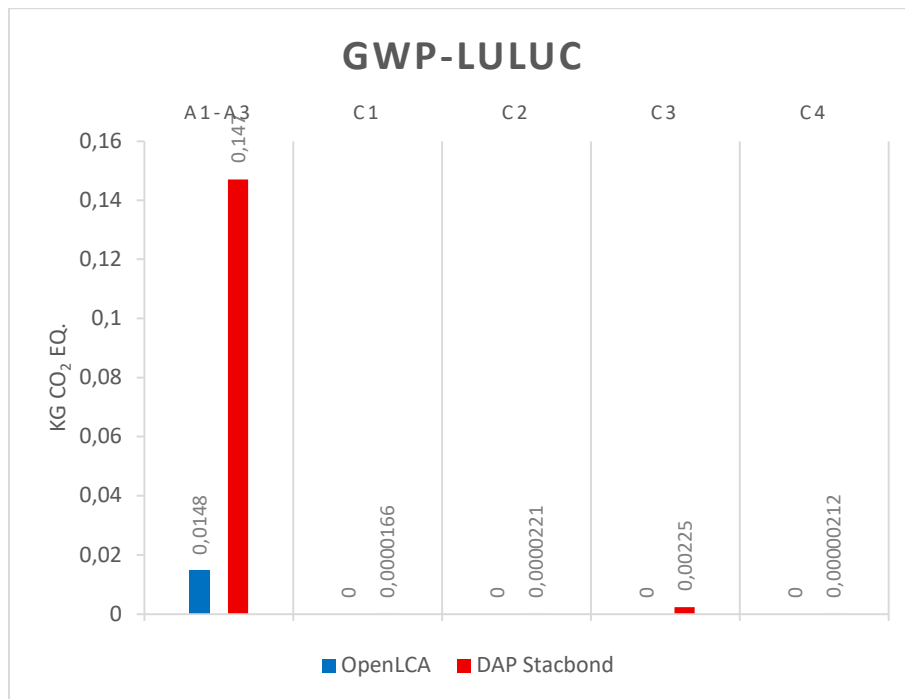
OpenLCA ofrece la información del impacto ambiental mediante los mismos indicadores ambientales que la EPD, ya que ambos ACV se han realizado con softwares específicos para su análisis, siendo SimaPro 9.3.0.3 en el caso de la EPD, y se han seguido la metodología marcada por las normas ISO14040/14044 y las Reglas de Categoría de Producto, junto a las especificaciones para Declaraciones Ambientales de Producto, de la norma EN15804.



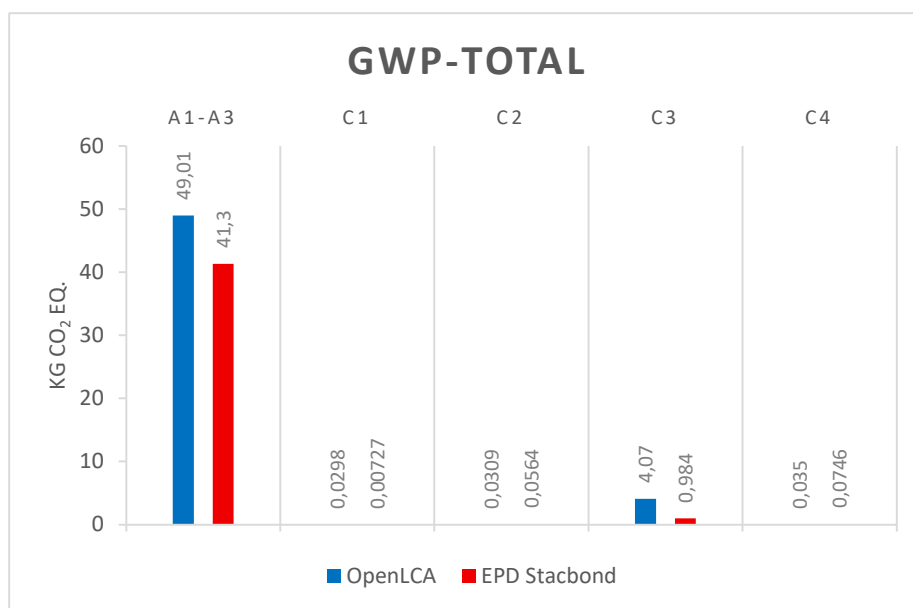
4.5. Gráfico de comparación de resultados del ACV con OpenLCA y los impactos ambientales reportados en la EPD. GWP-Fósil.



4.6. Gráfico de comparación de resultados del ACV con OpenLCA y los impactos ambientales reportados en la EPD. GWP-Biogénico.



4.7. Gráfico de comparación de resultados del ACV con OpenLCA y los impactos ambientales reportados en la EPD. GWP-LULUC.



4.8. Gráfico de comparación de resultados del ACV con OpenLCA y los impactos ambientales reportados en la EPD. GWP-Total.

Aun así, es notable la diferencia entre los resultados, derivado de las bases de datos usadas y las limitaciones en la calidad de datos de mi estudio con OpenLCA. Destacan, como ya se explicó anteriormente, los resultados con valor 0 en los indicadores de GWP-Biogénico y GWP-LULUC. Su diferencia con la EPD se debe a los datos específicos usados por la empresa, pudiendo contar las emisiones en el cambio del suelo para la producción de energía o combustibles o el empleo de biomasa. También se ha de tener en cuenta las limitaciones en cuanto a la calidad de los datos de este estudio con OpenLCA.

Por otro lado, se observan diferencias en los resultados de GWP-fósil, donde se aprecia que la evaluación hecha con OpenLCA emite hasta 10 kg CO<sub>2</sub> eq. más por unidad declarada en la etapa de producto. Una posible explicación para esta diferencia es el uso de aluminio reciclado en el Panel Composite STACBOND FR en un porcentaje no especificado, mientras que para el estudio con OpenLCA he usado de 100% aluminio primario, debido a la asunción explicada al principio del análisis.

También destacan, aunque en menor medida, los resultados de GWP-fósil en el módulo C3, donde los procesos usados en el sistema de OpenLCA tienen mayores emisiones que las reportadas en la EPD. Esto se debe al uso de procesos y datos exactos para la elaboración de la EPD del fabricante, y al uso de datos y procesos genéricos para el estudio con OpenLCA.

#### 4.5.2. Comparación de resultados con Eco Audit y EPD

Los resultados con este programa, al no tener las emisiones expresadas en las mismas unidades, es difícil compararlas con la EPD de STACBOND FR. Sin embargo, aunque el programa está enfocado en la enseñanza en el ámbito académico, gracias a los resultados desglosados podemos identificar cuáles son los materiales y componentes del producto con mayor huella de carbono.

Aunque el GWP engloba todos los GEI, y esta herramienta solo proporciona el impacto por emisiones de CO<sub>2</sub>, podemos apreciar como el mayor impacto ambiental, igual que en la EPD, se encuentra en las primeras fases del producto. En los resultados de Eco Audit, encontramos la mayor emisión de CO<sub>2</sub> en la fase de materiales, es decir, desde la extracción de las materias

primas hasta la producción de los componentes del producto. Destacan el aluminio y el polietileno de baja densidad, siendo los responsables del 60,85% y 14,55% de las emisiones totales en el ciclo de vida del panel.

### **4.5.3. Comparación de resultados con CYPE y EPD.**

Los resultados ofrecidos por el módulo de ACV de CYPE Arquímedes, como se ha aclarado durante el estudio, proporcionan la información del impacto ambiental mediante 7 indicadores de impacto ambiental presentes en la anulada norma EN15804:2012. Para el estudio se contempla solo el indicador Potencial de Calentamiento Global (GWP), pues el programa no reporta los indicadores del GWP desglosados en fósil, biogénico, LULUC y total, en comparación con la EPD donde sí se reportan estos 4 indicadores de GWP.

Además, CYPE solo reporta el impacto ambiental de los módulos A1-A3, A4 y A5, a diferencia de la EPD, donde se calculan los impactos de los módulos A1-A3, C1-C4 y D. Debido a esto, solo se pueden comparar las emisiones en la etapa de producto (A1-A3) de ambos ACV.

Los resultados de CYPE varían ligeramente debido a que estos también contemplan las emisiones en el ciclo de vida de la subestructura y anclajes del sistema de fachada, sumados al reporte ambiental que obtienen de la EPD del fabricante del panel composite. De igual forma que en los anteriores estudios, se observa que el mayor porcentaje de emisiones se encuentra en la etapa de producto.

## **4.6. Análisis crítico-comparativo de los programas**

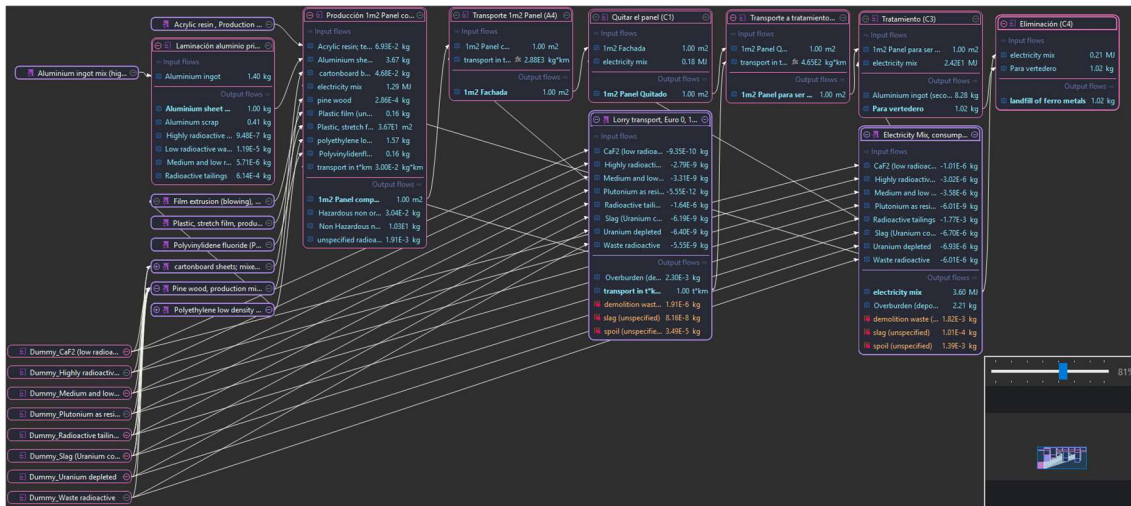
Durante la realización de los estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de un panel composite, que ha implicado el uso de OpenLCA, Granta EduPack y CYPE, mi perspectiva de estudiante me ha permitido observar de primera mano las ventajas, desventajas y limitaciones inherentes de cada programa.

Aprovechando esta experiencia de uso, los datos recopilados, los resultados obtenidos y, sobre todo, la información previa necesaria para el uso apropiado de cada herramienta, procederé a realizar una comparación crítica de estos programas.

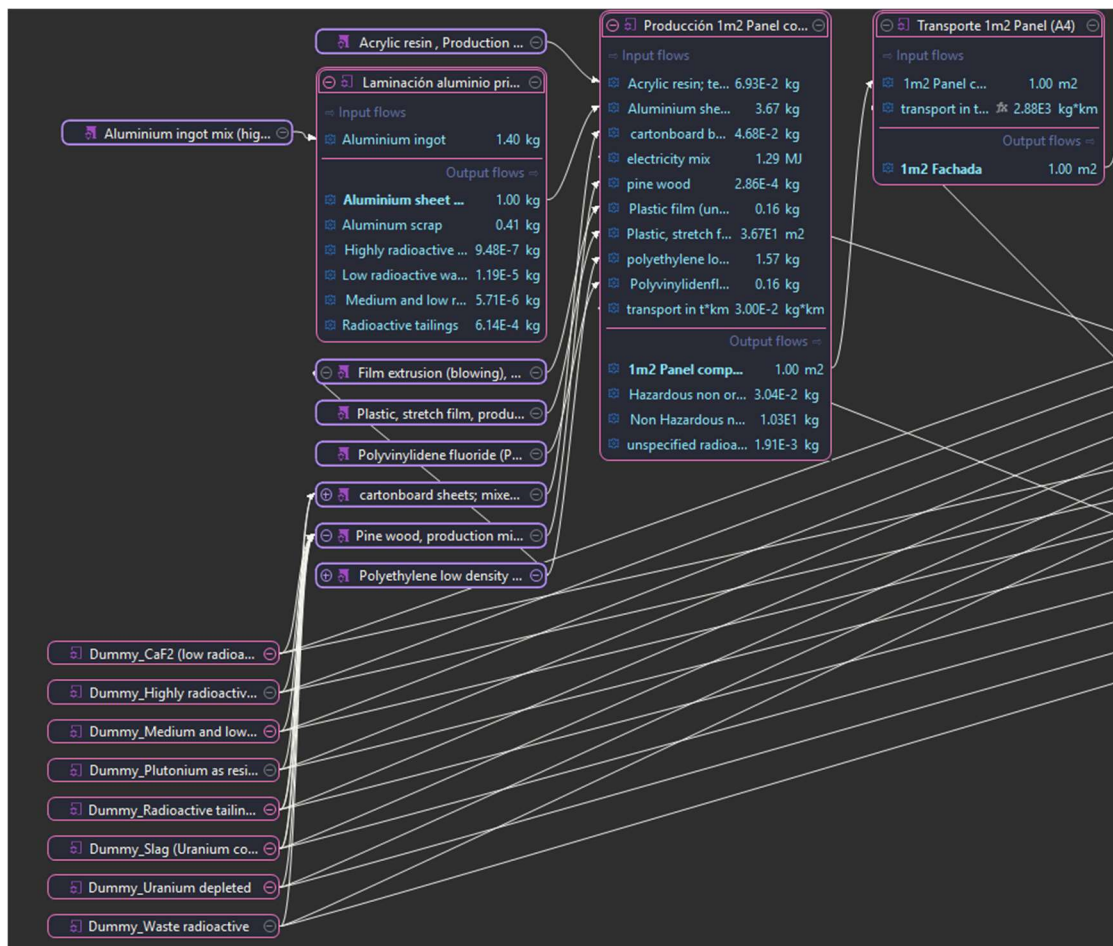
Se evaluará el alcance de bases de datos agregadas y la complejidad de adquirir nuevos datos e información e incorporarlos a cada programa. Se revisarán los métodos de Evaluación de Impacto, así como la comunicación de la información ambiental. Se analizará la flexibilidad para modelar escenarios y sistemas, así como la usabilidad de cada programa y la curva de aprendizaje requerida.

### **4.6.1. OpenLCA**

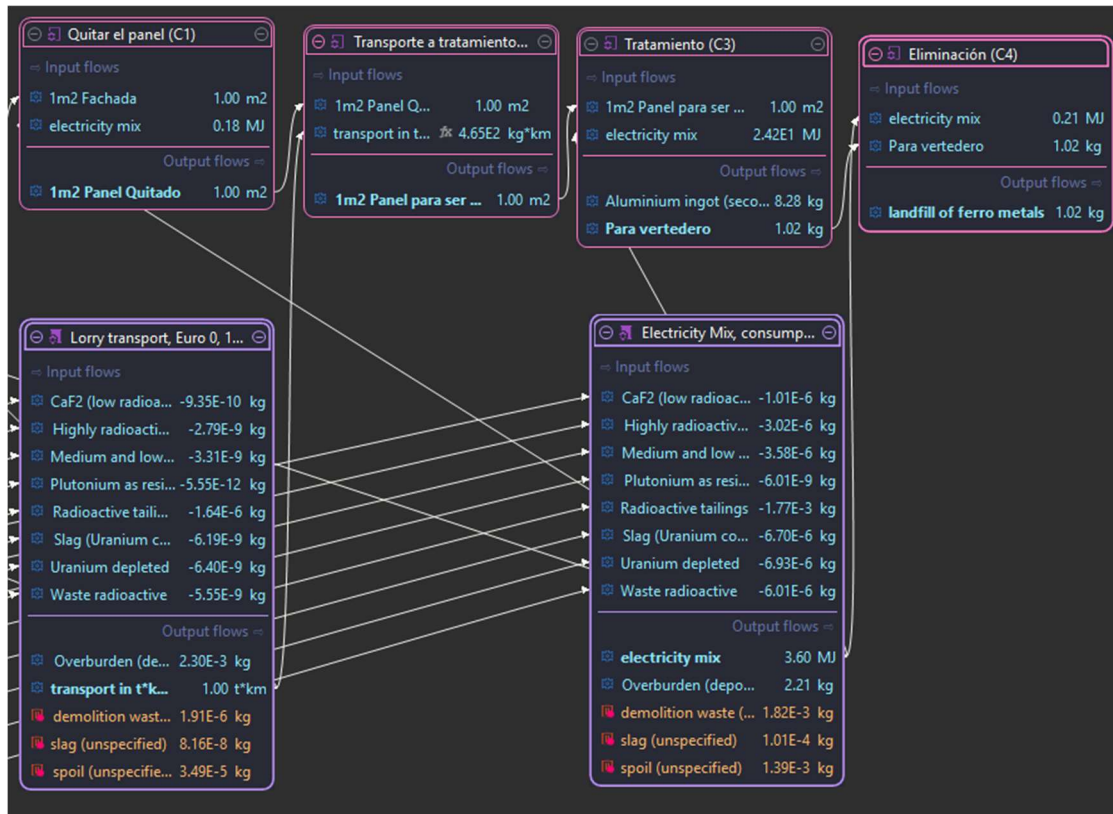
OpenLCA se posiciona como un software profesional y de código abierto, respaldada por una comunidad global. Debido a que es gratuita, y está ampliamente aceptada mundialmente, hacen del programa una atractiva herramienta. Sin embargo, su potencia viene acompañada de una curva de aprendizaje y una exigencia de información que pueden ser significativas, sobre todo en el ámbito académico.



4.9. Modelado gráfico del sistema del ACV del panel composite con OpenLCA.



4.10. Modelado gráfico del sistema del ACV del panel composite con OpenLCA 1/2.



1.10. Modelado gráfico del sistema del ACV del panel composite con OpenLCA 2/2.

### Fortalezas

- Acceso a bases de datos globales: Una de sus mayores virtudes es la integración con OpenLCA Nexus, un repositorio web que alberga una vasta cantidad de datos y bases de datos esenciales para el ACV. Esto incluye la compatibilidad con bases de datos públicas y gratuitas como ELCD, y la posibilidad de integrar bases de datos con licencia (como GaBi, Ecoinvent, Ökobaudat), datasets de procesos y datos, metodologías de evaluación, etc.
- Flexibilidad: Ofrece una libertad casi total para modelar cualquier producto o sistema, siempre y cuando se disponga de la información y datos necesarios para ello. Permite definir con precisión los límites del sistema del ACV, estableciendo los procesos incluidos en cada etapa del ciclo de vida.
- Facilidad de aprendizaje: A pesar de su complejidad subyacente, su interfaz es relativamente intuitiva, y cuenta con guías y tutoriales que facilitan el aprendizaje. Esto es un punto a favor para nuevos usuarios que buscan familiarizarse con la metodología del ACV.

Además, para una interpretación exhaustiva, los resultados pueden agruparse según el indicador ambiental deseado, y desglosarse en los diferentes procesos que participan en el ciclo de vida del producto.

### Debilidades y limitaciones para el usuario estudiante

- Exigencia de información previa y normativa: Al ser un software de nivel profesional, OpenLCA demanda un conocimiento de la metodología del ACV, y de las normas UNE-EN ISO 14040, UNE-EN ISO 14044, y EN 15804 en el caso de productos de construcción, para el correcto uso del programa y calidad de los resultados. Para un estudiante, adquirir esta información previa puede ser un obstáculo considerable, pues se requiere una familiarización con cada etapa del ACV que va más allá del simple uso del programa o la adquisición de los datos necesarios.
- Dificultad en la adquisición de datos específicos: Aunque permite importar datos, la obtención de información específica sobre el consumo de energía, los procesos exactos llevados a cabo en la fabricación de un producto o los detalles de una cadena de suministro puede ser un desafío. Si bien las Declaraciones Ambientales de Producto pueden servir de base para ciertos estudios, no siempre es suficiente para modelar con la exactitud que OpenLCA permite.

## 4.6.2. Eco Audit (Granta EduPack)

La herramienta Eco Audit, integrada en Granta EduPack, representa una puerta de entrada fundamental al Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el ecodiseño, especialmente para estudiantes y aquellos que se inician en la sostenibilidad. Su diseño intuitivo prioriza la facilidad de uso, pero esta accesibilidad conlleva ciertas limitaciones en la flexibilidad del análisis.

Uds.		Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Proceso secundario	% eliminado	Fin de vida	% recuperado
1	Laca	PVDF (homopolymer,...	Virgen (0%)	0.231				0	Vertedero	100
1	Lámina de aluminio ext	Aluminum, 5005, H14	Virgen (0%)	1.835	Extrusión, laminado	Corte y recorte		0	Reciclar	89
1	Lámina de aluminio int	Aluminum, 3105, H14	Virgen (0%)	1.835	Extrusión, laminado	Corte y recorte		0	Reciclar	89
1	Film Embalaje	PE-LLD (molding and...	Virgen (0%)	1.01	Extrusión de polímeros			0	Vertedero	100
1	Núcleo	PE-LD (molding and e...	Virgen (0%)	1.572	Extrusión de polímeros			0	Vertedero	100
1	Madera	Pine (pinus resinosa) (I)	Virgen (0%)	0.00029				0	Reutilizar	50
1	Cartón	Cardboard	Parte reutilizada	0.0468				0	Reutilizar	50
1	Adhesivo	PE-LD (molding and e...	Virgen (0%)	0.16	Extrusión de polímeros			0	Vertedero	100

Nombre	Proceso	Cantidad	Unidad
Unión	Adhesivos de curado por c	1	m^2
Laca	Pintura	1	m^2

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
Transporte a obra	Camión 16-32 t, EURO 5	400

1.11. Modelado del sistema del ACV del panel composite con Eco Audit.

### Fortalezas

- Facilidad de uso: La interfaz de Eco Audit es extremadamente intuitiva, lo que facilita su aprendizaje y manejo. Cada paso y proceso está bien indicado, y se guía al usuario a través del modelado simplificado del ciclo de vida del producto. Esto reduce drásticamente la curva de aprendizaje en comparación con software de ACV más complejos.

Además, existen guías y tutoriales para su correcto uso, tanto por parte de Ansys (empresa dueña del software) como por externos, convirtiendo la herramienta en excelente recurso didáctico.

- Base de datos integrada: Una de sus mayores virtudes es su base de datos de materiales y procesos precargada. Esta integración permite una utilización rápida y sin complicaciones si se enfoca adecuadamente al ámbito académico, eliminando la necesidad de buscar y gestionar bases de datos externas o procesos específicos, lo cual puede ser un desafío para iniciados en el ACV.
- Introducción a la sostenibilidad: No requiere un conocimiento exhaustivo de las normas UNE-EN ISO de ACV (ISO 14040/14044). Su simplicidad es perfecta para introducir a los estudiantes en el pensamiento de ciclo de vida y en cómo los materiales y procesos de diseño impactan en el medio ambiente.

#### Debilidades y limitaciones

- Metodología simplificada: La principal desventaja radica en su metodología de ACV altamente simplificada. Los resultados se ofrecen por fases "genéricas" (material, fabricación, transporte, uso, fin de vida), lo cual difiere de la estructura modular detallada (A1-A3, A4, A5, B, C1-C4, D) que exigen normas como la EN 15804 para Declaraciones Ambientales de Producto (EPD).
- Limitación en los datos: La facilidad de uso gracias a su base de datos integrada conlleva también una falta de especificación en la modelización de un sistema, pues al incluir datos genéricos es difícil modelar con detalle el producto si los materiales y procesos requeridos no están incluidos en dicha base. Se puede recurrir al uso de materiales o procesos parecidos a los necesarios (comúnmente llamados "proxys"), pero esto conlleva resultados inexactos.

Aunque se pueden añadir materiales y procesos personalizados, esto implica que el usuario debe buscar e introducir manualmente los valores de energía y huella de carbono para ese proceso específico, lo cual anula parte de la ventaja de la base de datos integrada ya que requiere el uso de fuentes externas o documentos técnicos que no siempre son de fácil obtención.

- Limitación en los resultados: Eco Audit se centra en la Energía Incorporada y la Huella de Carbono. No ofrece la gama completa de indicadores de impacto ambiental que son estándar en un ACV profesional.











A esto hay que sumarle que los resultados obtenidos, al utilizarse una base de datos integrada y genérica, no son lo suficientemente específicos o precisos para realizar un ACV. Su enfoque es la comparación entre diferentes materiales y productos, no la cuantificación exacta de sus impactos ambientales.

### 4.6.3. CYPE

CYPE, a través de sus programas Generador de presupuestos o Arquímedes, ofrece herramientas para el cálculo ambiental que buscan simplificar la obtención de datos de ACV para elementos constructivos.

**FAS010 m<sup>2</sup> Revestimiento exterior de fachada ventilada, de paneles composite. Sistema "CORTIZO".** 282,21€

Revestimiento exterior de fachada ventilada, de paneles composite Stacbond Stacbond A2 Non Combustible ACP "CORTIZO", de 4 mm de espesor total, formados por una lámina de aluminio en la cara interior de 0,5 mm de espesor y una lámina exterior de aleación de aluminio EN AW-5005, con acabado lacado, con una capa de PVDF Kynar de 22 a 40 micras de espesor, pretratamiento libre de cloro en ambas láminas, y núcleo intermedio con elevada proporción de carga mineral y con resistencia al fuego, de 3 mm de espesor, Euroclase A2-s1, d0 de reacción al fuego, según UNE-EN 13501-1, en forma de bandejas; colocación en posición vertical mediante el sistema de anclaje oculto con piezas de cuelgue STB-CH, sobre subestructura soporte de aleación de aluminio. Incluso tirafondos y anclajes mecánicos de expansión de acero inoxidable A2, para la fijación de la subestructura soporte. El precio no incluye el aislamiento térmico.

Etapa del ciclo de vida	Indicadores de impacto ambiental							Uso de recursos		
										
	GWP CO <sub>2</sub> eq. (kg)	ODP CFC 11 eq. (kg)	AP SO <sub>2</sub> eq. (kg)	EP (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> eq. (kg)	POCP etileno eq. (kg)	ADPE Sb eq. (kg)	ADFP (MJ)	PERT (MJ)	PERNRT (MJ)	FW (m <sup>3</sup> )
Total A1-A2-A3:	53,713	2,84e-06	0,333	0,017	0,171	7,61e-04	738,200	140,759	685,298	4,246
A4	0,238	3,09e-04	0,017	0,003	8,79e-04	1,43e-04	26,143		3,212	0,050
A5	0,051	3,40e-09	2,26e-04	9,26e-04	4,37e-05	1,90e-06	0,720		0,355	0,103
Total A4-A5:	0,289	3,09e-04	0,017	0,004	9,23e-04	1,45e-04	26,863		3,567	0,153
Energía total y emisiones:	54,002	3,12e-04	0,350	0,021	0,172	9,05e-04	765,063	140,759	688,864	4,399

#### 4.11. Informe de impactos ambientales con CYPE.

#### Fortalezas

- Sencillez y rapidez: El procedimiento para obtener el impacto ambiental es notablemente sencillo. Una vez que el elemento constructivo está definido en el proyecto de CYPE, el programa calcula y reporta el impacto ambiental asociado. Esto es un gran ahorro de tiempo y esfuerzo, ya que no requiere que el usuario modele explícitamente el sistema o producto en términos de ACV, que realice una recopilación de datos para el inventario, pues el programa se encarga de este proceso internamente.

Además, al hacerlo a través de Arquímedes o Generador de presupuestos, se pueden medir los impactos de todos los elementos y procesos involucrados en la obra, no solo de un producto.

- Accesibilidad: Una ventaja significativa para el usuario es que no es necesario poseer un conocimiento exhaustivo de las normas UNE-EN ISO de ACV (ISO 14040, 14044, etc.) o de la EN 15804 como en este caso. El software simplifica la aplicación de la metodología, haciendo que la evaluación ambiental sea accesible sin una especialización profunda en ACV.
- Fiabilidad de los resultados: CYPE basa sus cálculos en datos provenientes de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) de fabricantes, datos de asociaciones de fabricantes, estudios de empresas, etc. Esto asegura que los resultados de los impactos ambientales sean verídicos. Además, CYPE trabaja con una gran biblioteca de materiales y sistemas constructivos, vinculados a información ambiental.

### Debilidades y limitaciones

- **Falta de flexibilidad:** La principal limitación de CYPE es que no permite al usuario modelar el sistema o producto de forma personalizada más allá de la configuración predefinida de los elementos o procesos constructivos. Esto significa que solo se puede calcular el ACV de los elementos que el programa ofrece, como es el caso de este estudio donde se han calculado los impactos del panel composite junto al sistema de anclaje y subestructura, sin posibilidad de excluir estos dos últimos elementos o añadir más procesos.
- **Resultados:** La herramienta de CYPE ofrece una visión de ACV muy enfocada en las fases de producción (A1-A3), transporte a obra (A4) e instalación (A5), de acuerdo con la norma EN 15804. El programa no proporciona la flexibilidad para modelar escenarios de la fase de uso (B) o del fin de vida (C1-C4) y los beneficios/cargas más allá del sistema (D) al igual que un software de ACV dedicado.

Además, los indicadores de impacto ambiental de la anulada norma EN15804:2012 por lo que, entre otros, no reporta el GWP desglosado en sus 4 categorías (fósil, biogénico, LULUC y total).

## **4.7. Conclusión de los estudios de ACV**

Gracias a los 3 estudios de ACV y a los resultados obtenidos, junto a sus interpretaciones, y a su realización con programas muy diferentes, con fortalezas y límites marcados, se ha llegado a varias conclusiones.

En primer lugar, se ha concluido que en el panel composite estudiado, y probablemente en todos los paneles composite, la mayor cantidad de emisiones se genera en la etapa de producto, resultado de la extracción de materias primas, su transporte a fábrica y a la fabricación del panel. En los estudios con OpenLCA y Eco Audit, el porcentaje de las emisiones totales en esta etapa es del 86% y 83,8% respectivamente. La EPD del fabricante, proporcionando datos más sólidos, ofrece un porcentaje del 97,35% de las emisiones totales.

Es aquí donde radica la mayor oportunidad de mejoras en el diseño y en la implementación de estrategias en favor de la sostenibilidad. La reducción de emisiones en esta etapa podría llevarse a cabo mediante la elección de materiales con menor huella de carbono o reciclados.

Por otro lado, los resultados obtenidos por OpenLCA y Eco Audit permiten llegar a la conclusión de que el mayor responsable de las emisiones en esta etapa es el aluminio. La comparación entre los materiales usados nos muestra que el aluminio es el responsable del 79.83% (OpenLCA) y 73% (Eco Audit), de las emisiones totales durante su producción primaria.

Es, por tanto, el mejor punto donde aplicar las estrategias de mejora. Realizar el panel con aluminio reciclado supondría una gran reducción de emisiones, ya que se excluyen del ciclo de vida los procesos más contaminantes, como al extracción y producción primaria del aluminio, en medida del porcentaje de aluminio reciclado usado. Además, la energía necesaria en el reciclaje del aluminio es alrededor del 5% de la energía que se requiere en la producción primaria según European Aluminium Association (2010)<sup>25</sup>.

En resumen, la estrategia de usar aluminio reciclado en alto porcentaje para los paneles composites de aluminio, adicionalmente a la reincorporación a la cadena de producción de chatarra resultante de los procesos, reduciría enormemente las emisiones y el uso de energía

<sup>25</sup> European Aluminium Association. (2010). Sustainability of Aluminium in Buildings.

necesarios para su producción. Además, el aluminio es 100% reciclable como indica European Aluminium Association (2010), con la cualidad de que conserva sus propiedades físicas en el proceso, por lo que el panel composite de aluminio reciclado tendría las mismas prestaciones que con aluminio de producción primaria.

## 4.8. Conclusión del análisis de programas

Para este análisis en el que se han comparado y criticado los 3 programas usados ha sido clave, en mi opinión, el panel composite como objeto de estudio. Este producto, al estar formado por varios componentes y requerir de varios procesos para su producción, ha supuesto la complejidad necesaria, al realizar la búsqueda de datos y modelar los sistemas e inventarios, para alcanzar los límites de cada programa, y observar sus fortalezas y debilidades.

Gracias a los estudios, sus resultados, y el análisis, se han llegado a diferentes conclusiones de cada programa, clasificándolos según su utilidad y capacidades para distintos tipos de usuario:

Para un usuario estudiante de arquitectura, e interesado en la sostenibilidad y en las estrategias de ecodiseño, Granta EduPack es el mejor programa para la iniciación en este ámbito. Como se ha comentado, el software está enfocado a la enseñanza y es ampliamente usado en universidades. La herramienta usada, Eco Audit, tiene una interfaz fácil de utilizar, y permite la iniciación en la sostenibilidad y en el Análisis del Ciclo de Vida sin la necesidad de realizar búsquedas de datos complejas. Además, permite modelar el sistema de forma intuitiva paso por paso, lo que se traduce en realizar el ACV de una forma simplificada sin necesidad de aprenderse la metodología proporcionada por las normas.

Por otro lado, aunque se han criticado ciertas limitaciones en la comunicación de los resultados, estos se ofrecen de una manera sencilla para su rápida interpretación, comparación e identificación de puntos de mejora en el ciclo de vida, siendo este uno de los puntos más importantes en el ámbito de la arquitectura sostenible.

En cuanto OpenLCA, no es necesario asegurar que es el mejor programa, de los usados en este estudio, para un usuario profesional encargado de realizar estudios de ACV. Sin embargo, es importante aclarar que se trata de un software gratuito, y que otros programas como SimaPro o GaBi, son más usados a nivel mundial en la realización de ACV y Declaraciones Ambientales de Producto.

Es por esto que, aunque es un software profesional y requiere de mucha preparación para realizar el estudio, también puede llegar a ser una gran herramienta para la enseñanza, pues al permitir realizar el sistema entero, se puede observar de primera mano cómo las elecciones basadas en estrategias sostenibles afectan a los resultados del estudio.

Para un usuario medio, cuya profesión está relacionada con el mundo de la arquitectura y la construcción, y que tiene cierto conocimiento de las normas, la mejor fuente de información son las Declaraciones Ambientales de Producto. Proporcionan la información actualizada del producto, mediante un ACV realizado por el fabricante o asociación, y verificada por terceros.

No requiere de un gran conocimiento de las normas, pues solo basta con saber que significa cada indicador e interpretar los resultados, y su metodología y enfoque armonizado permite la comparación entre diferentes productos, permitiendo tomar las mejores decisiones e implementar estrategias sostenibles.

Para terminar, el módulo de ACV incluido en el software CYPE es, sin duda, la herramienta con menos prestaciones de las tres analizadas. Aunque no requiere de una búsqueda y recopilación de datos, establecer el sistema, modelar el inventario, etc., los datos que ofrece son los mismos que una DAP, solo que con indicadores de la norma EN15804 anulada, lo que no permite su comparación con DAP de fabricantes. Además, los resultados solo se ofrecen en las dos primeras etapas del ciclo de vida, omitiendo la información y los impactos ambientales del resto de módulos.

## CAPÍTULO 5. ESTUDIO 2: ESTUDIOS DE ACV CON ALUMINIO RECICLADO

Para este estudio se realizarán, con OpenLCA dos ACV de paneles composite, implementando a la estrategia de usar aluminio reciclado en diferentes porcentajes y se compararán con los resultados del primer estudio, con el objetivo de evaluar las reducciones en el GWP en ambos casos.

Los dos estudios de ACV de paneles composite con aluminio reciclado, en porcentajes del 50% y 100%, se realizarán siguiendo la misma metodología, directrices y normas (ISO 14040/14044) así como las RCP (EN 15804) del primer estudio.

### 5.1. Panel composite con 50% de aluminio reciclado

Se procede a realizar a continuación el Análisis del Ciclo de Vida de un panel composite de aluminio usando 50% de aluminio primario, y 50% de aluminio secundario.

#### 5.1.1. Análisis del Ciclo de Vida

Para realizar el Análisis del Ciclo de Vida con OpenLCA, se han seguido las normas internacionales UNE-EN ISO 14040 e UNE-EN ISO 14044, que establecen los principios y el marco metodológico, así como los requisitos y directrices para llevar a cabo un ACV.

Adicionalmente, el estudio se ha guiado por las especificaciones y Reglas de Categoría de Producto (RCP) establecidas en la norma EN 15804, fundamental para los productos de la construcción, asegurando la armonización de la evaluación y la comparabilidad de los resultados.

##### 5.1.1.1. Definición del objetivo y el alcance

###### Objetivo del estudio

El objetivo es el análisis del Potencial de Calentamiento Global de revestimientos de fachada para la realización de un TFG, comparando los impactos ambientales producidos por el uso de aluminio reciclado en los paneles composite. Los resultados se harán públicos en el Archivo Digital UPM, y estarán a libre disposición del público. Este estudio del ACV entre productos de construcción no pretende ser una Declaración Ambiental de Producto real ni profesional, ni tener validez.

###### Alcance

Función principal: revestimiento de fachada.

Unidad declarada: revestimiento de 1 m<sup>2</sup> de fachada de un edificio de uso docente considerando una vida útil del edificio de 50 años.

Descripción del producto analizado: Para el estudio, se utilizan las características del Panel Composite STACBOND FR de 4mm de espesor, con variaciones en la composición.

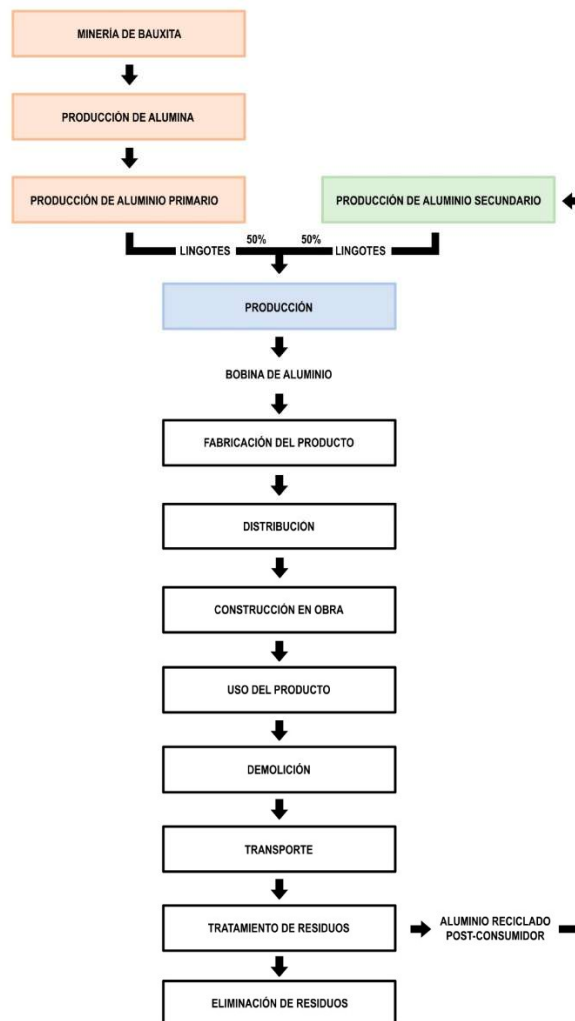
Está compuesto por una lámina de aluminio 5005 de 0,5mm de espesor lacada con una pintura PVDF 70/30 (70% de fluoruro de polivinilideno (PVDF) y un 30% de resina acrílica), un núcleo de resinas termoplásticas (polietileno de baja densidad y compuestos retardantes de llama), y una lámina interior de aluminio 3105/3005 de 0,5mm de espesor. El aluminio será 50% de producción primaria, y 50% reciclado.

El peso total de 1 m<sup>2</sup> de panel es de 9.3 kg, la densidad del núcleo es de 1,50±0,15 g/cm<sup>3</sup> y la densidad de las aleaciones de aluminio es de 2700 kg/m<sup>3</sup>.

De la misma forma, se estudiará el impacto producido por los materiales de embalaje, tal y como vienen especificados en la EPD.

Vida útil de referencia: no es relevante para los escenarios estudiados y los límites del sistema.

Límites del sistema: Basándome en la norma EN 15804, se estudian los módulos A1-A3 (etapa de producto), A4 (transporte a obra) y C1-C4 (etapa de fin de vida) del ciclo de vida, en un enfoque de “cuna a puerta con opciones”, omitiendo el módulo D ya que no se dispone de los datos necesarios para su estudio. Se omite el módulo A5 (proceso de construcción - instalación) por asunción de consumo de energía insignificante y falta de datos de procesos relacionados.



5.1. Diagrama del ciclo de vida del aluminio utilizado en el estudio. 50% primario, 50% reciclado.

Suposiciones de partida: Solo se incluyen en el estudio los procesos directamente relacionados con la producción, proceso de construcción y fin de vida del producto, quedando fuera del sistema procesos relacionados con la producción de la maquinaria usada, impacto de las infraestructuras y personal, etc.

Limitaciones y calidad de los datos: la base de datos utilizada es ELCD 3.2. Debido a que es una base de datos genéricos, y muchos de los procesos que intervienen en el ACV del objeto de estudio no se encuentran en la base de datos utilizada, dichos datos se obtienen de bases de datos alternativas (como GaBi Database), o se cambian por procesos genéricos existentes en la base de datos usada.

También es importante aclarar que estos datos tienen una representatividad temporal limitada, pues los años de recolección varían notablemente, pudiendo afectar a la calidad general de los resultados.

De igual forma, la localización de los datos es también importante para la calidad de los resultados, pues la situación geográfica puede variar en aspectos como la disponibilidad de recursos, la producción de energía, el uso de tecnologías, e incluso aspectos políticos. Debido a la limitación en la obtención de datos y procesos, estos tienen una variabilidad notable, aunque casi todos se han recogido en el ámbito europeo.

#### **5.1.1.2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)**

Para realizar el inventario se ha recopilado información principalmente de la Declaración Ambiental de Producto del Panel Composite STACBOND FR, y en menor medida de otros fabricantes para la información no especificada en la mencionada DAP. También se tienen en cuenta los datos agregados a los procesos, o sistemas de productos, de la base de datos utilizada.

Para el análisis y la construcción del inventario se han asumido diferentes hipótesis y decisiones debido a la falta de datos, como se ha explicado anteriormente:

- Láminas de aluminio: para este estudio, como ya se ha explicado, el 50% del aluminio será de producción primaria, y el 50% restante será aluminio reciclado, asumiendo que se trata de chatarra post-consumo. Para este último, debido a la limitación de datos, se considera el proceso de reciclaje de la chatarra de aluminio resultante de los procesos en producción primaria.
- Núcleo de resinas termoplásticas: ante la ausencia de datos relacionados con los “compuestos retardantes de llama”, se utiliza únicamente el proceso de producción de PE-LD granulado, asumiendo una proporción del 30% de este material. A su vez, se tiene en cuenta la electricidad utilizada en su extrusión para formar el núcleo.
- Adhesivo: al no especificarse el adhesivo usado en el panel composite, se asume que se trata de un film adhesivo de polietileno de baja densidad.
- Madera: al no especificarse el tipo de madera, se asume que es madera de pino.
- Cartón: se usa un proceso genérico de producción de cartón con un 54% de fibras recuperadas.
- En general, para el resto de los materiales, se usan procesos genéricos para su producción, a falta de procesos y datos exactos.
- Mix eléctrico. Se usa un mix eléctrico para bajo voltaje genérico, diferente al del fabricante.
- La energía usada como recurso en los módulos A1 y A2 se considera incorporada en la información de los procesos de producción y transporte de los materiales hasta la fábrica. Solo se pone como entrada la energía usada en el módulo A3, cuyo dato proviene de la EPD.
- Transporte: ante la falta de camiones EURO 5 en la base de datos, se ha utilizado un proceso genérico de mix de camiones EURO 1, 2, 3, 4.

- El uso de agua fresca como recurso en los módulos A1 y A2 se considera incorporada en la información de los procesos de producción y transporte de los materiales hasta la fábrica. Para el resto de los módulos, los datos provienen de la EPD.

#### Fases del inventario:

- Fase 1. Construcción del inventario: Para los módulos A1-A3 se han recopilado datos de la EPD sobre los materiales y procesos llevados a cabo para la producción del panel composite. También se han tenido en cuenta los recursos usados durante esta etapa, como la energía o el uso de agua.
- Fase 2. Módulo A4: Se considera una distancia para el transporte a obra de 400km, desde la fábrica en Parandones, León, hasta la ETSAM, Madrid. La localización de la fábrica se ha extraído de la EPD.
- Fase 4. Módulo C2: El transporte se realiza a lo largo de 50km según los datos de la EPD.
- Fase 5. Módulos C3-C4: Se considera una tasa de reciclaje del 89%, y el 11% restante termina en vertedero, según los datos de la EPD. Al no encontrar datasets con datos del reciclaje del polietileno de baja densidad, se asume solo el reciclaje del aluminio.
- Fase 3. Modelado del sistema: Se establecen las entradas de materiales y recursos en el inventario haciendo uso de las bases de datos. Para algunos materiales se ha requerido de la construcción de sistemas de producto específicos para la producción de dichos materiales. Estos "subsistemas", modelados de forma independiente, fueron integrados posteriormente como entradas al sistema del panel composite.

En el caso del PVDF 70/30, formado por fluoruro de polivinilideno y resina acrílica, su sistema se construye mediante los procesos de producción de ambas sustancias, en una proporción del 70% y 30% respectivamente.

En el caso del film adhesivo, el sistema se modela mediante el proceso de producción del polietileno de baja densidad granulado y su posterior proceso de extrusión.

En la siguiente tabla se muestran las entradas de los materiales considerados en el estudio, para 1m<sup>2</sup> de panel composite, especificando a que procesos de la base de datos corresponden.

MATERIAL / ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	BASE DE DATOS	UNIDADES	CANTIDAD
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (NÚCLEO) / PE-LD	Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant	ELCD 3.2.	kg	1,572
LÁMINA DE ALUMINIO (PRODUCCIÓN PRIMARIA)	1) Aluminium ingot mix (high purity), single route, at plant, primary production, aluminium casting, 2.7 g/cm <sup>3</sup> , >99% Al  2) Aluminium sheet rolling, single route, at plant, primary production, aluminium, 2.7 g/cm <sup>3</sup>	1) GaBi  2) GaBi	kg	1,835
LÁMINA DE ALUMINIO (RECICLADO)	1) Recycling of aluminium into aluminium ingot - from pre-consumer, production mix, at plant, collection, transport, pretreatment, remelting, aluminium waste, efficiency 99%  2) Aluminium sheet rolling, single route, at plant, primary production, aluminium, 2.7 g/cm <sup>3</sup>	1) GaBi  2) GaBi	kg	1,835
FLUORURO DE POLIVINILIDENO (LACA) / PVDF 70/30	1) Polyvinylidene fluoride (PVDF), production mix, at plant, polymerisation of vinyl fluoride, 1.76 g/cm <sup>3</sup>	1) GaBi  2) Ecoinvent	kg	0,231

	2) Acrylic resin, Production mix, at plant, Technology mix			
ADHESIVO	1) Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant 2) Film extrusion (blowing), production mix, at plant, plastic extrusion, for PP, PE, PVC, PET and PS	1) ELCD 3.2. 2) GaBi	kg	0,16
FILM	Plastic, stretch film, production mix, at plant, raw material production, plastic extrusion, thickness: 30 µm, grammage: 0,02754 kg/m <sup>2</sup>	GaBi	m <sup>2</sup>	1,01
MADERA	Pine wood, production mix, at saw mill, timber, 40% water content	GaBi	kg	0,00029
CARTÓN	Cartonboard sheets; mixed technology; production mix, at plant; 46% primary fibre, 54% recovered fibre (en)	ELCD 3.2.	kg	0,0468
<i>Se ha optado por no traducir las descripciones para facilitar su búsqueda en las bases de datos correspondientes.</i>				
<i>*1) y 2) es el orden de los procesos en los sistemas de producto específicos para la producción esos materiales.</i>				

Tabla 5.1. Entradas del inventario del ACV de panel composite con 50% de aluminio reciclado, por módulos.

En la siguiente tabla se muestran las entradas de los procesos relacionados con la energía, el agua y el transporte, especificando a que procesos de la base de datos corresponden.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	BASE DE DATOS	UNIDADES	CANTIDAD
ENERGÍA	Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, < 1kV	ELCD 3.2.	MJ	A1-A3: 1,294 A4: 0 C1: 0,178 C2: 0 C3-C4: 4,452
TRANSPORTE	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload	ELCD 3.2.	kg*km	A1-A3: 0 A4: 9,3*400 C1: 0 C2: 9,3*50 C3-C4: 0
AGUA FRESCA	Elementary flows/Resource/from water	ELCD 3.2.	m <sup>3</sup>	A1-A3: 0,000169 A4: 0 C1: 0,000127 C2: 0,000095 C3-C4: 0,0175
<i>Se ha optado por no traducir las descripciones para facilitar su búsqueda en las bases de datos correspondientes.</i>				

Tabla 5.2. Entradas de recursos del inventario del ACV de panel composite con 50% de aluminio reciclado, por módulos.

Como se ha comentado anteriormente, la calidad de los datos del inventario puede afectar a los resultados. Es necesario aclarar los límites de los datos de los procesos utilizados para modelar el sistema, pues es muy importante que estos contengan la información necesaria para que el estudio realmente abarque un sistema de “cuna a tumba”.

Para ello se especifica, gracias a la descripción incorporada en los datasets de los procesos utilizados, cuales de estos incluyen los datos anteriores a la producción del material, en un alcance “cuna a puerta” (extracción de materias primas, transporte, etc.), o por el contrario no se incluyen, con un alcance “puerta a puerta”.

También, como se ha explicado anteriormente, la localización geográfica ha de tenerse en cuenta para la calidad del estudio, pues conlleva diversos factores que afectan a este. Ignorar la especificidad geográfica puede conducir a resultados, interpretaciones y conclusiones erróneos.

Las especificaciones previas se detallan mediante la siguiente tabla, junto a los materiales y datos correspondientes:

MATERIAL / ABREVIATURA	PROCESO*	ALCANCE	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (NÚCLEO) / PE-LD	Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant	"Cuna a puerta", especificado en su descripción.	Europa
LÁMINA DE ALUMINIO (PRODUCCIÓN PRIMARIA)	1) Aluminium ingot mix (high purity), single route, at plant, primary production, aluminium casting, 2.7 g/cm <sup>3</sup> , >99% Al 2) Aluminium sheet rolling, single route, at plant, primary production, aluminium, 2.7 g/cm <sup>3</sup>	1) "Cuna a puerta", especificado en su descripción. 2) Es el proceso de laminación, los datos de la materia y recursos son los de 1).	Europa
LÁMINA DE ALUMINIO (RECICLADO)	1) Recycling of aluminium into aluminium ingot - from pre-consumer, production mix, at plant, collection, transport, pretreatment, remelting, aluminium waste, efficiency 99% 2) Aluminium sheet rolling, single route, at plant, primary production, aluminium, 2.7 g/cm <sup>3</sup>	1) "Cuna a puerta", especificado en su descripción. 2) Es el proceso de laminación, los datos de la materia y recursos son los de 1).	Europa
FLUORURO DE POLIVINILIDENO (LACA) / PVDF 70/30	1) Polyvinylidene fluoride (PVDF), production mix, at plant, polymerisation of vinyl fluoride, 1.76 g/cm <sup>3</sup> 2) Acrylic resin, Production mix, at plant, Technology mix	1) "Cuna a puerta", especificado en su descripción. 2) "Cuna a puerta", especificado en su descripción.	1) Mundial 2) Europa
ADHESIVO	1) Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant 2) Film extrusion (blowing), production mix, at plant, plastic extrusion, for PP, PE, PVC, PET and PS	1) "Cuna a puerta", especificado en su descripción. 2) Es el proceso de extrusión, los datos de la materia y recursos son los de 1).	1) Europa 2) Europa
FILM	Plastic, stretch film, production mix, at plant, raw material production, plastic extrusion, thickness: 30 µm, grammage: 0,02754 kg/m <sup>2</sup>	"Cuna a puerta", especificado en su descripción.	Europa
MADERA	Pine wood, production mix, at saw mill, timber, 40% water content	Incluye el transporte del tronco tras su tala, pero no la extracción de la madera.	Alemania
CARTÓN	Cartonboard sheets; mixed technology; production mix, at plant; 46% primary fibre, 54% recovered fibre (en)	"Cuna a puerta", especificado en su descripción.	Europa
ENERGÍA	Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, < 1kV		Europa
TRANSPORTE	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload		Europa
Se ha optado por no traducir el nombre de cada proceso para facilitar su búsqueda en las bases de datos correspondientes.			
*Aunque el proceso contenga términos como que "at plant" o "at saw mill", en la descripción incluida en el dataset especifican que alcance tienen los datos incorporados.			

Tabla 5.3. Especificaciones del inventario del ACV de panel composite con 50% de aluminio reciclado, por módulos.

### 5.1.1.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

Para el EICV se escogen las categorías de impacto según los parámetros ambientales básicos, siendo estos los indicadores obligados por la norma EN 15804.

Como este estudio se ha centrado exclusivamente en la evaluación del Potencial de Calentamiento Global (GWP) como único indicador de impacto ambiental, la metodología usada para la clasificación y caracterización de dicho impacto es la incorporada en la base de datos ELCD 3.2., llamada "EN 15804 +A2 Method", la cual implementa el conjunto de factores de caracterización del modelo base de 100 años del IPCC tal y como indica la norma para dicho indicador.

## 5.1.2. Resultados

Como se expone en la definición del objetivo, el propósito de la realización de este ACV es el análisis del Potencial de Calentamiento Global de un panel composite como recubrimiento de fachada. Por ello, los resultados del ACV, presentes en la siguiente tabla, solo proporcionan los indicadores de GWP (fósil, biogénico, LULUC y total), de acuerdo con el alcance definido.

ACV PANEL COMPOSITE 50% DE ALUMINIO RECICLADO

INDICADOR	Unidad	A1-A3	A4	C1	C2	C3	C4
GWP-FÓSIL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	3,053e+1	1,19e-1	2,98e-2	3,09e-2	4,07	3,5e-2
GWP-BIOGÉNICO	Kg CO <sub>2</sub> eq.	-1,28e-1	0	0	0	0	0
GWP-LULUC	Kg CO <sub>2</sub> eq.	9,19e-3	0	0	0	0	0
GWP-TOTAL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	3,041e+1	1,19e-1	2,98e-2	3,09e-2	4,07	3,5e-2

Tabla 5.4. Resultados del ACV de panel composite con 50% de aluminio reciclado. Impactos de GWP por módulo estudiado.

## 5.2. Panel composite con 100% de aluminio reciclado

Se procede a realizar el Análisis del Ciclo de Vida de un panel composite de aluminio, utilizando en su totalidad aluminio 100% reciclado.

### 5.2.1. Análisis del Ciclo de Vida

Para realizar el Análisis del Ciclo de Vida con OpenLCA, se han seguido las normas internacionales UNE-EN ISO 14040 e UNE-EN ISO 14044, que establecen los principios y el marco metodológico, así como los requisitos y directrices para llevar a cabo un ACV.

Adicionalmente, el estudio se ha guiado por las especificaciones y Reglas de Categoría de Producto (RCP) establecidas en la norma EN 15804, fundamental para los productos de la construcción, asegurando la armonización de la evaluación y la comparabilidad de los resultados.

#### 5.2.1.1. Definición del objetivo y el alcance

##### Objetivo del estudio

El objetivo es el análisis del Potencial de Calentamiento Global de revestimientos de fachada para la realización de un TFG, comparando los impactos ambientales producidos por el uso de aluminio reciclado en los paneles composite. Los resultados se harán públicos en el Archivo Digital UPM, y estarán a libre disposición del público. Este estudio del ACV entre productos de construcción no pretende ser una Declaración Ambiental de Producto real ni profesional, ni tener validez.

### Alcance

Función principal: revestimiento de fachada.

Unidad declarada: revestimiento de 1 m<sup>2</sup> de fachada de un edificio de uso docente considerando una vida útil del edificio de 50 años.

Descripción del producto analizado: Para el estudio, se utilizan las características del Panel Composite STACBOND FR de 4mm de espesor, con variaciones en la composición.

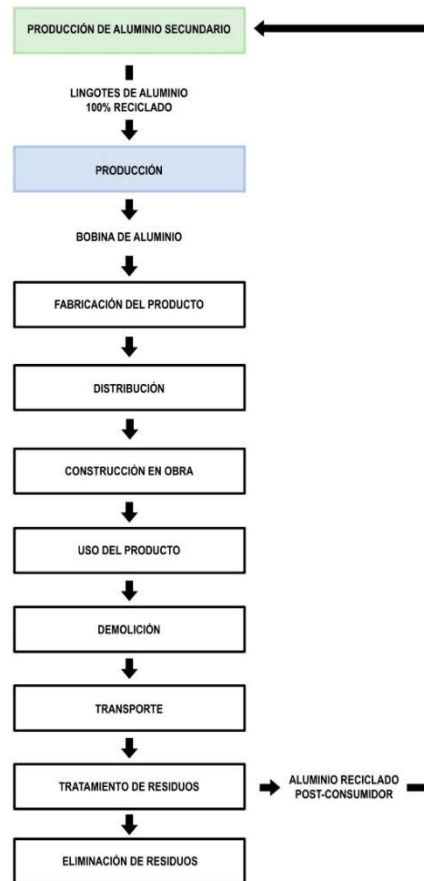
Está compuesto por una lámina de aluminio 5005 de 0,5mm de espesor lacada con una pintura PVDF 70/30 (70% de fluoruro de polivinilideno (PVDF) y un 30% de resina acrílica), un núcleo de resinas termoplásticas (polietileno de baja densidad y compuestos retardantes de llama), y una lámina interior de aluminio 3105/3005 de 0,5mm de espesor. El aluminio será 100% reciclado.

El peso total de 1 m<sup>2</sup> de panel es de 9.3 kg, la densidad del núcleo es de 1,50±0,15 g/cm<sup>3</sup> y la densidad de las aleaciones de aluminio es de 2700 kg/m<sup>3</sup>.

De la misma forma, se estudiará el impacto producido por los materiales de embalaje, tal y como vienen especificados en la EPD.

Vida útil de referencia: no es relevante para los escenarios estudiados y los límites del sistema.

Límites del sistema: Basándome en la norma EN 15804, se estudian los módulos A1-A3 (etapa de producto), A4 (transporte a obra) y C1-C4 (etapa de fin de vida) del ciclo de vida, en un enfoque de "cuna a puerta con opciones", omitiendo el módulo D ya que no se dispone de los datos necesarios para su estudio. Se omite el módulo A5 (proceso de construcción - instalación) por asunción de consumo de energía insignificante y falta de datos de procesos relacionados.



5.2. Diagrama del ciclo de vida del aluminio utilizado en el estudio. 100% reciclado.

Suposiciones de partida: Solo se incluyen en el estudio los procesos directamente relacionados con la producción, proceso de construcción y fin de vida del producto, quedando fuera del sistema procesos relacionados con la producción de la maquinaria usada, impacto de las infraestructuras y personal, etc.

Limitaciones y calidad de los datos: la base de datos utilizada es ELCD 3.2. Debido a que es una base de datos genéricos, y muchos de los procesos que intervienen en el ACV del objeto de estudio no se encuentran en la base de datos utilizada, dichos datos se obtienen de bases de datos alternativas (como GaBi Database), o se cambian por procesos genéricos existentes en la base de datos usada.

También es importante aclarar que estos datos tienen una representatividad temporal limitada, pues los años de recolección varían notablemente, pudiendo afectar a la calidad general de los resultados.

De igual forma, la localización de los datos es también importante para la calidad de los resultados, pues la situación geográfica puede variar en aspectos como la disponibilidad de recursos, la producción de energía, el uso de tecnologías, e incluso aspectos políticos. Debido a la limitación en la obtención de datos y procesos, estos tienen una variabilidad notable, aunque casi todos se han recogido en el ámbito europeo.

### 5.2.1.2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)

Para realizar el inventario se ha recopilado información principalmente de la Declaración Ambiental de Producto del Panel Composite STACBOND FR, y en menor medida de otros fabricantes para la información no especificada en la mencionada DAP. También se tienen en cuenta los datos agregados a los procesos, o sistemas de productos, de la base de datos utilizada.

Para el análisis y la construcción del inventario se han asumido diferentes hipótesis y decisiones debido a la falta de datos, como se ha explicado anteriormente:

- Láminas de aluminio: para este estudio, como ya se ha explicado, se utilizará aluminio 100% reciclado para el panel, asumiendo que este aluminio se trata de chatarra post-consumo. Debido a la limitación de datos, se considera el proceso de reciclaje de la chatarra de aluminio resultante de los procesos en producción primaria.
- Núcleo de resinas termoplásticas: ante la ausencia de datos relacionados con los “compuestos retardantes de llama”, se utiliza únicamente el proceso de producción de PE-LD granulado. A su vez, se tiene en cuenta la electricidad utilizada en su extrusión para formar el núcleo.
- Adhesivo: al no especificarse el adhesivo usado en el panel composite, se asume que se trata de un film adhesivo de polietileno de baja densidad.
- Madera: al no especificarse el tipo de madera, se asume que es madera de pino.
- Cartón: se usa un proceso genérico de producción de cartón con un 54% de fibras recuperadas.
- En general, para el resto de los materiales, se usan procesos genéricos para su producción, a falta de procesos y datos exactos.
- Mix eléctrico. Se usa un mix eléctrico para bajo voltaje genérico, diferente al del fabricante.
- La energía usada como recurso en los módulos A1 y A2 se considera incorporada en la información de los procesos de producción y transporte de los materiales hasta la fábrica. Solo se pone como entrada la energía usada en el módulo A3, cuyo dato proviene de la EPD.
- Transporte: ante la falta de camiones EURO 5 en la base de datos, se ha utilizado un proceso genérico de mix de camiones EURO 1, 2, 3, 4.
- El uso de agua fresca como recurso en los módulos A1 y A2 se considera incorporada en la información de los procesos de producción y transporte de los materiales hasta la fábrica. Para el resto de los módulos, los datos provienen de la EPD.

#### Fases del inventario:

- Fase 1. Construcción del inventario: Para los módulos A1-A3 se han recopilado datos de la EPD sobre los materiales y procesos llevados a cabo para la producción del panel composite. También se han tenido en cuenta los recursos usados durante esta etapa, como la energía o el uso de agua.
- Fase 2. Módulo A4: Se considera una distancia para el transporte a obra de 400km, desde la fábrica en Parandones, León, hasta la ETSAM, Madrid. La localización de la fábrica se ha extraído de la EPD.
- Fase 4. Módulo C2: El transporte se realiza a lo largo de 50km según los datos de la EPD.
- Fase 5. Módulos C3-C4: Se considera una tasa de reciclaje del 89%, y el 11% restante termina en vertedero, según los datos de la EPD. Al no encontrar datasets con datos del reciclaje del polietileno de baja densidad, se asume solo el reciclaje del aluminio.
- Fase 3. Modelado del sistema: Se establecen las entradas de materiales y recursos en el inventario haciendo uso de las bases de datos. Para algunos materiales se ha requerido de la construcción de sistemas de producto específicos para la producción de

dichos materiales. Estos “subsistemas”, modelados de forma independiente, fueron integrados posteriormente como entradas al sistema del panel composite.

En el caso del PVDF 70/30, formado por fluoruro de polivinilideno y resina acrílica, su sistema se construye mediante los procesos de producción de ambas sustancias, en una proporción del 70% y 30% respectivamente.

En el caso del film adhesivo, el sistema se modela mediante el proceso de producción del polietileno de baja densidad granulado y su posterior proceso de extrusión.

En la siguiente tabla se muestran las entradas de los materiales considerados en el estudio, para 1m<sup>2</sup> de panel composite, especificando a que procesos de la base de datos corresponden.

MATERIAL / ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	BASE DE DATOS	UNIDADES	CANTIDAD
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (NÚCLEO) / PE-LD	Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant	ELCD 3.2.	kg	1,572
LÁMINA DE ALUMINIO (100% RECICLADO)	1) Recycling of aluminium into aluminium ingot - from pre-consumer, production mix, at plant, collection, transport, pretreatment, remelting, aluminium waste, efficiency 99%  2) Aluminium sheet rolling, single route, at plant, primary production, aluminium, 2.7 g/cm <sup>3</sup>	1) GaBi 2) GaBi	kg	3,67
FLUORURO DE POLIVINILIDENO (LACA) / PVDF 70/30	1) Polyvinylidene fluoride (PVDF), production mix, at plant, polymerisation of vinyl fluoride, 1.76 g/cm <sup>3</sup>  2) Acrylic resin, Production mix, at plant, Technology mix	1) GaBi 2) Ecoinvent	kg	0,231
ADHESIVO	1) Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant  2) Film extrusion (blowing), production mix, at plant, plastic extrusion, for PP, PE, PVC, PET and PS	1) ELCD 3.2. 2) GaBi	kg	0,16
FILM	Plastic, stretch film, production mix, at plant, raw material production, plastic extrusion, thickness: 30 µm, grammage: 0,02754 kg/m <sup>2</sup>	GaBi	m <sup>2</sup>	1,01
MADERA	Pine wood, production mix, at saw mill, timber, 40% water content	GaBi	kg	0,00029
CARTÓN	Cartonboard sheets; mixed technology; production mix, at plant; 46% primary fibre, 54% recovered fibre (en)	ELCD 3.2.	kg	0,0468
<i>Se ha optado por no traducir las descripciones para facilitar su búsqueda en las bases de datos correspondientes.</i>				
<i>*1) y 2) es el orden de los procesos en los sistemas de producto específicos para la producción esos materiales.</i>				

Tabla 5.5. Entradas del inventario del ACV de panel composite con 100% de aluminio reciclado, por módulos.

En la siguiente tabla se muestran las entradas de los procesos relacionados con la energía, el agua y el transporte, especificando a que procesos de la base de datos corresponden.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	BASE DE DATOS	UNIDADES	CANTIDAD
ENERGÍA	Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, < 1kV	ELCD 3.2.	MJ	A1-A3: 1,294 A4: 0 C1: 0,178

				C2: 0 C3-C4: 4,452
TRANSPORTE	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload	ELCD 3.2.	kg*km	A1-A3: 0 A4: 9,3*400 C1: 0 C2: 9,3*50 C3-C4: 0
AGUA FRESCA	Elementary flows/Resource/from water	ELCD 3.2.	m <sup>3</sup>	A1-A3: 0,000169 A4: 0 C1: 0,000127 C2: 0,000095 C3-C4: 0,0175
<i>Se ha optado por no traducir las descripciones para facilitar su búsqueda en las bases de datos correspondientes.</i>				

Tabla 5.6. Entradas de recursos del inventario del ACV de panel composite con 100% de aluminio reciclado, por módulos.

Como se ha comentado anteriormente, la calidad de los datos del inventario puede afectar a los resultados. Es necesario aclarar los límites de los datos de los procesos utilizados para modelar el sistema, pues es muy importante que estos contengan la información necesaria para que el estudio realmente abarque un sistema de “cuna a tumba”.

Para ello se especifica, gracias a la descripción incorporada en los datasets de los procesos utilizados, cuales de estos incluyen los datos anteriores a la producción del material, en un alcance “cuna a puerta” (extracción de materias primas, transporte, etc.), o por el contrario no se incluyen, con un alcance “puerta a puerta”.

También, como se ha explicado anteriormente, la localización geográfica ha de tenerse en cuenta para la calidad del estudio, pues conlleva diversos factores que afectan a este. Ignorar la especificidad geográfica puede conducir a resultados, interpretaciones y conclusiones erróneos.

Las especificaciones previas se detallan mediante la siguiente tabla, junto a los materiales y datos correspondientes:

MATERIAL / ABREVIATURA	PROCESO*	ALCANCE	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA
POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (NÚCLEO) / PE-LD	Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant	“Cuna a puerta”, especificado en su descripción.	Europa
LÁMINA DE ALUMINIO (100% RECICLADO)	1) Recycling of aluminium into aluminium ingot - from pre-consumer, production mix, at plant, collection, transport, pretreatment, remelting, aluminium waste, efficiency 99% 2) Aluminium sheet rolling, single route, at plant, primary production, aluminium, 2.7 g/cm <sup>3</sup>	1) “Cuna a puerta”, especificado en su descripción. 2) Es el proceso de laminación, los datos de la materia y recursos son los de 1).	Europa
FLUORURO DE POLIVINILIDENO (LACA) / PVDF 70/30	1) Polyvinylidene fluoride (PVDF), production mix, at plant, polymerisation of vinyl fluoride, 1.76 g/cm <sup>3</sup> 2) Acrylic resin, Production mix, at plant, Technology mix	1) “Cuna a puerta”, especificado en su descripción. 2) “Cuna a puerta”, especificado en su descripción.	1) Mundial 2) Europa
ADHESIVO	1) Polyethylene low density granulate (PE-LD), production mix, at plant	1) “Cuna a puerta”, especificado en su descripción.	1) Europa 2) Europa

	2) Film extrusion (blowing), production mix, at plant, plastic extrusion, for PP, PE, PVC, PET and PS	2) Es el proceso de extrusión, los datos de la materia y recursos son los de 1).	
FILM	Plastic, stretch film, production mix, at plant, raw material production, plastic extrusion, thickness: 30 µm, grammage: 0,02754 kg/m2	"Cuna a puerta", especificado en su descripción.	Europa
MADERA	Pine wood, production mix, at saw mill, timber, 40% water content	Incluye el transporte del tronco tras su tala, pero no la extracción de la madera.	Alemania
CARTÓN	Cartonboard sheets; mixed technology; production mix, at plant; 46% primary fibre, 54% recovered fibre (en)	"Cuna a puerta", especificado en su descripción.	Europa
ENERGÍA	Electricity Mix, consumption mix, at consumer, AC, < 1kV		Europa
TRANSPORTE	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload		Europa
<p><i>Se ha optado por no traducir el nombre de cada proceso para facilitar su búsqueda en las bases de datos correspondientes.</i></p> <p><i>*Aunque el proceso contenga términos como que "at plant" o "at saw mill", en la descripción incluida en el dataset especifican que alcance tienen los datos incorporados.</i></p>			

Tabla 5.7. Especificaciones del inventario del ACV de panel composite con 100% de aluminio reciclado, por módulos.

### 5.2.1.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

Para el EICV se escogen las categorías de impacto según los parámetros ambientales básicos, siendo estos los indicadores obligados por la [norma EN 15804](#).

Como este estudio se ha centrado exclusivamente en la evaluación del Potencial de Calentamiento Global (GWP) como único indicador de impacto ambiental, la metodología usada para la clasificación y caracterización de dicho impacto es la incorporada en la base de datos ELCD 3.2., llamada "EN 15804 +A2 Method", la cual implementa el conjunto de factores de caracterización del modelo base de 100 años del IPCC tal y como indica la [norma](#) para dicho indicador.

## 5.2.2. Resultados

Como se expone en la definición del objetivo, el propósito de la realización de este ACV es el análisis del Potencial de Calentamiento Global de un panel composite como recubrimiento de fachada. Por ello, los resultados del ACV, presentes en la siguiente tabla, solo proporcionan los indicadores de GWP (fósil, biogénico, LULUC y total), de acuerdo con el alcance definido.

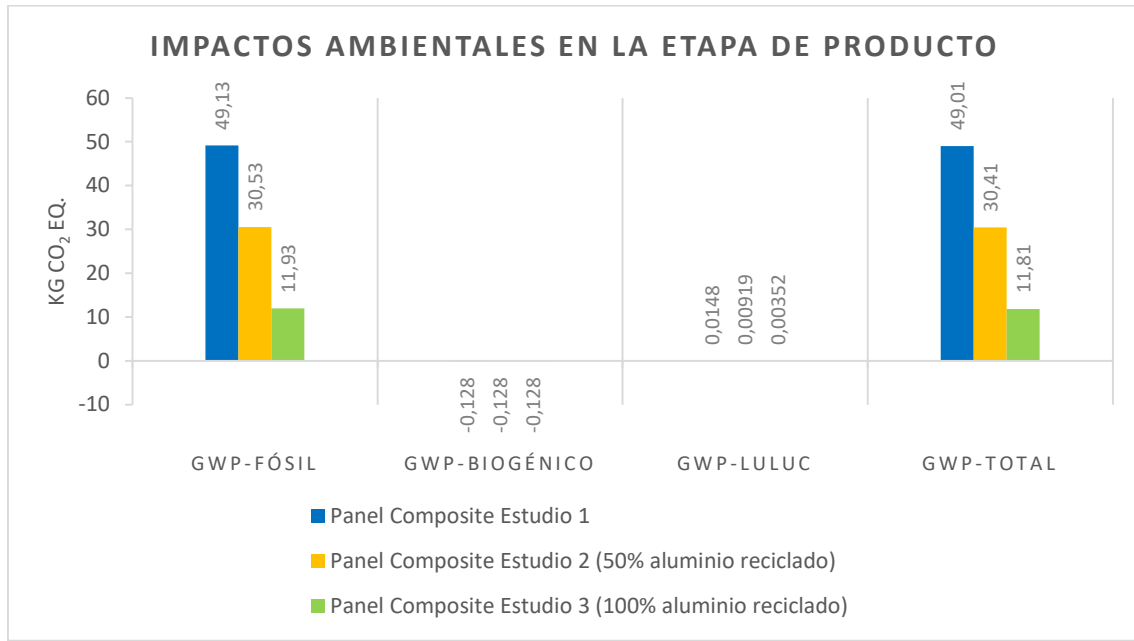
**ACV PANEL COMPOSITE 100% DE ALUMINIO RECICLADO**

INDICADOR	Unidad	A1-A3	A4	C1	C2	C3	C4
<b>GWP-FÓSIL</b>	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,193e+1	1,19e-1	2,98e-2	3,09e-2	4,07	3,5e-2
<b>GWP-BIOGÉNICO</b>	Kg CO <sub>2</sub> eq.	-1,28e-1	0	0	0	0	0
<b>GWP-LULUC</b>	Kg CO <sub>2</sub> eq.	3,52e-3	0	0	0	0	0
<b>GWP-TOTAL</b>	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,181e+1	1,19e-1	2,98e-2	3,09e-2	4,07	3,5e-2

Tabla 5.8. Resultados del ACV de panel composite con 100% de aluminio reciclado. Impactos de GWP por módulo estudiado.

### 5.3. Análisis de resultados

Se lleva a cabo a continuación el análisis de los tres ACV de paneles composite realizados con OpenLCA, cuyos resultados se encuentran en las tablas X, X y X. Para ello, se ha elaborado un gráfico donde se muestran los resultados de las cuatro categorías de GWP durante la fase de producto (A1-A3), ya que en el resto de las fases no hay diferencia en los resultados.



5.3. Gráfico de comparación de resultados de los tres estudios de ACV con OpenLCA.

Se observa una gran diferencia entre los tres estudios en el GWP-fósil, donde en el panel composite usando 50% de aluminio reciclado se han reducido las emisiones en un 37,86%. Este porcentaje aumenta con el panel de aluminio 100% reciclado, en el que se observa una reducción del 75,72% de las emisiones fósiles totales comparado con el panel sin aluminio reciclado.

En este último caso, con el 100% de aluminio reciclado, el resto de las emisiones se deben a los procesos de producción de los otros componentes del panel, al proceso de reciclaje del aluminio, al combustible y energía usado en el transporte, y a la energía usada en la producción del panel.

En cuanto al GWP-biogénico, no se observa ningún cambio. Esto se debe a que el aluminio no tiene carbono biogénico incorporado, por lo que estos resultados, dependientes de otros componentes del panel como la madera de los palets, no se han visto afectados por el porcentaje de aluminio reciclado.

En el GWP-LULUC sí que observamos cambios en los resultados, con una reducción del 37,91% usando 50% de aluminio reciclado, y una reducción del 76,22% en el panel con 100% de aluminio reciclado con respecto al panel sin aluminio reciclado. Estas reducciones se deben a la eliminación del uso del suelo en el proceso de producción del aluminio, pues al ser reciclado, no requiere de cambios en el uso del suelo, como por ejemplo para la minería, y procesos

similares. Las emisiones restantes, por lo tanto, son producidas por el resto de los componentes del panel.

Todos estos resultados se traducen en una reducción del GWP-total del 37,95% en el panel composite con 50% de aluminio reciclado, y una reducción del 75,90% en el panel con 100% de aluminio reciclado.

## 5.4. Conclusión del Estudio 2

Los resultados obtenidos evidencian una reducción significativa del GWP-total en la etapa de producto al incorporar aluminio reciclado en la composición del panel composite. En concreto, el uso de un 50% de aluminio reciclado permite reducir las emisiones asociadas en un 37,95 %, mientras que al emplear 100% de aluminio reciclado, la reducción alcanza un 75,90 % respecto al escenario base con aluminio primario. Estos datos reflejan el alto impacto ambiental del aluminio virgen, cuya producción es intensiva en consumo energético, así como el potencial de mitigación que ofrece el reciclaje en términos de emisiones de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, es importante destacar que incluso en el escenario de uso exclusivo de aluminio reciclado, las emisiones no se reducen a cero. Esto se debe a que el proceso de recolección, transporte, clasificación, fundición y producción del aluminio secundario conlleva igualmente un consumo de energía y, por tanto, la emisión de CO<sub>2</sub> y otros gases asociados de efecto invernadero. Es por esto que, aunque el reciclaje representa una estrategia efectiva para reducir la huella de carbono en la etapa de producto, sigue siendo necesario complementar esta medida con otros enfoques de ecodiseño y eficiencia energética a lo largo del ciclo de vida del edificio.

## CAPÍTULO 6. ESTUDIO 3: EVALUACIÓN AMBIENTAL DE TRES PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN DE FACHADA

Con los resultados obtenidos en los ACV, y aplicada la estrategia sostenible en el panel composite, se realizará el cálculo de las emisiones totales de GEI de 3 propuestas de rehabilitación, basados en un mismo sistema, para la fachada del Pabellón Nuevo de la ETSAM.

El objetivo es establecer, mediante la estrategia sostenible aplicada a los paneles composite de aluminio, un revestimiento de fachada para la rehabilitación con bajas emisiones de carbono incorporado. Para la evaluación ambiental, se comparan tres revestimientos distintos, para la elección con menos Potencial de Calentamiento Global, a la vez que se busca mantener la apariencia de la fachada actual.

Los datos de los estudios se reportarán empleando el GWP como único indicador ambiental, y se compararán, terminando con el proceso de evaluación ambiental y la elección de la mejor estrategia de diseño sostenible.

### 6.1. Sistema propuesto para la rehabilitación

La propuesta de rehabilitación de la fachada se plantea con un sistema de aislamiento exterior que emplea placas aislantes de EPS de 60mm. Los componentes son:

- Muro soporte (cerramiento)
- Mortero adhesivo 3mm
- Panel de Poliestireno Expandido (EPS) 60mm
- Mortero adhesivo + malla de fibra de vidrio 3mm
- Revestimiento exterior

El objetivo de esta solución rehabilitar la envolvente del edificio mediante un sistema de rápido montaje, ofreciendo un mayor confort interior y una notable reducción del consumo energético, lo que resulta en una menor emisión de carbono operacional del edificio.

#### 6.1.1. Revestimiento de paneles composite de aluminio

La primera opción de revestimiento se basa en el uso de paneles composite de aluminio, ya estudiados, como acabado de la fachada. Con el objetivo de mantener la apariencia actual de la fachada, se ha contactado con ECOBIERZO COMPOSITE S.L. para preguntar si es posible fabricar paneles composite de aluminio con acabado de arenisca, similar a la utilizada en la fachada actual. Además de confirmar la existencia de dicho acabado, se me ha proporcionado dos muestras de dicha textura en dos colores diferentes, "*Symphony Urban*" y "*Venethian Theater*", con las que se han elaborado dos muestras del sistema de fachada propuesto.



6.1. Acabado Symphony Urban



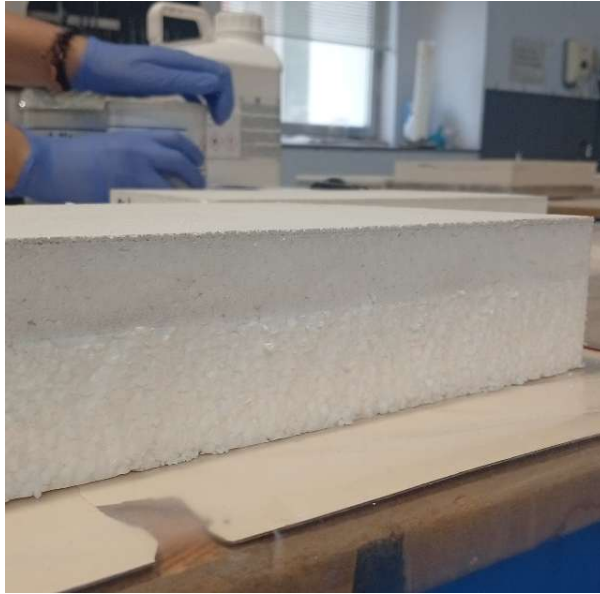
6.2. Acabado Venethian Theater



6.3. Textura de piedra caliza del revestimiento del Pabellón Nuevo

#### **6.1.1.1. Preparación de la muestra**

Las muestras han sido desarrolladas en el laboratorio DIT del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Para ambas muestras, se ha utilizado un panel de aislamiento térmico EPS, de 60mm de espesor, sobre el que se ha puesto una capa de mortero base junto a una malla de fibra de vidrio, haciendo un total de capa de 3mm.



6.4. Capa de mortero base (3mm), con malla de fibra de vidrio, sobre panel EPS (60mm).

Tras ello, se han cortado las muestras de EPS + mortero en un tamaño A4, igual a los de las muestras de panel composite de STACBOND. Ambas muestras se han unido con adhesivo Epoxi de dos componentes, terminando con las muestras del sistema de fachada.



6.5. Muestras de EPS + mortero y muestras de panel composite.



6.6. Adhesivo Epoxi de dos componentes.



6.7. Muestras del sistema de fachada terminadas.

La muestra P01 se corresponde con el acabado “Symphony Urban”, y la muestra P03 se corresponde con el acabado “Venethian Theater”.

### 6.1.1.2. Comparación de EPD

También, se me ha proporcionado la EPD de los nuevos paneles composite, actualizada el 21/06/2025 ya que se ha implementado el uso de materiales reciclados en los paneles composite STACBOND ECOGREEN<sup>26</sup>. Tal y como explica la empresa, estos paneles se hacen con bobinas de aluminio con certificado de bajas emisiones, asegurando que se ha reducido la huella de carbono en un 50%.

A continuación, se indica el contenido de los paneles nuevos, y la información ambiental de los impactos de GWP. Además, realizará una comparación con los antiguos paneles para evaluar la reducción del impacto ambiental.

<sup>26</sup> STACBOND. (s.f.). Reciclaje: Damos una segunda vida al panel composite de aluminio.

Componentes del producto	Por 1 m <sup>2</sup>		
	Peso, kg	Material post-consumidor, % de peso	Material renovable, % del peso
Núcleo mineral	5,24E+00	0,00%	0,00%
Aluminio	3,67E+00	0,00%	0,00%
Laca	2,31E-01	0,00%	0,00%
Adhesivo	1,60E-01	0,00%	0,00%
TOTAL	9,30E+00	0,00%	0,00%
Materiales de embalaje	Peso, kg	Peso-% (frente al producto)	
Film	1,01E+00	10,84%	
Madera	2,86E-04	0,00%	
Cartón	4,68E-02	0,50%	
TOTAL	1,05E+00	11,34%	

## 4.2. Información de contenidos del Panel Composite STACBOND FR.

## EPD STACBOND®FR

INDICADOR	Unidad	A1-A3	C1	C2	C3	C4	D
GWP-FÓSIL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	4,14e+1	7,03e-3	5,63e-2	9,52e-1	7,40e-2	-2,56e+1
GWP-BIOGÉNICO	Kg CO <sub>2</sub> eq.	-1,62e-1	2,21e-4	5,07e-5	2,99e-2	6,55e-4	1,30e-1
GWP-LULUC	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,47e-1	1,66e-5	2,21e-5	2,25e-3	2,12e-6	-3,64e-1
GWP-TOTAL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	4,13e+1	7,27e-3	5,64e-2	9,84e-1	7,46e-2	-2,59e+1

Tabla 4.9. Impactos ambientales obtenidos de la EPD del Panel Composite STACBOND FR.

Componentes del producto	Por 1 m <sup>2</sup>		
	Peso, kg	Material post-consumidor, % de peso	Material renovable, % del peso
Núcleo mineral	4,80E+00	45,51%	0,00%
Aluminio	2,48E+00	73,43%	0,00%
Laca	2,13E-01	0,00%	0,00%
Adhesivo	2,11E-01	0,00%	0,00%
TOTAL	7,70E+00	0,00%	0,00%
Materiales de embalaje	Peso, kg	Peso-% (frente al producto)	
Film	1,75E-04	0,00%	
Madera	5,93E-02	0,77%	
Cartón	3,18E-02	0,41%	
TOTAL	9,13E-02	1,19%	

## 6.8 Información de contenidos del Panel Composite STACBOND FR ECOGREEN.

## NUEVA EPD STACBOND®FR

INDICADOR	Unidad	A1-A3	C1	C2	C3	C4	D
GWP-FÓSIL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,82e+01	1,86e-02	6,87e-02	1,67e+00	6,98e-02	-2,83e+01
GWP-BIOGÉNICO	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,22e-01	1,02e-04	2,18e-05	1,88e-02	1,94e-05	-8,31e-02
GWP-LULUC	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,24e-01	4,63e-05	3,34e-05	1,10e-03	2,43e-06	-3,93e-01
GWP-TOTAL	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,85e+01	1,87e-02	6,88e-02	1,69e+00	6,98e-02	-2,88e+01

Tabla 6.1. Impactos ambientales obtenidos de la EPD actualizada del Panel Composite STACBOND FR.

Como se puede apreciar, mediante el uso del 73,43% de aluminio y un 45,51% de núcleo mineral reciclados, se han conseguido reducir las emisiones de GWP-total hasta en un 52%, sin contar con las emisiones negativas del módulo D.

### 6.1.2. Revestimiento de piedra caliza

La segunda opción para el revestimiento de la fachada se basa en la utilización de un aplacado de piedra caliza, igual al revestimiento de la fachada actual del edificio. Para ello, se usarán las placas de piedra natural caliza de la variedad Piedra Paloma, de la empresa Piedra Paloma. En cuanto a la obtención de los datos de su impacto ambiental, se ha obtenido su EPD publicada en AENOR<sup>27</sup>. La composición de las placas de piedra natural y materiales de embalaje, por m<sup>2</sup> declarado, se indica en la tabla a continuación:

Sustancia	Contenido	Unidad	Contenido reciclado
Carbonato cálcico	99	%	0%
Otros materiales	1	%	0%
<b>Material de embalaje</b>			
Material de embalaje	Contenido	Unidad	Contenido reciclado
Madera	0,768	kg	0%
Polietileno	0,004	kg	0%
PET	0,003	kg	0%
FOAM	0,003	kg	0%
Poliestireno	0,001	kg	0%

Tabla 6.2. Contenido de las placas de piedra caliza Piedra Paloma.

## 6.2. Metodología para la evaluación ambiental

El cálculo del impacto ambiental de las propuestas de rehabilitación de fachada se llevará a cabo mediante la metodología y cálculos proporcionados por la norma EN 15978, ajustados y reducidos al escenario de rehabilitación del ciclo de vida del edificio (módulo B5), y a la limitación de los datos obtenidos para el estudio. Se seguirá, igual que en los anteriores estudios, los pasos marcados por la norma para la evaluación ambiental.

<sup>27</sup> <https://www.aenor.com/certificacion/certificacion-de-producto/declaraciones-ambientales-de-producto/declaraciones-globalepd-en-vigor>.

### 6.2.1.1. Propósito de la evaluación

La finalidad de la evaluación es cuantificar el Potencial de Calentamiento Global de 3 propuestas de rehabilitación de la fachada del Pabellón Nuevo de la ETSAM.

El alcance del estudio se limitará al escenario de rehabilitación del edificio, específicamente a toda la superficie de fachada.

El uso previsto de la evaluación es la comparación de los resultados del impacto ambiental de cada propuesta de rehabilitación, como asistencia en el proceso de toma de decisiones de diseño.

### 6.2.1.2. Objeto de la evaluación

El objeto de la evaluación es la rehabilitación de la fachada del Pabellón Nuevo de la ETSAM, basada en bajas emisiones de carbono incorporado.

Equivalente funcional de la propuesta 1:

- Mortero adhesivo THERMOPROSOPSIS MULTI KAM 700<sup>28</sup> (3mm). Su función es adherir los paneles de aislamiento térmico al muro de ladrillo soporte.
- Panel de Poliestireno Expandido (EPS) KNAUF THERM ETIX (1000x500x60)<sup>29</sup>.
- Mortero adhesivo THERMOPROSOPSIS MULTI KAM 700 (3mm) + malla de fibra de vidrio RE08-01 fiberglass mesh VTX 56<sup>30</sup>.
- Revestimiento exterior de panel composite de aluminio 100% reciclado

Equivalente funcional de la propuesta 2:

- Mortero adhesivo THERMOPROSOPSIS MULTI KAM 700 (3mm). Su función es adherir los paneles de aislamiento térmico al muro de ladrillo soporte.
- Panel de Poliestireno Expandido (EPS) KNAUF THERM ETIX (1000x500x60).
- Mortero adhesivo THERMOPROSOPSIS MULTI KAM 700 (3mm) + malla de fibra de vidrio RE08-01 fiberglass mesh VTX 56.
- Revestimiento exterior de panel composite de aluminio STACBOND FR.

Equivalente funcional de la propuesta 3:

- Mortero adhesivo THERMOPROSOPSIS MULTI KAM 700 (3mm). Su función es adherir los paneles de aislamiento térmico al muro de ladrillo soporte.
- Panel de Poliestireno Expandido (EPS) KNAUF THERM ETIX (1000x500x60).
- Mortero adhesivo THERMOPROSOPSIS MULTI KAM 700 (3mm) + malla de fibra de vidrio RE08-01 fiberglass mesh VTX 56.

<sup>28</sup> Knauf Cyprus Ltd. (2025). EPD-IES-0024084:001:Mortars for ETICS (The International EPD® System).

<sup>29</sup> Knauf Industries. (2024). EPD-IES-0015781:003: *KNAUF THERM ETIX 1000x500x100*. The International EPD® System.

<sup>30</sup> GRUPPO STAMPLAST SPA. (2018). EPD-IES-0021406:001: *FIBERGLASS MESH*. The International EPD® System.

- Revestimiento exterior de piedra natural caliza Piedra Paloma<sup>31</sup>.

La vida útil para la fachada se fija en 50 años.

Los límites del sistema, ajustados al escenario de rehabilitación (módulo B5) son:

- Producción de los componentes nuevos (módulos A1-A3)
- Transporte de los componentes nuevos a la obra (módulo A4)
- Proceso de construcción de los componentes (módulo A5)
- Etapa de fin de vida de los componentes sustituidos (módulos C1-C4)

El modelo del edificio también se adapta al escenario de rehabilitación de fachada para facilitar la posterior cuantificación. De acuerdo con esto, se describe la fachada actual:

- La superficie total de la fachada es de 2.233,89m<sup>2</sup>. Debido a la geometría general del edificio, en forma de prisma rectangular, la fachada se encuentra en las 4 orientaciones.
- Composición actual del cerramiento. El cerramiento actual se basa en dos muros de fábrica de ladrillo hueco doble de ½ pie, separados por una cámara de aire de 10cm. El revestimiento exterior se compone por placas de piedra caliza.

### 6.2.1.3. Escenarios de la evaluación

De acuerdo con los límites del sistema, para cada una de las tres propuestas de rehabilitación, el escenario del Módulo B5 se centrará en los impactos generados por:

- Producción de los componentes nuevos (módulos A1-A3): Se incluyen los impactos de la cuna a la puerta de todos los materiales que forman parte del nuevo sistema de fachada.
- Transporte de los componentes nuevos a la obra (módulo A4): El impacto de llevar los materiales desde el fabricante hasta el sitio de construcción en la ETSAM.
- Proceso de construcción de los componentes (módulo A5): El impacto de las actividades y procesos relacionados con el montaje/construcción de la fachada.
- Etapa de fin de vida de los componentes sustituidos (módulos C1-C4): Como las 3 propuestas de rehabilitación implican la retirada del revestimiento actual, se incluyen los impactos de la etapa de fin de vida de este.

A continuación, se muestra una tabla estableciendo los límites de cada producto usado en la evaluación, de acuerdo con el escenario definido. Se establecen también varias suposiciones:

- Revestimiento actual de piedra caliza: al no encontrar datos del fabricante original, se toma la información ambiental de la DAP del fabricante de piedra caliza usada en la propuesta 3. Como ya se ha explicado, solo se utilizan los datos ambientales de la etapa de fin de vida, al tratarse del producto sustituido en el escenario de rehabilitación.

---

<sup>31</sup> Piedra Paloma S.L.U. (2025). *Placas de Piedra Natural Variedades Piedra Paloma y Ambra* (AENOR GlobalEPD, GlobalEPD EN15804-126).

- Para el resto de los productos, al evaluarse en escenario de rehabilitación, solo se utilizan los datos ambientales de la etapa de producto (módulos A1-A3), transporte a obra (módulo A4), y montaje/construcción en obra (módulo A5).
- Debido a la no obligatoriedad de declarar los módulos A4-A5, los impactos ambos módulos de las propuestas 2 y 3 no se usarán para el cálculo debido a la falta de datos.
- El cálculo se realizará en función de m<sup>2</sup> para facilitar el cálculo del impacto ambiental de cada propuesta de fachada. Los datos de la DAP del mortero adhesivo THERMOPROSOPSIS MULTI KAM 700, al declararse por kg, se asume un peso de 4,2kg cada m<sup>2</sup> para el espesor de 3mm establecido en la capa de mortero. Los datos ambientales se ajustarán para una unidad de 1 m<sup>2</sup>.
- Los productos cuyas DAP no especifican su vida útil de referencia, se consideran 50 años como valor medio.

PRODUCTO	DATOS	UNIDAD DECLARADA	A1-A3	A4	A5	C1	C2	C3	C4	ESCENARIOS
Placa de piedra caliza (revestimiento actual)	DAP de fabricante de piedra caliza Piedra Paloma	m <sup>2</sup>	NR	NR	NR	X	X	X	X	- C1: desmontaje del producto. - C2: Distancia a planta de tratamiento de 150km. - C3: Tratamiento del 70% para posterior reciclaje. - C4: Disposición final del 30% restante en vertedero.
Mortero adhesivo	DAP de fabricante	kg	X	ND	X	NR	NR	NR	NR	- A1-A3: "cuna a puerta". - A4: No declarado. - A5: Instalación. - Vida útil: no especificada,
Aislamiento térmico	DAP de fabricante	m <sup>2</sup>	X	X	X	NR	NR	NR	NR	- A1-A3: "cuna a puerta". - A4: Distancia de transporte media de 250km. Camión Euro 6. - A5: Instalación. - Vida útil: 50 años
Malla de fibra de vidrio	DAP de fabricante	m <sup>2</sup>	X	X	X	NR	NR	NR	NR	- A1-A3: "cuna a puerta". - A4: Distancia de transporte media de 584km. - A5: Instalación. - Vida útil: 50 años.
Panel composite de aluminio 100% reciclado (propuesta 1)	Datos obtenidos por estudio propio	m <sup>2</sup>	X	X	ND	NR	NR	NR	NR	- A1-A3: "cuna a puerta". - A4: Distancia de transporte de 400km. - A5: Instalación. - Vida útil: no especificada.
Panel composite de aluminio STACBOND FR (propuesta 2)	DAP de fabricante	m <sup>2</sup>	X	ND	ND	NR	NR	NR	NR	- A1-A3: "cuna a puerta". - A4: No declarado. - A5: No declarado. - Vida útil: no especificada.
Placa de piedra caliza Piedra Paloma (propuesta 3)	DAP de fabricante	m <sup>2</sup>	X	ND	ND	NR	NR	NR	NR	- A1-A3: "cuna a puerta". - A4: No declarado. - A5: No declarado. - Vida útil: no especificada.

X = Declarado; ND = No declarado, NR - No es relevante para el cálculo.

Tabla 6.3. Límites del sistema de las DAP de los productos usados en la evaluación.

### 6.2.1.4. Cuantificación y selección de los datos

La cantidad neta de los productos necesarios para la rehabilitación se calcula en base a los metros cuadrados necesarios para la rehabilitación.

La cantidad bruta de los productos debe cuantificarse considerando las pérdidas durante el transporte, obra, tratamiento de productos y errores de diseño. De la misma forma, deberán contabilizarse la sustitución de los componentes y el número de sustituciones. Debido a la falta de datos en relación con las pérdidas, se asume que no existen. De la misma forma, como la vida útil estimada de todos los productos (50 años) alcanza a la vida útil requerida del edificio (50 años), no se contabilizan sustituciones de los componentes.

El tipo de datos elegidos, junto a su calidad y límite, queda establecido en la tabla 6.3.

Siendo la superficie de fachada de 2.233,89 m<sup>2</sup>, la cantidad de producto necesaria se establece en la siguiente tabla:

PRODUCTO	DATOS	UNIDAD DECLARADA	CANTIDAD NETA	CANTIDAD BRUTA
Placa de piedra caliza (revestimiento actual)	DAP de fabricante de piedra caliza Piedra Paloma	m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>
Mortero adhesivo (2 capas de 3mm)	DAP de fabricante	kg	4,2kg/m <sup>2</sup> 18.764,67 kg	18.764,67 kg
Aislamiento térmico (60mm)	DAP de fabricante	m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>
Malla de fibra de vidrio	DAP de fabricante	m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>
Panel composite de aluminio 100% reciclado (propuesta 1) (4mm)	Datos obtenidos por estudio propio	m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>
Panel composite de aluminio STACBOND FR (propuesta 2) (4mm)	DAP de fabricante	m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>
Placa de piedra caliza Piedra Paloma (propuesta 3)	DAP de fabricante	m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>	2.233,89 m <sup>2</sup>

Tabla 6.4. Cuantificación de las cantidades netas y brutas necesarias de cada producto para la evaluación.

### 6.2.1.5. Cálculo de los indicadores ambientales

Como se ha establecido en el propósito de la evaluación, el cálculo solo se llevará a cabo en el indicador ambiental de Potencial de Calentamiento Global Total (GWP-total). De igual manera, el cálculo se ha ajustado al escenario de rehabilitación del ciclo de vida del edificio (módulo B5). Las fórmulas a continuación siguen el principio de cálculo matricial proporcionado por la norma EN 15978:

#### Fórmula general para el cálculo

$$GWP_i = a_{1,i} * GWP_{a_{1,i}} + a_{2,i} * GWP_{a_{2,i}} + \dots + a_{n,i} * GWP_{a_{n,i}}$$

Donde:

$GWP_i$  es el Potencial de Calentamiento Global total (en kg CO<sub>2</sub> eq.) cuantificado para la etapa  $i$

$a_{n,i}$  es la cantidad bruta de producto  $n$  (en m<sup>2</sup>) cuantificada utilizada en el módulo  $i$

$GWP_{a_{n,i}}$  es el Potencial de Calentamiento Global total del producto  $n$  para la etapa  $i$

Cálculo de la propuesta 1:

PRODUCTO	CANTIDAD (m <sup>2</sup> )	A1-A3 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	A4 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	A5 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C1 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C2 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C3 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C4 (kg CO <sub>2</sub> eq.)
Mortero adhesivo	18.764,67 (kg) *	0,279	ND	0,00183	NR	NR	NR	NR
Aislamiento térmico EPS	2233,89	3,024	0,1146	0,05472	NR	NR	NR	NR
Malla de fibra de vidrio	2233,89	0,46	0,0201	0,0025	NR	NR	NR	NR
Placa de piedra caliza (revestimiento actual)	2233,89	NR	NR	NR	0,189	1,11	0,399	0,044
Panel composite de aluminio 100% reciclado	2233,89	11,81	0,119	ND	NR	NR	NR	NR

*ND = No declarado, NR - No es relevante para el cálculo.*

*\*El mortero adhesivo se presenta en kg debido a que es la unidad declarada en su DAP.*

Tabla 6.5. Cálculo de la propuesta 1. Impactos de GWP-total de cada producto por módulo.

- Etapa de fin de vida del revestimiento actual

$$GWP_{C1} = 2.233,89 * 0,189$$

$$GWP_{C2} = 2.233,89 * 1,11$$

$$GWP_{C3} = 2.233,89 * 0,399$$

$$GWP_{C4} = 2.233,89 * 0,044$$

- Etapa de producto de la propuesta

$$GWP_{A1-A3} = 18.764,67 * 0,279 + 2.233,89 * 3,024 + 2.233,89 * 0,46 + 2.233,89 * 11,81$$

- Transporte de los productos a la obra

$$GWP_{A4} = 2.233,89 * 0,1146 + 2.233,89 * 0,0201 + 2.233,89 * 0,119$$

- Instalación de los productos

$$GWP_{A5} = 18.764 * 0,00183 + 2.233,89 * 0,05472 + 2.233,89 * 0,0025$$

- Cálculo del GWP-total de la propuesta 1

$$GWP_{total} = GWP_{A1-A3} + GWP_{A4} + GWP_{A5} + GWP_{C1} + GWP_{C2} + GWP_{C3} + GWP_{C4}$$

Cálculo de la propuesta 2:

PRODUCTO	CANTIDAD (m <sup>2</sup> )	A1-A3 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	A4 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	A5 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C1 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C2 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C3 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C4 (kg CO <sub>2</sub> eq.)
Mortero adhesivo	18.764,67 (kg) *	0,279	ND	0,00183	NR	NR	NR	NR
Aislamiento térmico EPS	2233,89	3,024	0,1146	0,05472	NR	NR	NR	NR
Malla de fibra de vidrio	2233,89	0,46	0,0201	0,0025	NR	NR	NR	NR
Placa de piedra caliza (revestimiento actual)	2233,89	NR	NR	NR	0,189	1,11	0,399	0,044
Panel composite de aluminio STACBOND FR	2233,89	18,5	ND	ND	NR	NR	NR	NR

*ND = No declarado, NR - No es relevante para el cálculo.*

*\*El mortero adhesivo se presenta en kg debido a que es la unidad declarada en su DAP.*

Tabla 6.6. Cálculo de la propuesta 2. Impactos de GWP-total de cada producto por módulo.

- Etapa de fin de vida del revestimiento actual

$$GWP_{C1} = 2.233,89 * 0,189$$

$$GWP_{C2} = 2.233,89 * 1,11$$

$$GWP_{C3} = 2.233,89 * 0,399$$

$$GWP_{C4} = 2.233,89 * 0,044$$

- Etapa de producto de la propuesta

$$GWP_{A1-A3} = 18.764,67 * 0,279 + 2.233,89 * 3,024 + 2.233,89 * 0,46 + 2.233,89 * 18,5$$

- Transporte de los productos a la obra

$$GWP_{A4} = 2.233,89 * 0,1146 + 2.233,89 * 0,0201$$

- Instalación de los productos

$$GWP_{A5} = 18.764 * 0,00183 + 2.233,89 * 0,05472 + 2.233,89 * 0,0025$$

- Cálculo del GWP-total de la propuesta 2

$$GWP_{total} = GWP_{A1-A3} + GWP_{A4} + GWP_{A5} + GWP_{C1} + GWP_{C2} + GWP_{C3} + GWP_{C4}$$

Cálculo de la propuesta 3:

PRODUCTO	CANTIDAD (m <sup>2</sup> )	A1-A3 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	A4 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	A5 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C1 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C2 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C3 (kg CO <sub>2</sub> eq.)	C4 (kg CO <sub>2</sub> eq.)
Mortero adhesivo	18.764,67 (kg)*	0,279	ND	0,00183	NR	NR	NR	NR
Aislamiento térmico EPS	2233,89	3,024	0,1146	0,05472	NR	NR	NR	NR
Malla de fibra de vidrio	2233,89	0,46	0,0201	0,0025	NR	NR	NR	NR
Placa de piedra caliza (revestimiento actual)	2233,89	NR	NR	NR	0,189	1,11	0,399	0,044
Placas de piedra caliza Piedra Paloma	2233,89	2,99	ND	ND	NR	NR	NR	NR

*ND = No declarado, NR = No es relevante para el cálculo.*

*\*El mortero adhesivo se presenta en kg debido a que es la unidad declarada en su DAP.*

Tabla 6.7. Cálculo de la propuesta 3. Impactos de GWP-total de cada producto por módulo.

- Etapa de fin de vida del revestimiento actual

$$GWP_{C1} = 2.233,89 \cdot 0,189$$

$$GWP_{C2} = 2.233,89 \cdot 1,11$$

$$GWP_{C3} = 2.233,89 \cdot 0,399$$

$$GWP_{C4} = 2.233,89 \cdot 0,044$$

- Etapa de producto de la propuesta

$$GWP_{A1-A3} = 18.764,67 \cdot 0,279 + 2.233,89 \cdot 3,024 + 2.233,89 \cdot 0,46 + 2.233,89 \cdot 2,99$$

- Transporte de los productos a la obra

$$GWP_{A4} = 2.233,89 \cdot 0,1146 + 2.233,89 \cdot 0,0201$$

- Instalación de los productos

$$GWP_{A5} = 18.764 \cdot 0,00183 + 2.233,89 \cdot 0,05472 + 2.233,89 \cdot 0,0025$$

- Cálculo del GWP-total de la propuesta 1

$$GWP_{total} = GWP_{A1-A3} + GWP_{A4} + GWP_{A5} + GWP_{C1} + GWP_{C2} + GWP_{C3} + GWP_{C4}$$

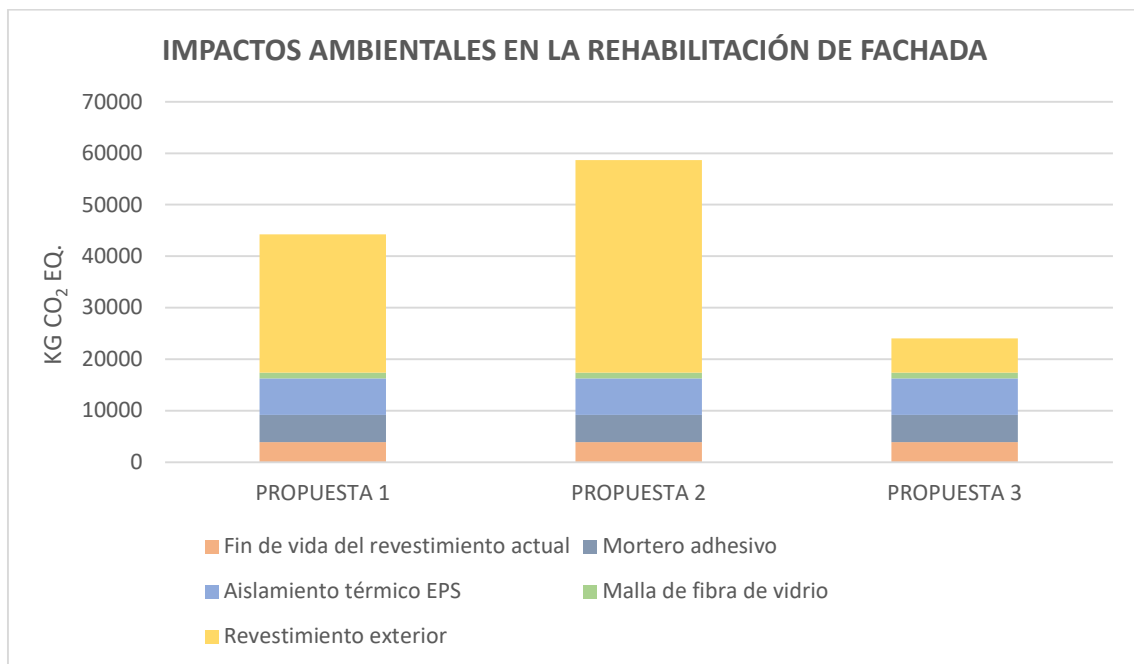
## 6.2.2. Resultados e interpretación

En la siguiente tabla se proporcionan los resultados de los cálculos de las 3 propuestas, expresados con el indicador GWP-total, y desglosados por productos:

	REVESTIMIENTO ACTUAL (C1-C4)	MORTERO ADHESIVO (A1-A3, A4, A5)	AISLAMIENTO TÉRMICO EPS (A1-A3, A4, A5)	MALLA DE FIBRA DE VIDRIO (A1-A3, A4, A5)	REVESTIMIENTO EXTERIOR (A1-A3,A4,A5)	TOTAL
Propuesta 1	3891,43638 kg CO <sub>2</sub> eq.	5248,078 kg CO <sub>2</sub> eq.	7133,526 kg CO <sub>2</sub> eq.	1078,075 kg CO <sub>2</sub> eq.	26913,91 kg CO <sub>2</sub> eq.	44265,02229 kg CO <sub>2</sub> eq.
Propuesta 2	3891,43638 kg CO <sub>2</sub> eq.	5248,078 kg CO <sub>2</sub> eq.	7133,526 kg CO <sub>2</sub> eq.	1078,075 kg CO <sub>2</sub> eq.	41326,97 kg CO <sub>2</sub> eq.	58678,08057 kg CO <sub>2</sub> eq.
Propuesta 3	3891,43638 kg CO <sub>2</sub> eq.	5248,078 kg CO <sub>2</sub> eq.	7133,526 kg CO <sub>2</sub> eq.	1078,075 kg CO <sub>2</sub> eq.	6679,331 kg CO <sub>2</sub> eq.	24030,44667 kg CO <sub>2</sub> eq.

Tabla 6.8. Impactos de GWP-total de cada propuesta por producto y total.

Para la interpretación de los resultados se proporciona una gráfica:



6.9. Comparación de impactos de GWP-total de cada propuesta, por producto.

La Propuesta 2 tiene el impacto ambiental total más alto (58.678,08 kg CO<sub>2</sub> eq.), seguida por la Propuesta 1 (44.265,02 kg CO<sub>2</sub> eq.), y la Propuesta 3 tiene el impacto más bajo (24.030,45 kg CO<sub>2</sub> eq.). Esto sugiere que la Propuesta 3, basada en el revestimiento de piedra caliza es la opción más sostenible de las tres. Se procede a continuación a analizar los motivos:

- Para la Propuesta 1 y la Propuesta 2, el revestimiento exterior y el aislamiento térmico EPS son los dos componentes que contribuyen de manera más significativa a las emisiones totales de CO<sub>2</sub>. Específicamente, el revestimiento exterior, basado en paneles composite con diferente porcentaje de aluminio reciclado, tiene un impacto mucho mayor que el Aislamiento térmico EPS en estas propuestas.

Para la Propuesta 1, basada en el panel composite de aluminio 100% reciclado, las emisiones de dicho revestimiento exterior llegan a suponer el 60,8% de las emisiones totales.

Para la Propuesta 2, basada en el panel composite de aluminio STACBOND FR, las emisiones de dicho revestimiento exterior son las más elevadas de las 3 propuestas, llegando a suponer el 70,43% de las emisiones totales de la propuesta.

- Para la Propuesta 3, aunque el revestimiento exterior basado en piedra caliza natural sigue contribuyendo significativamente en comparación con el resto de los productos, su valor global es mucho menor en comparación con las Propuestas 1 y 2, llegando a suponer el 27,30% de las emisiones de la propuesta.
- El aislamiento térmico EPS también muestra un alto impacto, siendo en las Propuestas 1 y 2 el segundo producto con más emisiones de CO<sub>2</sub>. En la Propuesta 3, se convierte en el producto con mayor impacto. En el total de emisiones del sistema de fachada, incluyendo las dos capas de mortero, la malla de fibra de vidrio, y excluyendo el revestimiento, el EPS supone el 53% de las emisiones.
- El mortero adhesivo y la malla de fibra de vidrio muestran consistentemente impactos ambientales más bajos en comparación con el EPS o los revestimientos en todas las propuestas. Incluso, la etapa de fin de vida del revestimiento actual se sitúa como el segundo proceso con menor huella ambiental, solo por encima de la malla de fibra de vidrio.

### 6.3. Conclusión del Estudio 3

El análisis comparativo de ambas fachadas, revelando un mayor GWP en la solución de panel composite frente a la de piedra natural, es un ejemplo contundente de la evaluación ambiental como una herramienta indispensable en la toma de decisiones de diseño y construcción. Más allá de ser un simple requisito normativo, este tipo de estudios permite identificar puntos de influencia críticos para la implementación de estrategias de sostenibilidad.

Tradicionalmente, el aluminio reciclado es reconocido por su notable reducción de energía y emisiones en comparación con el aluminio primario, pues el proceso de reciclaje del aluminio puede ahorrar hasta un 95% de la energía necesaria para producirlo desde la bauxita, tal como indica European Aluminium Association (2010).

Sin embargo, este estudio revela un hecho más complejo, evidencia la superioridad de la piedra natural en términos de carbono incorporado para esta aplicación específica. Esto subraya la necesidad de priorizar el uso de materiales con un GWP bajo, con procesos de extracción y fabricación menos intensivos en energía.

El hecho de que un panel composite con un 73,43% de aluminio reciclado y con un núcleo mineral 45,51% reciclado, o incluso el panel composite con 100% de aluminio reciclado estudiado, presenten un GWP muchísimo superior a la piedra natural supone una lección fundamental en la sostenibilidad: la correcta elección de los productos de construcción es una de las principales estrategias sostenibles, y demuestra que a menudo las soluciones más efectivas no residen en procesos complejos sino en decisiones más sencillas y directas.

En resumen, aunque utilizar materiales reciclados en un panel composite es una importante estrategia para disminuir su GWP, el impacto de seleccionar un material intrínsecamente más sostenible, con un procesamiento mínimo y una huella de carbono naturalmente baja como la piedra, puede ser significativamente mayor. Sin embargo, no quiere decir que no se hagan esfuerzos en disminuir el GWP mediante estas medidas, pues, en el caso de aluminio, al ser un material 100% reciclable sin perder sus propiedades, lo convierte en un gran material para impulsar la economía circular y disminuir las emisiones producidas por su uso en otros productos de construcción.

## CONCLUSIONES

Los estudios realizados han puesto de manifiesto la importante relevancia del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) como herramienta fundamental para la evaluación y optimización del diseño arquitectónico en favor de una arquitectura sostenible, facilitando la comprensión del Potencial de Calentamiento Global y el uso de ambos conceptos desde la etapa de formación del arquitecto.

En el Estudio 1, al profundizar en el ciclo de vida de los productos constructivos, se identifican los puntos clave donde aplicar las mejores estrategias para bajar las emisiones de carbono incorporado, en este caso, en los paneles composites de aluminio.

Mediante los resultados obtenidos, se confirma que la fase de extracción de materias primas y fabricación de los componentes es la de mayor impacto ambiental. Específicamente, el aluminio virgen se erige como el principal contribuyente a las emisiones de GWP en este tipo de paneles, proponiendo así la estrategia de usar aluminio reciclado en los paneles composite.

En el Estudio 2, con el enfoque del uso de la evaluación ambiental como herramienta tras identificar los puntos de mejora, se implementa la estrategia sostenible propuesta en el producto estudiado.

En el caso de los paneles composite de aluminio, la adopción de aluminio reciclado emerge como una estrategia altamente eficaz para mitigar las emisiones estudiadas demostrando reducciones significativas de hasta el 75% al usar aluminio 100% reciclado, ya que el proceso de reciclaje del aluminio puede ahorrar hasta un 95% de la energía necesaria para producirlo de materia prima virgen.

Además, el aluminio es 100% reciclable sin perder sus propiedades físicas, lo que asegura que un panel composite con aluminio reciclado mantenga las mismas prestaciones que uno con aluminio de producción primaria y evidencia el potencial de la economía circular para disminuir la huella de carbono de los materiales.

Quedando demostrada la eficacia de la identificación e implantación de las mejoras sostenibles, ¿cómo se podría reducir la huella de carbono aún más? ¿Es necesario un mayor reciclaje de los componentes y de los materiales? Con estas preguntas se planteó el último estudio de este trabajo, y se obtuvieron, en mi opinión, las conclusiones más importantes.

El Estudio 3 se basa en el análisis comparativo entre 3 propuestas de rehabilitación de la fachada del Pabellón Nuevo de la ETSAM, dos de las cuales tienen como revestimiento paneles composite de aluminio, con un porcentaje reciclado de este material, y la tercera un revestimiento de piedra natural.

Los resultados revelaron que, para la aplicación específica estudiada, la solución de piedra natural presenta un GWP significativamente menor. Este hallazgo subraya la importancia crítica de la elección de materiales con un GWP intrínsecamente bajo y procesos de extracción y fabricación menos intensivos en energía. A pesar de los esfuerzos por reducir el GWP del panel composite mediante la incorporación de un alto porcentaje de aluminio y núcleo mineral reciclados (73.43% y 45.51% respectivamente, e incluso 100% de aluminio reciclado), el impacto ambiental sigue siendo considerablemente superior al de la piedra natural.

Esto enseña una lección fundamental en sostenibilidad: las soluciones sostenibles más efectivas a menudo residen en decisiones más sencillas y directas relacionadas con la selección del material en origen, más allá de las mejoras por reciclaje u otras estrategias. No obstante, el reciclaje del aluminio, y de cualquier otro material, sigue siendo una estrategia valiosa para la economía circular.

Sin embargo, al ver los resultados, y observar el ínfimo impacto ambiental en el Potencial de Calentamiento Global de la piedra caliza natural en comparación con el aluminio, no me lo podía creer. Antes del estudio, suponía que las emisiones podrían ser menores, pero no hasta el punto de que, aun usando aluminio 100% reciclado, este material emitiría 75 veces más huella de carbono.

Gracias a esto adquirí otro punto de vista con el que observar la sostenibilidad en la arquitectura, un punto de vista que me hizo llegar a una conclusión que, personalmente, me parece la más importante de este trabajo: a los estudiantes de arquitectura no se nos enseña nada sobre la sostenibilidad.

Se nos enseña las propiedades de los materiales, e incluso los procesos ligados a su producción, pero no se nos enseña a evaluarlos ambientalmente. Se nos enseña, durante 4 asignaturas, los diferentes sistemas de construcción, pero no se nos muestra las ventajas ambientales que tienen unos materiales sobre otros. Se nos enseña a proyectar y a construir, pero no a hacerlo sosteniblemente ni a elegir los materiales adecuados.

Es por ello que, con el fin de que los estudiantes de arquitectura de la ETSAM aprendan a implementar estrategias sostenibles en sus proyectos y a evaluar ambientalmente los materiales, se ha llegado a la conclusión de que hace falta que el plan de estudios de la ETSAM implemente estos principios y conocimientos en las asignaturas. Esta idea viene reforzada por el hecho de que, dadas las nuevas normativas y la actualización del CTE, la sostenibilidad en nuestro sector se ha convertido en un concepto obligatorio.

Mediante el estudio y análisis de los softwares utilizados, se concluye que haciendo uso de programas como Granta Edupack, con su módulo Eco Audit, en los primeros años del Grado, u OpenLCA en cursos superiores, la teoría de la sostenibilidad y la evaluación ambiental se puede convertir en algo práctico, sencillo y aplicable a los trabajos que realizan los alumnos en la Escuela, fomentando así una arquitectura sostenible durante el desarrollo académico de los arquitectos.

Además, dadas las normativas ya mencionadas, se están empezando a realizar y publicar las DAP de todos los productos de construcción, haciendo que la información necesaria para la evaluación ambiental sea más accesible que nunca.

Entonces, ¿qué mejor momento para introducirse en la sostenibilidad?

## FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de la experiencia práctica al realizar los estudios, la obtención de resultados y las conclusiones alcanzadas, se establecen propuestas de investigación a futuro:

- Declaraciones Ambientales obligatorias:

En el actual contexto, a las puertas de un nuevo Documento Básico que obligará, de forma progresiva, a declarar el PCG e incorporará el concepto del Análisis del Ciclo de Vida, una línea de investigación podría ser el estudio de este documento. Sería interesante evaluar como establece la sostenibilidad de manera declarativa en la arquitectura, y de igual forma que este TFG, se podría estudiar la forma de implantarlo en la formación del arquitecto de una manera sencilla y práctica.

- Limitaciones del aluminio reciclado:

Unas de las dudas que me han surgido a lo largo de los estudios de ACV con aluminio reciclado es, ¿existe tanto aluminio producido para mantener una economía circular de aluminio secundario? Estudiar las limitaciones en el reciclaje del aluminio, incluso evaluar el impacto económico del reciclaje del aluminio sobre la producción primaria, son líneas que, aunque complejas, serían un gran aporte en el mundo de la sostenibilidad.

- Estrategias sostenibles para la reducción de las emisiones en otros materiales:

El impacto ambiental de los productos de construcción no se limita al PCG, existen hasta 15 indicadores ambientales que se irán declarando progresivamente en las DAP de forma obligatoria. Evaluar estos indicadores y las estrategias adecuadas para su reducción puede ser una línea de investigación interesante.

## FUENTES

### Bibliografía y recursos digitales

3A Composites GmbH. (2024). *ALUCOBOND A2 (EPD Hub, HUB-2025)*. <https://www.epdhub.com/>

3A Composites GmbH. (2024). *ALUCOBOND PLUS (EPD Hub, HUB-2026)*. <https://www.epdhub.com/>

AENOR. (2006). *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices (UNE-EN ISO 14044:2006)*. Asociación Española de Normalización.

AENOR. (2006). *Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos. (UNE-EN ISO 14025:2006)*. Asociación Española de Normalización.

AENOR. (2006). *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia (UNE-EN ISO 14040:2006)*. Asociación Española de Normalización.

AENOR. (2012). *Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de productos básicas para productos de construcción (UNE-EN 15804:2012)*. Asociación Española de Normalización.

AENOR. (2012). *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo (UNE-EN 15978:2012)*. Asociación Española de Normalización.

AENOR. (2020). *Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción (UNE-EN 15804:2012+A2:2020)*. Asociación Española de Normalización.

AENOR. (2021) *Sostenibilidad en la construcción. Marco para la evaluación de los edificios y las obras de ingeniería civil (UNE-EN 15643:2021)*. Asociación Española de Normalización.

Alucoil S.A. (2022). EPD-IES-0000363:003 (S-P-00363): *larson@FR, larson@A2 - aluminium composite panel*. The International EPD® System. <https://www.environdec.com/library/epd363>

Amiri, A., Emami, N., Ottelin, J., Sorvari, J., Marteinson, B., Heinonen, J., & Junnila, S. (2021). Embodied emissions of buildings - A forgotten factor in green building certificates. *Energy And Buildings*, 241, 110962. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110962>

Asamblea General de las Naciones Unidas. (2000). *Declaración del Milenio (A/RES/55/2)*. <https://www.un.org/spanish/milenio/ares552.pdf52.pdf>

Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (A/RES/70/1)*. <https://undocs.org/es/A/RES/70/1>

Ashby, M., Coulter, P., Ball, N., & Bream, C. (2021). *Granta EduPack Eco Audit Tool- A White Paper*. Ansys, Inc. <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2021/august/webpage-requests/education-resources-dam-upload-batch-3/eco-audit-white-paper-PAPEAUEN21.pdf>

Benveniste, G., Gazulla, C., Fullana, P., Celades, I., Ros, T., Zaera, V., & Godes, B. (2011). Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas. *Informes de la Construcción*, 63(522), 71-81. <https://doi.org/10.3989/ic.10.034>

Berge, B. (2009). *The Ecology of Building Materials*. 2aEd. Oxford: Architectural Press.

Boucher, L. (2021, junio). *¿Cómo reducir el carbono incorporado de los edificios?* Green Building Council España. <https://gbce.es/como-reducir-el-carbono-incorporado-de-los-edificios/>

Burgos Bayo, Raquel (2022). *Hacia la transición ecológica del pabellón nuevo : ETSAM*. Trabajo Fin de Grado. Madrid: E.T.S. Arquitectura (UPM).

Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo. (1987). *Nuestro futuro común*. Oxford University Press.

Construible. (2018, 7 noviembre). *Finaliza la construcción del edificio Oxseo con la certificación LEED Platinum Core & Shell • CONSTRUIBLE*. CONSTRUIBLE. <https://www.construible.es/2018/11/08/finaliza-construccion-edificio-oxseo-certificacion-led-platinum-core-shell>

Dierikx, R. (2025). Global warming potential of multi-story timber buildings. *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 1-71. <https://doi.org/10.1680/jensu.22.00066>

Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición).

Dodd, N., Donatello, S., & Cordella, M. (2021). *Indicador 1.2 de Level(s): Potencial de calentamiento global (PCG) del ciclo de vida. Manual del usuario: Información introductoria, instrucciones y orientaciones (versión 1.1)*. Comisión Europea, Centro Común de Investigación. <https://ec.europa.eu/jrc>

Dodd, N., Donatello, S., & Cordella, M. (2021). *Level(s): el marco común de la UE de indicadores básicos de sostenibilidad para edificios residenciales y de oficinas, Manual del usuario n.º 2: Preparación de un proyecto para utilizar el marco común Level(s) (versión de la publicación 1.1)*. Comisión Europea, Centro Común de Investigación. <https://ec.europa.eu/jrc>

Dossche, C., Boel, V., & De Corte, W. (2017). Use of Life Cycle Assessments in the Construction Sector: Critical Review. *Procedia Engineering*, 171, 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.338>

ECO BIERZO COMPOSITE S.L. (2018). *EPD-IES-0001289:004 (S-P-01289): Composite panels STACBOND®PE, STACBOND®FR and STACBOND®A2*. The International EPD® System. <https://www.environdec.com/library/epd1289>

European Aluminium Association. (2010). *Sustainability of Aluminium in Buildings*. European Aluminium. [sus https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/10/sustainability-of-aluminium-in-buildings.pdf](https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/10/sustainability-of-aluminium-in-buildings.pdf)

European Aluminium Association. (2025). *Environmental Profile Report For The European Aluminium Industry*. European Aluminium. [Our https://european-aluminium.eu/blog/environmental-profile-reports/ Environmental Profile Reports - European Aluminium](https://european-aluminium.eu/blog/environmental-profile-reports/Environmental-Profile-Reports-European-Aluminium)

Fernando Fernández, L., (2023). *Desarrollo de un material autorreparable tipo ECC (Engineered Cementitious Composite) para impresión 3D*. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

Greenhouse Gas Protocol. (2024). *IPCC Global Warming Potential Values*. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf>

GRUPPO STAMPLAST SPA. (2018). *EPD-IES-0021406:001: FIBERGLASS MESH*. The International EPD® System. <https://www.environdec.com/library/epd1289>

Knauf Cyprus Ltd. (2025). EPD-IES-0024084:001:Mortars for ETICS (The International EPD® System). <https://www.environdec.com/library/epd24084>

Knauf Industries. (2024). EPD-IES-0015781:003: KNAUF THERM ETIX 1000x500x100. The International EPD® System. <https://www.environdec.com/library/epd15781>

Lahoz Ruiz, E., (2016). *Caracterización de sistemas de fachada ventilada con fijaciones ocultas mecánico adhesivas en paneles compuestos de aluminio*. Tesis Doctoral. Madrid: Escuela Técnica Superior de Edificación.

Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. (2022, 9 de abril). *Boletín Oficial del Estado*, 85, 49395-49483

Maierhofer, D., Röck, M., Saade, M. R. M., Hoxha, E., & Passer, A. (2022). Critical life cycle assessment of the innovative passive nZEB building concept 'be 2226' in view of net-zero carbon targets. *Building And Environment*, 223, 109476. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109476>

Martínez-Risco, J. M. (2024, 18 octubre). *Ganadores de la primera edición de los Premios BREEAM®ES - BREEAM® ES*. BREEAM® ES. <https://breeam.es/ganadores-de-la-primera-edicion-de-los-premios-breeam-es/>

Moya, L. & de Luxán, M. (2008). *Convenio de colaboración entre la fundación de la energía de la Comunidad de Madrid, la Universidad Politécnica de Madrid y la Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, para la realización de una auditoría energética y un proyecto básico para la mejora de la eficiencia energética en la edificación de la ETSAM*.

Otero, M. S., Garnica, T., Montilla, S., Conde, M., & Tenorio, J. A. (2023). Analysis of Sectoral Environmental Product Declarations as a Data Source for Life Cycle Assessment. *Buildings*, 13(12), 3032. <https://doi.org/10.3390/buildings13123032>

Piedra Paloma S.L.U. (2025). *Placas de Piedra Natural Variedades Piedra Paloma y Ambra* (AENOR GlobalEPD, GlobalEPD EN15804-126). [AEN   
 https://www.aenor.com/certificacion/certificacion-de-producto/declaraciones-ambientales-de-producto/declaraciones-globalepd-en-vigorOR - Declaraciones GlobalEPD en vigor](https://www.aenor.com/certificacion/certificacion-de-producto/declaraciones-ambientales-de-producto/declaraciones-globalepd-en-vigorOR - Declaraciones GlobalEPD en vigor)

Reglamento (UE) 2024/1781 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024, por el que se instaura un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos sostenibles, se modifican la Directiva (UE) 2020/1828 y el Reglamento (UE) 2023/1542 y se deroga la Directiva 2009/125/CE.

Reglamento (UE) 2024/3110 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de noviembre de 2024, por el que se establecen reglas armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga el Reglamento (UE) nº 305/2011.

Rezaallah, Anahita & Bolognesi, Cecilia & Afghani Khoraskani, Roham. (2012). *LEED and BREEAM; Comparison between policies, assessment criteria and calculation methods*.

Sanjuán Sánchez, Azucena (2024). *Reflejos del reciclado. Nuevos paneles composite en fachada ventilada*. Trabajo Fin de Grado. Madrid: E.T.S. Arquitectura (UPM).

United Nations Environment Programme. (2025). *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: Not just another brick in the wall - The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast*. Paris. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47214>

Wen, B., Musa, N., Onn, C. C., Ramesh, S., Liang, L., & Wang, W. (2020). Evolution of sustainability in global green building rating tools. *Journal Of Cleaner Production*, 259, 120912. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120912>

## Procedencia de las ilustraciones

1.1. Tomado de Nieto, O. (2025). New Construction Products Regulation: Regulation (EU) 2024/3110. European Commission.

1.2. Tomado de Campus tecnologico cortizo. (s. f.). <https://www.cortizo.com/ficheros/paginasinline/MTczMjYwNzkwMI8yMDdfY2FtcHVzX3RIY25vbG9naWNvX2Vz/>

1.3. Tomado de *oxxeo Gmp*. (s. f.). Grupo Gmp. <https://grupogmp.com/oficina/oxxeo/>

1.4. Tomado del Servicio de Investigación del Parlamento Europeo.

1.5. Tomado de García, V. B. (2023, 30 noviembre). *Importancia ACV (análisis del ciclo de vida)*. Knauf Industries. <https://knauf-industries.es/analisis-ciclo-vida-acv/>

1.6. Tomado de Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. (2017). *Guía para la aplicación conjunta de los Análisis de Ciclo de Vida Ambiental (LCA) y de Costes (LCC)*. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental.

1.7. Tomado de 3A Composites GmbH. (2024). *ALUCOBOND A2 (EPD Hub, HUB-2025)*. <https://www.epdhub.com/>

1.8. Tomado de AENOR. (2021) Sostenibilidad en la construcción. Marco para la evaluación de los edificios y las obras de ingeniería civil (UNE-EN 15643:2021). Asociación Española de Normalización.

1.9. Tomado de <https://www.openlca.org/>

1.10. Tomado de Greenhouse Gas Protocol. (2024). IPCC Global Warming Potential Values. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf>

2.1. Tomado de Moya, L. & de Luxán, M. (2008). Convenio de colaboración entre la fundación de la energía de la Comunidad de Madrid, la Universidad Politécnica de Madrid y la Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, para la realización de una auditoría energética y un proyecto básico para la mejora de la eficiencia energética en la edificación de la ETSAM.

2.2. Elaboración propia.

2.3. Elaboración propia.

3.1. Tomado de <https://www.ietcc.csic.es/team-members/tenorio-rios-jose-antonio/>

4.1. Tomado de STACBOND. (2025, 14 febrero). *Panel composite de aluminio y sistemas de montaje STACBOND® / Fachadas ventiladas*. <https://stacbond.com/>

4.2. Tomado de ECO BIERZO COMPOSITE S.L. (2018). *EPD-IES-0001289:004 (S-P-01289): Composite panels STACBOND®PE, STACBOND®FR and STACBOND®A2*. The International EPD® System. <https://www.environdec.com/library/epd1289>

4.3. Elaboración propia.

4.4. Elaboración propia.

4.5. Elaboración propia.

4.6. Elaboración propia.

4.7. Elaboración propia.

4.8. Elaboración propia.

4.9. Elaboración propia.

4.10. Elaboración propia.

4.11. Elaboración propia.

5.1. Elaboración propia.

5.2. Elaboración propia.

5.3. Elaboración propia.

6.1. Tomado de <https://stacbond.com/acabados/>

6.2. Tomado de <https://stacbond.com/acabados/>

6.3. Elaboración propia.

6.4. Elaboración propia.

6.5. Elaboración propia.

6.6. Elaboración propia.

6.7. Elaboración propia.

6.8. Tomado de ECO BIERZO COMPOSITE S.L. (2018). *EPD-IES-0001289:004 (S-P-01289): Composite panels STACBOND®PE, STACBOND®FR and STACBOND®A2*. The International EPD® System. <https://www.environdec.com/library/epd1289>

6.9. Elaboración propia.