



**Universidad
Europea** CANARIAS

Trabajo Fin de Máster

Evaluación del cumplimiento de la Taxonomía Europea
en edificación mediante herramientas digitales: estudio
comparado entre Austria y España.

Autor

Paloma García García

Director

Loic Revuelta Luis

Escuela de Arquitectura, Ingeniería, Ciencia y Computación – STEAM

Fecha

Octubre 2025

Índice

Lista de abreviaturas	5
Resumen	7
Abstract	8
Capítulo 1. Introducción	9
Capítulo 2. Antecedentes	12
2.1. La Taxonomía Europea: definición, origen y justificación del Reglamento	12
2.2. Evolución de la sostenibilidad en la edificación en Europa	13
2.3. Austria: de los estándares energéticos a la circularidad	15
2.4. España: de la eficiencia energética obligatoria a la Taxonomía	16
2.5. Comparación Austria – España	16
Capítulo 3. Marco teórico	18
3.1 Finanzas sostenibles, Taxonomía UE y principio DNSH	18
3.1.1 Finanzas sostenibles en Europa	18
3.1.2 La Taxonomía Europea como instrumento central	19
3.1.3 El principio DNSH aplicado al sector construcción	20
3.1.4 Relación con el acceso a financiación verde	21
3.1.5 Herramientas e indicadores complementarios: Level(s) y certificaciones	21
3.2 Building Information Modeling (BIM) y Revit	22
3.2.1 Introducción al BIM	22
3.2.2 Revit como herramienta BIM	22
3.3 Madaster: circularidad y pasaportes de materiales	23
3.4 One Click LCA: análisis de ciclo de vida y huella de carbono	24
3.5 Normativa comparada Austria–España	24
3.6 Conclusión del Marco Teórico	25
Capítulo 4. Hipótesis	27
Capítulo 5. Objetivos	28
5.1 Objetivo general	28
5.2 Objetivos específicos	28
Capítulo 6. Metodología	30
6.1 Enfoque y diseño del estudio	30
6.2 Herramientas digitales empleadas	31
6.3 Procedimiento paso a paso	33
Fase 0. Preparación y supuestos	33
Fase 1. Modelado BIM (Revit)	34
Fase 2. Extracción de datos y exportación	34

Fase 3. Madaster (circularidad)	34
Fase 4. One Click LCA (ACV)	34
Fase 5. Verificación de criterios de la Taxonomía	35
Fase 6. Comparación Austria–España	36
Fase 7. Reporte	36
6.4 Muestra: edificio virtual en Viena y Madrid	36
Capítulo 7. Análisis y resultados	37
7.1 Descripción del caso y cálculo energético	37
7.1.1 Ficha del edificio	38
7.1.2 Envolvente y superficies (modelo IFC)	46
7.1.3 Acristalamientos por clima (premisa de diseño)	46
7.1.4 Supuestos de modelización energética	46
7.1.5 U-valores empleados (opacos “as-is” del IFC)	47
7.1.6 Resultados de calefacción (transmisión + ventilación, “as-is”, con vidrios por clima)	47
7.1.7 Marco normativo (resumen operativo)	49
7.2 Resultados Madaster (circularidad y materiales)	50
7.2.1 Introducción	50
7.2.2 Conceptos clave: aclarando dudas frecuentes	50
7.2.3 Masa total y composición del edificio	53
7.2.4 Circularidad global y por capas	57
7.2.5 Diferencia entre usar EN 15804+A2 o no	62
7.2.6 Interpretación de los resultados mediante ejemplos prácticos	65
7.2.7 Valor económico de los materiales	66
7.2.8 Conclusión de resultados Madaster	68
7.2.9 Recomendaciones para el diseño circular.	69
7.2.10 Implicaciones para la alineación con la Taxonomía Europea	72
7.3 Resultados One Click LCA (huella de carbono y ACV)	74
7.3.1 Austria	75
7.3.1.1 Indicador global (A1–C, kg CO _{2e} /m ²)	76
7.3.1.2	78
7.3.1.3	79
7.3.1.4	80
7.3.2 Madrid	84
7.3.3 Análisis por filtros (A1–C): qué explica el resultado	92
7.4 Comparación Austria vs España	98
7.4.1 Diferencias normativas y energéticas	98
7.4.2 Tabla de KPIs comparativos	100

7.4.3 Discusión causa–efecto	100
7.4.3.3 Factor explicativo 3: <i>Envolvente y supuestos energéticos</i>	101
7.4.3.4 Factor explicativo 4: <i>Fotovoltaica en Módulo D</i>	102
7.5 Verificación de criterios DNSH	103
7.5.1 Objetivo 2: Adaptación al cambio climático	103
7.5.2 Objetivo 3: Uso sostenible y protección del agua y los recursos marinos	105
7.5.3 Objetivo 4: Transición a una economía circular	106
7.5.4 Objetivo 5: Prevención y control de la contaminación	106
7.5.5 Objetivo 6: Protección y restauración de la biodiversidad y los ecosistemas	107
7.5.6 Síntesis de verificación DNSH	108
7.6 Limitaciones del estudio	109
Capítulo 8. Conclusiones	113
8.1 Síntesis de hallazgos clave	113
8.2 Respuesta a objetivos e hipótesis	114
8.3 Implicaciones académicas y profesionales	115
Capítulo 9. Futuras líneas de trabajo	116
Referencias	118
Anexos	123
Anexo 1. Índice de Tablas y Figuras	123
Anexo 2. Documentación del Caso de Estudio	124
2.1. Pasaportes de Materiales y Evaluaciones de Ciclo de Vida	124
2.1.2 Extracto del Pasaporte de Materiales – Madaster	124
2.1.3 Extracto del Informe de ACV – One Click LCA	131
2.1.3.1 Extracto para el escenario austriaco (Perchtoldsdorf)	131
2.1.3.2 Extracto para el escenario español (Madrid)	136
2.2. Certificaciones Energéticas Comparativas	141
2.2.1. Energieausweis austriaco (Perchtoldsdorf)	141
2.2.2. Certificado de Eficiencia Energética español (Madrid)	144

Lista de abreviaturas

Sigla	Significado / Uso
A1–A3	Fabricación de productos (materias primas, transporte, procesado).
ACV	Análisis de Ciclo de Vida (EN 15978 para edificación).
ACH	<i>Air Changes per Hour</i> (renovaciones de aire por hora).
BC	Bomba de calor.
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (modelado de información de construcción).
B6	Energía operativa del edificio en fase de uso. Incluye calefacción, refrigeración, ventilación, ACS e iluminación según EN 15978. En este TFM, por limitaciones metodológicas, se modeló en One Click LCA únicamente como electricidad de uso general, manteniendo la verificación normativa completa con herramientas oficiales (HULC en España, GEQ en Austria).
CTE DB-HE	Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Ahorro de Energía (España).
DNSH	<i>Do No Significant Harm</i> (no causar un perjuicio significativo; criterio Taxonomía).
EN 15978	Norma de ACV de edificios (módulos A1–A3, A4–A5, B, C, D).
EPBD	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i> (Directiva de Eficiencia Energética de Edificios).
FV	Fotovoltaica.
g	Factor solar del acristalamiento (0–1).
HDD18	<i>Heating Degree Days</i> base 18 °C (grados-día de calefacción).
HE0 / HE1	HE0: consumo de energía primaria; HE1: limitación de demanda/envolvente (España).
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i> (formato abierto de intercambio BIM).
ISO 13370	Cálculo de pérdidas al terreno (suelo en contacto con el terreno).
Madaster	Plataforma de pasaporte de materiales y circularidad.
nZEB	<i>Nearly Zero Energy Building</i> (edificio de consumo de energía casi nulo).
OIB-RL6	<i>OIB Richtlinie 6</i> : Eficiencia energética y aislamiento térmico (Austria).
One Click LCA	One Click LCA (software de Análisis de Ciclo de Vida).
PED	<i>Primary Energy Demand</i> (demanda de energía primaria) (kWh/m ² ·año).
PED total	Suma de energías primarias de todos los usos regulados.

PEF	<i>Primary Energy Factor</i> (factor de paso a energía primaria, adimensional).
Rsi / Rse	Resistencias superficiales interior/exterior ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$).
SCOP	<i>Seasonal Coefficient of Performance</i> (rendimiento estacional de bomba de calor).
TL	Transmitancia luminosa del vidrio (%).
U	Transmitancia térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) (cuanto menor, mejor).
Uw / Ug / Uf	U de ventana global / del vidrio / del marco ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

Resumen

El sector de la construcción europeo, responsable de alrededor del 40 % del consumo energético y del 36 % de las emisiones de CO₂ (Eurostat, 2023), se enfrenta al desafío de cumplir con el Reglamento de Taxonomía de la UE (Reglamento (UE) 2020/852), que introduce por primera vez criterios cuantitativos para definir qué constituye una construcción sostenible (European Parliament & Council of the European Union, 2020). No obstante, su aplicación práctica plantea dificultades: los profesionales deben traducir requisitos como el principio DNSH, la valorización del 70 % de residuos de construcción y demolición o el cálculo de emisiones de ciclo de vida en verificaciones concretas y trazables. Este trabajo parte de la hipótesis de que la integración de herramientas digitales —modelo BIM enriquecido (Revit), análisis de circularidad (Madaster) y evaluación de ciclo de vida (One Click LCA)—constituye un procedimiento válido para verificar el cumplimiento de la Taxonomía Europea en edificación.

La selección de Austria y España como casos de estudio responde a sus diferencias estructurales: Austria cuenta con un marco maduro, con estándares voluntarios avanzados (klimaaktiv) y una alta penetración de energías renovables, mientras que España avanza en una transición más reciente, apoyada en los fondos europeos. Esta comparación permite explorar cómo contextos nacionales distintos condicionan la aplicación de criterios comunes a escala europea.

El objetivo general es evaluar el grado de cumplimiento de la Taxonomía mediante esta integración digital, analizando su validez como sistema de verificación y comparando su implementación práctica en Austria y España.

Palabras clave: *Taxonomía Europea, BIM, Revit, Madaster, One Click LCA, edificación sostenible, economía circular, impacto ambiental.*

Abstract

The European construction sector—responsible for around 40% of energy use and 36% of CO₂ emissions (Eurostat, 2023)—faces the challenge of complying with the EU Taxonomy Regulation (Regulation (EU) 2020/852), which for the first time introduces quantitative criteria to define what constitutes sustainable construction (European Parliament & Council of the European Union, 2020). However, its practical application poses difficulties: practitioners must translate requirements such as the Do No Significant Harm (DNSH) principle, the $\geq 70\%$ recovery of construction and demolition waste (CDW), and life-cycle emissions accounting into concrete, traceable verifications.

This work starts from the hypothesis that the integration of digital tools—an enriched BIM model (Revit), circularity analysis (Madaster) and life-cycle assessment (One Click LCA)—constitutes a valid procedure to verify compliance with the EU Taxonomy in building projects.

The selection of Austria and Spain as case studies responds to their structural differences: Austria has a mature framework with advanced voluntary standards (klimaaktiv) and a high penetration of renewable energy, whereas Spain is progressing through a more recent transition supported by European funds. This comparison allows us to explore how distinct national contexts condition the application of common EU-wide criteria.

The overall objective is to evaluate the degree of compliance with the Taxonomy through this digital integration, assessing its validity as a verification system and comparing its practical implementation in Austria and Spain.

Keywords: EU Taxonomy, BIM, Revit, Madaster, One Click LCA, sustainable building, circular economy, environmental impact.

Capítulo 1. Introducción

La construcción sostenible ha emergido como una prioridad estratégica en la agenda europea de transición ecológica, especialmente tras la implementación del Reglamento de Taxonomía de la UE (2020/852). Se ha constatado la existencia de una brecha significativa entre los marcos teóricos de sostenibilidad establecidos por la normativa europea y su aplicación práctica en proyectos reales de edificación.

El sector de la construcción, responsable de aproximadamente el 40 % del consumo energético y del 36 % de las emisiones de CO₂ en Europa (Eurostat, 2023), enfrenta el desafío de implementar los criterios específicos establecidos por la Taxonomía Europea. Estos criterios trascienden la eficiencia energética tradicional, incorporando evaluaciones del potencial de calentamiento global del ciclo de vida completo y principios de economía circular (European Commission, 2021a). Sin embargo, la verificación práctica de estos criterios presenta complejidades metodológicas significativas relacionadas con las herramientas de evaluación disponibles y las particularidades de cada contexto nacional.

El interés por esta problemática surge al observar cómo los profesionales del sector enfrentan dificultades para traducir los requisitos taxonómicos en evaluaciones concretas y verificables. Esta constatación llevó a formular la siguiente pregunta de investigación: ¿en qué medida las herramientas digitales especializadas permiten evaluar de manera consistente los criterios de la Taxonomía Europea en edificación, y cómo influyen las diferencias entre contextos nacionales en los resultados obtenidos?

La selección de Austria y España como casos de estudio responde a sus contrastes significativos en términos de marcos regulatorios, mix energético y madurez en sostenibilidad constructiva. Austria presenta estándares avanzados en eficiencia energética, con un 78 % de electricidad procedente de fuentes renovables (E-Control, 2023) y experiencia consolidada en

herramientas de circularidad como Madaster (Madaster Foundation, 2023). España, pese a los avances normativos recientes recogidos en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021–2030 (MITECO, 2021), mantiene desafíos en la implementación homogénea de edificios de consumo casi nulo y en las tasas de valorización de residuos de construcción y demolición. Esta divergencia proporciona un escenario ideal para evaluar cómo las particularidades nacionales condicionan la aplicabilidad de criterios taxonómicos uniformes.

El presente trabajo tiene como objetivo general evaluar el grado de cumplimiento de la Taxonomía Europea en el sector de la construcción mediante la aplicación combinada de herramientas digitales (Revit, Madaster y One Click LCA), analizando su validez como sistema de verificación normativa y comparando su implementación práctica en Austria y España.

La metodología adoptada se fundamenta en un enfoque cuantitativo comparativo utilizando un modelo arquitectónico único desarrollado en Revit, replicado en dos contextos nacionales. Esta aproximación permite aislar el efecto de variables geográficas y normativas, facilitando una comparación controlada entre herramientas y contextos. El modelo se analiza en las ubicaciones de Viena y Madrid, incorporando las particularidades climáticas y energéticas específicas de cada entorno, pero manteniendo idénticos la geometría, materiales y sistemas constructivos para garantizar la comparabilidad de resultados.

La justificación de este enfoque responde tanto a criterios académicos como profesionales. Desde el punto de vista académico, contribuye a cubrir un vacío identificado en la literatura, donde la mayoría de los estudios sobre la Taxonomía Europea se centran en aspectos financieros o marcos conceptuales generales, siendo escasos los análisis de implementación práctica en proyectos constructivos específicos (European Commission, 2022). Desde la perspectiva profesional, el trabajo aporta evidencia empírica sobre el potencial y

limitaciones de herramientas digitales ampliamente utilizadas en el sector, proporcionando orientaciones prácticas para arquitectos, ingenieros y consultores de sostenibilidad.

Los resultados preliminares obtenidos con Madaster ya apuntan a divergencias significativas en circularidad entre diferentes capas constructivas, con una estructura altamente reciclable frente a una fachada con escasa circularidad pese a su elevada desmontabilidad. Estos hallazgos iniciales ilustran la complejidad de la evaluación taxonómica y la necesidad de enfoques integrados que consideren múltiples herramientas y criterios.

La estructura de este documento se organiza en siete capítulos principales que guían al lector a través del proceso completo de investigación. Tras esta introducción, el capítulo de antecedentes contextualiza la evolución de la Taxonomía Europea y analiza los marcos regulatorios comparados entre Austria y España. El marco teórico profundiza en los fundamentos conceptuales que vinculan finanzas sostenibles, herramientas digitales BIM y criterios de sostenibilidad. Las hipótesis y objetivos establecen las premisas de trabajo y las metas específicas de la investigación, mientras que la metodología describe exhaustivamente el protocolo experimental desarrollado. El apartado de análisis y resultados presenta los hallazgos obtenidos tanto con Madaster como con One Click LCA, seguido de las conclusiones que sintetizan las contribuciones principales y las futuras líneas de investigación identificadas.

La convergencia entre marcos regulatorios ambiciosos, herramientas digitales avanzadas pero fragmentadas y contextos nacionales diversos que caracteriza el panorama actual de la construcción sostenible europea configura un escenario complejo que requiere investigación aplicada rigurosa. Este trabajo pretende contribuir a esa necesidad, proporcionando evidencia empírica que pueda informar tanto la evolución de políticas públicas como las mejores prácticas profesionales en la implementación de la Taxonomía Europea en el sector de la construcción.

Capítulo 2. Antecedentes

En el marco de esta investigación se constata la necesidad de contextualizar la Taxonomía Europea dentro de un marco histórico y regulatorio más amplio. El análisis se centra en comprender cómo este instrumento normativo se ha desarrollado y cómo se implementa de manera diferenciada en Austria y España, los dos países que constituyen el núcleo del estudio comparativo.

2.1. La Taxonomía Europea: definición, origen y justificación del Reglamento

Al iniciar la investigación resultó fundamental comprender el origen etimológico del término taxonomía. Proviene del griego *táxis* (τάξις), que significa "orden" o "clasificación", y *nómos* (νόμος), "norma" o "ley". Tradicionalmente utilizado en biología para clasificar organismos vivos (Mayr, 1982), la Unión Europea adoptó esta denominación para referirse a un sistema de clasificación común de actividades económicas sostenibles. En esencia, constituye un marco normativo que permite identificar de forma estandarizada qué puede considerarse "verde" o "sostenible" dentro del mercado único europeo (European Parliament & Council of the European Union, 2020).

La revisión de la literatura permite identificar que la creación de la Taxonomía Europea respondía a una problemática concreta: la fragmentación de criterios de sostenibilidad. Antes de su aprobación, cada país o sector utilizaba definiciones diferentes para lo "verde", generando incertidumbre para inversores y facilitando prácticas de *greenwashing* —la presentación engañosa de productos como más sostenibles de lo que realmente son (Delmas & Burbano, 2011). Este hecho evidencia cómo la ausencia de estándares comunes puede distorsionar mercados enteros.

La respuesta institucional llegó con el Plan de Acción sobre Finanzas Sostenibles de 2018 (European Commission, 2018), cuyo objetivo era desarrollar una clasificación común que

garantizara transparencia en los mercados financieros. El resultado fue el Reglamento (UE) 2020/852, conocido como Reglamento de Taxonomía, que entró en vigor en julio de 2020.

Un aspecto particularmente relevante es la elección de un Reglamento en lugar de una Directiva. Mientras que las directivas requieren transposición nacional y permiten interpretaciones diversas, los reglamentos son directamente aplicables en toda la UE (Craig & de Búrca, 2020). Esta decisión asegura armonización inmediata, aunque la implementación práctica presenta matices nacionales significativos.

La aplicación del Reglamento, aunque jurídicamente uniforme, depende de contextos normativos específicos. Por ejemplo, las definiciones de edificios de consumo casi nulo (nZEB) o la disponibilidad de datos de Análisis de Ciclo de Vida varían considerablemente entre Estados miembros. Además, las obligaciones directas se aplican principalmente a grandes empresas bajo la Directiva de Informes de Sostenibilidad Corporativa (European Parliament & Council of the European Union, 2022) y entidades financieras reguladas por el SFDR (European Parliament & Council of the European Union, 2019).

Para empresas menores, especialmente pymes y promotores, la alineación con la Taxonomía no siempre es obligatoria legalmente. Sin embargo, se convierte en requisito práctico para acceder a financiación verde, subvenciones europeas como NextGenerationEU, o participar en proyectos de clientes que sí deben reportar (European Commission, 2021b). Esta dinámica resulta especialmente interesante porque convierte a la Taxonomía en un instrumento de *facto* más amplio que su alcance legal formal.

2.2. Evolución de la sostenibilidad en la edificación en Europa

El análisis histórico revela que la preocupación europea por el impacto ambiental de la construcción tiene raíces relativamente recientes. La Directiva 2002/91/CE de Eficiencia

Energética en los Edificios (EPBD) fue el primer instrumento que obligó a establecer requisitos mínimos de eficiencia energética (European Parliament & Council of the European Union, 2002). La revisión de esta evolución normativa muestra una progresión clara hacia criterios cada vez más ambiciosos.

La revisión de 2010 introduce el concepto de edificios de consumo de energía casi nulo (nearly Zero Energy Buildings, nZEB), estableciéndolos como estándar obligatorio para construcciones nuevas a partir de 2020 (European Parliament & Council of the European Union, 2010). Resulta especialmente relevante que esta normativa anticipaba desafíos que ahora aborda la Taxonomía.

La *recast* de la EPBD en 2018 refuerza este marco con exigencias de planes nacionales de renovación y sistemas inteligentes de gestión energética (European Parliament & Council of the European Union, 2018). Paralelo a esto, la Estrategia Renovation Wave (European Commission, 2020) busca duplicar las tasas de renovación energética, objetivo ambicioso considerando que pretende rehabilitar 35 millones de edificios para 2030.

Un desarrollo crucial fue el Plan de Acción de Finanzas Sostenibles de 2018 (European Commission, 2018), que sentó las bases del actual Reglamento de Taxonomía. Este plan no se limita a criterios de eficiencia energética, sino que incorpora circularidad, gestión de residuos y resiliencia climática (European Commission, 2022). Este hecho marca un cambio paradigmático hacia evaluaciones holísticas de sostenibilidad.

La Comisión Europea complementó este marco con Level(s), un sistema común de indicadores para evaluar sostenibilidad de edificios, facilitando comparaciones entre países y conexión operativa con la Taxonomía (European Commission, 2021c). Diversos estudios han constatado que Level(s) funciona como puente metodológico entre los criterios taxonómicos abstractos y su aplicación práctica.

2.3. Austria: de los estándares energéticos a la circularidad

En un análisis comparativo, Austria emerge como caso paradigmático de implementación proactiva de sostenibilidad en construcción. El país ha desarrollado políticas ambiciosas desde mediados de los años 2000, posicionándose como referente europeo.

El programa klimaaktiv, lanzado en 2004 por el Ministerio Federal de Acción Climática (BMK, 2023), resulta especialmente relevante por su carácter anticipatorio. Este estándar voluntario evalúa edificios en cuatro áreas: eficiencia energética, calidad de materiales, confort interior y aspectos socioeconómicos. Se observa que muchos criterios de klimaaktiv coinciden con exigencias posteriores de la Taxonomía, especialmente en cálculo de emisiones de ciclo de vida y circularidad de materiales.

Austria también ha sido clave en la expansión de la certificación DGNB fuera de Alemania. Este esquema introduce indicadores ambientales avanzados como potencial de calentamiento global ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$) y tasas de reciclabilidad, aspectos directamente vinculados con los Criterios Técnicos de Selección de la Taxonomía (DGNB, 2022).

La normativa técnica austriaca incluye la serie ÖNORM, con estándares que complementan las directivas europeas. Viena se ha posicionado como laboratorio de innovación en circularidad, incorporando plataformas como Madaster para registrar materiales en pasaportes digitales (Madaster Foundation, 2017). Este hecho representa un enfoque sistémico que integra normativa, certificación voluntaria y herramientas digitales.

Austria llega así a la implementación de la Taxonomía con un ecosistema maduro caracterizado por marcos voluntarios avanzados, integración temprana de metodologías ACV y casos piloto de digitalización. Sin embargo, un desafío es el carácter voluntario de muchas iniciativas genera heterogeneidad en la aplicación práctica, ya que no todos los promotores adoptan los estándares más ambiciosos (BMK, 2023).

2.4. España: de la eficiencia energética obligatoria a la Taxonomía

El caso español presenta una trayectoria diferente que resulta igualmente instructiva. El Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado en 2006, marcó el inicio de la regulación ambiental en edificación, introduciendo requisitos mínimos en aislamiento térmico, eficiencia energética y calidad del aire (Ministerio de Vivienda, 2006).

Las modificaciones de 2013 y la actualización de 2019 alinearon progresivamente los requisitos nacionales con la definición de edificios nZEB (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2019). A diferencia de Austria, España optó por un enfoque regulatorio obligatorio que asegura homogeneidad mínima territorial, aunque sin alcanzar niveles tan avanzados en circularidad.

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC 2021-2030) establece objetivos ambiciosos: rehabilitación de 1,2 millones de viviendas con ahorro energético medio del 30% (MITECO, 2023). Resulta significativo que el acceso a fondos NextGenerationEU ha convertido la Taxonomía en filtro imprescindible, requiriendo cumplimiento del principio DNSH (*Do No Significant Harm*) y demostración de alineación con objetivos ambientales europeos.

En economía circular, España aprobó la Estrategia Española de Economía Circular 2030 (MITECO, 2020), estableciendo metas como reducción del 15% en generación de residuos. Sin embargo, los análisis muestran que la aplicación específica en construcción es limitada, con tasas de valorización de residuos de construcción y demolición en torno al 40-45%, distantes del 70% exigido por la Taxonomía (Eurostat, 2022).

2.5. Comparación Austria – España

El análisis comparativo revela dos modelos diferenciados de aproximación a la sostenibilidad constructiva:

- **Austria** desarrolló un enfoque proactivo y voluntario, creando estándares más ambiciosos que los mínimos europeos (klimaaktiv, DGNB). Esto proporciona ventajas en circularidad y ACV, aunque dependiendo de la adopción voluntaria por parte del sector. Este modelo genera excelencia en casos que lo adoptan, pero puede crear disparidades en el mercado general.
- **España** optó por un enfoque regulatorio obligatorio (CTE) que asegura homogeneidad mínima en eficiencia energética, pero carece de marcos sólidos en circularidad y digitalización. Este modelo garantiza estándares mínimos universales, aunque puede limitar la innovación por encima de requisitos obligatorios.

Respecto a la alineación con la Taxonomía, se identifica que Austria parte de un ecosistema avanzado en herramientas digitales y certificaciones de circularidad, facilitando el cumplimiento de criterios como pasaportes de materiales. España se encuentra en transición, donde la Taxonomía actúa como catalizador gracias a fondos europeos, pero con dependencia excesiva de la eficiencia energética como indicador central.

Ambos países enfrentan retos comunes: falta de datos ambientales estandarizados, integración del ACV como requisito y necesidad de capacitación técnica en herramientas digitales para verificar alineación taxonómica. Estas convergencias ofrecen oportunidades de aprendizaje mutuo y desarrollo de mejores prácticas compartidas.

La revisión de antecedentes establece el contexto necesario para comprender cómo los marcos regulatorios nacionales condicionan la implementación práctica de la Taxonomía Europea, justificando la pertinencia de mi estudio comparativo.

Capítulo 3. Marco teórico

El marco teórico de un Trabajo de Fin de Máster (TFM) constituye la base conceptual que sustenta la investigación. Su propósito es establecer un hilo conductor entre la literatura científica, la normativa europea y las herramientas digitales que se emplean en el estudio. Este marco teórico explica cómo la Taxonomía Europea se articula con las finanzas sostenibles y el principio DNSH (Do No Significant Harm), y cómo las herramientas digitales —BIM, Madaster y One Click LCA— permiten trasladar esos criterios al sector de la construcción en Austria y España.

3.1 Finanzas sostenibles, Taxonomía UE y principio DNSH

3.1.1 Finanzas sostenibles en Europa

La Unión Europea (UE) ha situado en los últimos años las finanzas sostenibles en el centro de sus políticas ambientales y económicas. Este concepto hace referencia a la integración de criterios ambientales, sociales y de buen gobierno (ASG/ESG, por sus siglas en inglés) en las decisiones de inversión. La lógica es clara: orientar los flujos de capital hacia actividades sostenibles resulta decisivo para alcanzar los objetivos climáticos, energéticos y de economía circular (OECD, 2020).

En 2018 la Comisión Europea presentó el Plan de Acción sobre Finanzas Sostenibles, que marcó un punto de inflexión en este ámbito. Dicho plan definió tres metas fundamentales (European Commission, 2018):

1. Reorientar los flujos de capital hacia inversiones sostenibles.
2. Gestionar los riesgos financieros derivados del cambio climático, la degradación ambiental y los problemas sociales.
3. Fomentar la transparencia y la visión a largo plazo en las finanzas.

De este plan surgieron los principales instrumentos normativos que hoy conforman el Marco Europeo de Finanzas Sostenibles:

- SFDR (Reglamento de Divulgación de Finanzas Sostenibles, Regulation (EU) 2019/2088): obliga a bancos y fondos de inversión a explicar cómo integran criterios de sostenibilidad en sus decisiones (European Union, 2019).
- CSRD (Directiva de Informes de Sostenibilidad Corporativa, Directive (EU) 2022/2464): amplía las exigencias de reporte de sostenibilidad a más empresas, sustituyendo a la anterior NFRD (European Union, 2022).
- Taxonomía Europea (Reglamento (EU) 2020/852): crea un sistema de clasificación común que define qué actividades económicas pueden considerarse sostenibles (European Union, 2020).

La interacción de estos tres instrumentos garantiza que la información ambiental publicada por empresas y proyectos sea comparable, verificable y relevante para inversores y responsables políticos.

3.1.2 La Taxonomía Europea como instrumento central

La Taxonomía Europea funciona como un “diccionario común” que evita que cada país o sector defina lo que considera sostenible de manera arbitraria. Antes de su existencia, coexistían múltiples estándares nacionales, lo que generaba confusión y facilitaba el greenwashing, entendido como la presentación engañosa de productos o proyectos como más sostenibles de lo que realmente son (Delmas & Burbano, 2011).

El Reglamento (UE) 2020/852 establece seis objetivos ambientales principales (European Union, 2020):

1. Mitigación del cambio climático.

2. Adaptación al cambio climático.
3. Uso sostenible y protección del agua y los recursos marinos.
4. Transición a una economía circular.
5. Prevención y control de la contaminación.
6. Protección y restauración de la biodiversidad y los ecosistemas.

Para que una actividad pueda considerarse sostenible debe cumplir simultáneamente cuatro condiciones (art. 3 del Reglamento):

- Contribuir de forma sustancial a al menos uno de los seis objetivos.
- No causar un perjuicio significativo (principio DNSH) a ninguno de los demás.
- Cumplir con garantías sociales mínimas (salvaguardas).
- Respetar los criterios técnicos de selección definidos por actos delegados.

De este modo, la Taxonomía vincula directamente la sostenibilidad con la financiación: únicamente los proyectos alineados con ella pueden optar a fondos europeos como NextGenerationEU o a inversiones privadas clasificadas como “verdes”.

3.1.3 El principio DNSH aplicado al sector construcción

El principio Do No Significant Harm (DNSH), definido en el artículo 17 del Reglamento (UE) 2020/852, es una salvaguarda que asegura que ninguna actividad sostenible lo sea a costa de causar un daño en otras dimensiones ambientales.

En el caso del sector construcción, este principio implica que un proyecto no puede:

- Reducir emisiones de carbono a costa de aumentar el consumo de agua.
- Lograr eficiencia energética usando materiales con sustancias tóxicas.

- Promover la circularidad generando contaminación o degradando ecosistemas.

En la práctica, el DNSH exige realizar evaluaciones de ciclo de vida completo de los edificios (EN 15978), de modo que no solo se mida el consumo energético en fase de uso, sino también el carbono embebido, la gestión de residuos y el impacto en biodiversidad.

3.1.4 Relación con el acceso a financiación verde

El cumplimiento de la Taxonomía y del principio DNSH tiene una consecuencia directa: acceder o no a financiación verde.

- A nivel público, todos los proyectos financiados mediante el Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (NextGenerationEU) deben demostrar que cumplen el DNSH (European Commission, 2021b).
- A nivel privado, bancos e inversores que reportan bajo SFDR y CSRD priorizan proyectos alineados con la Taxonomía porque reducen riesgos regulatorios y reputacionales.

Por tanto, la Taxonomía y el DNSH funcionan como un puente entre sostenibilidad y financiación, impulsando a las constructoras y promotoras a adoptar metodologías más rigurosas si desean acceder a recursos financieros.

3.1.5 Herramientas e indicadores complementarios: Level(s) y certificaciones

La Comisión Europea ha desarrollado Level(s), un marco común de indicadores que permite comparar el desempeño ambiental de edificios en toda la UE. Evalúa seis áreas: huella de carbono de ciclo de vida, uso de recursos, agua, salud y confort, adaptación climática y costes de ciclo de vida (European Commission, 2021a).

Al mismo tiempo, certificaciones internacionales como LEED, BREEAM o DGNB están adaptando sus criterios en el mercado europeo para alinearse con Level(s) y, de forma

indirecta, con la Taxonomía. Esto refleja una convergencia: lo regulatorio (Taxonomía) y lo voluntario (certificaciones) se están acercando cada vez más. En este trabajo resulta relevante porque herramientas digitales como Madaster y One Click LCA generan indicadores que pueden utilizarse tanto para demostrar alineación con la Taxonomía como para sumar puntos en certificaciones internacionales.

3.2 Building Information Modeling (BIM) y Revit

3.2.1 Introducción al BIM

El Building Information Modeling (BIM) no es solo un software 3D, sino una metodología de trabajo colaborativa que gestiona información digital durante todo el ciclo de vida de un edificio. Cada elemento del modelo —muros, ventanas, instalaciones— contiene no solo geometría, sino también propiedades técnicas (Eastman et al., 2011).

Las ventajas principales del BIM incluyen:

- Integración multidisciplinar: todos los agentes trabajan sobre un modelo único.
- Parametrización: cada objeto contiene datos sobre materiales, costes, impactos, etc.
- Visión de ciclo de vida completo: desde el diseño hasta la demolición.

Gracias a esto, BIM no solo sirve para diseñar, sino también para simular consumos energéticos, calcular impactos ambientales, prever residuos y tomar decisiones multicriterio (Azhar, 2011; Shadram & Mukkavaara, 2018; Won & Cheng, 2017).

3.2.2 Revit como herramienta BIM

Entre los programas BIM, Autodesk Revit es de los más utilizados. Se emplea porque:

- Sirve de base técnica homogénea para exportar modelos a Madaster y One Click LCA.
- Permite introducir parámetros ambientales (densidad, reciclabilidad, contenido reciclado).

Así, Revit se convierte en el punto de partida que conecta diseño digital y verificación normativa.

3.3 Madaster: circularidad y pasaportes de materiales

Madaster nació en Países Bajos en 2017 como una “plataforma-catastro” que registra los materiales de los edificios para tratarlos como bancos de materiales (Madaster Foundation, 2023).

El producto principal es el pasaporte de materiales (Materialpass), que otorga identidad a cada componente: tipo, cantidad, propiedades, impacto ambiental y potencial de reutilización. Como afirma Thomas Rau, fundador de Madaster, “el residuo es material sin identidad”: cuando un material está documentado, deja de ser residuo anónimo y se convierte en recurso.

Madaster se inspira en la filosofía Cradle to Cradle® (McDonough & Braungart, 2002) y en el proyecto europeo BAMB (Buildings As Material Banks, 2015–2020), que desarrolló los primeros prototipos de pasaportes digitales. Su diferencia es que ofrece una aplicación práctica y automatizada a partir de modelos BIM.

En la Taxonomía Europea, Madaster ayuda a cumplir criterios como:

- Valorización del 70 % de residuos de construcción y demolición.
- Documentación de desmontabilidad y reciclabilidad.
- Uso de materias primas secundarias.

En Austria ya se usa en programas como klimaaktiv, mientras que en España su aplicación aún es incipiente, ligada a los fondos europeos y a la Estrategia Circular 2030.

3.4 One Click LCA: análisis de ciclo de vida y huella de carbono

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es la metodología estándar para calcular impactos ambientales a lo largo de todas las fases de un edificio (EN 15978). Incluye desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida y beneficios potenciales por reciclaje.

One Click LCA es una de las plataformas más reconocidas para aplicar ACV en construcción. Permite:

- Importar cantidades desde BIM o presupuestos.
- Vincularlas con bases de datos de Declaraciones Ambientales de Producto (EPDs).
- Calcular indicadores como huella de carbono embebida, impactos operativos y circularidad.

El impacto asociado al módulo B6 depende directamente del mix eléctrico nacional, entendido como la combinación de fuentes utilizadas para generar electricidad en cada país (renovables, nuclear, gas, carbón, entre otras). Este mix determina la intensidad de carbono de la electricidad consumida (gCO_2/kWh), que varía de forma significativa según el contexto geográfico y temporal. En Austria, la elevada penetración de renovables sitúa este valor en niveles bajos, mientras que en España, aunque en plena transición energética, la intensidad es todavía más alta. One Click LCA incorpora en sus cálculos los factores de emisión de cada país publicados por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2022), lo que garantiza que los resultados reflejen el contexto energético real en el que se ubica el edificio analizado.

La Taxonomía exige reportar emisiones de ciclo de vida completo a partir de 2027, y One Click LCA está diseñada para cumplir este requisito (European Commission, 2022). En España y Austria ya se emplea en proyectos financiados con fondos europeos, en los que el principio DNSH debe demostrarse con resultados de ACV.

3.5 Normativa comparada Austria–España

La implementación de la Taxonomía varía entre países.

- Austria: combina normas obligatorias (ÖNORM, transposición *PBD 2024/1275*) con esquemas voluntarios avanzados como klimaaktiv y DGNB, e incluso ha lanzado pilotos con Madaster. Sus tasas de valorización de residuos superan el 70 % exigido (BMK, 2023; DGNB, 2022).
- España: se centra en el Código Técnico de la Edificación (CTE) como marco obligatorio, y en planes como el PNIEC 2021–2030 y la Estrategia Circular 2030 (MITECO, 2020; MITECO, 2023). Sin embargo, sus tasas de valorización de residuos se sitúan aún en torno al 40–45 % (Eurostat, 2022).

Ambos países avanzan en digitalización mediante estrategias BIM (2015), aunque Austria vincula más claramente BIM con circularidad, mientras que España lo relaciona con eficiencia energética.

3.6 Conclusión del Marco Teórico

El marco teórico presentado muestra que la Taxonomía Europea es más que una clasificación: es un lenguaje común que conecta regulación, financiación y práctica constructiva. Su aplicación en la edificación requiere traducir los criterios normativos en métricas cuantificables.

Aquí entran en juego las herramientas digitales:

- BIM/Revit → datos paramétricos y trazabilidad.
- Madaster → circularidad y pasaportes de materiales.
- One Click LCA → huella de carbono y ACV.

En Austria ya se observan proyectos pioneros alineados, mientras que en España la transición está siendo impulsada principalmente por los fondos europeos. En ambos casos, la tendencia es clara: la construcción se está transformando en un sector regulado por criterios de

sostenibilidad medibles, en el que la digitalización es condición indispensable para acceder a financiación y demostrar alineación con la Taxonomía.

Capítulo 4. Hipótesis

La revisión del marco normativo y técnico realizada en los capítulos anteriores permite plantear una hipótesis central para esta investigación. El Reglamento (UE) 2020/852 y su Reglamento Delegado (UE) 2021/2139 definen criterios técnicos de sostenibilidad para la construcción de edificios, pero no especifican los procedimientos ni las herramientas con las que estos deben ser verificados. Este vacío metodológico abre la necesidad de contar con plataformas digitales que permitan operacionalizar los requisitos de la Taxonomía Europea.

De acuerdo con esta premisa, la hipótesis del presente TFM es la siguiente:

“La integración de un modelo BIM único (Revit) con las plataformas Madaster y One Click LCA constituye un procedimiento válido y eficaz para verificar el cumplimiento de la Taxonomía Europea en edificación, tanto en nuevos edificios como en rehabilitaciones, y permite comparar la aplicación práctica de sus criterios técnicos en contextos nacionales diferentes, como Austria y España.”

Esta hipótesis se desglosa en dos supuestos específicos:

1. Los modelos BIM, enriquecidos con parámetros ambientales, constituyen una base fiable de datos para la evaluación de circularidad y huella de carbono.
2. El uso combinado de Madaster y One Click LCA permite superar las limitaciones individuales de cada herramienta y ofrecer un sistema de verificación alineado con los criterios técnicos de la Taxonomía Europea (eficiencia energética, ACV, gestión de residuos, circularidad).

La validez de esta hipótesis se pondrá a prueba en los capítulos de metodología y resultados, mediante el análisis del caso de estudio modelado en Revit y evaluado con Madaster y One Click LCA, cuyos resultados se interpretarán en relación con los criterios de la Taxonomía Europea.

Capítulo 5. Objetivos

El presente Trabajo Fin de Máster se plantea a partir de la hipótesis de que la integración de modelos BIM (Revit) con las plataformas Madaster y One Click LCA constituye un procedimiento válido para verificar el cumplimiento de la Taxonomía Europea en edificación y permite comparar su aplicación en diferentes contextos nacionales, como Austria y España. A partir de esta premisa, se definen un objetivo general y varios objetivos específicos que guían la investigación.

5.1 Objetivo general

Evaluar el grado de cumplimiento de la Taxonomía Europea en el sector de la construcción mediante la aplicación combinada de herramientas digitales (Revit, Madaster y One Click LCA), analizando su validez como sistema de verificación normativa y comparando su implementación práctica en Austria y España.

5.2 Objetivos específicos

1. Aplicar la metodología BIM a través de Revit, generando un modelo paramétrico del edificio de referencia que incorpore información técnica y ambiental necesaria para la exportación y el análisis posterior.
2. Analizar la circularidad y trazabilidad de materiales mediante Madaster, generando pasaportes digitales de materiales que permitan evaluar la alineación con el objetivo 4 de la Taxonomía (economía circular).
3. Calcular la huella de carbono y otros impactos ambientales con One Click LCA, de acuerdo con la norma EN 15978, verificando la contribución al Objetivo 1 (mitigación del cambio climático) y el cumplimiento del principio DNSH respecto a los demás objetivos ambientales.

4. Comparar la aplicación práctica de la Taxonomía Europea en Austria y España, identificando similitudes, diferencias y condicionantes derivados de sus respectivos marcos normativos y contextos sectoriales.
5. Detectar barreras y oportunidades para la implementación de la Taxonomía en el sector de la construcción, valorando tanto el potencial de las herramientas digitales como las limitaciones actuales en términos de disponibilidad de datos, requisitos normativos y madurez del sector.

Capítulo 6. Metodología

6.1 Enfoque y diseño del estudio

Se adopta un enfoque aplicado y comparativo, con diseño cuasi-experimental basado en un único prototipo de edificio digital (modelo BIM) evaluado en dos contextos regulatorios y geográficos (Viena, Austria; Madrid, España). La lógica es mantener constantes la geometría, el programa funcional y los sistemas principales del edificio, y variar únicamente los marcos normativos y los parámetros de contexto (clima, red eléctrica, escenarios de fin de vida, umbrales nZEB, disponibilidad de EPDs), para observar cómo cambia la alineación con la Taxonomía Europea.

Variables clave:

- **Independientes (de contexto):** clima y zonas climáticas; factores de conversión de energía primaria; mezcla eléctrica país; requisitos nZEB nacionales; prácticas/infraestructura de gestión de RCD.
- **Dependientes (resultado):**
 - Mitigación climática: GWP total del ciclo de vida (kgCO₂e/m², EN 15978).
 - Eficiencia energética: relación con nZEB ($\leq -10\%$ en obra nueva) o reducción $\geq 30\%$ en rehabilitación.
 - Circularidad/RCD: % valorización (objetivo $\geq 70\%$ en peso) y métricas de pasaporte de materiales.
 - DNSH: evidencias para agua, contaminación y sustancias peligrosas.

Unidad funcional y alcance:

- Unidad funcional: 1 m² de construida (consistente a lo largo del estudio).

- Periodo de estudio (RSP): 50 años (práctica común en edificación; coherente con EN 15978).
- Límites del sistema: módulos A1–A5, B4–B6, C1–C4 y reporte informativo D (beneficios/cargas fuera de los límites del sistema).

6.2 Herramientas digitales empleadas

La investigación se apoya en un conjunto de herramientas digitales que permiten trasladar los criterios de la Taxonomía Europea a métricas verificables. La selección responde a la necesidad de cubrir tres dimensiones fundamentales: modelado de información, circularidad de materiales y cálculo de impactos ambientales. Adicionalmente, se emplean programas oficiales de certificación energética para garantizar la comparabilidad con los umbrales normativos nacionales (nZEB).

Autodesk Revit (BIM).

Se utiliza como plataforma base para el modelado paramétrico del edificio y la gestión de la información. Revit permite definir la geometría, las capas constructivas y los sistemas, así como vincular a cada elemento propiedades ambientales (densidad, contenido reciclado, escenario de fin de vida, referencias a EPDs). De esta forma, el modelo BIM actúa como punto de partida único y homogéneo que asegura la trazabilidad de los datos a lo largo del análisis.

Madaster.

El modelo exportado en formato IFC se procesa en Madaster, que genera el denominado *pasaporte de materiales*. Esta herramienta calcula indicadores de circularidad (índice global, desmontabilidad, potencial de reciclaje y valor económico residual) que permiten evaluar la alineación con el objetivo 4 de la Taxonomía Europea (transición hacia una economía circular). Además, Madaster aporta transparencia sobre la composición material del

edificio y facilita la documentación relativa a la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD), requisito explícito en el Reglamento.

One Click LCA.

El análisis de ciclo de vida (ACV) y la huella de carbono se desarrollan con One Click LCA, conforme a la norma EN 15978. En la versión estudiante actualmente disponible, es posible importar directamente modelos en formato IFC, lo que permite un flujo de trabajo más integrado con Revit. El software realiza el mapeo de los elementos constructivos con su base de datos de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD), priorizando las específicas y, en su defecto, genéricas europeas. Este procedimiento facilita la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales, vinculados al objetivo 1 de la Taxonomía (mitigación del cambio climático) y al principio DNSH (Do No Significant Harm).

Soporte de cálculo normativo energético.

Dado que la Taxonomía exige que la demanda de energía primaria de un edificio nuevo sea al menos un 10 % inferior al umbral nZEB nacional, resulta imprescindible verificar este aspecto con herramientas reconocidas oficialmente en cada país:

- En **España**, la verificación se ha realizado mediante la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC), validada por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). Aunque existen otros programas oficiales autorizados para la certificación energética de edificios, en este estudio se ha empleado HULC por ser la herramienta de referencia más extendida y por su carácter gratuito y accesible.
- En **Austria**, la verificación se ha realizado conforme a la norma OIB-Richtlinie 6, mediante programas oficiales autorizados para la obtención del *Energieausweis*. En este estudio se ha empleado el software GEQ (ficha baubook), reconocido oficialmente y seleccionado por su compatibilidad con OIB-RL6 y la disponibilidad de una versión

gratuita de prueba, lo que facilitó su aplicación en el marco académico. De forma complementaria, se ha tomado como referencia cualitativa el esquema voluntario klimaaktiv, no aplicado directamente en los cálculos, pero relevante como contexto ya que incorpora criterios de eficiencia energética y circularidad que anticipan los requisitos de la Taxonomía Europea.

En conjunto, cada herramienta cubre un aspecto esencial del estudio: Revit como base común de datos, Madaster para la circularidad de materiales, One Click LCA para el ciclo de vida y la huella de carbono, y las herramientas oficiales (HULC/GEQ) para la comprobación energética. Cabe señalar que tanto HULC en España como GEQ en Austria representan ejemplos de software reconocidos oficialmente en cada país, empleados para verificar el cumplimiento de los criterios nZEB exigidos por la Taxonomía. Esta integración asegura la trazabilidad de la información y su alineación con los requisitos técnicos.

6.3 Procedimiento paso a paso

Fase 0. Preparación y supuestos

1. Definir el caso base (obra nueva, actividad 7.1 de la Taxonomía).
2. Fijar la unidad funcional, RSP (50 años) y estándares de referencia: EN 15978 para ACV y EN 15804 para EPDs.
3. Seleccionar tipología (p. ej., residencial multifamiliar u oficinas) y establecer los sistemas de referencia (estructura, envolvente, MEP).
4. Configuración inicial en Revit: creación de una plantilla de parámetros compartidos para materiales, incluyendo los campos: EPD_ID, Densidad (kg/m³), %Reciclado, Fin_de_vida (C), Reutilizable (sí/no), Grupo_RCD, Clasificación (Uniclass/OmniClass/IFC).

Fase 1. Modelado BIM (Revit)

5. Modelado geométrico y estratigráfico (muros, losas, cubiertas) con capas de material claramente definidas.
6. Asignación de materiales con propiedades físicas y ambientales; vinculación a EPDs disponibles (fabricante o genéricas europeas).
7. Modelado de sistemas MEP con parámetros mínimos (potencias, caudales, materiales principales).
8. Cuantificación: creación de tablas de planificación (materiales, categorías y volumen/masa). Validación mediante cortes y representaciones gráficas.

Fase 2. Extracción de datos y exportación

9. Exportación a IFC4 para Madaster (IfcSite georreferenciado por país; mapeo de categorías a IfcBuildingElement).
10. Exportación a **IFC4** para One Click LCA (con propiedades ambientales y cantidades desde Revit).

Fase 3. Madaster (circularidad)

11. Alta del activo y carga del IFC.
12. Revisión de mapeo y calidad de datos (completitud de capas, duplicados, materiales “desconocidos”).
13. Cálculo de indicadores: índice de circularidad (MCI), desmontabilidad, valor residual y % de masa con EPD asociada.
14. Exportación de pasaporte de materiales y capturas de evidencias (para reporting de Taxonomía y DNSH en circularidad y RCD).

Fase 4. One Click LCA (ACV)

15. Creación del proyecto (país, tipología, RSP 50 años) y selección de herramienta:
Level(s) EN 15804 +A2.

16. Importación del IFC con verificación de mapeo automático; aplicación/ajuste de una base de mapeo homologada: prioridad EPD nacionales +A2 equivalentes (misma unidad/espesor); en su defecto, EPD europeas representativas; último recurso, genéricas. Limpieza del inventario: “Sin asignar = 0” y “Unidades ambiguas = 0” (coherencia de unidades $\text{m}^2/\text{m}^3/\text{kg}$).

17. Definición de escenarios (consistentes para ambos países):

- A4 transporte: distancias medias ponderadas.
- A5: tasas de desperdicio por categoría.
- B6: energía operativa ($E_{p,tot}$) verificada con HULC (ES) / GEQ–OIB RL6 (AT) e introducida en OCLCA para trazabilidad.
- C1–C4: desmontaje, transporte y tratamiento; **objetivo de valorización $\geq 70\%$** .
- D: beneficios potenciales por reutilización/reciclaje (informativo, fuera de A1–C).

18. Cálculo y revisión de resultados: GWP total y por módulos; identificación de *hotspots* por material. (Se reportan KPIs “Carbon Heroes Benchmark” A1–C sin A5/B6 y, cuando procede, A1–C con A5/B6 normalizados por m^2).

19. Exportación de resultados: gráficos y tablas ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$; contribución por lotes) y capturas de trazabilidad del mapeo y escenarios (Anexos).

Fase 5. Verificación de criterios de la Taxonomía

20. Asignación de “criterio–indicador–fuente de verificación”:

- 7.1 Obra nueva:
 - Eficiencia energética: $E_{p,tot} \leq \text{nZEB} - 10\%$ → evidencia: reporte oficial (HULC en España, GEQ en Austria).
 - ACV completo: conforme EN 15978 → evidencia: informe One Click LCA.

- RCD ≥ 70 % valorización: evidencia: plan de RCD + métricas de Madaster + escenarios C.
- Sustancias peligrosas: evidencia: listado de materiales/EPD verificadas.
- 7.2 Rehabilitación (si aplica): reducción energética ≥ 30 % respecto al estado inicial → evidencia: comparación de certificaciones oficiales.
- Riesgos climáticos: análisis de peligros y medidas de adaptación → evidencia: ficha de riesgos.

21. DNSH: elaboración de una matriz de chequeo para los otros objetivos ambientales (agua, contaminación, biodiversidad), con justificación breve y referencias a planos, datos de consumo y EPDs.

Fase 6. Comparación Austria–España

22. Normalización de resultados por m² y RSP para garantizar comparabilidad.
23. Contextualización de diferencias: mix eléctrico, prácticas de gestión de RCD, disponibilidad de EPDs locales, umbrales nZEB.
24. Discusión de sensibilidad de resultados frente a tres factores:
- Sustitución de un material clave por una alternativa con menor GWP.
 - Variación del mix eléctrico en B6.
 - Cambio en los supuestos de fin de vida (C/D).

Fase 7. Reporte

25. Estructuración de evidencias (anexos): tablas de Revit, pasaporte Madaster, capturas de One Click LCA, verificaciones HULC/GEQ, plan de RCD, matriz DNSH.

6.4 Muestra: edificio virtual en Viena y Madrid

Para garantizar la comparabilidad, se ha definido un único modelo arquitectónico digital en Revit, exportado a IFC4 con IfcSite georreferenciado (Madrid/Viena). El modelo se

mantiene idéntico en geometría, materiales y sistemas en ambas ubicaciones; la única variación de diseño es el acristalamiento, como adaptación mínima al clima:

- Viena (clima continental): triple acristalamiento con argón y capa bajo emisiva.
- Madrid – Sierra de Guadarrama (clima mediterráneo continentalizado): doble acristalamiento selectivo.

El ACV se ha ejecutado en One Click LCA con Level(s) EN 15804 +A2 y base de mapeo homologada (prioridad EPD nacional +A2 equivalente; en su defecto, europea), dejando el inventario sin elementos sin asignar ni unidades ambiguas. La energía operativa (B6) se ha introducido con los valores oficiales de HULC (ES) y GEQ/OIB RL6 (AT) para su trazabilidad. De este modo, cualquier diferencia en los indicadores (circularidad, huella de carbono, alineación con la Taxonomía) se atribuye a factores de contexto (clima, mix eléctrico, gestión de RCD, cobertura de EPD).

Caso de uso Taxonomía: 7.1 (obra nueva).

RSP: 50 años.

Hipótesis comunes: tasas de mantenimiento/sustitución B4; vida útil de componentes (según EPD o bibliografía técnica); supuestos de C/D coherentes con el país.

Capítulo 7. Análisis y resultados

7.1 Descripción del caso y cálculo energético

Alcance. En este TFM no se modifican los materiales del edificio ni su sistema constructivo. El inventario de Madaster y los materiales en One Click LCA permanecen “as-is”. La única decisión de diseño aplicada al cálculo energético es la premisa de acristalamiento por clima: triple en Viena y doble selectivo en la Sierra de Madrid. Los resultados energéticos se emplean para el módulo B6 (energía de uso) y la estimación de agua en One Click LCA.

La geometría de la vivienda y su integración en la parcela se aprecia en distintas vistas del modelo BIM (**Figuras 1–5**). El detalle de la envolvente térmica y la continuidad de capas, fundamentales para el cálculo de transmitancias, se representa en la **Figura 6**, mientras que los cálculos de U-valores a partir de capas se documentan en las **Figuras 7–12**.

7.1.1 Ficha del edificio

- **Uso: Vivienda unifamiliar aislada** (planta baja + planta primera).
- **Superficie bruta: 317,46 m²; superficie útil acondicionada: 263,23 m².**
- **Sistemas:** Bomba de calor con suelo radiante (calefacción) y techo refrigerante (refrigeración).
- **Fotovoltaica:** aprox. 36 m² (20 módulos); no se descuenta de B6 en esta fase.
- **Ubicaciones metodológicas:**

Austria: Walzengasse, 2380 Perchtoldsdorf (área metropolitana de Viena).

España: Cercedilla (Sierra de Madrid).

B6 es la energía operativa del edificio durante su vida útil (fase de uso). En normas de edificación y ACV (EN 15978 / EN 15804 +A2) B6 recoge los impactos del consumo de energía en uso del edificio.

En este TFM, B6 significa, exactamente:

- **Qué incluye:** la electricidad consumida en operación (iluminación, equipos, ventilación/auxiliares...); se introduce en One Click LCA como kWh/año, se extrapola a 50 años (vida de estudio) y se convierte a impactos con el mix eléctrico nacional IEA-2022 de cada país (Austria o España).
- **Qué no incluye:** calefacción ni agua caliente sanitaria (no las estamos modelando en B6), agua (eso es B7), ni nada de obra o materiales (eso es A y C).

- **Fotovoltaica:**

- **Austria:** la energía exportada a red se reporta como crédito en Módulo D (fuera de A1–C).
- **España (Madrid):** no estamos aplicando crédito en Módulo D; B6 refleja la electricidad de uso tal como se ha introducido (sin restar créditos por exportación).

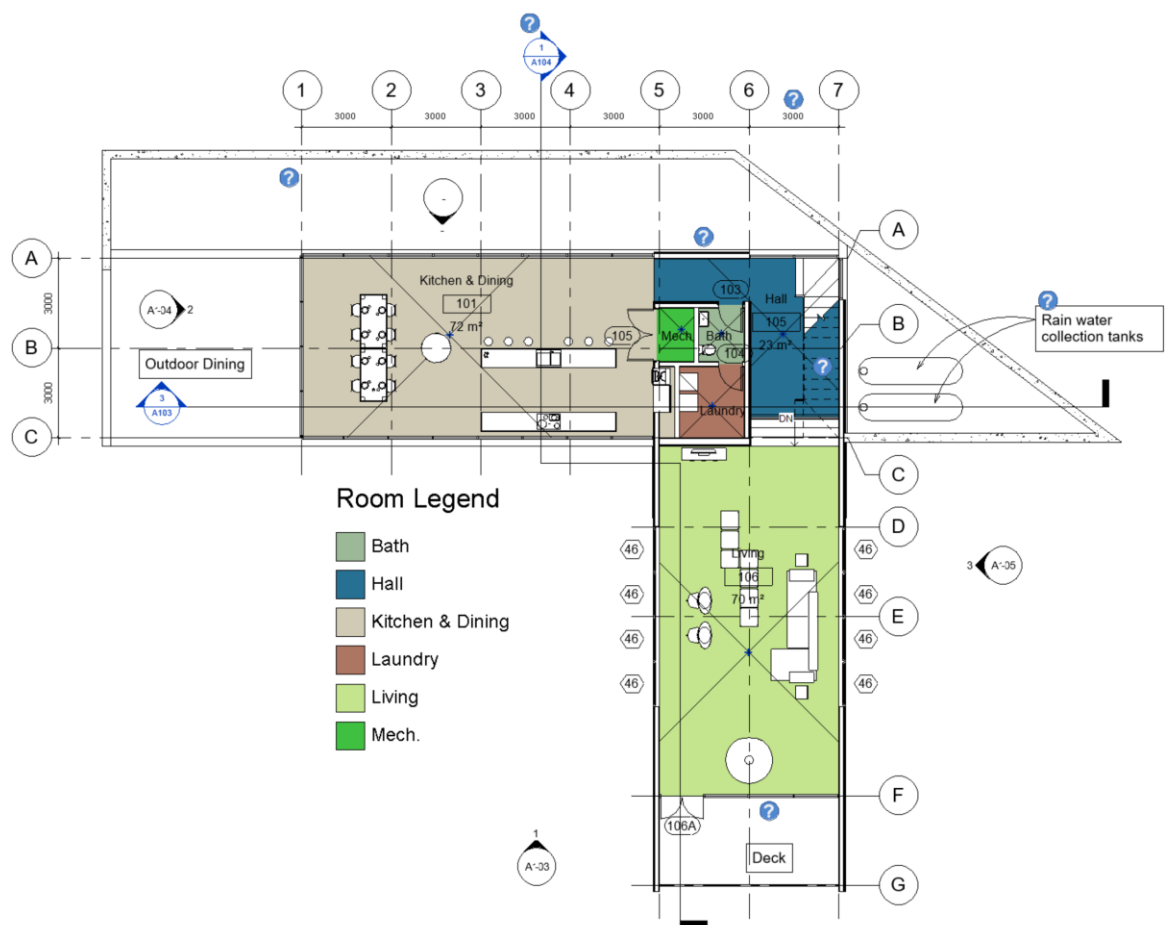


Figura 1 Vistas de sección planta baja. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.

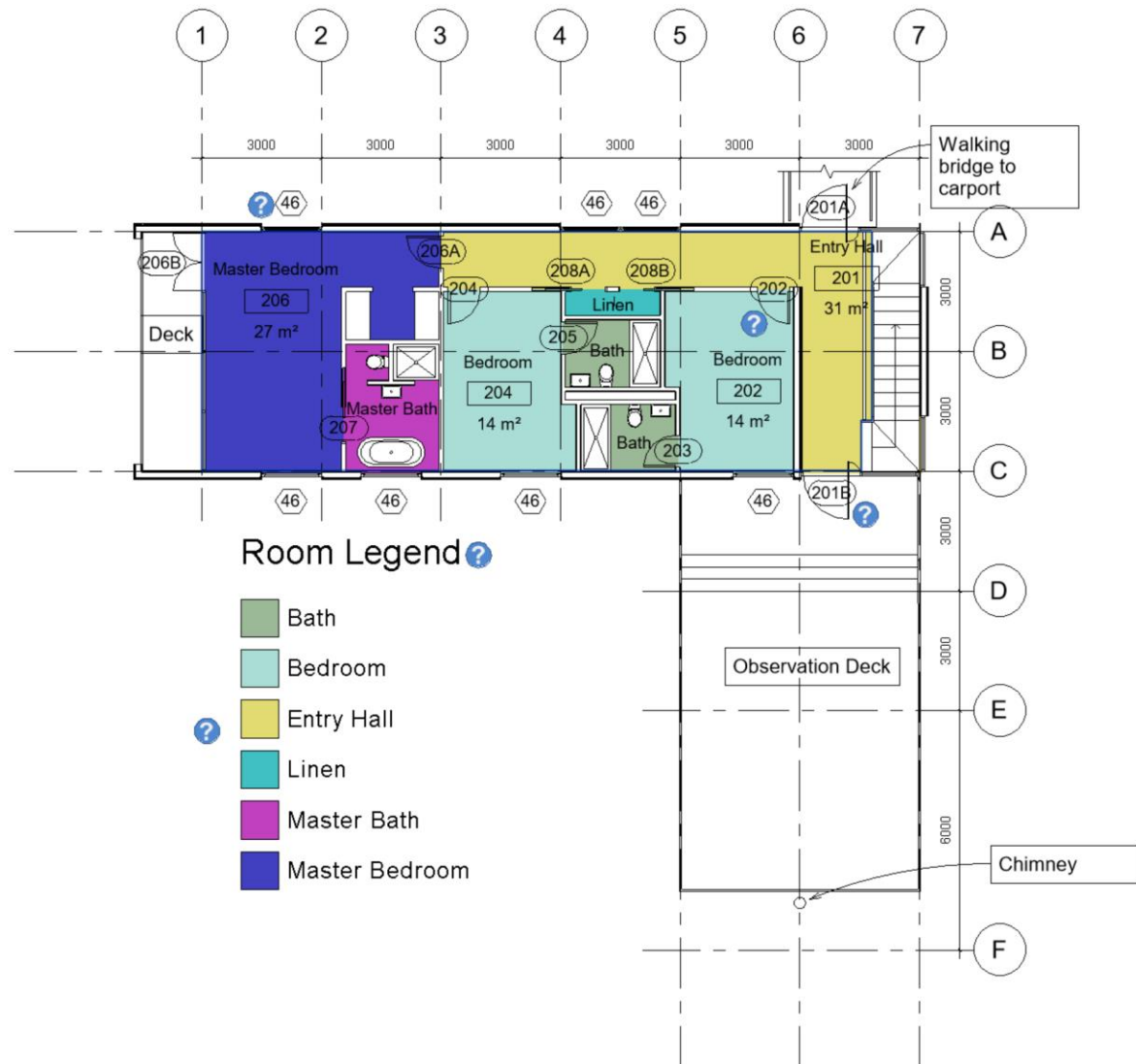


Figura 2 Vistas de sección planta primera. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.



Figura 3 Vivienda unifamiliar y parcela: integración en pendiente. Vista 3D. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.

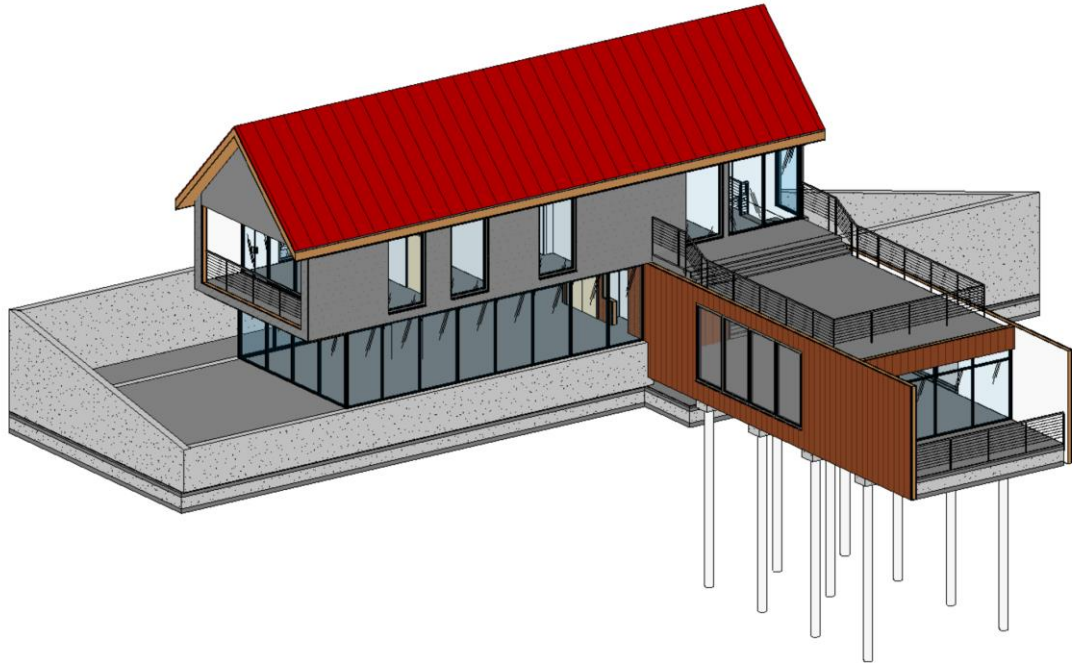
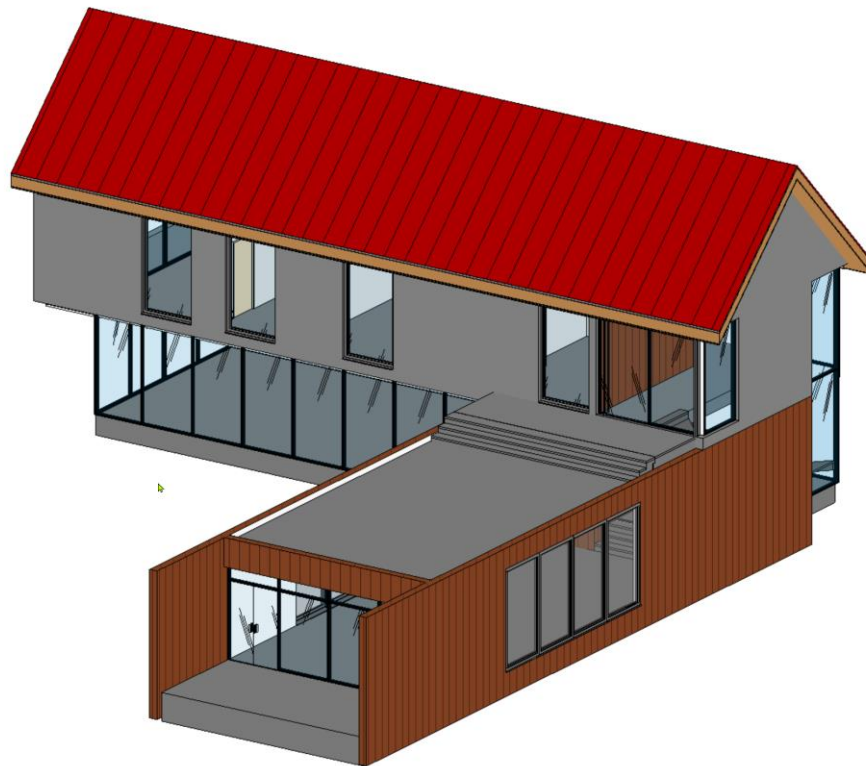
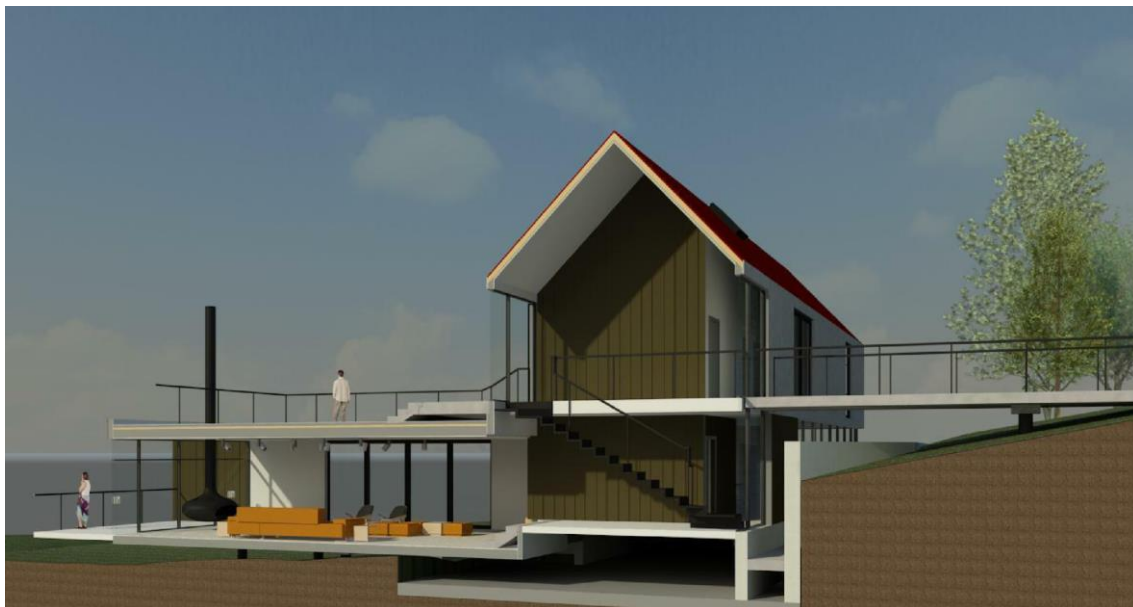


Figura 4 Superestructura. Elementos portantes principales tal como se exportan en IFC para ser importado en Madaster y en One Click LCA. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.



*Figura 5 **Envolvente térmica.** Cerramientos opacos y huecos del modelo usados en el cálculo energético. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.*



*Figura 6 **Sección 3D- forjado ventilado.** Detalle constructivo y continuidad de capas; base para U y para el cálculo energético en HULC y en GEQ. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.*

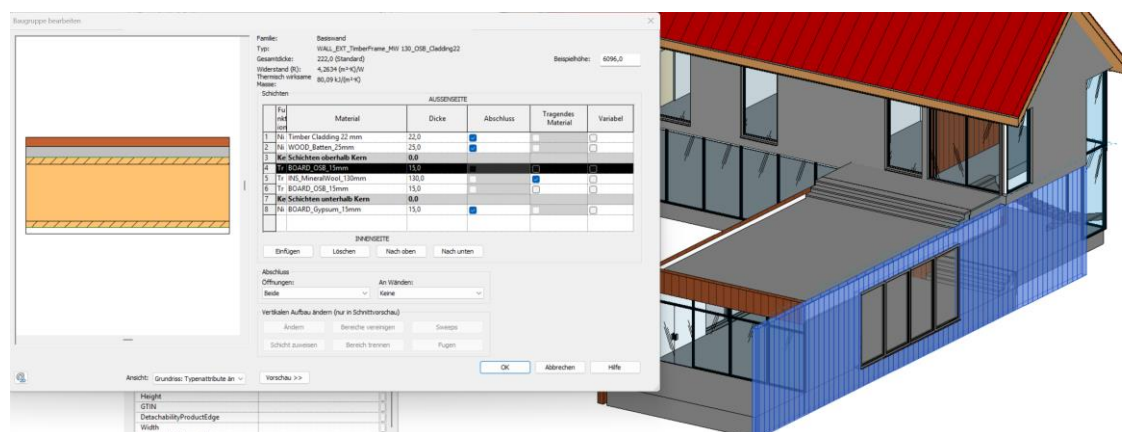


Figura 7 Detalles constructivos con transmitancias calculadas en Revit. Cálculo de U a partir de capas/nº de láminas. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.

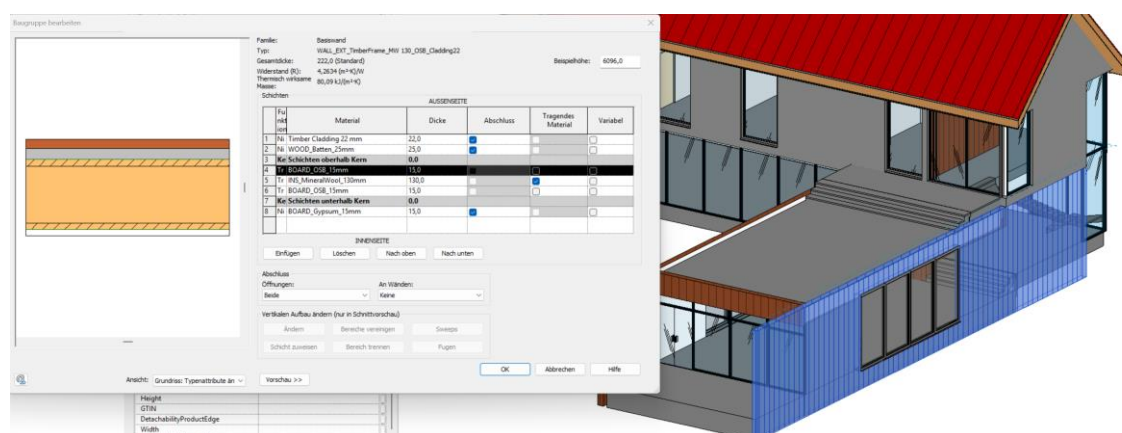


Figura 8 Detalles constructivos con transmitancias calculadas en Revit. Cálculo de U a partir de capas/nº de láminas. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.

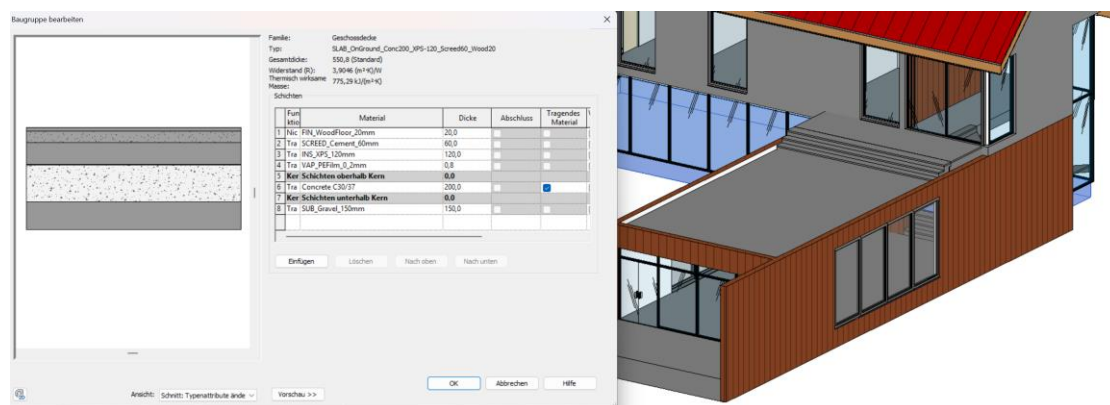


Figura 9 Detalles constructivos con transmitancias calculadas en Revit. Cálculo de U a partir de capas/nº de láminas. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.

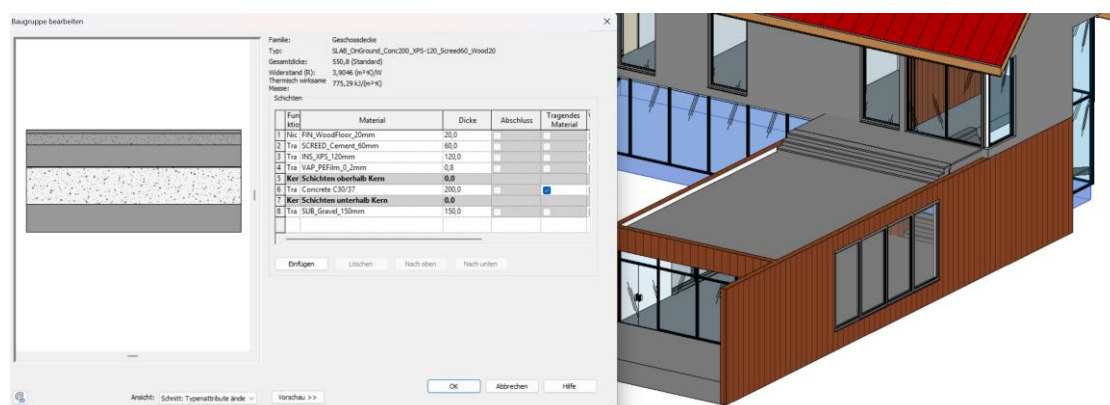


Figura 10 Detalles constructivos con transmitancias calculadas en Revit. Cálculo de U a partir de capas/nº de láminas. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.

7.1.2 Envoltente y superficies (modelo IFC)

Elemento	Superficie Bruta
Muros exteriores	288,91 m²
Huecos acristalados	204,98 m²
Cubierta (<i>única; sin doble conteo por capas</i>)	274,00 m²
Suelo en contacto con el terreno sobre cámara de aire ventilada	189,99 m²

Estos resultados energéticos alimentan el **módulo B6** en **One Click LCA** y permiten la **comparación Austria–España** del apartado 7.4.

7.1.3 Acristalamientos por clima (premisa de diseño)

Ubicación	Composición	U _g W/m ² ·K	U _f W/m ² ·K	U _w aprox.: W/m ² ·K	g	TL
Viena (Perchtoldsdorf)	Triple 4/16/4/16/4, bajo emisivo + argón	0,5	1,0	1,00	0,55	70%
Sierra de Madrid (Cercedilla)	Doble 6/16/6 selectivo	1,6	2,0	1,68	0,45	65%

Figura 11 Tablas de parámetros U-valores calculados en Revit. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.

7.1.4 Supuestos de modelización energética

- **Método:** Transmisión + ventilación con **grados-día base 18 °C (HDD18)**.
- **Altura media / Volumen:** **2,70 m / ~710,7 m³**.
- **Ventilación:** **0,5 ACH** → $H_v = 0,33 \cdot n \cdot V$
- **Bomba de calor:** **SCOP = 3,5**.
- **Factor de energía primaria (electricidad):** **PEF = 2,1**.
- **HDD18:** **Viena 3.050 · Sierra de Madrid 2.600 K·día**.

- **Nota:** el **suelo a terreno** se ha valorado por **capas** (cálculo simplificado). La aplicación de **ISO 13370** puede refinar este término.

7.1.5 U-valores empleados (opacos “as-is” del IFC)

Familie und Typ	Material	Wärmedurchgangskoeffizient (U) U _{total} ≈ W/m ² ·K	Thermischer Widerstand (R) R _{total} ≈ m ² K/W	Fläche m ²	Dicke mm
Cubierta: ROOF_MetalSeam_Warm_MW-200_VCL_OSB18_Gyp12	ROOF_MetalStandingSeam_0_8mm	0,1700	5,9000	1402,57	274
	BATTEN_VentilatedCavity_40mm				
	WPROOF_Membrane_2mm				
	INS_MineralWool_200mm				
	VAP_PEFilm_0_2mm				
	BOARD_OSB_18mm				
	BOARD_Gypsum_12_5mm				
Estructura horizontal entre espacio habitado: SLAB_InteriorRoomUFH_Dry_Conc250_DryPanel25_Wood15	FIN_WoodFloor_15mm	0,8830	1,1258	100,00	354
	UND_AcousticFoam_2mm				
	SCREED_UFH_Anhydrite_60mm				
	INS_EPS_ThermoDecouple_20mm				
	VAP_PEFilm_0_2mm				
	Concrete 20/25				
Forjado de terraza/sobre salón: SLAB_TerraceAboveRoom_Conc200_XPS-140_Waterproof	FIN_TerraceTile_30mm	0,2000	5,0112	70,7860	556
	SCREED_Terrace_30mm				
	WPROOF_Membrane_6mm				
	INS_XPS_140mm				
	Concrete C30/37 (300 mm)				
	FIN_GypsumRender_15mm				
Estructura horizontal sobre cámara de aire ventiladas tipo 1: SLAB_OnGround_Conc200_XPS-120_Screed60_Wood20	SCREED_Cement_60mm	0,2561	3,9046	105,91	550,8
	INS_XPS_120mm				
	VAP_PEFilm_0_2mm				
	Concrete C30/37 (200 mm)				
	SUB_Gravel_150mm				
Estructura horizontal sobre cámara de aire ventiladas tipo 2: SLAB_OnGround_Conc400_XPS-120_Screed60_Wood20	SCREED_Cement_60mm	0,2500	4,0157	92,35	750,00
	INS_XPS_120mm				
	VAP_PEFilm_0_2mm				
	Concrete C30/37 (400 mm)				
	SUB_Gravel_150mm				
Cerramiento vertical tipo 1: WALL_EXT_TimberFrame_MW_130_OSB_Cladding22	FIN_CementRender_22mm	0,2346	4,2634	163,91	222
	WOOD_Batten_25mm				
	BOARD_OSB_15mm				
	INS_MineralWool_130mm				
	BOARD_OSB_15mm				
	BOARD_Gypsum_15mm				
Cerramiento vertical tipo 2: WALL_EXT_TimberFrame_MW-130_OSB_ConcRender22	Timber Cladding 22 mm	0,2433	4,1099	125,00	222
	WOOD_Batten_25mm				
	BOARD_OSB_15mm				
	INS_MineralWool_130mm				
	BOARD_OSB_15mm				
	BOARD_Gypsum_15mm				

Figura 12 Tablas de parámetros U-valores calculados en Revit. Fuente: elaboración propia a partir de una Template de Revit.

7.1.6 Resultados de calefacción (transmisión + ventilación, “as-is”, con vidrios por clima)

Alcance y referencias. Cálculo simplificado por transmisión + ventilación (grados-día) sobre el modelo tal cual (*as-is*) y con la premisa de acristalamiento por clima (triple en Viena; doble selectivo en la Sierra de Madrid).

Intensidades referidas a la superficie útil acondicionada: 263,23 m².

Fotovoltaica: no se descuenta en este cálculo; su tratamiento en ACV se documenta en §7.3 (crédito Módulo D en Austria).

Viena (Perchtoldsdorf)

- $HT \approx 1.449 \text{ W/K}$; $H_{\text{total}} \approx 1.566,00 \text{ W/K}$.
- Demanda anual (Q) $\approx 114.656,00 \text{ kWh/año}$.
- Electricidad bomba de calor (B6) $\approx 32.759,00 \text{ kWh/año}$ (SCOP = 3,5).
- Energía primaria (factor 2,1) $\approx 68.794,00 \text{ kWh/año}$ ($\approx 261 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$).

Sierra de Madrid (Cercedilla)

- $HT \approx 1.588 \text{ W/K}$; $H_{\text{total}} \approx 1.706,00 \text{ W/K}$.
- Demanda anual (Q) $\approx 106.437,00 \text{ kWh/año}$.
- Electricidad bomba de calor (B6) $\approx 30.411,00 \text{ kWh/año}$ (SCOP = 3,5).
- Energía primaria (factor 2,1) $\approx 63.862,00 \text{ kWh/año}$ ($\approx 243 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$).

Agua (para One Click LCA, B7). Estimación operativa: 4 personas \times 120

L/persona·día $\rightarrow \approx 175,2 \text{ m}^3/\text{año}$ por vivienda.

Nota metodológica — energía operativa y verificación nZEB.

El balance de calefacción mostrado se ha calculado con un método simplificado (transmisión + ventilación mediante grados-día). Este resultado se usa únicamente como estimación para el módulo B6 en One Click LCA (electricidad, mix nacional IEA-2022, sin calefacción/ACS ni ganancias internas/solares explícitas). La verificación normativa del requisito 7.1 de la Taxonomía ($PED \leq nZEB - 10 \%$) se acreditará con herramientas oficiales:

HULC en España y GEQ (OIB-RL6) en Austria. Por tanto, el cálculo manual no sustituye los resultados del certificado energético oficial, que son los que prevalecen en la comprobación del criterio.

7.1.7 Marco normativo (resumen operativo)

- España – CTE DB-HE (2023). La verificación reglamentaria se hace por energía primaria total y no renovable (HE0) y por limitación de demanda/envolvente (HE1), con exigencias según zona climática y uso. Texto oficial del DB-HE. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023).
- Austria – OIB-Richtlinie 6. La OIB-RL6 (2023) unifica criterios de eficiencia energética y protección térmica (base del Energieausweis) y sirve como referencia para el contexto vienes. (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2023).
- Directiva (UE) 2024/1275 (refundición). La Directiva (UE) 2024/1275 orienta la transición desde nZEB hacia edificios de cero emisiones y refuerza la comparabilidad mediante PED. (Parlamento Europeo & Consejo, 2024).
- Taxonomía UE – Actividad 7.1 (obra nueva). Criterio de contribución sustancial: la Demanda de Energía Primaria (PED) del edificio resultante debe ser al menos un 10 % inferior al umbral nZEB fijado a nivel nacional y acreditarse con EPC “as-built”. (Comisión Europea, 2025, Anexo I §7.1).

7.2 Resultados Madaster (circularidad y materiales)

Alcance. El modelo IFC exportado desde Revit se ha procesado en Madaster para generar el pasaporte digital de materiales, que incluye indicadores de circularidad, masa total, desmontabilidad y valor residual. Estos resultados se emplean para evaluar la contribución sustancial al objetivo 4 de la Taxonomía (economía circular).

El pasaporte de materiales generado en Madaster refleja que la masa total del edificio asciende a 1.189 t, de las cuales el 98 % corresponde a la estructura (Figura 13). La distribución de esta masa por capas constructivas se representa en la Figura 14, mientras que el desglose por familias de materiales aparece en la Figura 15.

El índice global de circularidad (MCI) se sitúa en un 66 % (Figura 16), aunque se observan variaciones significativas según capas y elementos. La Figura 17 muestra los indicadores sin aplicar EN 15804+A2, mientras que la Figura 18 compara los resultados según distintas configuraciones normativas.

El valor residual de los materiales, un aspecto clave de la economía circular, alcanza 91.615 € en valor actual, reduciéndose a 69.566 € tras descontar costes futuros de desmontaje y procesado (Figura 19).

7.2.1 Introducción

Este apartado presenta los resultados obtenidos con Madaster, herramienta digital que genera el pasaporte de materiales (*Materialpass*) del edificio. Más allá de las cifras, este análisis permite comprender cómo conceptos como circularidad, reciclaje, reutilización o desmontabilidad se reflejan en indicadores concretos y en el valor económico residual.

7.2.2 Conceptos clave: aclarando dudas frecuentes

¿Qué es un pasaporte de materiales?

El Materialpass es un inventario digital que registra todos los materiales presentes en un edificio: su tipo, cantidad, propiedades, código de residuo, potencial de reciclaje y valor

económico residual. Se genera a partir de un modelo BIM exportado a IFC y enriquecido con datos ambientales de bases europeas (Baubook, IBU, Ökobau.dat, EPEA). En palabras sencillas: convierte el edificio en un “banco de materiales”, donde cada componente tiene identidad y valor.

El pasaporte de materiales es una herramienta digital que documenta de manera sistemática todos los componentes de un edificio, dotándolos de identidad propia. Esta identidad se traduce en datos como el nombre del material, su composición, propiedades técnicas, impactos ambientales, trazabilidad en el edificio y posibilidades de recuperación al final de su vida útil.

Gracias a esta identificación, los edificios se conciben como bancos de materiales: un conjunto de recursos que, en lugar de convertirse en residuos, se transforman en activos con valor residual que pueden mantenerse en circulación en futuros ciclos de uso.

En función de sus características, los materiales se clasifican en dos grandes categorías: aquellos que pueden retornar de forma segura a la naturaleza (como la madera o el algodón) y aquellos que pueden reintegrarse en procesos industriales (como los metales o determinados plásticos diseñados para reciclarse).

El pasaporte no solo registra esta información, sino que también incorpora un manual de deconstrucción, con pautas sobre la mejor forma de retirar cada componente para conservar su valor. De esta forma, un edificio deja de ser visto como un generador de residuos al final de su vida útil, y pasa a ser una inversión en recursos, donde cada material se coloca temporalmente en un lugar hasta que pueda reincorporarse a un nuevo ciclo de uso.

¿Qué significa circularidad?

La circularidad en construcción mide hasta qué punto los materiales de un edificio se

mantienen en un ciclo de valor en lugar de convertirse en residuos. Madaster la resume en un indicador global, el MCI (Madaster Zirkularitätsindikator), que combina:

- Origen de materiales (vírgenes o reciclados).
- Destino al final de vida (reciclaje, reutilización, vertedero o incineración).
- Desmontabilidad (capacidad de separarlos sin destruirlos).

¿Reciclable, reutilizable, desmontable?

- *Reciclable*: el material se transforma en otro (ej. acero → acero nuevo).
- *Reutilizable*: se puede volver a usar tal cual (ej. desmontar una ventana e instalarla en otro edificio).
- *Desmontable*: se puede retirar sin destruirlo, aunque luego vaya a vertedero.

¿Importa la localización geográfica?

En Madaster, los indicadores de circularidad no dependen del país: un muro cortina en Viena o en Madrid tendrá la misma circularidad. Lo que sí cambia en la realidad es el grado de recuperación efectiva, que depende de las infraestructuras locales de reciclaje. Esto no lo recoge el cálculo, pero conviene mencionarlo como limitación.

¿De dónde salen los porcentajes de circularidad y reciclaje?

Madaster se apoya en normas y bases de datos reconocidas:

- EN 15804+A2: regula las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) en construcción.
- ISO 14040/44: establecen la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.
- Bases de datos ambientales (IBU, Baubook, Ökobau.dat, EPEA).

- El indicador MCI está inspirado en el *Material Circularity Indicator* de la Ellen MacArthur Foundation.

Esto significa que cuando el informe indica que “el hormigón es 89 % valorizable”, no es un valor inventado por el software, sino el resultado de aplicar valores de referencia de esas bases de datos.

7.2.3 Masa total y composición del edificio

El edificio analizado presenta una masa total de 1.189 toneladas (1,19 kt), lo que equivale a una intensidad de materiales de 3,18 t/m² de superficie construida. Esta cifra sitúa al proyecto dentro de los valores habituales en edificaciones de tipología residencial con estructura de hormigón, donde la estructura constituye el principal aporte en peso.

La distribución por materiales muestra una clara dominancia del hormigón, que representa más del 80 % de la masa total. Le siguen los metales (12 %), la madera (3 %), la piedra natural (2 %) y un conjunto de materiales minoritarios (plásticos, yeso, pinturas, adhesivos, etc.), que en conjunto no superan el 2 %.

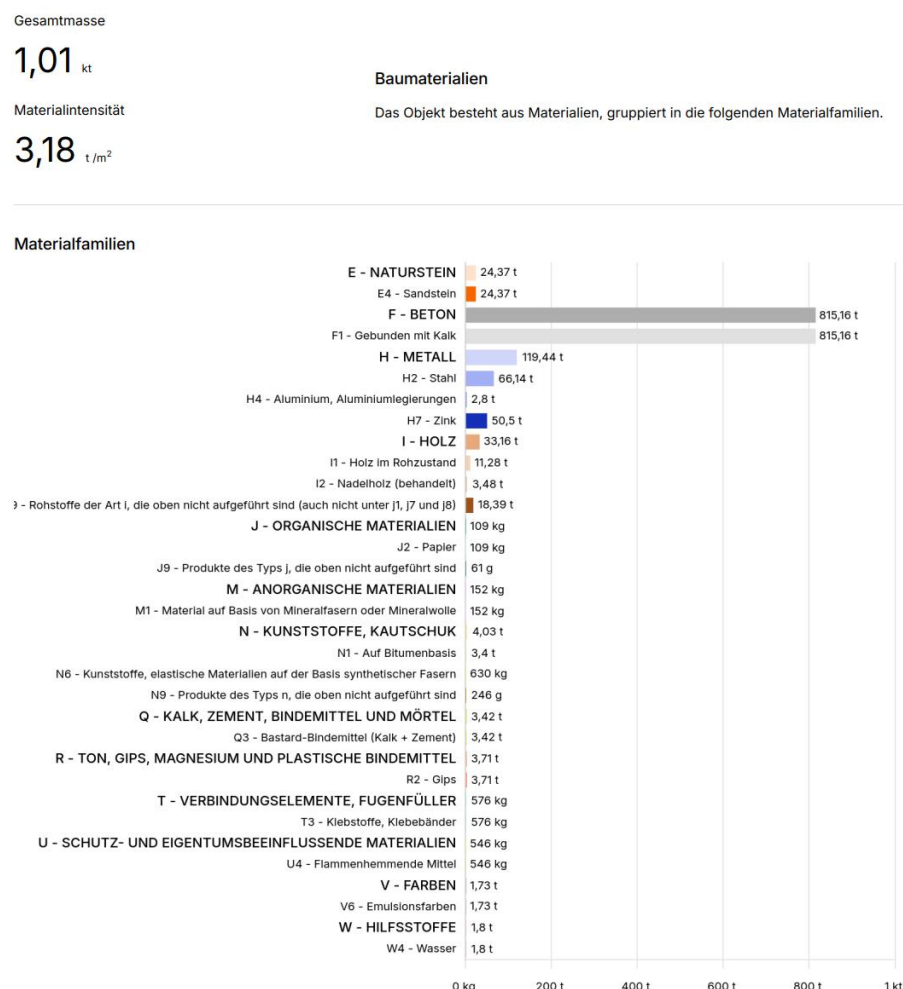


Figura 13 Masa total del edificio y desglose por familias de materiales en toneladas. Fuente: elaboración propia a partir del pasaporte de materiales generado en Madaster (2025).

Como se observa en la *Figura 13*, el hormigón armado (815 t) domina la composición del edificio, seguido de los metales (119 t, principalmente acero) y en menor medida la madera (33 t). El resto de los materiales apenas tiene peso en la masa global, aunque, como veremos más adelante, sí juegan un papel relevante en los indicadores de circularidad y en el principio DNSH.

Masse nach Gebäudeschichten

Gebäudeschichten

Madaster verwendet das "Shearing Layers"-Modell [Duffy, Brand, 1994], um ein Objekt in 6 Schichten zu unterteilen: Umgebung, Baukonstruktion, Gebäudehülle, Technische Anlagen, Innenausbau und Mobiliar.

Materialfamilien

Die 406 einzigartigen Materialien, aus denen das Objekt besteht, wurden in 34 Materialfamilien gruppiert.

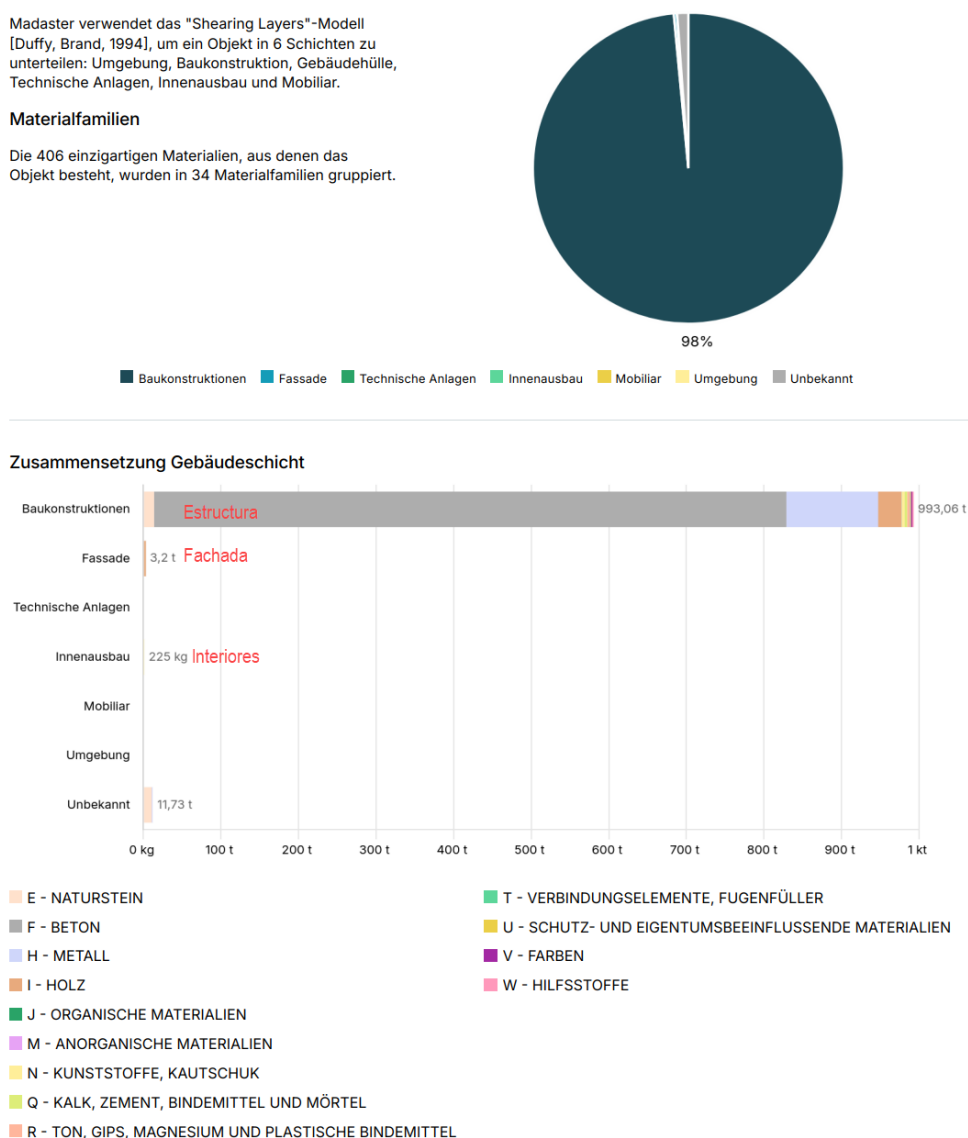
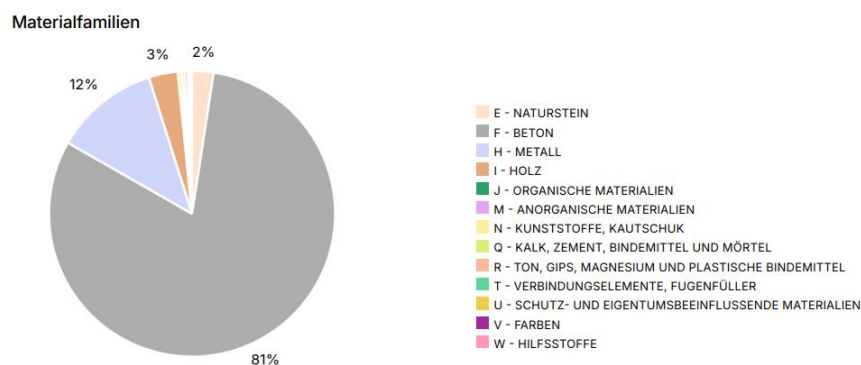


Figura 14 Masa del edificio distribuida por capas constructivas ("shearing layers"). Fuente: elaboración propia con datos de Madaster (2025).

La Figura 14 muestra la masa del edificio repartida entre las distintas capas constructivas. La estructura concentra prácticamente toda la masa (≈ 993 t), mientras que la fachada apenas suma 3,2 t y los interiores 225 kg. Esto refleja una característica típica de la construcción contemporánea: la estructura no solo condiciona la estabilidad del edificio, sino que también determina la mayor parte de sus impactos ambientales y de su circularidad.

Masse nach Materialfamilien



Zuordnung der Materialfamilien nach Gebäudeschichten

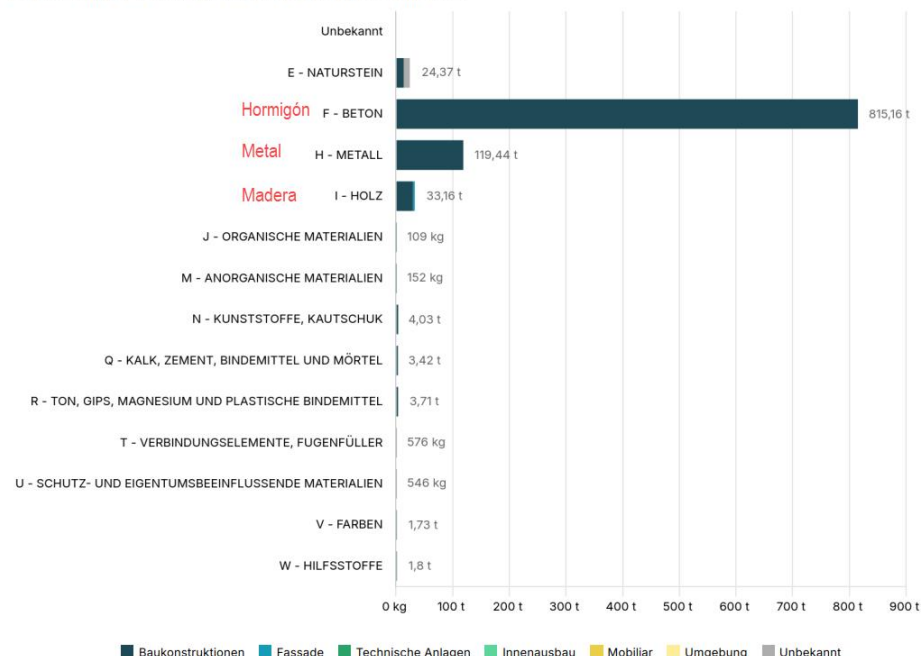


Figura 15 Distribución de la masa por familias de materiales, expresada tanto en proporción relativa (%) como en magnitud absoluta (t). Fuente: elaboración propia con datos de Madaster (2025).

En la Figura 15 se combinan dos perspectivas:

- El gráfico circular ilustra la proporción relativa de cada material dentro del total (ej. 81 % hormigón, 12 % metales, 3 % madera).
- El gráfico de barras complementa esta visión mostrando la masa absoluta en toneladas, lo que permite dimensionar el peso real de cada familia de materiales.

Este doble enfoque es útil porque aclara un aspecto clave: aunque ciertos materiales como adhesivos, pinturas o plásticos tienen muy poco peso en términos de toneladas, su importancia en los indicadores de circularidad y en la alineación con la Taxonomía es mucho mayor de lo que aparenta en la masa total.

7.2.4 Circularidad global y por capas

Circularidad global (MCI): 66 %

Esto indica que dos tercios de los materiales tienen potencial de mantenerse en un ciclo de valor. Es un resultado intermedio-alto, pero se debe interpretar con cautela: no significa que hoy en día se recicle el 66 %, sino que podría recuperarse en condiciones óptimas.

Resultados por capas:

- **Estructura:** Circularidad alta (79 %), reciclabilidad 89 %, desmontabilidad baja (14 %).
→ Circular por lo que *puede llegar a ser* (hormigón downcycling).
- **Fachada:** Circularidad muy baja (2 %), reciclabilidad 0 %, desmontabilidad alta (94 %).
→ Muy desmontable, pero para ir al vertedero.
- **Interiores:** Circularidad 5 %, reciclabilidad 0 %, desmontabilidad 0 %. → Poca masa, pero materiales muy problemáticos.

Madaster Zirkularitätsindikator (MZI)

Zirkularität berücksichtigt den Anteil der beim Bau verwendeten Sekundärrohstoffe sowie das Potenzial aller verwendeten Rohstoffe für die Wiederverwendung oder das Recycling am Ende der Nutzungsdauer.

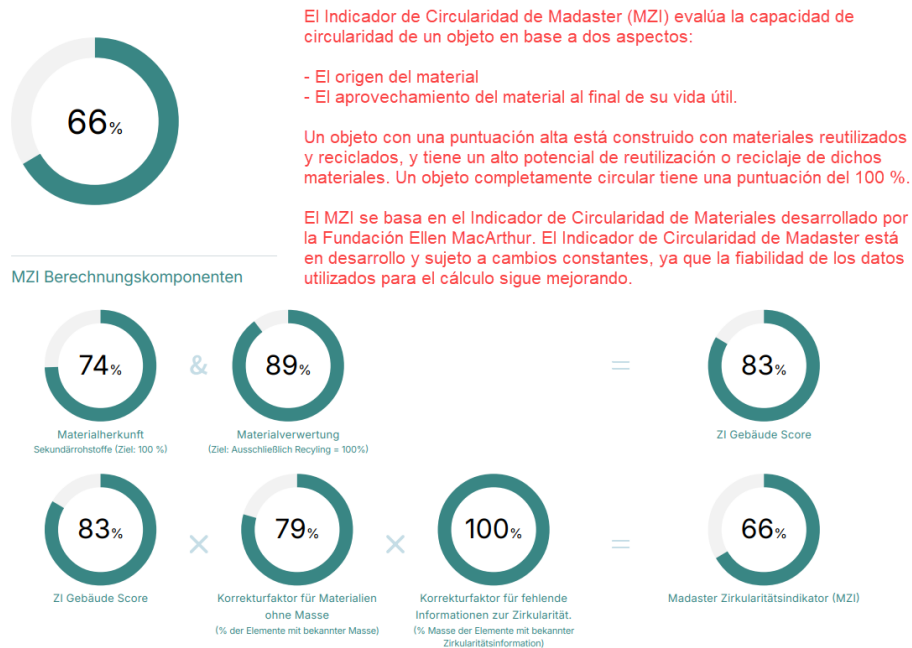


Figura 16 . Circularidad global del edificio según el indicador MCI de Madaster. Fuente: elaboración propia con datos de Madaster (2025).

Parte superior (indicadores principales) de la figura 16:

- 66 % – Madaster Zirkularitätsindikator (MCI)
 - Es la circularidad global del edificio. Resume todos los factores y nos dice que dos tercios de la masa tienen un potencial circular.
- 74 % – Materialherkunft (origen de materiales)
 - Indica que el 74 % de la masa total proviene de materiales secundarios (reciclados, reciclables o reutilizables).

- 89 % – Materialverwertung (valorización de materiales)
→ Nos dice que el 89 % de la masa se podría reciclar o reutilizar al final de la vida útil.
- 83 % – ZI Gebäude Score (puntuación base del edificio)
→ Es la “nota preliminar” de circularidad, antes de penalizar por carencias de datos.
- 79 % – Korrekturfaktor für Materialien ohne Masse (corrector por materiales sin masa conocida)
→ Como no todos los materiales tenían masa registrada en el modelo BIM, se aplica una penalización.
- 100 % – Korrekturfaktor für fehlende Informationen (corrector por falta de datos de circularidad)
→ Aquí no hay penalización porque todos los materiales tenían al menos información mínima de circularidad.

Parte inferior (MCI nach Gebäudeschicht – Circularidad por capas constructivas) de la figura 4, aquí se detalla cuánto aporta cada parte del edificio a la circularidad:

- Estructura (Baukonstruktionen)
 - MCI = 79 %
 - ZI Gebäude Score = 84 %
 - Origen secundario = 74 %
 - Valorización = 89 %

Es la que más peso tiene y la que “salva” el resultado global.

- Fachada (Fassade)

- MCI = 2 %
- ZI Gebäude Score = 48 %
- Origen secundario = 85 %
- Valorización = 0 %

Aunque parece que se compone de materiales secundarios, en la práctica no hay capacidad de reciclarlos (vidrio laminado, adhesivos, aislantes).

- Interiores (Innenausbau)

- MCI = 5 %
- ZI Gebäude Score = 37 %
- Origen secundario = 59 %
- Valorización = 0 %

Materiales de poco peso, pero problemáticos: pinturas, colas, acabados.

- Entorno (Umgebung)

- Origen secundario = 77 %
- Valorización = 0 %

Se registran algunos elementos, pero su peso es muy pequeño.

- Mobiliario (Mobiliar) y Instalaciones técnicas (Technische Anlagen)

→ En este modelo no aportan prácticamente nada (MCI = 0 %).

- Elementos “desconocidos” (Unbekannt)

- MCI = 69 %

- ZI Gebäude Score = 79 %
- Origen secundario = 76 %
- Valorización = 77 %

Son materiales que estaban en el modelo BIM pero sin clasificar del todo.

Madaster los estima con valores genéricos.

El MCI es el resultado final de circularidad; el ZI Gebäude Score es la nota preliminar antes de penalizaciones; el origen secundario mide de dónde vienen los materiales; y la valorización indica adónde pueden ir al final de su vida útil.

El gráfico nos enseña que:

- No todos los porcentajes son lo mismo. Algunos miden el origen (si son reciclados), otros el final de vida (si se reciclan), otros la calidad de la información (si el modelo BIM está bien definido).
- La estructura “engorda” el resultado, aunque su circularidad real es discutible (downcycling del hormigón).
- La fachada y los interiores son el gran talón de Aquiles: en papeles desmontables, en la práctica residuos.
- La calidad del modelo BIM influye directamente en los resultados: cuanto más detallada sea la información, menos penalizaciones (como el 79 % por masa desconocida).

La paradoja del hormigón y el acero en circularidad

Al interpretar los indicadores de “origen secundario” y “valorización” conviene distinguir entre materiales que son circulares por lo que ya son hoy y materiales que aparecen como circulares por lo que podrían llegar a ser.

- Acero → Circular por lo que es.

En Europa, gran parte del acero de construcción contiene chatarra reciclada ($\approx 60\%$) y, además, puede reciclarse indefinidamente en ciclo cerrado sin perder calidad. Por eso sus altas puntuaciones en circularidad reflejan un comportamiento real y consolidado en el mercado.

- Hormigón → Circular por lo que puede ser.

Aunque en la práctica la mayoría del hormigón se produce aún con áridos y cemento vírgenes, las bases de datos utilizadas por Madaster (EPDs genéricas y EN 15804) suelen asumir que puede incluir áridos reciclados o que, al final de su vida útil, puede triturarse y reutilizarse como árido en nuevas mezclas.

Esto le otorga buenas puntuaciones en “origen secundario” y “valorización”, aunque en la realidad la tasa de uso de áridos reciclados en Austria y España todavía es baja (10–15 %).

Por eso, en los resultados de Madaster, el hormigón aparece con alta circularidad, pero se trata de una circularidad teórica o potencial, mientras que en el caso del acero es una circularidad efectiva.

7.2.5 Diferencia entre usar EN 15804+A2 o no

Es importante remarcar que el mismo modelo BIM, exportado en IFC, arroja resultados distintos en Madaster dependiendo de la configuración normativa elegida.

- En la versión sin EN 15804+A2, Madaster asigna automáticamente valores genéricos (EPEA, Baubook) incluso aunque existan EPDs específicas en la base de datos. Como

resultado, la corrección por masa conocida es del 97 %. Es decir, prácticamente todo el modelo se considera con masa “conocida”, aunque los valores provengan de bases genéricas.

- En la versión con EN 15804+A2, Madaster busca hacer el matching con EPDs verificadas (IBU Data, Ökobau.dat). Esto incrementa la calidad de la información, pero también deja fuera un 11,5 % de elementos que no encontraron correspondencia exacta.

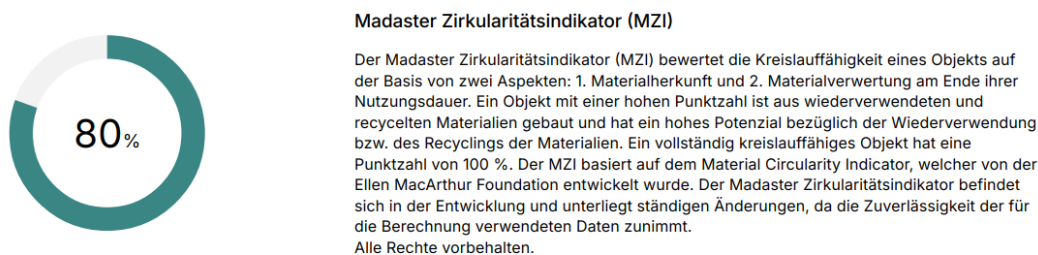
En consecuencia, la diferencia no se debe a errores de modelado, sino a la forma en que Madaster cruza los materiales con sus bases de datos en función de la normativa seleccionada.

Esto refleja un dilema habitual en el uso de bases de datos ambientales:

- Usar valores genéricos da una imagen más “limpia”, pero menos precisa y menos alineada con la Taxonomía.
- Usar EN 15804+A2 introduce incertidumbre (elementos no vinculados), pero garantiza trazabilidad y rigor en la alineación con los requisitos europeos.

Madaster Zirkularitätsindikator (MZI)

Zirkularität berücksichtigt den Anteil der beim Bau verwendeten Sekundärrohstoffe sowie das Potenzial aller verwendeten Rohstoffe für die Wiederverwendung oder das Recycling am Ende der Nutzungsdauer.



MZI Berechnungskomponenten

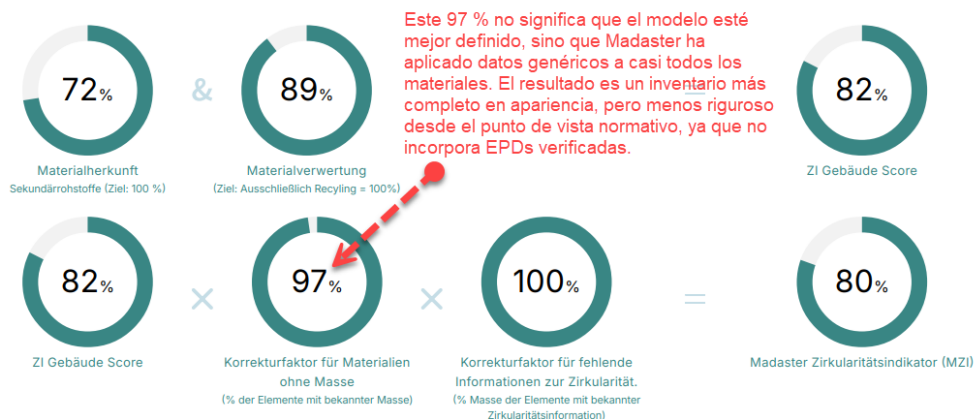


Figura 17 . Indicadores de circularidad (MCI) sin aplicar EN 15804+A2. Fuente: elaboración propia con datos de Madaster (2025).

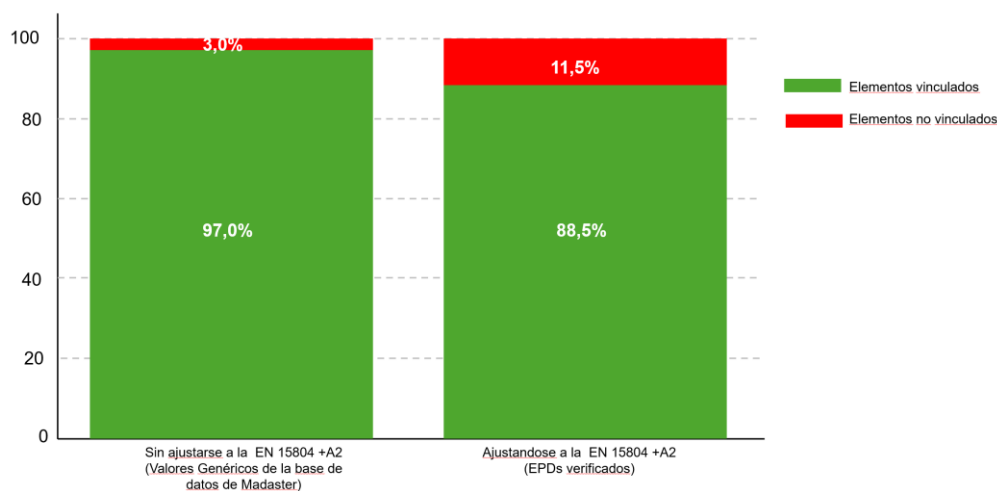


Figura 18 Comparación de resultados de vinculación en Madaster según la configuración normativa. Fuente: elaboración propia con datos de Madaster (2025)

Más porcentaje no siempre es mejor; lo que importa es la calidad y trazabilidad de los datos, no solo la cantidad.

7.2.6 Interpretación de los resultados mediante ejemplos prácticos

Los resultados de Madaster permiten no solo obtener indicadores numéricos, sino también comprender el comportamiento de distintos materiales y sistemas constructivos en relación con la circularidad, la reciclabilidad y la desmontabilidad. A continuación, se presentan algunos casos representativos que ayudan a interpretar los valores obtenidos.

- Hormigón (815 t, 81 % de la masa total):

Registra una circularidad alta (≈ 79 %) y una valorización del 89 %. Sin embargo, este valor se debe principalmente al *downcycling*. En la práctica, el hormigón no vuelve a ser hormigón estructural, sino que se tritura y se utiliza como árido de menor calidad. Por tanto, su circularidad debe entenderse como potencial teórico más que como realidad actual.

- Acero (≈ 119 t, 12 %):

Es el material que mejor representa la circularidad en ciclo cerrado. El acero puede reciclarse indefinidamente sin pérdida de propiedades, y en Europa ya incorpora de media un 60 % de contenido reciclado. En este caso, puede decirse que es circular por lo que efectivamente es, no solo por lo que podría llegar a ser.

- Fachada / muro cortina (≈ 3 t):

Aparece con una desmontabilidad muy alta (94 %), dado que los paneles y carpinterías se modelan como elementos reversibles. No obstante, su circularidad es prácticamente nula (≈ 2 %), ya que materiales como vidrios laminados, adhesivos o aislantes sintéticos no cuentan con cadenas de reciclaje efectivas. Este ejemplo muestra claramente que *desmontar no equivale a reciclar*.

- Interiores (225 kg):

Aunque su peso en la masa global es bajo, los acabados interiores (adhesivos, pinturas, revestimientos pegados) tienen un impacto muy negativo en la circularidad. Presentan 0 % de reciclaje y reutilización, y se consideran residuos directos.

En conjunto:

Estos ejemplos permiten diferenciar tres situaciones típicas en los indicadores de circularidad:

1. Materiales circulares por lo que ya son (acero en ciclo cerrado).
2. Materiales circulares solo en teoría (hormigón, cuyo potencial depende del downcycling).
3. Materiales desmontables pero no circulares (fachadas complejas).
4. Materiales problemáticos aunque de poca masa (interiores con adhesivos y compuestos).

De este modo, se evidencia que los porcentajes globales de circularidad deben analizarse en detalle y siempre con una interpretación crítica del comportamiento real de cada sistema constructivo.

7.2.7 Valor económico de los materiales

Madaster no solo calcula indicadores de circularidad, sino también el valor residual económico de los materiales, es decir, el dinero que podrían representar al final de la vida útil.

- Valor actual de los materiales: 91.615 € (289 €/m²).
- Valor descontado (considerando costes de desmontaje, transporte, etc.): 69.956 € (219€/m²).

Desglose por capas:

- Estructura: concentra prácticamente todo el valor (70.174 €).
- Fachada e interiores: no aportan valor e incluso generan costes (−56 €).

Conclusión: lo que tiene buena circularidad también tiene valor económico (acero, parte del hormigón). Lo que no es circular cuesta dinero gestionarlo (fachadas complejas, interiores pegados).

Rohstoff-Restwert

Der Rohstoff-Restwert misst den zukünftigen Geldwert der Materialien unter Berücksichtigung der Kosten für Rückbau, Transport und Aufarbeitung.

Diskontierter Kapitalwert des Rohstoff-Restwerts

69.566 €

219 €/m²

Aktueller Rohstoff-Restwert

91.615 €

289 €/m²

Madaster-Finanzmodul

Das Madaster Finanzmodul wurde entwickelt, um den Rohstoff-Restwert von Objekten zu kalkulieren. Es visualisiert den Wert der Materialien und Produkte zum Zeitpunkt des Baus und am Ende der Lebensdauer des Objekts.

Rohstoff-Restwert

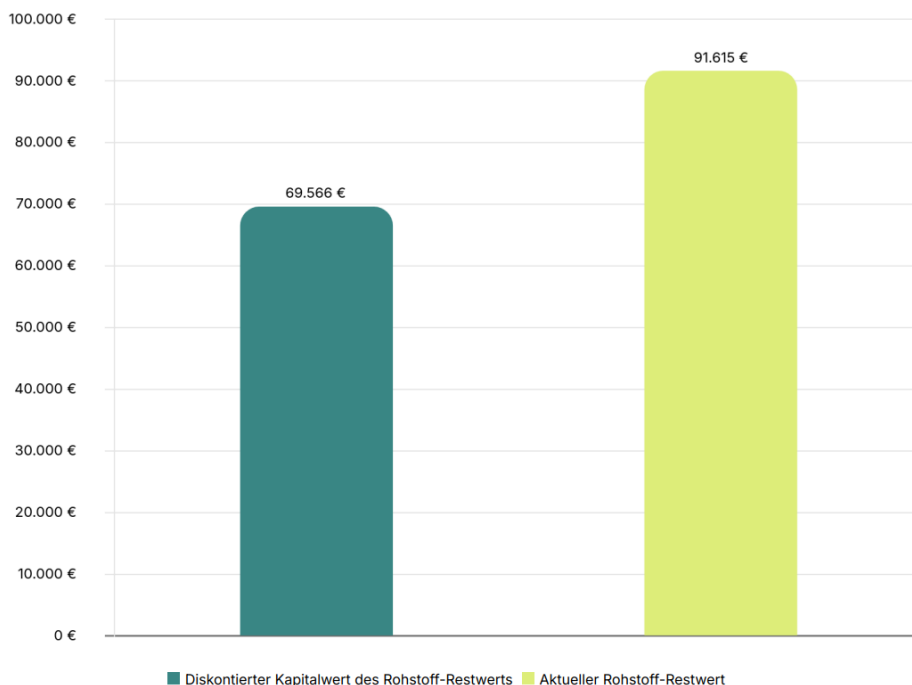


Figura 19 Valor residual de los materiales según Madaster. Comparación entre el valor residual actual de los materiales del edificio (91.615 €, equivalente a 289 €/m²) y su valor residual descontado considerando los costes futuros de desmontaje, transporte y procesado (69.566 €, equivalente a 219 €/m²). Fuente: elaboración propia a partir de Madaster (2025).

La Figura 19 muestra el cálculo del valor económico residual de los materiales del edificio según Madaster. Se presentan dos resultados:

- Valor residual actual: 91.615 € (289 €/m²). Este valor refleja el precio de mercado estimado de los materiales si hoy mismo se desmontara el edificio y se pusieran a disposición para su recuperación.
- Valor residual descontado: 69.566 € (219 €/m²). En este caso, Madaster aplica una corrección considerando que el desmontaje ocurrirá al final de la vida útil del edificio (50 años), teniendo en cuenta costes asociados a desmontaje, transporte y tratamiento.

La diferencia entre ambos valores (≈ 22.000 €) ilustra un aspecto fundamental: el valor de los materiales no es estático, sino que depende del horizonte temporal y de los costes de su recuperación. Esto permite entender a los edificios no solo como infraestructuras, sino también como “bancos de materiales”, donde el valor económico puede preservarse en la medida en que los materiales sean desmontables, reciclables y trazables.

De este modo, el valor económico residual se convierte en un indicador complementario a la circularidad: los materiales que tienen mercados secundarios consolidados (como el acero o el aluminio) aportan valor positivo, mientras que aquellos que generan costes de gestión al final de su vida (como adhesivos, pinturas o vidrios laminados) pueden incluso reducir el valor neto global del edificio.

7.2.8 Conclusión de resultados Madaster

De este análisis se desprenden varias lecciones claras:

- La estructura es la gran aportación positiva, pero su circularidad depende en gran medida del acero. El hormigón aporta solo un potencial teórico (downcycling).
- La fachada es el ejemplo más claro de contradicción: muy desmontable, poco circular.

- Los interiores son el eslabón débil: poca masa, pero gran contribución a residuos y sustancias problemáticas.
- Los indicadores deben leerse en conjunto: circularidad, reciclaje y desmontabilidad no son lo mismo.
- El valor económico residual confirma las conclusiones: lo circular genera valor, lo no circular supone un coste.

En definitiva, este capítulo demuestra que Madaster es una herramienta fundamental para alinearse con la Taxonomía Europea: traduce datos complejos en indicadores claros que permiten no solo analizar un edificio concreto, sino sobre todo aprender qué decisiones de diseño aumentan o reducen la circularidad.

7.2.9 Recomendaciones para el diseño circular.

A partir de los resultados obtenidos, se pueden identificar una serie de áreas de mejora que habrían permitido un diseño más alineado con los principios de circularidad y la Taxonomía Europea.

Es importante insistir en que este TFM no pretende emitir un juicio de conformidad, sino aprender de sus fortalezas y debilidades. El edificio estudiado refleja lo que es habitual en muchos proyectos contemporáneos: una estructura masiva de hormigón con algunos elementos metálicos y de madera, una fachada ventilada y unos interiores convencionales.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el camino hacia la economía circular no se logra automáticamente, sino que requiere elegir materiales y sistemas adecuados desde el inicio del proyecto. Con este propósito, se señalan a continuación las principales áreas de mejora detectadas y las alternativas recomendadas:

a) Fachada / muro cortina

En el modelo actual, la fachada ventilada o muro cortina aparece como un elemento con alta desmontabilidad (94 %) pero con circularidad prácticamente nula (≈ 2 %). Esto se debe a que sus materiales principales —vidrio laminado con recubrimientos, perfiles de aluminio, aislantes sintéticos y sellantes— no pueden separarse fácilmente ni disponen de cadenas de reciclaje establecidas. En la práctica, cuando se desmante, lo único que se recuperará con valor será el aluminio, mientras que los vidrios laminados, los adhesivos y los aislantes terminarán en vertedero o incinerados.

¿Cómo podría mejorarse esta situación?

- Usando vidrio monolítico reciclable o, al menos, vidrio con contenido reciclado en su composición.
- Sustituyendo los perfiles de aluminio vírgenes por aluminio reciclado certificado, que puede alcanzar hasta un 75–95 % de contenido secundario.
- Evitando adhesivos y sellantes permanentes, optando por uniones mecánicas reversibles.
- Reemplazando aislantes sintéticos por materiales minerales o biobasados.

Conexión con la Taxonomía: estas medidas refuerzan el objetivo 4 (circularidad) al facilitar la recuperación y reutilización de materiales, reduciendo la dependencia de recursos vírgenes.

b) Interiores (acabados y revestimientos)

En el modelo actual, los acabados (pinturas, selladores, adhesivos, compuestos ligeros) representan poca masa total (≈ 225 kg), pero su contribución a la circularidad es nula. Todo se contabiliza directamente como residuo.

¿Qué se podría cambiar?

- Sustituir acabados húmedos por sistemas secos y desmontables.
- Reducir el uso de adhesivos, priorizando fijaciones mecánicas o encajes tipo clic.
- Seleccionar pinturas con EPD y bajo contenido en COV.

Conexión con la Taxonomía: estas mejoras se alinean con el objetivo 5 (prevención y control de la contaminación) al reducir sustancias peligrosas, y con el objetivo 4 (circularidad) al facilitar la reutilización de componentes.

c) Estructura (hormigón armado)

La estructura representa 815 t de hormigón (81 % del total). En Madaster aparece con circularidad relativamente alta, pero solo por la valorización como árido triturado (downcycling).

¿Qué se podría hacer mejor?

- Incorporar áridos reciclados en la mezcla de hormigón.
- Optimizar el diseño estructural para reducir volumen de hormigón.
- Apostar por alternativas como CLT o acero estructural atornillado.

Conexión con la Taxonomía: estas soluciones inciden en el objetivo 1 (mitigación del cambio climático) al reducir el CO₂ embebido, y en el objetivo 4 (circularidad) al integrar materias primas secundarias y sistemas reversibles.

d) Aislamiento térmico

El aislamiento empleado en el modelo es probablemente sintético (EPS, PIR), con baja circularidad y un reciclaje prácticamente nulo.

¿Qué alternativas existen?

- Optar por aislamientos de origen biobasado como fibra de madera, celulosa o corcho.
- Son renovables, tienen menor huella de carbono embebida y aportan puntos en circularidad.

- Emplear lana mineral con EPD certificada, que puede reciclarse y tiene un comportamiento más alineado con la Taxonomía.

Conexión con la Taxonomía: estas opciones contribuyen al objetivo 1 (mitigación climática) al reducir emisiones embebidas, y al objetivo 4 (circularidad) al mejorar la reciclabilidad de materiales.

Con estas mejoras se refuerza tanto la circularidad como la mitigación del cambio climático, porque se reducen las emisiones asociadas a la fabricación.

En conjunto, los resultados obtenidos con Madaster muestran que la herramienta no solo permite analizar la composición material y el valor económico residual de un edificio, sino que también facilita la evaluación de su circularidad y su potencial de alineamiento con la Taxonomía Europea. El caso estudiado refleja que la estructura aporta un valor circular relevante gracias al acero, mientras que la fachada y los interiores constituyen los puntos críticos que limitan la recuperación de materiales. Este tipo de análisis pone de manifiesto que la circularidad no se alcanza de forma automática, sino que depende de decisiones de diseño y selección de materiales adoptadas desde el inicio del proyecto. Madaster se confirma, por tanto, como un instrumento clave para trasladar los criterios de economía circular y de verificación del principio DNSH a indicadores cuantitativos, en línea con lo previsto en el Reglamento (UE) 2020/852. No obstante, su eficacia práctica está condicionada por la calidad de los modelos BIM, la disponibilidad de bases de datos ambientales fiables y la integración de criterios de circularidad en la normativa nacional. Así, el capítulo evidencia que la digitalización del sector mediante pasaportes de materiales constituye una vía prometedora para convertir la Taxonomía en una herramienta operativa de sostenibilidad en edificación.

7.2.10 Implicaciones para la alineación con la Taxonomía Europea

Los resultados de Madaster permiten evaluar hasta qué punto el edificio puede considerarse alineado con la Taxonomía Europea:

- Circularidad (Objetivo 4 – Economía circular):
 - Mejorar fachada e interiores con soluciones reciclables y desmontables.
 - Demostrar uso de materias primas secundarias (hormigón con áridos reciclados, aluminio reciclado).
- Mitigación del cambio climático (Objetivo 1):
 - Reducir masa de hormigón o sustituir parte por madera o acero atornillado.
 - Emplear aislamientos de baja huella de carbono.
 - Optimizar el rendimiento energético operativo (B6-B7, evaluado con One Click LCA).
- Principio DNSH (Do No Significant Harm):
 - Evitar materiales con sustancias peligrosas.
 - Asegurar que mejoras en eficiencia energética no generan perjuicios en agua, contaminación o biodiversidad.

Con estas medidas, el edificio podría acercarse a los umbrales de la Taxonomía ($\approx <300\text{--}350 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ en 50 años) y reforzar notablemente su circularidad, pasando de ser un proyecto convencional a un caso alineado con los objetivos europeos de sostenibilidad.

7.3 Resultados One Click LCA (huella de carbono y ACV)

Alcance. El modelo IFC se ha importado en One Click LCA para calcular impactos ambientales conforme a EN 15978. Se han definido escenarios equivalentes para Austria y España, diferenciando únicamente el mix eléctrico y los factores nacionales. Los resultados permiten verificar el cumplimiento del objetivo 1 (mitigación climática) y aportar evidencias para DNSH.

Norma y alcance comunes

Los resultados se calculan conforme a EN 15804 +A2 / EN 15978 y, salvo indicación en contrario, se reportan con límite A1–C (*cuna a tumba*: A1–A3 producto, A4 transporte, A5 construcción, B1–B7 uso, C1–C4 fin de vida), con RSP = 50 años. El Módulo D (beneficios/cargas fuera del sistema), cuando exista —por ejemplo, electricidad fotovoltaica exportada—, se presenta aparte como crédito y no se suma al A1–C.

Unidad funcional

La unidad funcional es 1 m² de superficie construida del edificio.

Indicador principal y lecturas

El indicador de referencia es el GWP total A1–C (kg CO₂e/m²) para la comparación con línea base. En las figuras de columnas apiladas (por fases y por elementos) se muestra además el GWP A1–C (kg CO₂e totales del edificio). Cada pie de figura indica si el valor es por m² o total del edificio.

Energía operativa (B6) y agua (B7)

En este estudio, B6 representa exclusivamente la electricidad de uso del edificio (introducida en kWh/año, extrapolada a 50 años) y evaluada con el mix eléctrico nacional IEA-2022. No se incluyen en B6 la calefacción ni el ACS (quedan fuera del alcance operativo del ACV). El consumo de agua corresponde a B7 y se reporta por separado.

Perímetro del ACV y exclusiones

Incluye: estructura principal y cimentación del edificio, envolvente y sistemas técnicos integrados.

Excluye: infraestructura del sitio (p. ej., muros de contención), urbanización y paisajismo.

Justificación: La Taxonomía (Reg. 2021/2139) se refiere al edificio como unidad de evaluación; EN 15978 permite tratar la infraestructura del emplazamiento como opcional siempre que se declare. Este perímetro preserva la comparabilidad Austria–España y evita que la infraestructura distorsione los resultados.

Benchmark y nota de comparabilidad (A1–C vs. “semáforo”)

Se emplea el benchmark Western Europe – one dwelling building – 2023 Q3 como referencia comparativa. El Carbon Heroes Benchmark (“semáforo”) de One Click LCA compara A1–A3 + A4 + B4–B5 + C1–C4 y excluye A5 (obra) y B6 (energía en uso) —y B7 (agua)— por metodología. Por ello, su banda es solo relativa y no es directamente comparable con los totales A1–C mostrados en las figuras de este capítulo.

Parámetros coherentes por país (resumen)

Austria: B6 = electricidad (mix IEA-2022 AT). La fotovoltaica exportada se reporta como crédito en Módulo D (fuera del A1–C).

Madrid: B6 = electricidad (mix IEA-2022 ES). Sin calefacción/ACS en B6.

7.3.1 Austria

En Austria, el semáforo de Carbon Heroes Benchmark sitúa el diseño en 4.117 kgCO₂e/m² (Figura 20). La distribución del GWP de fabricación por grandes elementos constructivos se muestra en la Figura 21, mientras que la contribución absoluta de todas las fases A1–C aparece en la Figura 22.

El desglose porcentual por fases confirma el predominio de los materiales (A1–A3 = 76 %) frente a otras contribuciones secundarias (Figura 23). A nivel de elementos, el forjado

de planta baja concentra cerca del 80 % del impacto (Figura 24), complementado con la visión numérica en la Figura 25. Los impactos detallados por categorías ambientales y fases se encuentran en la Figura 26.

El análisis de hotspots confirma que el forjado de planta baja (813,2 t CO₂e), los cerramientos y huecos (322,7 t) y los revestimientos de suelo (53,2 t) concentran el grueso de las emisiones (Figuras 34–36).

7.3.1.1 Indicador global (A1–C, kg CO₂e/m²)

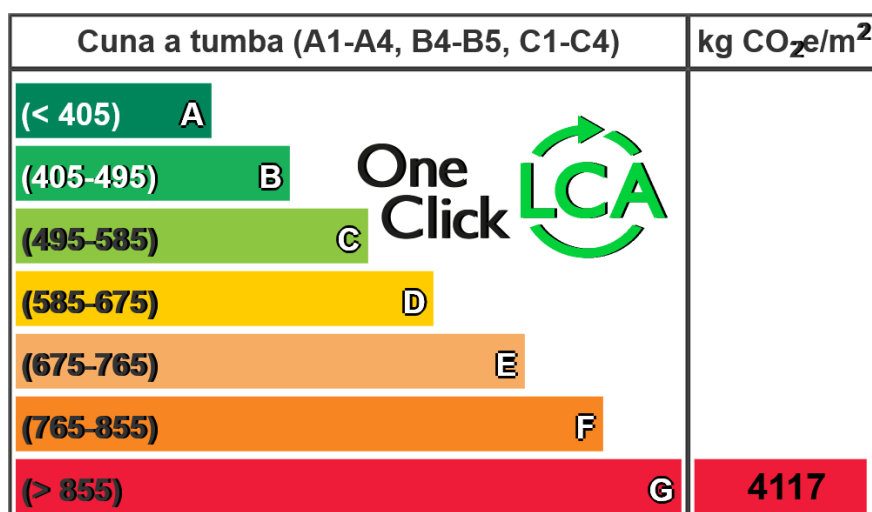


Figura 20 Austria — semáforo (Carbon Heroes Benchmark)

Indicador GWP “cuna-a-tumba” (A1–A4, B4–B5, C1–C4), kg CO₂e/m². Semáforo de One Click LCA frente a la línea base Western Europe – one dwelling building (2023 Q3). El diseño obtiene 4 117 kg CO₂e/m² de superficie construida, calculado cuna-a-tumba (A1–A4, B4–B5, C1–C4; sin Módulo D) según EN 15804 +A2. El semáforo es comparativo y no altera el resultado del ACV; su banda indica el margen respecto al benchmark. Fuente: One Click LCA.

Escala A–G (semáforo). La banda A–G de One Click LCA es una clasificación comparativa frente a una línea base (benchmark) seleccionada por país/tipología y periodo. El valor numérico (kg CO₂e/m², A1–C) es la huella del proyecto; la letra indica su posición relativa frente al benchmark y puede variar si cambia la línea base, aunque el número permanezca igual.

Nota de comparabilidad. El **Carbon Heroes Benchmark** de One Click LCA **excluye** por metodología **A5 (obra)** y **B6 (energía en uso)** —y B7—; compara **A1–A3 + A4 + B4–B5 + C1–C4**. Por ello, **la banda del semáforo no es directamente comparable con los totales A1–C** que se muestran en las figuras de barras apiladas del capítulo.

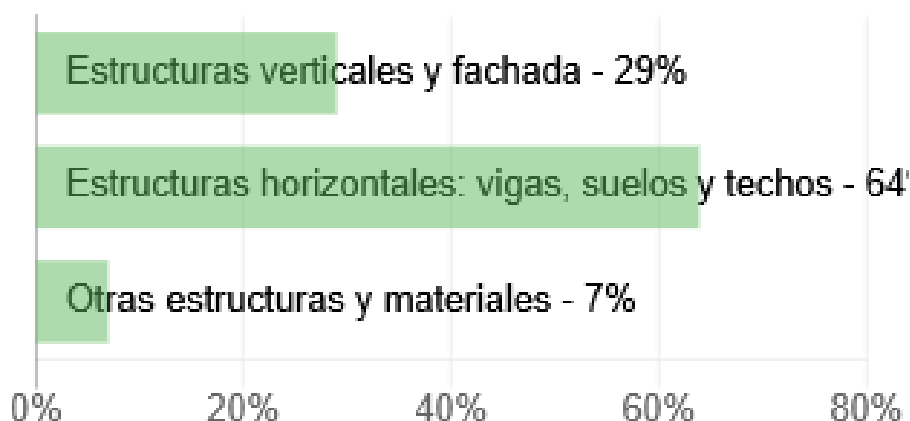


Figura 21 Reparto del GWP de fabricación por estructura (A1–A3)
Distribución del GWP de **fabricación (A1–A3)** por grandes elementos del edificio: **estructuras verticales y fachada, estructuras horizontales (vigas, suelos y techos)** y **otras estructuras/materiales**. Fuente: One Click LCA (EN 15804 +A2). País: **Austria**.

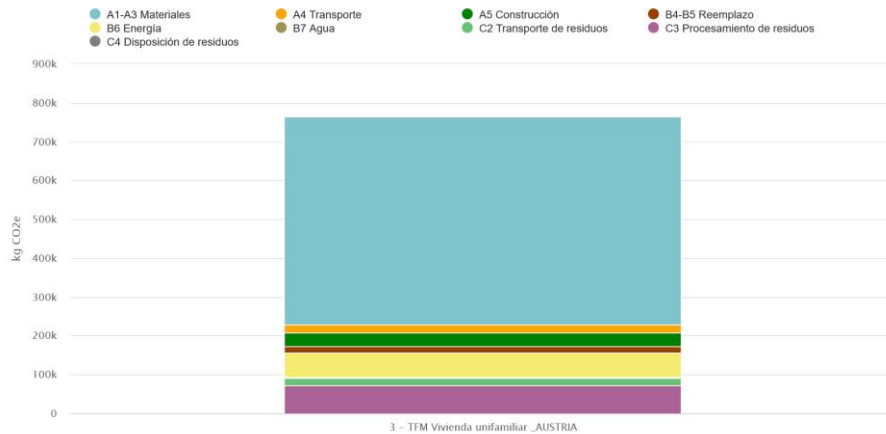


Figura 22 Contribución absoluta al GWP por fases del ciclo de vida (A1–C) – Austria. Gráfico de barras apiladas con el potencial de calentamiento global (kg CO₂e) de la vivienda unifamiliar en Austria, desglosado por fases: A1-A3 Materiales, A4 Transporte, A5 Construcción, reposición (B4-B5), B6 Energía, B7 Agua, C2 Transporte de residuos, C3 Procesamiento de residuos y C4 Disposición. Se observa el claro predominio de A1-A3 (fabricación de materiales), seguido a distancia por B6 (energía en uso) y C3; el resto de fases tienen contribuciones menores. **Fuente:** One Click LCA, EN 15804 +A2. **Unidad:** kg CO₂e.

Nota metodológica (B6). La energía operativa (B6) se ha modelado de forma simplificada: solo electricidad con mix nacional IEA-2022, sin calefacción/ACS (ni otros servicios térmicos). Se incluye en el total A1–C de este gráfico, pero no entra en el “semáforo” comparativo.

7.3.1.2 Distribución por fases del ciclo de vida (GWP)

Potencial de calentamiento global kg CO₂e - Fases del ciclo de vida

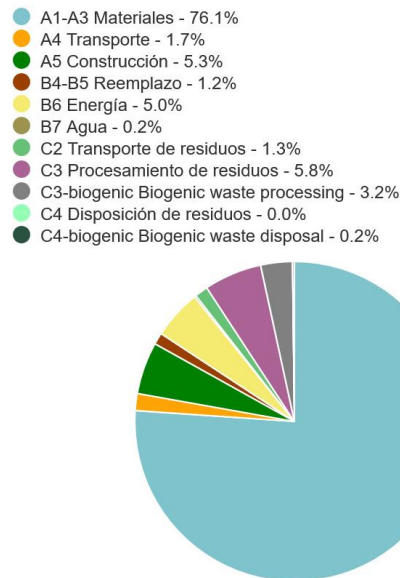


Figura 23 Austria - Distribución porcentual del GWP por fases del ciclo de vida (A1-C). Gráfico de tarta con el potencial de calentamiento global (kg CO₂e) de la vivienda en Austria desglosado por fases según EN 15804 +A2. Predominan claramente los materiales (A1-A3: 76 %); a continuación C3 Procesamiento de residuos (5,8 %), A5 Construcción (5,3 %) y B6 Energía (5,0 %). El resto de fases (A4, B4-B5, B7, C2, C4) aportan cada una ≤ 3 %. **Fuente:** One Click LCA.

7.3.1.3 Reparto por elementos constructivos (A1–A3)

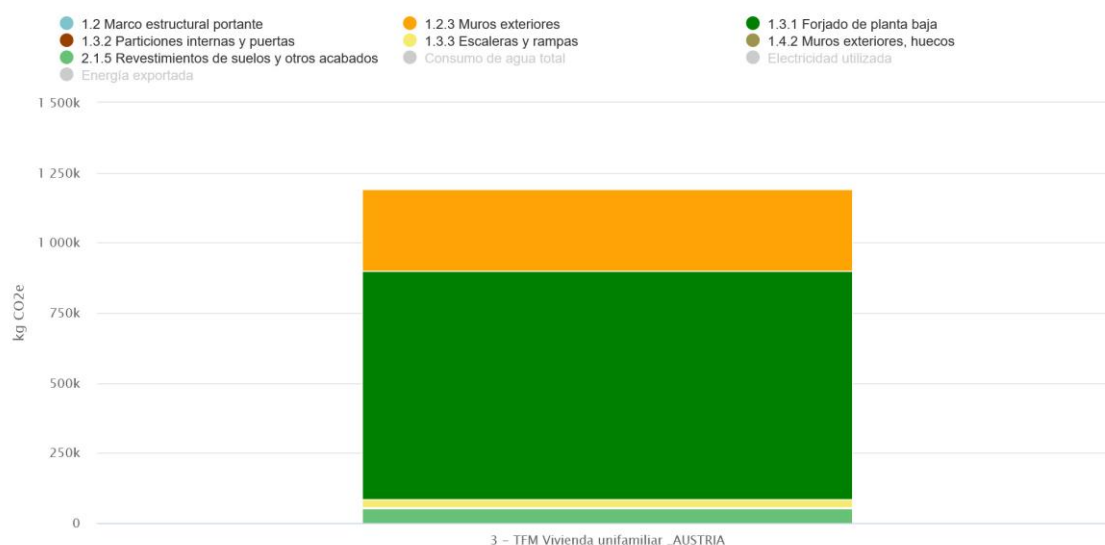


Figura 24 Austria — Reparto del GWP A1-A3 por elementos constructivos.

Gráfico de barras apiladas con la contribución de cada elemento al potencial de calentamiento global en fase de fabricación (A1–A3). Destaca el **forjado de planta baja** (~79–80 % del GWP), seguido por **muros exteriores** (~9 %) y **revestimientos de suelos y otros acabados** (~6 %). El resto de partidas (particiones, escaleras, marco estructural y huecos de fachada) aportan cada una $\lesssim 3$ %. Fuente: One Click LCA.

Elemento (EN 15804)	T CO _{2e}
1.3.1 Forjado de planta baja	813,90 t
1.2.3 Muros exteriores	289,70 t
1.3.2 Particiones internas y puertas	159,80 t
2.1.5 Revestimientos de suelos y otros acabados	53,20 t
1.3.3 Escaleras y rampas	30,60 t
1.2 Marco estructural portante	2,29 t
1.4.2 Muros exteriores, huecos	2,40 t
Total mostrado	1.351,89 t

Figura 25 Austria — Reparto del GWP A1-A3 por elementos constructivos. Igual que la imagen anterior pero en valores numéricos. Fuente: One Click LCA.

7.3.1.4 Fases × elementos

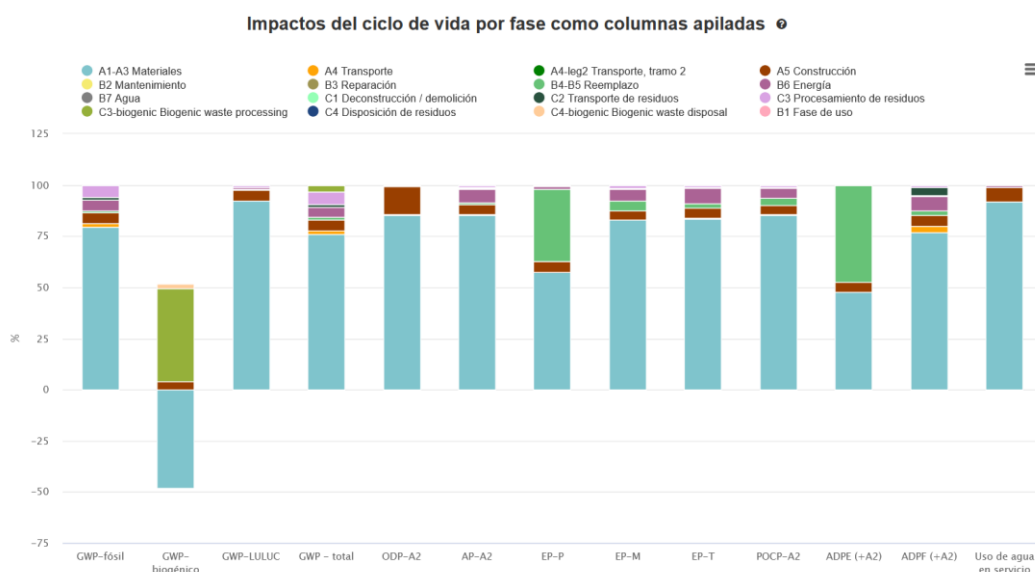


Figura 26 Austria — Impactos del ciclo de vida por fase (columnas apiladas, EN 15804 +A2). Contribución porcentual de cada fase del ciclo de vida (A1-A3 materiales, A4 transporte, A5 construcción, B4-B5 reposición, B6 energía, etc.) a distintos indicadores (GWP fósil/biológico/LULUC y total, ODP, AP, EP-P/EP-M/EP-T, POCP, ADPE, ADPF y uso de agua en servicio). En la mayoría de indicadores domina A1-A3 (materiales), con aportes secundarios de A5 Construcción y B6 Energía. La reposición (B4-B5) es especialmente relevante en EP-P y ADPE. En GWP-biológico aparece la contribución negativa de A1-A3 (almacenamiento de carbono en biogénicos) parcialmente compensada en los módulos de fin de vida C3/C4. Los transportes (A4/C2) y fin de vida (C1/C4) son, en general, minoritarios, mientras que B7 solo pesa en el indicador de uso de agua. Fuente: One Click LCA.

7.3.1.5 Hipótesis clave / calidad de datos

Alcance y unidad funcional

- Unidad funcional (UF): 1 m² de superficie construida del edificio.
- Indicador de referencia: GWP total A1–C (kg CO₂e/m²) según EN 15804 +A2.
- Límite del sistema: Cuna-a-tumba → A1-A3 (fabricación), A4 (transporte a obra), A5 (proceso de construcción), B4-B5 (reposición), B6 (energía de uso), C1–C4 (fin de vida). Módulo D reportado aparte (créditos por reciclaje/energía exportada).
- Periodo de estudio: 50 años (RSP).

Energía y Módulo D

- Electricidad de uso (B6): mix Austria – IEA 2022 (perfil “IEA2022 Austria” en One Click LCA).
- Fotovoltaica: el caso de Austria incluye crédito en Módulo D por energía exportada a red (≈ 5.145 kWh/año).
- Calefacción/ACS: no modelados; sólo electricidad de usos comunes según hipótesis del proyecto (ver apartado de energía).

Hipótesis de materiales y transporte

- Selección de EPD: prioridad a EPD EN 15804 +A2, 2019–2024, geografía AT/UE; se emplean genéricos de One Click LCA sólo cuando no existe EPD representativa.
- Localización y distancias: proyecto Austria; A4 con camión tráiler 40 t (100% fill, 60 km a obra por defecto).
- Fin de vida (C): escenarios por material siguiendo los presets de ONE CLICK LCA (p. ej. reciclaje de acero, incineración de madera, reciclaje de vidrio, vertedero de inertes). Distancias típicas ONE CLICK LCA: ~ 110 km vertedero, ~ 220 km incineración, ~ 370 – 430 km reciclaje (vidrio/metal), que pueden variar ligeramente por partida.
- Vidas útiles (B4–B5): 50 años para los cerramientos (p. ej. ventanas), alineadas entre casos para comparabilidad. El resto según valores por defecto del fabricante/EPD o de ONE CLICK LCA.

Calidad de datos

- Cobertura normativa: datasets EN 15804 +A2 (con verificación ISO 14025), combinados con genéricos ONE CLICK LCA cuando no hay EPD específica.

- Representatividad geográfica: Austria como primera opción; Europa como respaldo.
- Temporalidad: mayoritariamente 2018–2024.
- Completitud: materiales principales (hormigón, acero, vidrio, madera, aislamientos y acabados) cubiertos con EPD +A2; partidas menores (selladores, auxiliares) pueden estar modeladas con genéricos.
- Herramienta y versión: One Click LCA (perfil Western Europe One Dwelling Building – 2023 Q3 usado únicamente para el indicador-semáforo comparativo).

Principales fuentes de incertidumbre

1. EPD genéricas o UE cuando no hay EPD nacional → puede introducir ± 5 –15% en esas partidas.
2. Vidas útiles y reposiciones (B4–B5) → sensibles en elementos con alto GWP (p. ej. huecos acristalados).
3. Mix eléctrico (B6) y producción FV → gran influencia en el balance anual y en el crédito del Módulo D.
4. Distancias y rutas de transporte reales vs. supuestos ONE CLICK LCA.
5. Escenarios de fin de vida (tasas de reciclaje locales vs. valores por defecto).

Energía operativa (B6) y comparabilidad.

- B6 se ha modelado de forma simplificada con electricidad (mix IEA-2022 Austria), sin calefacción/ACS.
- La FV del proyecto se reporta como crédito en Módulo D (fuera del alcance A1–C).
- El Carbon Heroes Benchmark excluye A5 y B6; por tanto, su banda no es comparable con el total A1–C mostrado en las figuras.
- Estas decisiones se aplican de forma consistente en las comparativas del capítulo 7.3.

Nota de comparabilidad (A1–C vs. “semáforo”)

En este ACV, el módulo B6 representa únicamente la electricidad de uso del edificio (introducida en kWh/año y extrapolada a 50 años) con el mix nacional IEA-2022; B6 se incluye en los totales A1–C que muestran las figuras.

El indicador comparativo Carbon Heroes Benchmark (“semáforo”) de One Click LCA compara A1–A3 + A4 + B4–B5 + C1–C4 y excluye A5 (obra) y B6 (energía en uso) —y B7 (agua)— por metodología. Por ello su banda es solo relativa y no es directamente comparable con los totales A1–C presentados en este capítulo.

La conformidad nZEB –10 % se verifica aparte con herramientas oficiales (HULC/GEQ), no con el ACV.

7.3.2 Madrid

En Madrid, el semáforo de Carbon Heroes Benchmark reporta un total de 1.169 kgCO₂e/m² (Figura 27). La distribución de impactos por elementos constructivos (A1–A3) se observa en la Figura 28, mientras que la visión global A1–C aparece en la Figura 29. El desglose porcentual por fases confirma el peso de la operación (B6 = 35,3 %) frente a materiales (48,1 %) (Figura 30).

Los impactos de fabricación (A1–A3) se detallan por elementos en la Figura 31, y al incluir B6 y B7 se obtiene la comparación completa de contribuciones (Figura 32). El reparto por fases en distintas categorías de impacto se presenta en la Figura 33.

El análisis de hotspots señala al forjado de planta baja (66,6 t CO₂e), a cerramientos y huecos (28,5 t) y a revestimientos interiores (35,2 t) como los principales contribuyentes (Figuras 37–39).

7.3.2.1 Indicador global (A1–C, kg CO₂e/m²)

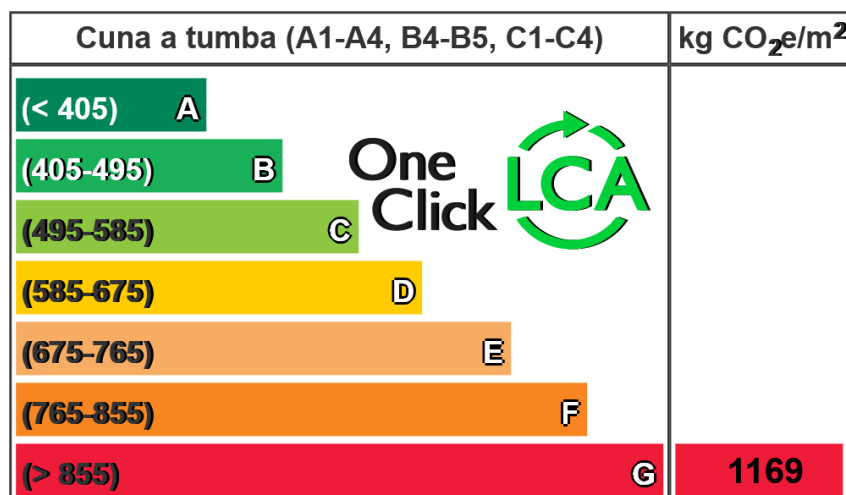


Figura 27 Madrid- semáforo (Carbon Heroes Benchmark)

Indicador GWP “cuna-a-tumba” (A1–A4, B4–B5, C1–C4), kg CO₂e/m². Semáforo de One Click LCA frente a la línea base Western Europe – one dwelling building (2023 Q3). El diseño obtiene 1 169 kg CO₂e/m² de superficie construida, calculado cuna-a-tumba (A1–A4, B4–B5, C1–C4; sin Módulo D) según EN 15804 +A2. El semáforo es comparativo y no altera el resultado del ACV; su banda indica el margen respecto al benchmark. Fuente: One Click LCA.

Nota de comparabilidad. El **Carbon Heroes Benchmark** de One Click LCA **excluye** por metodología **A5 (obra)** y **B6 (energía en uso)** —y B7—; compara A1–A3 + A4 + B4–B5 + C1–C4. Por ello, **la banda del semáforo no es directamente comparable** con los **totales A1–C** que se muestran en las figuras de barras apiladas del capítulo.

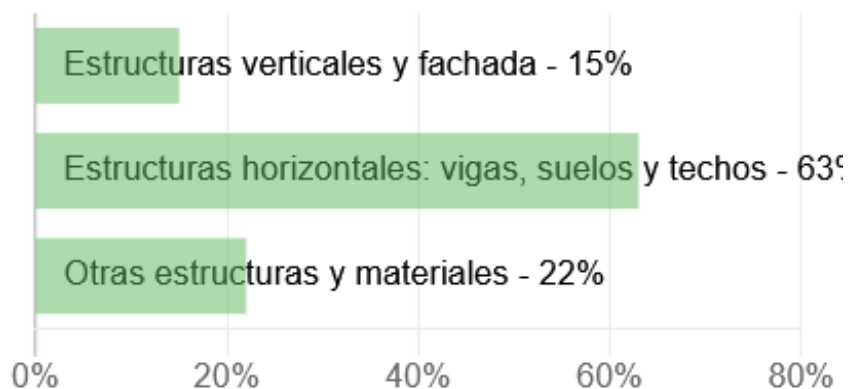


Figura 28 Madrid - Reparto del GWP por elemento constructivo (solo A1-A3).

Gráfico de barras con el potencial de calentamiento global (kg CO₂e (total)) de la fase de producto A1-A3 desagregado por partes del edificio. Predominan las estructuras horizontales (forjados, losas, vigas y suelos) con ~63 %, seguidas de otras estructuras y materiales (22 %) y estructuras verticales y fachada (15 %). Este análisis se limita a fabricación (A1-A3); no incluye uso ni fin de vida. Fuente: One Click LCA.

Análisis de ciclo de vida para Level(s) (EN15804 +A2) - Potencial de calentamiento global, kg CO₂e - Elementos y fases del ciclo de vida.

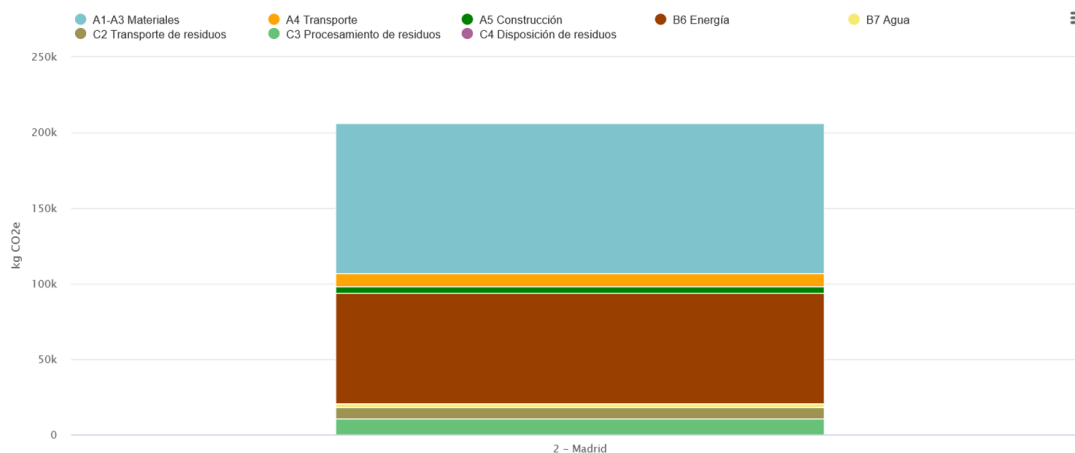


Figura 29 Madrid — Indicador global A1-C del GWP por fases del ciclo de vida.

Columna apilada con el potencial de calentamiento global (GWP, kg CO₂e) del diseño de Madrid, calculado según EN 15804 +A2 y desglosado por fases A1-C. El total asciende a ≈206.300 kg CO₂e (206,3 t). Predominan A1-A3 (materiales, 48,1 %) y B6 (energía en uso, 35,3 %); con contribuciones secundarias de A4 (4,4 %), C3 (5,0 %), C2 (3,8 %) y A5 (2,1 %), mientras que B7 (1,2 %) y C4 (~0 %) resultan marginales. Fuente: One Click LCA.

Nota metodológica (B6). La energía operativa (B6) se ha modelado de forma simplificada: solo electricidad con mix nacional IEA-2022, sin calefacción/ACS (ni otros servicios térmicos). Se incluye en el total A1-C de este gráfico, pero no entra en el “semáforo” comparativo.

El valor de la figura 19 es el **total del edificio (kg CO₂e (total))** con **A5 y B6 incluidos**; por el contrario, en la figura 16 (semáforo) el valor es un **indicador por m²** y, por metodología, **excluye A5 y B6**. Por eso no deben compararse directamente; ambos se usan con fines distintos (comparativo por m² vs. desglose absoluto).

7.3.2.2 Distribución por fases del ciclo de vida (GWP)

Potencial de calentamiento global kg CO₂e - Fases del ciclo de vida

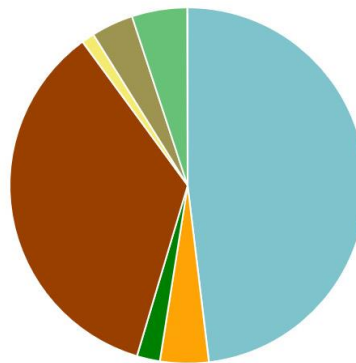


Figura 30 Madrid - Distribución porcentual del GWP por fases del ciclo de vida (A1-C).
Gráfico de tarta con el potencial de calentamiento global del diseño de Madrid desglosado por fases según EN 15804 +A2. Predominan **A1-A3 Materiales (48,1 %)** y la fase de uso **B6 Energía (35,3 %)** —asociada al consumo eléctrico durante la vida útil—. El resto de contribuciones son: **C3 Procesamiento de residuos (5,0 %)**, **A4 Transporte (4,4 %)**, **C2 Transporte de residuos (3,8 %)**, **A5 Construcción (2,1 %)**, **B7 Agua (1,2 %)** y **C4 Disposición de residuos (≈ 0 %)**. (La suma puede no ser exactamente 100 % por redondeo.)
Fuente: One Click LCA.

7.3.2.3 Reparto por elementos constructivos (A1–A3)

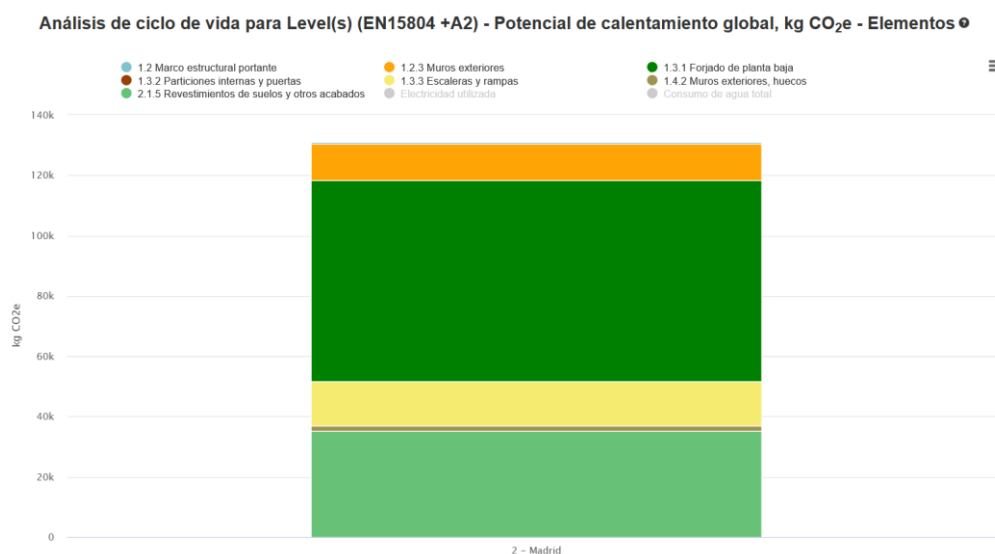


Figura 31 Madrid - Reparto del GWP (A1–A3) por elementos constructivos (kg CO₂e (total)). Columna apilada con el **potencial de calentamiento global de la fase de producto (A1–A3, EN 15804 +A2)** desglosado por **elementos**. Predomina el **forjado de planta baja**, seguido por **huecos y muros exteriores**; el **marco estructural** aporta menos y **particiones interiores, escaleras y revestimientos** tienen contribuciones minoritarias. Fuente: One Click LCA.

Elemento	t CO ₂ e (≈)	% sobre el total
1.2 Marco estructural portante	0,55 t	0,003
1.2.3 Muros exteriores	12,17 t	0,059
1.3.1 Forjado de planta baja	66,61 t	0,323
1.3.2 Particiones internas y puertas	0,07 t	0
1.3.3 Escaleras y rampas	14,53 t	0,07
1.4.2 Muros exteriores, huecos	1,84 t	0,009
2.1.5 Revestimientos de suelos y otros acabados	35,24 t	0,171
Electricidad utilizada (B6)	72,92 t	0,354
Consumo de agua total (B7)	2,37 t	0,012

Figura 32 Madrid - Reparto del potencial de calentamiento global por elementos (A1–C). El gráfico muestra las contribuciones por elemento constructivo; se incluyen además las partidas operacionales de **electricidad (B6)** y **agua (B7)** para visualizar su peso relativo en el total. Fuente: One Click LCA.

7.3.2.4 Fases × elementos

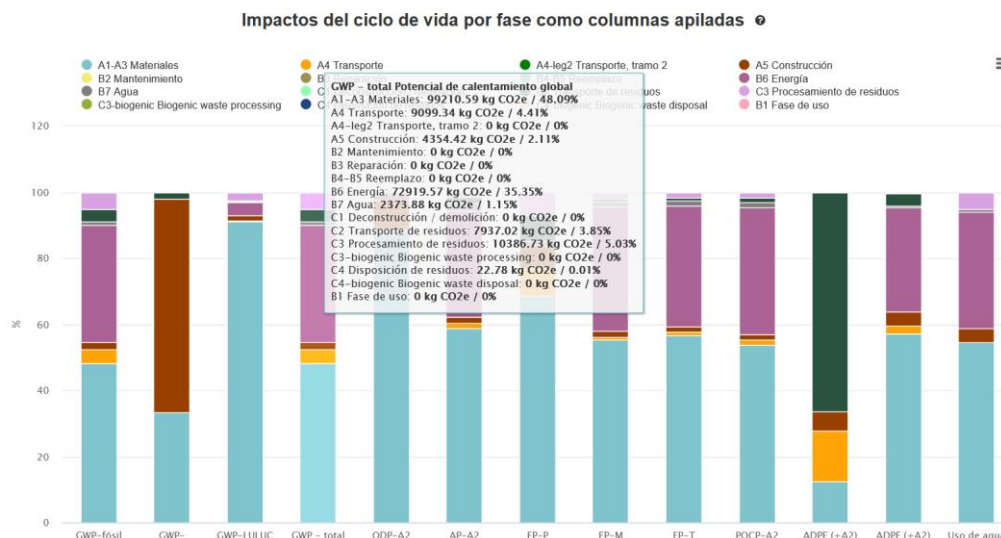


Figura 33 Madrid — Reparto porcentual por fase del ciclo de vida (A1-C) en las distintas categorías de impacto (EN 15804 +A2).

Cada columna muestra, para una categoría (GWP-fósil, GWP-biológico, GWP-LULUC, GWP-total, ODP-A2, AP-A2, EP-P, EP-M, EP-T, POCP-A2, ADPE (+A2), ADPF (+A2) y uso de agua en servicio), la **contribución relativa** de las fases A1-A3 (materiales), A4 (transporte), A5 (construcción), reposición (B4-B5), B6 (energía) y C1-C4 (fin de vida).

Se observa el **dominio de A1-A3** en la mayoría de categorías; A4 y A5 son aportes secundarios y B6 aparece con peso limitado, mientras que C2-C4 son **residuales**. En algunas categorías se aprecian particularidades (p. ej., **ADPE (+A2)** concentrando impacto en transporte A4 por la naturaleza del indicador; **GWP-biológico** recoge la fracción biológica asociada a los materiales). Nota: los porcentajes son relativos dentro de cada categoría y no son comparables entre columnas. **Fuente: One Click LCA.**

7.3.2.5 Hipótesis clave / calidad de datos

Nota de comparabilidad y alcance (A1-C vs. Semáforo)

- En este caso, B6 se ha modelado de forma simplificada como electricidad (mix IEA-2022 España), sin calefacción/ACS.
- El semáforo de One Click LCA (Carbón Heroes Benchmark) compara A1-A3 + A4 + B4-B5 + C1-C4 y excluye A5 y B6; por ello no es directamente comparable con el total A1-C de nuestros gráficos.
- Se mantiene la misma unidad funcional (1 m² de superficie construida, RSP 50 años) y el mismo benchmark (“Western Europe – One dwelling building – 2023 Q3”) para Austria y Madrid, garantizando consistencia en la lectura.

Alcance y unidad funcional

- Unidad funcional (UF): 1 m² de superficie construida del edificio.
- Indicador de referencia: GWP total A1-C (kg CO₂e/m²) según EN 15804 +A2.
- Límite del sistema: Cuna-a-tumba → A1-A3 (fabricación), A4 (transporte a obra), A5 (proceso de construcción), B4-B5 (reposición), B6 (energía de uso), C1-C4 (fin de vida). Módulo D sólo se reporta si procede (créditos por reciclaje/energía exportada).
- Periodo de estudio (RSP): 50 años.

Energía y Módulo D

- Electricidad de uso (B6): mix España – IEA 2022 (perfil “*IEA2022 – Electricity, Spain*” en One Click LCA).
- Generación fotovoltaica / energía exportada: no modelada en el caso de Madrid → no hay crédito en Módulo D por energía exportada.
- Calefacción/ACS: no se modelan cargas térmicas; se considera electricidad de usos comunes según hipótesis del proyecto (coherente con las gráficas B6).

Hipótesis de materiales y transporte

- Selección de EPD: prioridad a EPD EN 15804 +A2 2019–2024 con geografía España (ES); se recurre a EPD UE o a datasets genéricos de ONE CLICK LCA cuando no existe EPD representativa nacional.
- Localización y distancias (A4): proyecto Madrid; camión tráiler 40 t (100 % fill). Distancia por defecto a obra \approx 60 km salvo indicación específica.
- Fin de vida (C): escenarios por material según presets ONE CLICK LCA (p. ej., reciclaje de acero y vidrio, incineración de madera, vertedero de inertes para hormigones/cerámicos). Distancias típicas ONE CLICK LCA: \approx 110 km vertedero, \approx 220 km incineración, \approx 370–430 km reciclaje (vidrio/metal).
- Vidas útiles (B4-B5): 50 años para los huecos/ventanas (alineadas con Austria para comparabilidad; sin reposición dentro del RSP). Resto de elementos según valores de fabricante/EPD o por defecto de ONE CLICK LCA.

Calidad de datos

- Cobertura normativa: datasets EN 15804 +A2 (verificados bajo ISO 14025), combinados con genéricos ONE CLICK LCA cuando no hay EPD específica.
- Representatividad geográfica: España como primera opción; Europa como respaldo.
- Temporalidad: mayoritariamente 2018–2024.
- Completitud: materiales principales (hormigón, acero, vidrio, madera, aislamientos y acabados) cubiertos con EPD +A2; partidas menores (selladores, auxiliares) pueden estar modeladas con genéricos.
- Herramienta y versión: One Click LCA. Para el “semáforo” comparativo se emplea la línea base “Western Europe – one dwelling building (2023 Q3)” (solo a efectos de benchmark).

Principales fuentes de incertidumbre

1. EPD no nacionales (UE o genéricos) cuando faltan EPD españolas → posible variación $\pm 5-15$ % en esas partidas.
2. Vidas útiles y reposiciones (B4-B5): sensibles en elementos con alto GWP (p. ej., huecos acristalados); aquí se fijan a 50 años para evitar reposiciones.
3. Mix eléctrico (B6): la intensidad de carbono del mix IEA2022-ES condiciona el peso de operación; cambios de mix o políticas de compra (p. ej., PPA verde) alterarían B6.
4. Distancias/rutas reales de transporte (A4) frente a supuestos estándar ONE CLICK LCA.
5. Escenarios de fin de vida (C): tasas de reciclaje locales y logística real vs. valores por defecto.

Nota de comparabilidad

Se ha mantenido criterio homogéneo con Austria en: UF, RSP, límite del sistema, servicio de ventanas (50 años), método EN 15804 +A2 y uso de línea base nacional para el semáforo (Spain 2023 Q3). De este modo, las diferencias observadas responden principalmente a diseño/materiales, mix eléctrico B6 y EPD disponibles en cada país.

Nota de comparabilidad (A1–C vs. “semáforo”)

En este ACV, el módulo B6 representa únicamente la electricidad de uso del edificio (introducida en kWh/año y extrapolada a 50 años) con el mix nacional IEA-2022; B6 se incluye en los totales A1–C que muestran las figuras.

El indicador comparativo Carbon Heroes Benchmark (“semáforo”) de One Click LCA compara A1–A3 + A4 + B4–B5 + C1–C4 y excluye A5 (obra) y B6 (energía en uso) —y B7 (agua)— por metodología. Por ello su banda es solo relativa y no es directamente comparable con los totales A1–C presentados en este capítulo.

La conformidad nZEB –10 % se verifica aparte con herramientas oficiales (HULC/GEQ), no con el ACV.

7.3.3 Análisis por filtros (A1-C): qué explica el resultado

- *Filtro por elementos:* Cada gráfico aísla la contribución de elementos específicos (ej: solo forjados) del GWP total, permitiendo identificar hotspots constructivos.
- *Interpretación por fases A1-C:* Las columnas apiladas muestran qué fase del ciclo de vida genera mayor impacto en cada elemento, orientando decisiones de diseño hacia las fases más críticas.

7.3.3.1 Austria

Análisis de ciclo de vida para Level(s) (EN15804 +A2) - Potencial de calentamiento global, kg CO₂e - Elementos y fases del ciclo de vida.

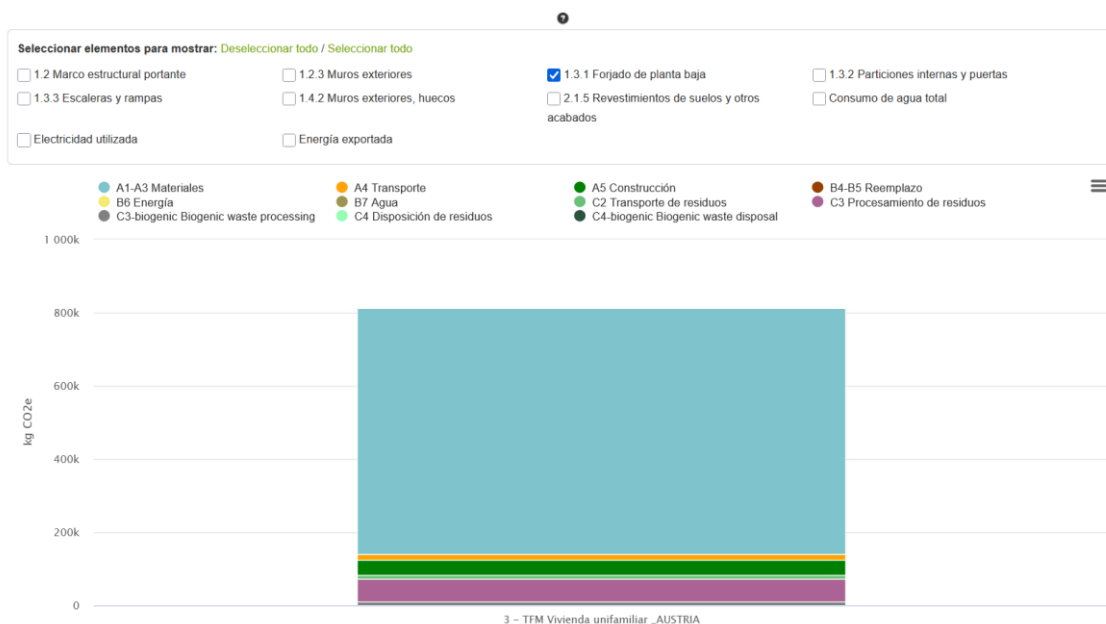


Figura 34 Austria - Forjado de planta baja (1.3.1): GWP por fases A1-C (EN 15804 +A2).
Columna apilada con el potencial de calentamiento global (GWP, kg CO₂e (total)) exclusivamente del forjado de planta baja del caso Austria (EN 15804 +A2). Total: 813,2 t CO₂e. Reparto por fases: A1-A3 672,8 t (82,7 %), C3 62,7 t (7,7 %), A5 41,6 t (5,1 %), A4 16,2 t (2,0 %), C2 10,1 t (1,2 %), C3-bio 9,5 t (1,2 %); el resto (B4-B5, B6, B7, C4 y C4-bio) ≈ 0 %. Fuente: One Click LCA (filtro por elemento 1.3.1).

Forjado de planta baja (1.3.1) - AUSTRIA

	A1–A3	A4	A5	B4-B5	B6	B7	C2	C3	C3-bio	C4	C4-bio	Total
t CO ₂ e	672,8	16,2	41,6	0,1	0,0	0,0	10,1	62,7	9,5	0,0	0,0	813,2
% del total	82,7%	2,0%	5,1%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%	7,7%	1,2%	0,0%	0,0%	100%

Análisis de ciclo de vida para Level(s) (EN15804 +A2) - Potencial de calentamiento global, kg CO₂e - Elementos y fases del ciclo de vida.

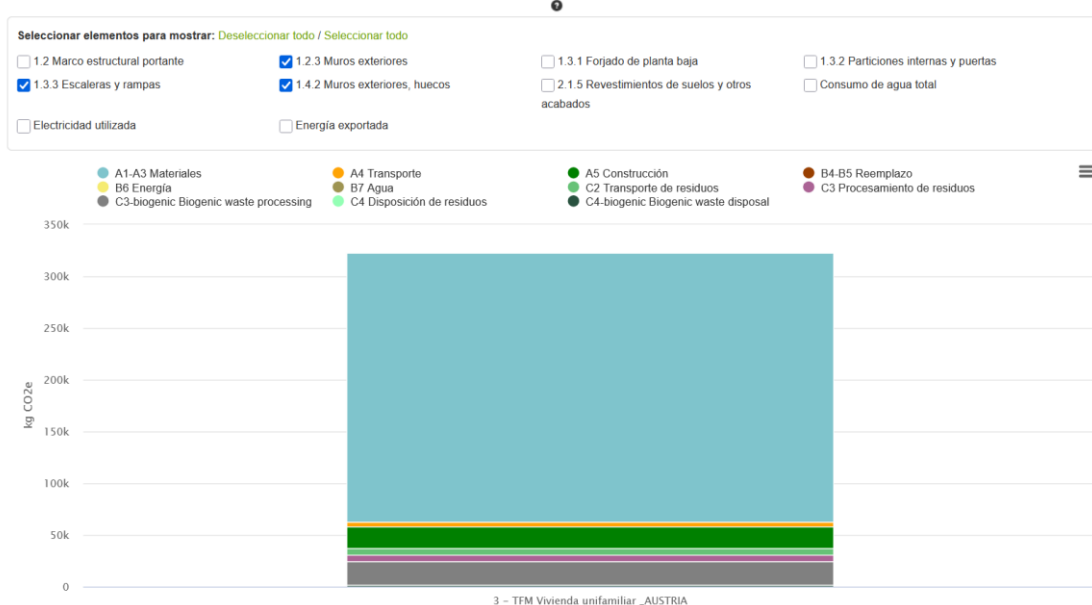


Figura 35 Austria - Muros exteriores y huecos (1.2.3 + 1.4.2) y escaleras (1.3.3): GWP por fases A1-C (EN 15804 +A2). Columna apilada con el potencial de calentamiento global (GWP, kg CO₂e (total)) solo de los elementos seleccionados. Total: 322,7 t CO₂e. Reparto por fases: A1-A3 259,7 t (80,5 %), C3-biogénico 22,0 t (6,8 %), A5 21,2 t (6,6 %), C3 6,7 t (2,1 %), C2 6,1 t (1,9 %), A4 4,6 t (1,4 %), C4-biogénico 2,2 t (0,7 %); B4-B5, B6, B7 y C4 ≈ 0 %. Fuente: One Click LCA (filtro por 1.2.3 + 1.4.2 + 1.3.3).

Muros exteriores + huecos (1.2.3 + 1.4.2) y escaleras (1.3.3) - AUSTRIA

	A1–A3	A4	A5	B4-B5	B6	B7	C2	C3	C3-bio	C4	C4-bio	Total
t CO ₂ e	259,7	4,6	21,2	0,0	0,0	0,0	6,1	6,7	22,0	0,0	2,2	322,7
% del total	80,5%	1,4%	6,6%	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	2,1%	6,8%	0,0%	0,7%	100%

Análisis de ciclo de vida para Level(s) (EN15804 +A2) - Potencial de calentamiento global, kg CO₂e - Elementos y fases del ciclo de vida.

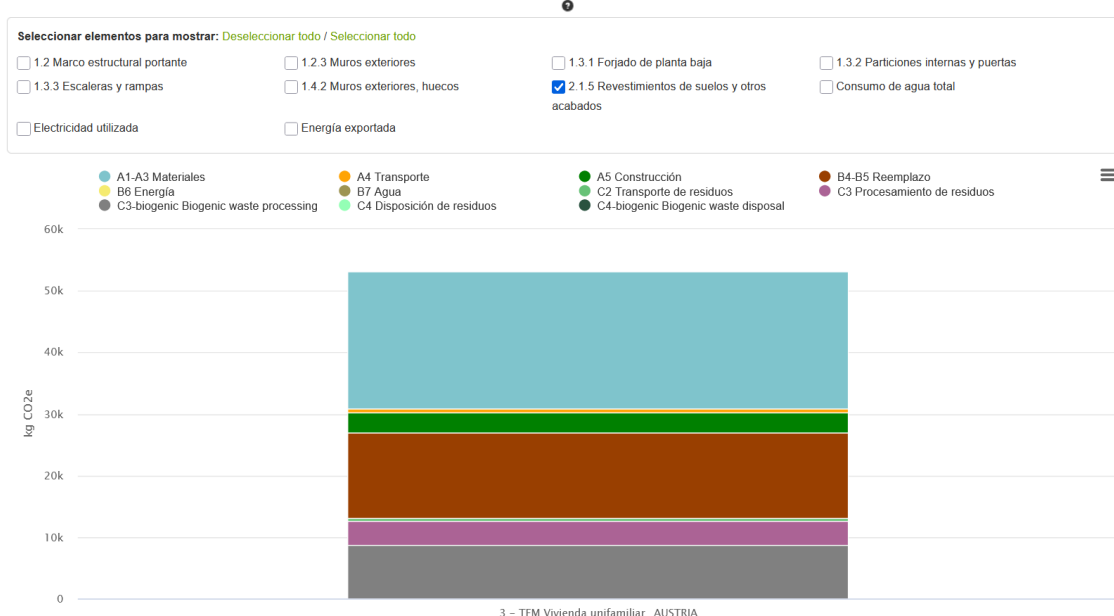


Figura 36 Austria - Revestimientos de suelos y otros acabados (2.1.5): GWP por fases A1-C (EN 15804 +A2). Columna apilada con el potencial de calentamiento global (kg CO₂e (**total**)) solo del elemento 2.1.5. Total: 53,2 t CO₂e. Reparto por fases: A1-A3 22,3 t (42,0 %), B4-B5 13,8 t (25,9 %), C3-biogénico 8,7 t (16,4 %), C3 3,9 t (7,2 %), A5 3,4 t (6,4 %), A4 0,5 t (1,0 %), C2 0,6 t (~1,1 %); B6, B7 y C4 ≈ 0 %.
Fuente: One Click LCA (filtro 2.1.5 – Revestimientos de suelos y otros acabados).

Revestimientos de suelos y otros acabados (2.1.5) - AUSTRIA

	A1–A3	A4	A5	B4-B5	B6	B7	C2	C3	C3-bio	C4	C4-bio	Total
t CO ₂ e	22,3	0,5	3,4	13,8	0,0	0,0	0,6	3,9	8,7	0,0	0,0	53,2
% del total	42,0%	1,0%	6,4%	25,9%	0,0%	0,0%	1,0%	7,2%	16,4%	0,0%	0,0%	100%

7.3.3.2 Madrid

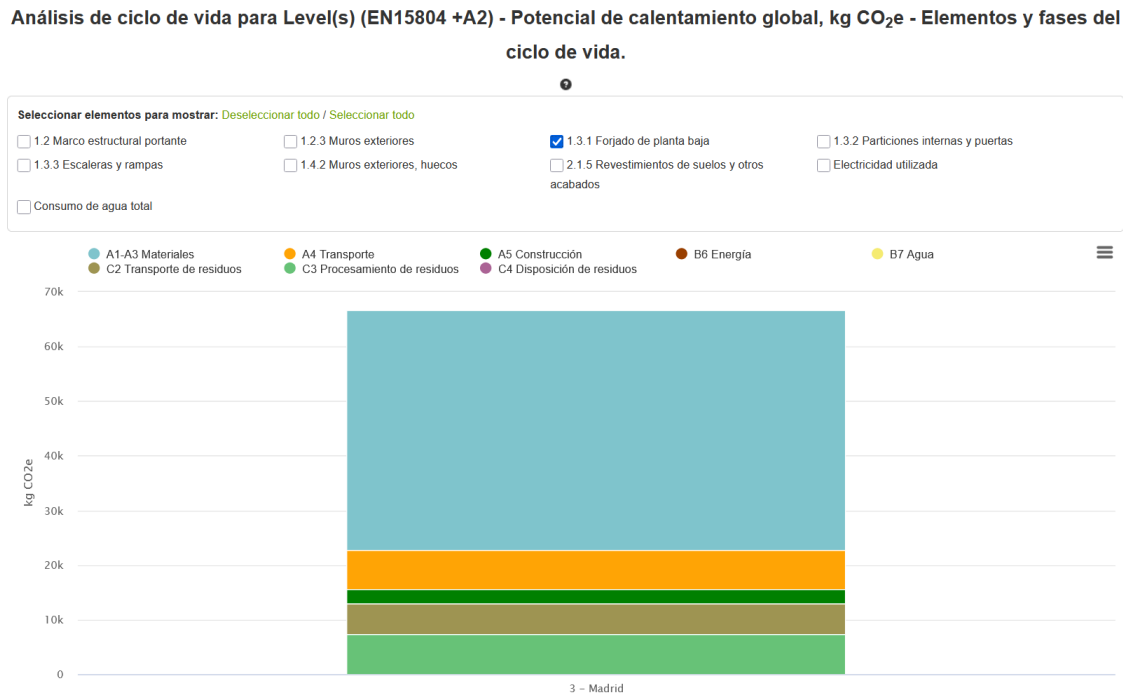


Figura 37 Madrid - Forjado de planta baja (1.3.1). Contribución al GWP por fases (A1-C) (EN 15804 +A2). Columna apilada con el potencial de calentamiento global del forjado de planta baja desglosado por fases según EN 15804 +A2. Total: 66,6 t CO₂e. Desglose: A1-A3 = 43,9 t (65,9 %), A4 = 7,1 t (10,7 %), A5 = 2,7 t (4,0 %), B7 = 5,5 t (8,3 %), C2 = 7,3 t (11,0 %); B4-B5, B6 y C3 ≈ 0 %. Fuente: One Click LCA.

Forjado de planta baja (1.3.1) - MADRID									
	A1–A3	A4	A5	B4-B5	B6	B7	C2	C3	Total
t CO ₂ e	43,9	7,1	2,7	0,0	0,0	5,5	7,3	0,0	66,6
% del total	65,9%	10,7%	4,0%	0,0%	0,0%	8,3%	11,0%	0,0%	100,0%

Análisis de ciclo de vida para Level(s) (EN15804 +A2) - Potencial de calentamiento global, kg CO₂e - Elementos y fases del ciclo de vida.

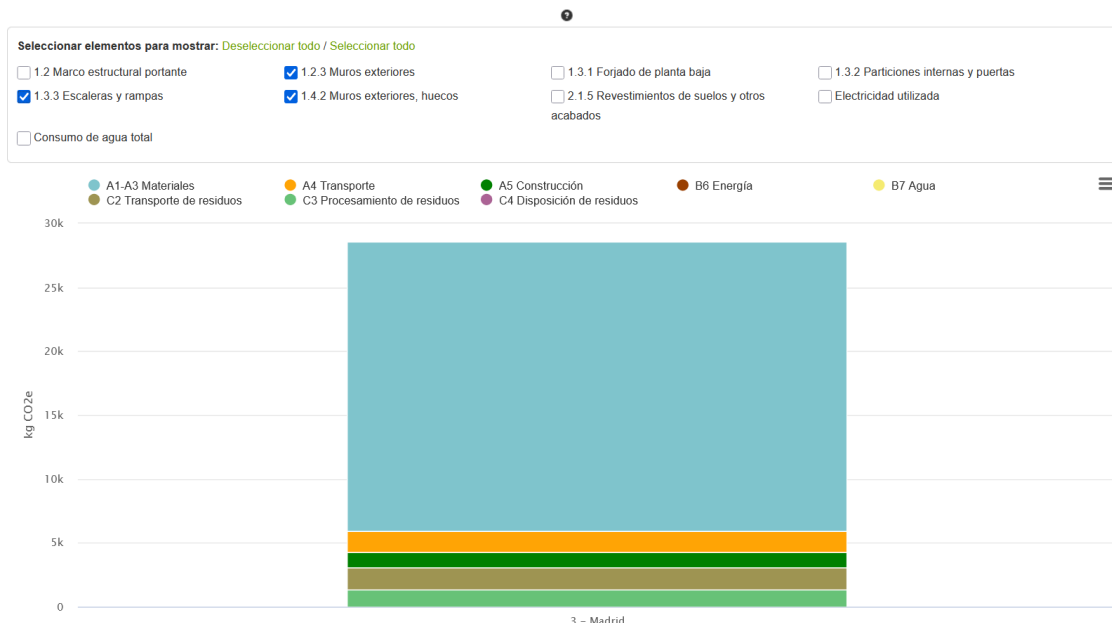


Figura 38 Madrid - Muros exteriores + huecos y escaleras: contribución del GWP por fases (A1-C) (EN 15804 +A2). Columna apilada con el potencial de calentamiento global (kg CO₂e (total)) del agregado de elementos 1.2.3 Muros exteriores, 1.4.2 Huecos y 1.3.3 Escaleras y rampas, calculado según EN 15804 +A2 (RSP 50 años). El total asciende a 28,5 t CO₂e y se reparte así: A1-A3 materiales 79,2 %, A4 transporte 5,8 %, A5 construcción 4,3 %, B7 agua 5,9 %, C2 transporte de residuos 4,8 %, mientras que B4-B5, B6 y C3 ≈ 0 %. Fuente: One Click LCA.

Muros exteriores + huecos (1.2.3 + 1.4.2) y escaleras (1.3.3) - MADRID

	A1-A3	A4	A5	B4-B5	B6	B7	C2	C3	Total
t CO ₂ e	22,6	1,7	1,2	0,0	0,0	1,7	1,4	0,0	28,5
% del total	79,2%	5,8%	4,3%	0,0%	0,0%	5,9%	4,8%	0,0%	100,0%

Análisis de ciclo de vida para Level(s) (EN15804 +A2) - Potencial de calentamiento global, kg CO₂e - Elementos y fases del ciclo de vida.

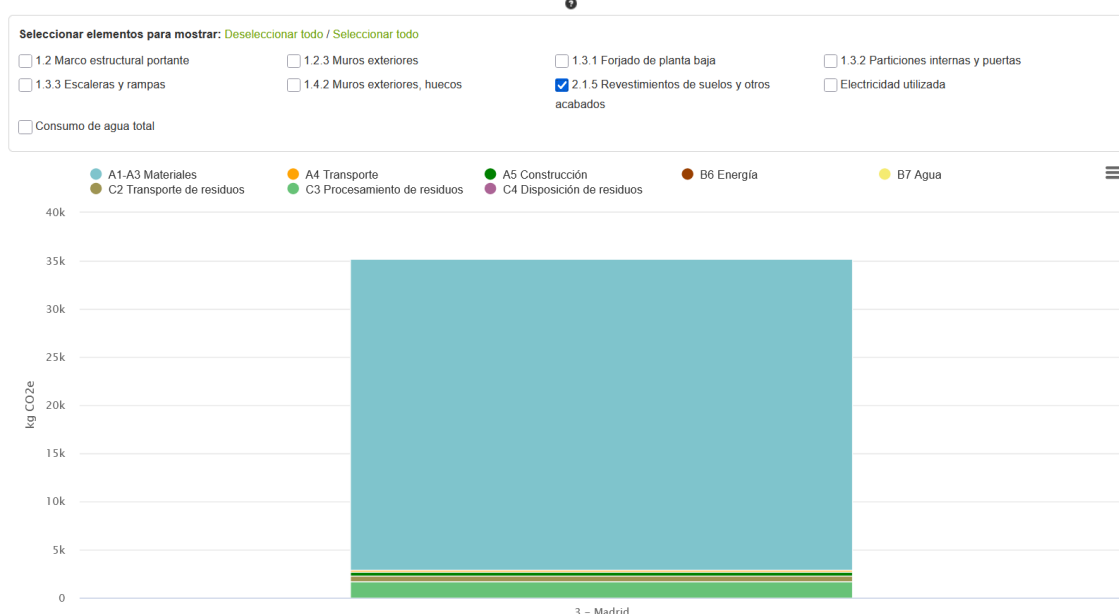


Figura 39 Madrid — Revestimientos de suelos y otros acabados (2.1.5): contribución del GWP por fases (A1-C) (EN 15804 +A2).

Columna apilada con el potencial de calentamiento global (kg CO₂e (total)) del elemento 2.1.5 calculado según EN 15804 +A2 (RSP 50 años). El total asciende a 35,2 t CO₂e, repartido en: A1-A3 materiales 91,7 %, A4 transporte 0,6 %, A5 construcción 1,1 %, B7 agua 1,8 %, C2 transporte de residuos 4,7 %; B4-B5, B6 y C3 ≈ 0 %. Fuente: One Click LCA.

Revestimientos de suelos y otros acabados (2.1.5) - MADRID

	A1–A3	A4	A5	B4-B5	B6	B7	C2	C3	Total
t CO ₂ e	32,3	0,2	0,4	0,0	0,0	0,6	1,7	0,0	35,2
% del total	91,7%	0,6%	1,1%	0,0%	0,0%	1,8%	4,7%	0,0%	100,0%

7.4 Comparación Austria vs España

La aplicación del mismo modelo arquitectónico y constructivo en dos contextos (Austria y España) permite aislar el efecto del marco normativo, el mix eléctrico y la calidad/disponibilidad de datos (EPD) en la huella de carbono de ciclo de vida y en la alineación con la Taxonomía. En ambos casos se ha usado el mismo perímetro de ACV (edificio con cimentación; sin infraestructura del sitio), metodología EN 15804 +A2 (CEN, 2019) y RSP = 50 años, con las aclaraciones de comparabilidad ya indicadas.

7.4.1 Diferencias normativas y energéticas

Marco regulatorio y herramientas oficiales

- **Austria.** La exigencia mínima de desempeño energético se fija en OIB-Richtlinie 6 (OIB, 2019), con un ecosistema voluntario avanzado (klimaaktiv) que integra ACV y circularidad desde hace años, facilitando la convergencia con la Taxonomía (European Commission, 2020). La verificación nZEB se realiza con GEQ.
- **España.** El CTE DB-HE (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), 2019) establece requisitos obligatorios homogéneos a nivel estatal, históricamente centrados en energía operativa. La integración de ACV/circularidad es más reciente y se apoya en instrumentos como fondos NextGenerationEU (European Commission, 2021). La verificación nZEB se realiza con HULC.

Nota operativa (B6 y comparabilidad). En ambos casos, para One Click LCA el módulo B6 se ha modelado únicamente como electricidad de uso (kWh/año extrapolados a 50 años; mix IEA-2022 por país) (International Energy Agency (IEA), 2022), sin calefacción/ACS. El Carbon Heroes Benchmark (“semáforo”) excluye A5 y B6 por metodología (One Click LCA, 2023); por tanto, no es comparable con los totales A1–C que se muestran en las figuras.

Mix eléctrico y peso de B6

- Austria presenta un mix con alta penetración renovable (IEA, 2022), lo que reduce la intensidad de carbono de la electricidad y explica que $B6 \approx 5\%$ del total A1–C.
- España opera con un mix en transición, de mayor intensidad de carbono que el austriaco (IEA, 2022); de ahí que $B6 = 35,3\%$ del total A1–C, aun con consumos operativos similares.

Fin de vida y residuos (C-módulos)

Austria dispone de infraestructura consolidada para valorización de RCD (European Environment Agency (EEA), 2020), mientras que en España el despliegue es heterogéneo según territorio (MITMA, 2022). Esto condiciona la robustez de los escenarios C y, en la práctica, la facilidad para alcanzar $\geq 70\%$ de valorización exigida por la Taxonomía (European Commission, 2021), aunque en este TFM los escenarios se han parametrizado de forma equivalente para mantener la comparabilidad.

Cobertura de EPD y calidad de datos

En Austria existe mayor disponibilidad de EPD locales (Institut Bauen und Umwelt (IBU), 2022), lo que mejora representatividad; en España se recurre con más frecuencia a EPD UE o genéricas de One Click LCA (2023). Esta diferencia afecta la incertidumbre y puede variar el peso de A1–A3.

7.4.2 Tabla de KPIs comparativos

Área de referencia del edificio: 263,23 m².

A1–C incluye A5 y B6 (electricidad). El “semáforo” excluye A5/B6 y es solo comparativo

frente a Western Europe – one dwelling building (One Click LCA, 2023 Q3).

KPI	Austria	Madrid	Observaciones / notas
Carbon Heroes Benchmark (kg CO ₂ e/m ² ; sin A5/B6)	4.117,0	1.169,0	Indicador comparativo; no confrontar con A1–C.
A1–C total (t CO ₂ e, edificio)	≈ 1 257	206,3	Totales One Click LCA con A5 y B6 (electricidad).
A1–A3 / A1–C (%)	≈ 76 %	48,10%	AT dominado por materiales; ES con mayor peso operativo.
B6 / A1–C (%)	≈ 5,0 %	35,30%	B6 = electricidad (mix IEA-2022); sin calefacción/ACS.
Hotspot #1 (elemento)	Forjado PB (1.3.1) = 813,2 t	Forjado PB (1.3.1) = 66,6 t	Diferencia estructural clave.
Hotspot #2 (elemento)	1.2.3+1.4.2+1.3.3 = 322,7 t	1.2.3+1.4.2+1.3.3 = 28,5 t	Cerramientos, huecos y escaleras.
Hotspot #3 (elemento)	2.1.5 = 53,2 t	2.1.5 = 35,2 t	Revestimientos.
Módulo D (FV)	Crédito reportado	No aplica	Se presenta aparte ; no suma a A1–C.
Demanda calefacción Q (kWh/m ² ·año)*	≈ 435	≈ 404	Cálculo 7.1.6 (transmisión+ventilación).
Energía primaria Ep,tot (kWh/m ² ·año)*	≈ 261	≈ 243	Verificación nZEB-10 % con GEQ / HULC .
Circularidad (Madaster)	MCI 66 %; Valorización RCD 89 %	MCI 66 %; Valorización RCD 89 %	Igual por tratarse del mismo modelo .

*Estimaciones operativas para informar **B6** en OCLCA; **no sustituyen** las verificaciones oficiales nZEB.

7.4.3 Discusión causa–efecto

7.4.3.1 Factor explicativo 1: Mix eléctrico y módulo B6

La diferencia más determinante proviene de la intensidad de carbono del mix eléctrico (IEA, 2022). Con consumos parecidos, Austria presenta un B6 muy bajo (~5 %), mientras que Madrid alcanza 35,3 %, desplazando el protagonismo desde los materiales hacia la operación. Esta realidad no depende del diseño (idéntico), sino del contexto energético.

7.4.3.2 Factor explicativo 2: Magnitud de A1–A3 = cantidad × factor de emisión (estructura + EPD)

El impacto en A1–A3 resulta, en esencia, del producto entre la cantidad de material y su factor de emisión (según EPD). En Austria, el forjado de planta baja (1.3.1) concentra 813,2 t CO_{2e} y el conjunto cerramientos + huecos + escaleras suma 322,7 t; en Madrid, los mismos elementos aportan 66,6 t y 28,5 t, respectivamente. Esta diferencia de orden de magnitud refleja, ante todo, la opción estructural y la masa asociada (OIB, 2019; MITMA, 2019). A su vez, la disponibilidad de EPD locales en Austria mejora la representatividad del dato (EN 15804 +A2), mientras que en España es más frecuente recurrir a EPD europeas o datasets genéricos (IBU, 2022; One Click LCA, 2023). En la práctica, esto reduce la incertidumbre en Austria y, según el producto y el proceso industrial, puede dar valores más realistas (a veces más altos que promedios europeos optimistas). En ambos países, A4 (transporte) y A5 (obra) modulan el resultado, pero A1–A3 sigue siendo la palanca dominante.

Implicación operativa: para reducir A1–A3 de forma eficaz, hay que actuar a la vez sobre (i) la masa (optimización de la solución estructural, prefabricación, contenidos reciclados) y (ii) el factor de emisión (selección de EPD +A2 con menor huella, geográficamente representativas, evitando genéricos cuando subestimen el impacto).

7.4.3.3 Factor explicativo 3: Envolvente y supuestos energéticos

Se ha modelado triple acristalamiento en Austria y doble selectivo en Madrid, coherente con la práctica habitual y con los climas respectivos (OIB, 2019; MITMA, 2019). Esta decisión mejora el balance térmico en AT y reduce Q y Ep,tot, contribuyendo a la robustez del cumplimiento nZEB, aunque el efecto sobre A1–C es secundario frente a A1–A3 y B6.

7.4.3.4 Factor explicativo 4: Fotovoltaica en Módulo D

En Austria se ha considerado crédito por exportación FV en Módulo D (fuera de A1–C); en Madrid no. No altera los totales A1–C, pero mejora el balance completo cradle-to-grave + D del caso austriaco (European Commission, 2021).

Implicaciones prácticas

- Si el objetivo es bajar A1–C rápidamente: actuar sobre A1–A3 (hormigones con menor clinker, aceros con mayor reciclado, madera con EPD robustas) y A5 (plan de obra y prefabricación).
- Para territorios con mix más intensivo en carbono: impulsar autoconsumo FV (Módulo D), gestión activa de demanda y electrificación eficiente (IEA, 2022).
- Para la Taxonomía (nZEB-10 %): la verificación final se hace con GEQ/HULC (OIB, 2019; MITMA, 2019); el B6 usado en One Click LCA sirve para trazabilidad, pero no sustituye la comprobación normativa.

Resumen comparativo. Con idéntico edificio, Austria muestra mayor peso de A1–A3 y B6 bajo (mix eléctrico favorable y crédito FV en D), mientras que Madrid traslada mayor parte del impacto a B6. La Taxonomía es un marco común (European Commission, 2020), pero los resultados varían por condiciones nacionales (energía, EPD, residuos). Esta lectura contextualizada es clave para diseñar hojas de ruta realistas de descarbonización y circularidad.

Interpretación conjunta. Los resultados evidencian que la Taxonomía, a pesar de ser un Reglamento directamente aplicable (European Commission, 2020), genera outcomes diferentes según el contexto nacional. Esta variabilidad no es un defecto del sistema, sino un reflejo de la realidad: las condiciones energéticas, industriales y climáticas de cada país son parte integral de la evaluación de sostenibilidad. Sin embargo, desde la perspectiva de armonización del mercado único, esta situación plantea preguntas relevantes sobre equidad competitiva: ¿debe un mismo proyecto tener diferentes niveles de alineación taxonómica según su ubicación?

¿Cómo equilibrar criterios uniformes con realidades nacionales diversas? En mi opinión, los resultados refuerzan la necesidad de interpretar la Taxonomía no como un estándar absoluto, sino como un marco que debe contextualizarse según las particularidades de cada Estado miembro, manteniendo ambiciones elevadas pero realistas.

7.5 Verificación de criterios DNSH

El principio *Do No Significant Harm* (DNSH) exige que cualquier actividad que contribuya de forma sustancial a un objetivo ambiental de la Taxonomía no cause perjuicios significativos a los demás.

En el caso de la actividad 7.1 (construcción de edificios nuevos), la contribución sustancial se realiza respecto al Objetivo 1: Mitigación del cambio climático, que se ha verificado mediante:

el cálculo de la huella de carbono de ciclo de vida completo (A1–C) conforme a EN 15978 y con One Click LCA, y

la comprobación de la eficiencia energética ($E_{p,tot} \leq nZEB - 10\%$) con herramientas oficiales en Austria (GEQ, OIB-RL6) y España (HULC, DB-HE).

Por tanto, el Objetivo 1 no se evalúa como DNSH, sino como el objetivo central de contribución positiva.

La verificación DNSH se centra en los objetivos ambientales **2 a 6**.

7.5.1 Objetivo 2: Adaptación al cambio climático

Criterio DNSH. Las soluciones de adaptación implementadas no deben afectar negativamente el nivel de resiliencia o aumentar los riesgos climáticos físicos para otras personas, la naturaleza, el patrimonio cultural, los activos y otras actividades económicas (European Commission, 2021).

Verificación del proyecto.

- Evaluación de riesgos climáticos.
 - En Austria (Viena), los riesgos identificados incluyen olas de calor urbanas, eventos de precipitación extrema y períodos de sequía (IPCC, 2022; Umweltbundesamt, 2021). El diseño incorpora inercia térmica (estructura de hormigón) y sombreado pasivo.
 - En España (Madrid), los principales riesgos son estrés térmico estival, escasez hídrica y eventos meteorológicos extremos (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), 2020). La orientación sur optimiza ganancias solares en invierno mientras que los voladizos reducen el sobrecalentamiento estival.

Medidas de adaptación implementadas.

1. CRVA realizada: identificación de peligros materiales por emplazamiento y horizonte (Madrid: sobrecalentamiento estival, lluvias intensas/anegamiento puntual, viento; Viena: los anteriores + nieve/hielo).
2. Criterios de adaptación y verificación: medidas proporcionadas y eficaces, sin mal-adaptación; coherentes con normativa energética (HULC/MITMA, 2019; OIB-RL6, 2019) y documentadas con planos/detalles y trazabilidad en IFC/OCLCA/Madaster.
3. Resiliencia térmica: acristalamiento adaptado al clima (triple en Austria, doble selectivo en España) y aislamiento térmico continuo (OIB, 2019; MITMA, 2019).
4. Gestión de agua: superficies permeables en parcela y sistemas de drenaje integrados (European Commission, 2020).

5. Durabilidad de materiales: selección de materiales con vida útil adecuada al clima local (50 años para huecos).

Resultado. ✓ CONFORME. Las medidas no generan externalidades negativas y mejoran la resiliencia del edificio.

7.5.2 Objetivo 3: Uso sostenible y protección del agua y los recursos marinos

Criterio DNSH. La actividad debe cumplir con los criterios establecidos en el Apéndice B del Anexo I del Reglamento Delegado (European Commission, 2021).

Verificación del proyecto.

Consumo de agua. Estimación: 175,2 m³/año para 4 personas (120 L/persona·día) (World Health Organization (WHO), 2017). Se integra un sistema de recolección de agua de lluvia mediante tanques para usos no potables (riego, limpieza), reduciendo la demanda sobre la red pública. No se incluyen sistemas de uso intensivo de agua (piscinas, refrigeración evaporativa). Además, se incorporan griferías eficientes y gestión integral del ciclo hídrico (European Commission, 2020).

Calidad del agua. Los materiales seleccionados (hormigón, acero, madera, vidrio) no contienen sustancias que puedan lixiviar contaminantes al suelo o acuíferos (EN 15804 +A2; CEN, 2019). Los sistemas de saneamiento están conectados a la red pública con tratamiento secundario (MITECO, 2020).

Impacto en ecosistemas acuáticos. La huella del edificio es reducida (317 m²) y no afecta a cuerpos de agua sensibles; además, los materiales no incluyen sustancias bioacumulativas o tóxicas para la vida acuática (European Chemicals Agency (ECHA), 2022).

Resultado. ✓ CONFORME. Consumo responsable de agua sin impactos significativos en ecosistemas acuáticos.

7.5.3 Objetivo 4: Transición a una economía circular

Criterio DNSH. No aplicable para la actividad 7.1, ya que la circularidad constituye un objetivo de contribución positiva, no una salvaguarda DNSH (European Commission, 2021).

Nota. Los resultados de Madaster (66 % circularidad, 89 % valorización) se evalúan como contribución positiva al objetivo 4 (Madaster, 2023), no como criterio DNSH.

7.5.4 Objetivo 5: Prevención y control de la contaminación

Criterio DNSH. La actividad no debe llevar a un aumento significativo de las emisiones de contaminantes al aire, agua o suelo (European Commission, 2021).

Verificación del proyecto.

Sustancias peligrosas. Amianto: no presente (prohibido en la UE desde 2005). COV: pinturas y adhesivos con certificación de bajas emisiones (European Chemicals Agency (ECHA), 2022). Formaldehído: tableros de madera con clasificación E1 o superior (EN 13986:2015). Sustancias SVHC: verificación en EPDs de ausencia de sustancias extremadamente preocupantes según REACH (European Commission, 2006).

Emisiones durante la construcción. Gestión de polvo y ruido según buenas prácticas constructivas (ISO 14001:2015). Plan de gestión de residuos con separación selectiva (objetivo ≥ 70 % valorización; European Commission, 2021). Transporte de materiales optimizado (distancias medias A4: 60 km).

Operación del edificio. Sin sistemas de climatización con refrigerantes de alto GWP (Reglamento (UE) n.º 517/2014). Ventilación natural complementaria para reducir cargas de ventilación mecánica. Mantenimiento con productos de limpieza biodegradables (European Environment Agency (EEA), 2020).

Resultado. ✓ CONFORME. Control efectivo de emisiones durante construcción y operación.

7.5.5 Objetivo 6: Protección y restauración de la biodiversidad y los ecosistemas

Criterio DNSH. La actividad no debe ser significativamente perjudicial para el buen estado y la resiliencia de los ecosistemas (European Commission, 2021).

Verificación del proyecto.

Localización y uso del suelo. Austria: emplazamiento en zona periurbana consolidada (Perchtoldsdorf), sin afectación a espacios protegidos Natura 2000 (European Environment Agency (EEA), 2020). España: ubicación en ámbito residencial de la Sierra de Madrid, fuera de áreas de especial conservación (MITECO, 2020).

Superficie ocupada. Huella edificatoria: 189,99 m² sobre parcela privada, con mantenimiento de permeabilidad del suelo en >60 % de la parcela y medidas de integración paisajística mediante pendiente y vegetación autóctona (European Commission, 2020).

Materiales y ecosistemas. Madera con certificación de gestión forestal sostenible FSC/PEFC (Forest Stewardship Council (FSC), 2021; Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC), 2021). Áridos de cantera con planes de restauración ambiental (MITMA, 2022). Sin materiales procedentes de ecosistemas sensibles o deforestación.

Servicios ecosistémicos. Contribución al almacenamiento de carbono a través de elementos de madera (33 t según Madaster, 2023). Sistemas de drenaje que favorecen infiltración natural y cubierta vegetal en porcentaje de la parcela (European Commission, 2020).

Resultado. ✓ CONFORME. Impacto mínimo sobre biodiversidad y ecosistemas locales.

7.5.6 Síntesis de verificación DNSH

Objetivo Ambiental	Estado	Evidencias principales
2. Adaptación climática	✓	Diseño resiliente, medidas pasivas (orientación, inercia térmica, acristalamiento adaptado al clima, sombreado pasivo).
3. Agua y recursos marinos	✓	Consumo responsable (175,2 m³/año; ≈120 L/persona·día), recolección de agua pluvial, ausencia de contaminantes y conexión a red de saneamiento.
4. Economía circular	N/A *	Circularidad evaluada como contribución sustancial, no como DNSH (Madaster: MCI 66 %, valorización RCD 89 %, desmontabilidad elevada en estructura).
5. Prevención contaminación	✓	Ausencia de sustancias peligrosas (amianto, SVHC), materiales con bajas emisiones de COV y formaldehído, plan de gestión de residuos ≥70 %, control de polvo y ruido en obra.
6. Biodiversidad	✓	Localización fuera de áreas Natura 2000, mantenimiento de >60 % de suelo permeable, uso de especies autóctonas y madera certificada FSC/PEFC.

* En el caso del objetivo 4 (economía circular), el Reglamento Delegado (UE) 2021/2139 establece que no se trata de un criterio DNSH para la actividad 7.1 (obra nueva), sino de un objetivo de contribución sustancial. Por ello se indica como “N/A” en la tabla, lo cual no implica ausencia de evaluación, sino que su análisis se aborda como parte de la contribución positiva al alineamiento taxonómico. En este sentido, el uso de Madaster resulta esencial, ya que permite cuantificar indicadores de circularidad (MCI 66 %, valorización de RCD 89 %, desmontabilidad) y aportar evidencia verificable sobre el cumplimiento de requisitos clave como la valorización mínima del 70 % de los residuos de construcción y demolición. De este modo, aunque la circularidad no se verifique dentro del marco DNSH, constituye un pilar central de la contribución sustancial de este proyecto a los objetivos de la Taxonomía, y la herramienta Madaster se justifica plenamente como soporte metodológico para su documentación y trazabilidad.

Conclusión DNSH. El proyecto cumple con el principio *Do No Significant Harm* en todos los objetivos ambientales aplicables (2, 3, 5 y 6). Esta verificación, combinada con la contribución sustancial al Objetivo 1 (mitigación climática) y la aportación positiva al Objetivo 4 (economía circular), así como el cumplimiento del criterio energético nZEB -10 %, permite considerar la actividad como elegible y alineada con la Taxonomía Europea.

7.6 Limitaciones del estudio

El presente estudio presenta una serie de limitaciones que deben considerarse para interpretar correctamente los resultados:

El presente estudio presenta varias limitaciones que deben considerarse para interpretar adecuadamente los resultados. Estas limitaciones no invalidan el análisis realizado, sino que reflejan la complejidad de trasladar criterios europeos a contextos nacionales y el carácter metodológico de la investigación.

Modelo de referencia. El edificio analizado no corresponde a un caso real con permisos o documentación técnica completa, sino a un prototipo digital desarrollado en Revit. Esta elección no es un error, sino una decisión metodológica deliberada: al mantener constante la geometría, los materiales y los sistemas constructivos en Austria y España, se garantiza que las diferencias observadas en circularidad, huella de carbono o cumplimiento energético se deban únicamente a factores de contexto (marco normativo, mix eléctrico, disponibilidad de EPDs, gestión de RCD). Esto significa que el valor del estudio no radica en representar un edificio construido, sino en demostrar, bajo condiciones controladas, cómo un mismo diseño puede generar resultados distintos en función del país en el que se evalúe. La limitación, por tanto, no está en la validez de la comparación, sino en la imposibilidad de extrapolar directamente los resultados a todo el parque edificatorio.

Restricción en variaciones de diseño. El modelo se ha mantenido idéntico en ambos contextos, con la única variación en los acristalamientos para reflejar la adaptación mínima al clima local. En proyectos reales, la adaptación a normativas y prácticas constructivas nacionales sería más amplia (sistemas de calefacción, espesores de aislamiento, tipologías estructurales). Esta simplificación refuerza la comparabilidad, pero reduce el realismo de la simulación.

Integración BIM–ACV y circularidad. La importación de modelos IFC en plataformas como One Click LCA y Madaster no siempre reconoce automáticamente todos los materiales o propiedades. Este hecho obliga a realizar correcciones y ajustes manuales (mapeo de EPDs, densidades, reciclabilidad), lo que introduce incertidumbre y cierta dependencia de la calidad de los datos iniciales. La fiabilidad de los resultados depende en gran medida de que el modelo BIM en Revit esté correctamente parametrizado y de que la nomenclatura de los materiales esté estandarizada, de manera que los softwares puedan realizar el *matching* automático con sus bases de datos. Esta limitación es estructural: sin estandarización BIM para sostenibilidad, el proceso de verificación seguirá dependiendo de ajustes manuales.

Disponibilidad de EPDs locales. No todos los materiales cuentan con Declaraciones Ambientales de Producto específicas en Austria o España. En ausencia de datos locales, se han empleado EPDs genéricas europeas, lo que afecta a la representatividad de los impactos. Esta limitación es especialmente evidente en España, donde la cobertura nacional de EPDs es más reducida y obliga a usar promedios europeos que no siempre reflejan la realidad local (p. ej., en hormigón o acero). Austria, por el contrario, dispone de una base más consolidada, especialmente en madera y hormigones, gracias a la tradición de certificación voluntaria y a la integración temprana de ACV en esquemas como *klimaaktiv*. La consecuencia es clara: la incertidumbre es mayor en el caso español y puede situarse entre un 5 % y un 15 % según el material (Passer et al., 2015). Este aspecto refleja una realidad más amplia: la verificación de

la Taxonomía no depende solo del diseño de los edificios, sino también de la madurez de las bases de datos ambientales disponibles en cada país.

Verificación energética nZEB. La metodología oficial difiere entre países: en España se emplea HULC, mientras que en Austria el procedimiento se realiza conforme a la OIB-Richtlinie 6 mediante el software GEQ. Ambos programas incluyen todos los consumos regulados (calefacción, ACS, refrigeración, ventilación e iluminación) y permiten verificar el cumplimiento del criterio de la Taxonomía (−10 % respecto al nZEB). En One Click LCA, sin embargo, el módulo B6 se ha modelado únicamente como consumo eléctrico de uso general (iluminación y equipos), sin contabilizar calefacción ni ACS. Esta simplificación metodológica responde a dos razones: (i) la versión académica de One Click LCA presenta limitaciones para modelar sistemas energéticos completos sin introducir múltiples supuestos adicionales, y (ii) se buscó mantener la comparabilidad entre Austria y España aislando el efecto del mix eléctrico. Por ello, la omisión de calefacción y ACS en One Click LCA no implica incumplimiento, ya que la verificación normativa del criterio nZEB se realizó con herramientas oficiales en ambos países. El uso de One Click LCA se limitó a garantizar trazabilidad de resultados y a reforzar la interpretación de los impactos de ciclo de vida.

Escenarios de fin de vida (C/D). Los escenarios de demolición, transporte y tratamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) se han parametrizado siguiendo la Taxonomía (≥ 70 % de valorización), pero la realidad es que la infraestructura disponible varía notablemente: Austria cuenta con plantas de valorización más extendidas, mientras que en España la tasa real de reciclaje se sitúa aún en torno al 40–45 % (Eurostat, 2022). Los resultados del TFM, por tanto, deben interpretarse como proyecciones normativas más que como descripciones de la práctica actual.

Cobertura del principio DNSH. Algunos aspectos del principio *Do No Significant Harm* —como ruido y polvo durante la obra, o la interacción real con ecosistemas— no se han

modelado cuantitativamente, sino que se han justificado a través de referencias normativas y buenas prácticas. Este enfoque cualitativo cumple con los criterios del Reglamento, pero deja margen de interpretación en la práctica.

Generalización. El análisis se basa en un único caso de estudio digital. Por tanto, los resultados no son extrapolables a toda la edificación europea. Su valor reside en la metodología y en la trazabilidad lograda mediante herramientas digitales (Revit, Madaster, One Click LCA), así como en la comparación Austria–España, más que en los valores absolutos obtenidos.

Capítulo 8. Conclusiones

8.1 Síntesis de hallazgos clave

A pesar de las limitaciones señaladas —representatividad del caso, disponibilidad desigual de datos y diferencias metodológicas nacionales—, la estrategia de trabajar con un único modelo BIM basado en Revit, modificado únicamente en la variable de los acristalamientos, ha permitido garantizar la comparabilidad entre Austria y España y reforzar la validez metodológica del estudio.

Los resultados evidencian que la aplicación combinada de Revit, Madaster y One Click LCA constituye un sistema viable para la verificación de criterios taxonómicos, aunque condicionado por la calidad de los datos y la interpretación experta. Tres hallazgos principales estructuran las conclusiones de este trabajo:

Primer hallazgo. La digitalización BIM facilita la verificación taxonómica, pero requiere enriquecimiento paramétrico específico. La inclusión de campos como EPD_ID, densidad, contenido reciclado y escenarios de fin de vida resulta determinante para la precisión de los análisis posteriores. Esto refuerza la necesidad de estándares BIM específicos para sostenibilidad, más allá de la geometría.

Segundo hallazgo. Los contextos nacionales generan divergencias significativas en la aplicación de la Taxonomía, pese a ser un Reglamento directamente aplicable. Austria presenta un B6 bajo debido a su mix eléctrico (≈ 5 % del total), mientras que en España el mismo indicador alcanza un 35,3 %. Aunque la circularidad permanece constante (66 % MCI), los impactos ambientales difieren sustancialmente, planteando preguntas sobre equidad competitiva en el mercado único europeo.

Tercer hallazgo. Las herramientas digitales muestran la complejidad de la circularidad real frente a la teórica. La estructura concentra el 98 % de la masa y presenta circularidad alta (79 %), pero principalmente por downcycling. En contraste, la fachada presenta gran

desmontabilidad (94 %) pero circularidad casi nula (2 %). Esto ilustra que desmontabilidad no equivale a reciclaje efectivo, y que los indicadores requieren interpretación crítica.

8.2 Respuesta a objetivos e hipótesis

Objetivo general. Cumplido. La metodología desarrollada ha generado los indicadores requeridos por la Taxonomía: eficiencia energética (Ep_{tot}) verificada con herramientas oficiales, huella de carbono completa (A1–C) conforme a EN 15978, circularidad cuantificada con pasaportes de materiales y verificación DNSH por objetivos ambientales.

Objetivos específicos. Cumplidos en su totalidad:

1. Aplicación de metodología BIM: lograda mediante un modelo paramétrico en Revit, exportado en IFC y usado en ambas plataformas.
2. Análisis de circularidad: alcanzado con Madaster, con un pasaporte de materiales completo y métricas alineadas con el objetivo 4 de la Taxonomía.
3. Cálculo de huella de carbono: desarrollado con One Click LCA conforme a EN 15978, verificando contribución al objetivo 1 y cumplimiento DNSH.
4. Comparación Austria–España: realizada con resultados normalizados, identificando similitudes (circularidad) y diferencias (B6 y EPDs).
5. Identificación de barreras y oportunidades: obtenidas a partir de la dependencia de EPDs locales, la necesidad de parametrización BIM y la brecha en infraestructuras de reciclaje.

Hipótesis. Confirmada con matices. La integración de un modelo BIM único con Madaster y One Click LCA constituye un procedimiento válido para verificar la Taxonomía. Sin embargo, su eficacia depende de tres factores críticos: parametrización BIM adecuada, disponibilidad de EPDs representativas y competencia técnica para interpretar resultados.

8.3 Implicaciones académicas y profesionales

Contribución académica. Este TFM aporta evidencia empírica sobre la operacionalización práctica de la Taxonomía en construcción, un área hasta ahora poco estudiada. Demuestra cómo la parametrización BIM y la integración digital pueden facilitar verificaciones normativas. También evidencia la paradoja entre circularidad teórica y real, abriendo camino a nuevas métricas más sofisticadas.

Práctica profesional. Para arquitectos e ingenieros, el estudio muestra que verificar la Taxonomía no requiere herramientas excesivamente complejas, sino competencias específicas en BIM y ACV. Para consultores, evidencia que la verificación debe ir más allá de cálculos energéticos, incorporando ACV y circularidad. Para promotores, demuestra que un mismo proyecto puede tener distintos niveles de alineación según el país, lo que influye en el acceso a financiación verde.

Política pública. Las diferencias observadas entre Austria y España plantean cuestiones sobre equidad en el mercado único. Países con mix más intensivo en carbono o infraestructuras de reciclaje menos maduras pueden estar en desventaja. Esto sugiere la necesidad de mecanismos de convergencia gradual que reconozcan diferencias de partida, sin rebajar la ambición ambiental.

Capítulo 9. Futuras líneas de trabajo

Las limitaciones metodológicas identificadas —uso de un prototipo digital, dependencia de EPDs locales y necesidad de parametrización BIM estandarizada— no invalidan el análisis, sino que refuerzan la importancia de avanzar hacia bases de datos nacionales más completas y protocolos BIM para sostenibilidad. En particular:

- La menor disponibilidad de EPDs en España introduce incertidumbre adicional, reflejando la falta de datos ambientales estandarizados.
- En One Click LCA, el módulo B6 se modeló solo como electricidad de uso, excluyendo calefacción y ACS; sin embargo, la verificación nZEB completa se realizó con HULC y GEQ, cumpliendo el criterio taxonómico.
- Madaster y OCLCA dependen del *matching* automático con el modelo BIM, lo que pone en evidencia la necesidad de nomenclaturas y parámetros estandarizados en Revit para mejorar la fiabilidad.

Futuras investigaciones deberían ampliar el análisis a tipologías diversas y casos reales con documentación completa, así como profundizar en el impacto del mix eléctrico y la disponibilidad de EPDs en la aplicabilidad de la Taxonomía.

Reflexión final

La Taxonomía Europea representa un cambio de paradigma en la construcción sostenible: pasar de intenciones generales a criterios cuantitativos verificables. Este TFM demuestra que las herramientas digitales pueden facilitar esta transición, siempre que se usen con rigor metodológico, datos fiables y competencias técnicas. Comparar Austria y España ha permitido visibilizar cómo un mismo modelo digital puede generar resultados distintos según el contexto, evidenciando tanto las oportunidades como las tensiones del marco regulatorio europeo.

En síntesis, el valor principal de este trabajo no reside en el edificio analizado, sino en la metodología aplicada: un flujo digital replicable que traduce la Taxonomía en métricas verificables, ofreciendo a investigadores, profesionales y responsables públicos una base para avanzar hacia una construcción más sostenible y alineada con los objetivos europeos.

Referencias

- Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241-252.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
- BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2023). *Klimaaktiv building standard*.
- CEN. (2011). *EN 15978: Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. Comité Europeo de Normalización.
- CEN. (2015). *EN 13986: Wood-based panels for use in construction – Characteristics, evaluation of conformity and marking*. Comité Europeo de Normalización.
- CEN. (2019). *EN 15804:2012+A2:2019. Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*. Comité Europeo de Normalización.
- Comisión Europea. (2018). *Action plan: Financing sustainable growth*.
- Comisión Europea. (2020). *A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*.
- Comisión Europea. (2021a). *Level(s): Marco común de indicadores de sostenibilidad de la UE para edificios de oficinas y residenciales*. Publications Office of the European Union.
- Comisión Europea. (2021b). Reglamento Delegado (UE) 2021/2139 de 4 de junio de 2021 que complementa el Reglamento (UE) 2020/852. En *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 442.
- Comisión Europea. (2021c). *Technical guidance on the application of “do no significant harm” under the Recovery and Resilience Facility Regulation*.
- Comisión Europea. (2022). *Taxonomía de la UE para actividades sostenibles*. Publications Office of the European Union.

- Commission, E. (2025). *Commission Delegated Regulation (EU) 2021/2139 (consolidated 01/01/2025), Annex I, Section 7.1 Construction of new buildings*. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2021/2139/oj
- Craig, P., & de Búrca, G. (2020). *EU law: Text, cases, and materials* (7th ed.). Oxford University Press.
- Delmas, M. A., & Burbano, V. C. (2011). The drivers of greenwashing. *California Management Review*, 54(1), 64-87. <https://doi.org/10.1525/cmr.2011.54.1.64>
- DGNB. (2022). *System for Sustainable Building Certification, Version 2022*.
- Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo. (2024). *Relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- E-Control. (2023). *Stromkennzeichnung 2023: Herkunft und Zusammensetzung des österreichischen Strommix*. E-Control Austria. <https://www.e-control.at>
- European Parliament & Council of the European Union. (2002). Directive 2002/91/EC on the energy performance of buildings. En *Official Journal of the European Union*, L 1.
- European Parliament & Council of the European Union. (2010). Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings (recast). En *Official Journal of the European Union*, L 153.
- European Parliament & Council of the European Union. (2018). Directive (EU) 2018/844 amending Directive 2010/31/EU and Directive 2012/27/EU. En *Official Journal of the European Union*, L 156.
- European Parliament & Council of the European Union. (2019). Regulation (EU) 2019/2088 on sustainability-related disclosures in the financial services sector (SFDR). En *Official Journal of the European Union*, L 317.
- European Parliament & Council of the European Union. (2020). Reglamento (UE) 2020/852 sobre la Taxonomía de actividades sostenibles. En *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 198.

European Parliament & Council of the European Union. (2022). Directive (EU) 2022/2464 on corporate sustainability reporting (CSRD). En *Official Journal of the European Union*, L 322.

Eurostat. (2022). *Waste statistics – Construction and demolition waste*.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

Eurostat. (2023). *Greenhouse gas emission statistics – carbon footprints*.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics

Forest Stewardship Council (FSC). (2021). *Forest Stewardship Council Principles and Criteria*.

<https://fsc.org>

GEQ — Building Energy Quality. (2024). *Energieausweis-Software laut OIB RL 6*.

<https://www.baubook.info/en/tools/calculation-programmes/geq-building-energy-quality>

Gerrish, T., Ruikar, K., Cook, M., Johnson, M., Phillip, M., & Lowry, C. (2017). BIM application to building energy performance visualisation and management: Challenges and potential.

Energy and Buildings, 144, 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.032>

Göswein, V., Koutamanis, A., van Reenen, A., & van Nederveen, G. A. (2021). Material passports for the circular economy: Enhancing reuse and recycling of construction materials. *Journal of*

Cleaner Production, 310, 127476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127476>

Herramienta Unificada LIDER/CALENER (HULC). (2025). *Verificación CTE DB-HE 2019*.

<https://www.codigotecnico.org/Programas/HerramientaUnificadaLIDERCALENER.html>

Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). (2022). *EPD-Program for Building Products*. <https://ibu-epd.com>

International Energy Agency (IEA). (2022a). *Emissions Factors (2022 edition): Electricity & Heat—Database documentation*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/631bfd9a-fea7-4ef3-8cc0-a11ab416805d/CO2KWH_Methodology.pdf

International Energy Agency (IEA). (2022b). *World Energy Outlook 2022*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press.

ISO. (2015). *ISO 14001:2015 Environmental management systems – Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.

Madaster. (2024). *Circularity—Madaster knowledge base (MCI y desmontabilidad)*.

<https://docs.madaster.com/gb/en/platform-pages/building/circularity.html>

Madaster Foundation. (2017). *Material Passport Guidelines*.

Madaster Foundation. (2023). *Circularity metrics and material passports*. <https://madaster.com>

Mayr, E. (1982). *The growth of biological thought: Diversity, evolution, and inheritance*. Harvard University Press.

McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. North Point Press.

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2019). *Código Técnico de la Edificación (CTE). Actualización 2019*.

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2023). *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE: Ahorro de Energía*.

<https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>

Ministerio de Vivienda. (2006). *Código Técnico de la Edificación (CTE)*.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2020). *Estrategia Española de Economía Circular 2030*.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2021). *Guía para la aplicación del principio DNSH en proyectos del PRTR*.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2023). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021–2030*.

OECD. (2020). *OECD business and finance outlook 2020: Sustainable and resilient finance*. OECD Publishing.

One Click LCA. (2021). *Embodied carbon benchmarks for European buildings*.

<https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360015340058>

One Click LCA. (2025). *Carbon Heroes Benchmarks—Embodied carbon (A1–C) benchmarks y*

metodología. <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/14100506813969>

Österreichisches Institut für Bautechnik. (2023). *OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und*

Wärmeschutz (OIB-Richtlinien 2023). [https://www.oib.or.at/kernaufgaben/oib-](https://www.oib.or.at/kernaufgaben/oib-richtlinien/richtlinien/oib-richtlinien-2023/)

[richtlinien/richtlinien/oib-richtlinien-2023/](https://www.oib.or.at/kernaufgaben/oib-richtlinien/richtlinien/oib-richtlinien-2023/)

Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB). (2023). *OIB Guideline 6: Energy-saving and heat*

protection (Edition 2023). [https://www.oib.or.at/en/oib-guidelines/guideline-6-energy-](https://www.oib.or.at/en/oib-guidelines/guideline-6-energy-saving-and-heat-protection)

[saving-and-heat-protection](https://www.oib.or.at/en/oib-guidelines/guideline-6-energy-saving-and-heat-protection)

Passer, A., Lasvaux, S., Allacker, K., De Lathauwer, D., Spirinckx, C., Wittstock, B., & Wall, J. (2015).

Environmental product declarations entering the building sector: Critical reflections based

on 5 to 10 years' experience in different European countries. *International Journal of Life*

Cycle Assessment, 20(9), 1199-1212. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0926-3>

Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC). (2021). *PEFC Sustainable Forest*

Management Standard. <https://www.pefc.org>

Shadram, F., & Mukkavaara, J. (2018). An integrated BIM-based framework for minimizing embodied

energy during building design. *Energy and Buildings*, 158, 1189-1205.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.051>

Won, J., & Cheng, J. C. P. (2017). Identifying potential opportunities of building information modeling

for construction and demolition waste management and minimization. *Automation in*

Construction, 79, 3-18. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.002>

World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth edition*

incorporating the first addendum. World Health Organization.

Anexos

Anexo 1. Índice de Tablas y Figuras

Figura 1. Sección planta baja (Revit).....	38
Figura 2. Sección planta primera (Revit).....	39
Figura 3. Vivienda y parcela en pendiente (vista 3D, Revit).....	40
Figura 4. Superestructura exportada a IFC (Madaster / One Click LCA).....	41
Figura 5. Envoltente térmica: cerramientos y huecos (Revit).....	42
Figura 6. Sección 3D: forjado ventilado (base U; HULC/GEQ).....	42
Figura 7. Detalle constructivo: cálculo de U (Revit).....	43
Figura 8. Detalle constructivo: cálculo de U (Revit).....	43
Figura 9. Detalle constructivo: cálculo de U (Revit).....	44
Figura 10. Detalle constructivo: cálculo de U (Revit).....	44
Figura 11. Tabla de U-valores calculados (Revit).....	45
Figura 12. Tabla de U-valores calculados (Revit).....	46
Figura 13. Masa total del edificio por familias (Madaster).....	54
Figura 14. Masa por capas constructivas (shearing layers, Madaster).....	55
Figura 15. Masa por familias: % y toneladas (Madaster).....	56
Figura 16. Circularidad global (MCI, Madaster).....	58
Figura 17. Circularidad (MCI) sin EN 15804+A2 (Madaster).....	64
Figura 18. Comparativa de vinculaciones según normativa (Madaster).....	64
Figura 19. Valor residual de materiales (Madaster).....	67
Figura 20. Austria — Carbon Heroes Benchmark (One Click LCA).....	75
Figura 21. Austria — GWP A1–A3 por grandes elementos (One Click LCA).....	76
Figura 22. Austria — GWP absoluto por fases A1–C (One Click LCA).....	77
Figura 23. Austria — GWP porcentual por fases A1–C (One Click LCA).....	77
Figura 24. Austria — GWP A1–A3 por elementos constructivos (One Click LCA).....	78
Figura 25. Austria — GWP A1–A3 por elementos (valores numéricos) (One Click LCA).....	78
Figura 26. Austria — Impactos por fase e indicador ambiental (EN 15804+A2).....	79
Figura 27. Madrid — Carbon Heroes Benchmark (One Click LCA).....	83
Figura 28. Madrid — GWP A1–A3 por elemento (One Click LCA).....	83
Figura 29. Madrid — GWP total A1–C por fases (One Click LCA).....	84
Figura 30. Madrid — GWP porcentual por fases A1–C (One Click LCA).....	85
Figura 31. Madrid — GWP A1–A3 por elementos (One Click LCA).....	85
Figura 32. Madrid — GWP A1–C por elementos (incl. B6/B7) (One Click LCA).....	86
Figura 33. Madrid — Impactos por fase en categorías ambientales (EN 15804+A2).....	86
Figura 34. Austria — Forjado planta baja (1.3.1): GWP por fases A1–C.....	90
Figura 35. Austria — Muros + huecos + escaleras: GWP por fases A1–C.....	91
Figura 36. Austria — Revestimientos de suelos (2.1.5): GWP por fases A1–C.....	92
Figura 37. Madrid — Forjado planta baja (1.3.1): GWP por fases A1–C.....	93
Figura 38. Madrid — Muros + huecos + escaleras: GWP por fases A1–C.....	94
Figura 39. Madrid — Revestimientos de suelos (2.1.5): GWP por fases A1–C.....	95

Anexo 2. Documentación del Caso de Estudio

2.1. Pasaportes de Materiales y Evaluaciones de Ciclo de Vida

2.1.2 Extracto del Pasaporte de Materiales – Madaster

Capturas representativas del pasaporte digital de materiales generado mediante la plataforma Madaster. Se incluyen indicadores de circularidad (MCI), masa de materiales por categoría y valor residual estimado.



Materialpass TFM_Vivienda unifamiliar_Pasaporte de Materiales/Construcción Circular

Masse

Die Gesamtmasse und die Materialintensität (Masse/m²) geben eine Übersicht, welche und wie viele Materialien in dem betrachteten Objekt verbaut sind. Das Ziel ist eine bewusste und effektive Ressourcennutzung.

Gesamtmasse

1,01 t

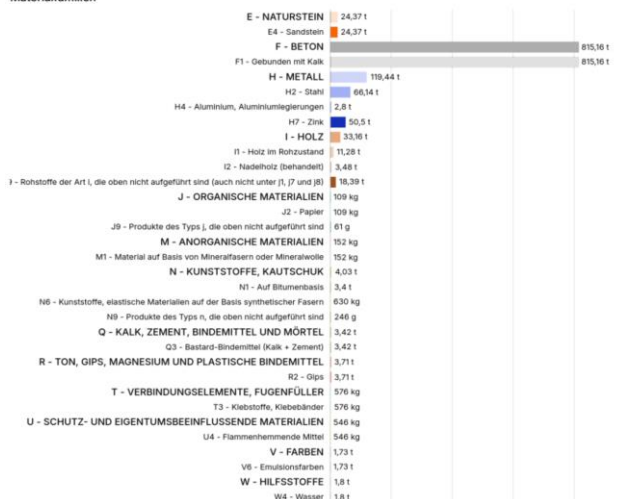
Materialintensität

3,18 t/m²

Baumaterialien

Das Objekt besteht aus Materialien, gruppiert in die folgenden Materialfamilien.

Materialfamilien



Materialpass
TFM_Vivienda unifamiliar_Pasaporte de Materiales/Construcción Circular

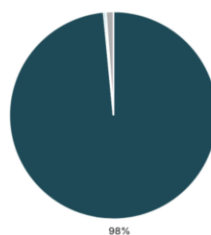
Masse nach Gebäudeschichten

Gebäudeschichten

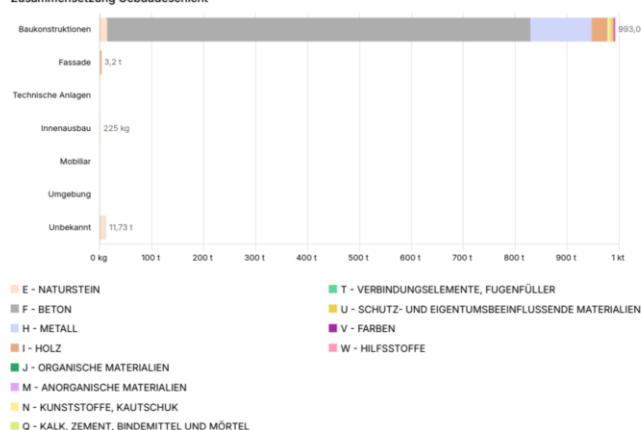
Madaster verwendet das "Shearing Layers"-Modell (Duffy, Brand, 1994), um ein Objekt in 6 Schichten zu unterteilen: Umgebung, Baukonstruktion, Gebäudehülle, Technische Anlagen, Innenausbau und Mobiliar.

Materialfamilien

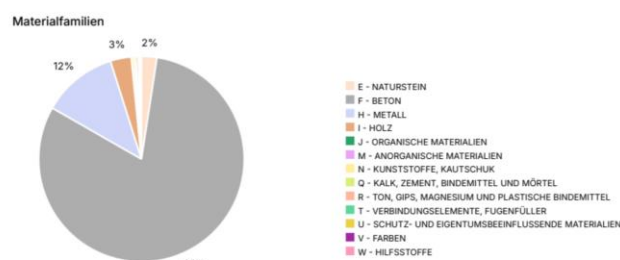
Die 406 einzigartigen Materialien, aus denen das Objekt besteht, wurden in 34 Materialfamilien gruppiert.



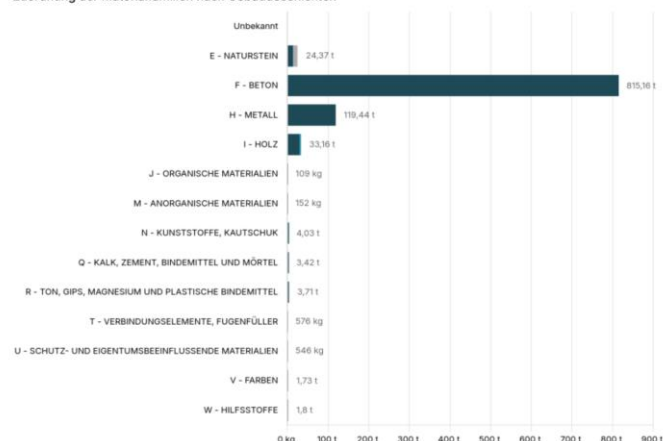
Zusammensetzung Gebäudeschicht



Masse nach Materialfamilien



Zuordnung der Materialfamilien nach Gebäudeschichten



Materialpass
TFM_Vivienda unifamiliar_Pasaporte de Materiales/Construcción Circular

Details zur Masse

Materialfamilie	Summe	Baukonstruktionen Fassade	Technische Anlagen	Innenbau Mobiliar	Umgebung	Unbekannt
Unbekannt	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
E - NATURSTEIN	2,4 % 24,37 t	1,4 % 13,7 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	1,1 % 10,67 t
E4 - Sandstein	2,4 % 24,37 t	1,4 % 13,7 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	1,1 % 10,67 t
F - BETON	80,9 % 815,16 t	80,9 % 815,16 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
F1 - Gebunden mit Kalk	80,9 % 815,16 t	80,9 % 815,16 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
H - METALL	11,8 % 119,44 t	11,7 % 118,39 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0,1 % 1,06 t
H2 - Stahl	6,6 % 66,14 t	6,6 % 66,14 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
H4 - Aluminium, Aluminiumlegierungen	0,3 % 2,8 t	0,2 % 1,75 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0,1 % 1,06 t
H7 - Zink	5 % 50,5 t	5 % 50,5 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
I - HOLZ	3,3 % 33,16 t	3 % 29,95 t	0,3 % 3,2 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
I1 - Holz im Rohzustand	1,1 % 11,28 t	0,8 % 8,07 t	0,3 % 3,2 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
I2 - Nadelholz (behandelt)	0,3 % 3,48 t	0,3 % 3,48 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
I9 - Rohstoffe der Art i, die oben nicht aufgeführt sind (auch nicht unter j, j7 und j8)	1,8 % 18,39 t	1,8 % 18,39 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
J - ORGANISCHE MATERIALIEN	0 % 109 kg	0 % 109 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
J2 - Papier	0 % 109 kg	0 % 109 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
J9 - Produkte des Typs j, die oben nicht aufgeführt sind	0 % 61 g	0 % 61 g	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
M - ANORGANISCHE MATERIALIEN	0 % 152 kg	0 % 152 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
M1 - Material auf Basis von Mineralfasern oder Mineralwolle	0 % 152 kg	0 % 152 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
N - KUNSTSTOFFE, KAUSCHUK	0,4 % 4,03 t	0,4 % 3,8 t	0 % 0 kg	0 % 225 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
N1 - Auf Bitumenbasis	0,3 % 3,4 t	0,3 % 3,4 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
N6 - Kunststoffe, elastische Materialien auf der Basis synthetischer Fasern	0,1 % 630 kg	0 % 406 kg	0 % 0 kg	0 % 225 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
N9 - Produkte des Typs n, die oben nicht aufgeführt sind	0 % 246 g	0 % 246 g	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
Q - KALK, ZEMENT, BINDEMITTEL UND MÖRTEL	0,3 % 3,42 t	0,3 % 3,42 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg

Materialpass TFM_Vivienda unifamiliar_Pasaporte de Materiales/Construcción Circular								
R2 - Gips	0,4 % 3,71 t	0,4 % 3,71 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
T - VERBINDUNGSELEMENTE, FUGENFÜLLER	0,1 % 576 kg	0,1 % 576 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
T3 - Klebstoffe, Klebebänder	0,1 % 576 kg	0,1 % 576 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
U - SCHUTZ- UND EIGENTUMSBEEINFLUSSENDE MATERIALIEN	0,1 % 546 kg	0,1 % 546 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 231 g	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
U4 - Flammenhemmende Mittel	0,1 % 546 kg	0,1 % 546 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 231 g	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
V - FARBEN	0,2 % 1,73 t	0,2 % 1,73 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
V6 - Emulsionsfarben	0,2 % 1,73 t	0,2 % 1,73 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
W - HILFSSTOFFE	0,2 % 1,8 t	0,2 % 1,8 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg
W4 - Wasser	0,2 % 1,8 t	0,2 % 1,8 t	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg	0 % 0 kg

Madaster Zirkularitätsindikator (MZI)

Zirkularität berücksichtigt den Anteil der beim Bau verwendeten Sekundärrohstoffe sowie das Potenzial aller verwendeten Rohstoffe für die Wiederverwendung oder das Recycling am Ende der Nutzungsdauer.



MZI Berechnungskomponenten



MZI nach Gebäudeschicht

	Unbekannt	Baukonstruktionen Fassade	Technische Anlagen	Innenausbau	Möbiliar	Umgebung
Madaster Zirkularitätsindikator (MZI)	69%	79%	2%	5%		
ZI Gebäude Score	79%	84%	48%	37%		
Punktzahlen nach Gebäudeschichten						
Materialherkunft Sekundärrohstoffe (Ziel: 100 %)	76%	74%	85%	59%	-	-
Materialverwertung (Ziel: Ausschließlich Recycling = 100%)	77%	89%	0%	0%	-	-

Materialherkunft

	Unbekannt	Baukonstruktionen Fassade	Technische Anlagen	Innenausbau	Möbiliar	Umgebung
Sekundärrohstoffe (Ziel: 100 %)	76% 8,96 t	74% 738,29 t	85% 2,72 t	59% 133 kg	-	-
Masse des Produkts (t)	11,73 t	993,06 t	3,2 t	225 kg	0 kg	0 kg
Zusammensetzung der Masse						
Eingesetzte recycelte Materialien (% der Masse)	4% 422 kg	1% 7,84 t	0% 0 kg	33% 75 kg	-	-
Eingesetzte nachwachsende, nachhaltig produzierte Materialien (% der Masse)	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Eingesetzte wiederverwendete Komponenten (% der Masse)	73% 8,54 t	74% 730,45 t	85% 2,72 t	26% 58 kg	-	-
Recycling						
% Effizienz des Recyclingprozesses der Primärrohstoffe	100%	100%	0%	100%	-	-
Abfallmasse, die beim Recycling entsteht (t)	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg	-	-

Materialverwertung

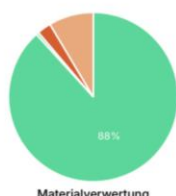
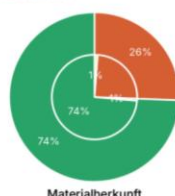
	Unbekannt	Baukonstruktionen Fassade	Technische Anlagen	Innenausbau	Möbiliar	Umgebung
(Ziel: Ausschließlich Recycling = 100%)	77%	89%	0%	0%	-	-
Masse des Produkts (t)	11,73 t	993,06 t	3,2 t	225 kg	0 kg	0 kg
Zusammensetzung der Masse						
Komponenten, die zum Recycling gesammelt werden (% der Masse)	77% 9,02 t	89% 886,38 t	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Komponenten, die zur Wiederverwendung gesammelt werden (% der Masse)	0% 0,02 t	0% 886,38 t	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Masse an potenzieller Deponierung & Energieverbrennung (t)	2,71 t	106,68 t	3,2 t	225 kg	-	-
Recycling						
Effizienz des Recyclingprozesses für die End-of-Life-Phase (%)	100%	100%	0%	100%	-	-
Masse der potenziellen Deponie- und Energieverbrennung des Recyclingprozesses (t)	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg	-	-



Materialpass
TFM_Vivienda unifamiliar_Pasaporte de Materiales/Construcción Circular

Herkunft und Verwertung von Materialien

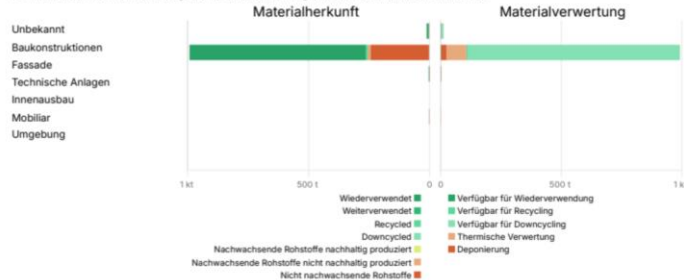
Materialströme



Primärrohstoffe	258,11 t	25,6 %	Abfall	112,82 t	11,2 %
Nachwachsende Rohstoffe:	12,26 t	1,2 %	Deponierung:	26,56 t	2,6 %
Nachwachsende Rohstoffe nachhaltig produziert:	0 kg	0 %	Thermische Verwertung:	86,26 t	8,6 %
Nicht nachwachsende Rohstoffe:	245,85 t	24,4 %	Nachnutzung	889,93 t	88,8 %
Sekundärrohstoff	750,1 t	74,4 %	Verfügbar für Wiederverwendung:	0 kg	0 %
Wiederverwendet:	741,77 t	73,6 %	Verfügbar für Recycling:	889,93 t	88,3 %
Weiterverwendet:	0 kg	0 %	Verfügbar für Downcycling:	5,47 t	0,5 %
Recycled:	8,34 t	0,8 %			
Downcycled:	0 kg	0 %			

Materialströme nach Gebäudeschichten

Die Ansicht der Materialströme zeigt die Materialbeschaffung und das Potenzial nach Lebensende.





Materialpass
TFM_Vivienda unifamiliar_Pasaporte de Materiales/Construcción Circular

Materialherkunft

	Unbekannt	Baukonstruktionen Fassade	Technische Anlagen	Innenausbau	Möbiliar	Umgebung
Masse des Produkts (t)	11,73 t	993,06 t	3,2 t	0 kg	225 kg	0 kg
Zusammensetzung der Masse						
Primärrohstoffe	24% 2,77 t	26% 254,77 t	15% 481 kg	41% 92 kg	-	-
Nicht nachwachsende Rohstoffe	24% 2,77 t	24% 242,99 t	0% 481 g	41% 92 kg	-	-
Nachwachsende Rohstoffe	0% 0 kg	1% 11,78 t	15% 480 kg	0% 0 kg	-	-
Nachwachsende Rohstoffe nachhaltig produziert	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Sekundärrohstoff	76% 8,96 t	74% 738,29 t	85% 2,72 t	59% 133 kg	-	-
Downcycled	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Recycled	4% 422 kg	1% 7,84 t	0% 0 kg	33% 75 kg	-	-
Weiterverwendet	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Wiederverwendet	73% 8,54 t	74% 730,45 t	85% 2,72 t	26% 58 kg	-	-
Knappheit						
Physisch	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Sozioökonomisch	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-

Materialverwertung

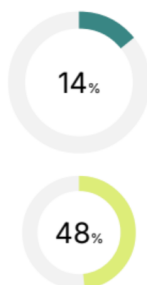
	Unbekannt	Baukonstruktionen Fassade	Technische Anlagen	Innenausbau	Möbiliar	Umgebung
Masse des Produkts (t)	11,73 t	993,06 t	3,2 t	0 kg	225 kg	0 kg
Zusammensetzung der Masse						
Verfügbar für Wiederverwendung	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Verfügbar für Recycling	77% 9,02 t	89% 880,91 t	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Verfügbar für Downcycling	0% 0 kg	1% 5,47 t	0% 0 kg	0% 0 kg	-	-
Thermische Verwertung	0% 2,71 t	8% 23,85 t	100% 0 kg	100% 0 kg	-	-
Deponierung	23% 0 kg	2% 82,83 t	0% 3,2 t	0% 225 kg	-	-



Materialpass
TFM_Vivienda unifamiliar_Pasaporte de Materiales/Construcción Circular

Demontierbarkeit

Die Demontierbarkeit gibt an, inwieweit Materialien und Produkte getrennt werden können, ohne beschädigt zu werden.



Demontierbarkeitsindex

Der Demontierbarkeitsindex wird nach der vom Dutch Green Building Council beschriebenen Methodik berechnet. Die Berechnung erfolgt für alle Elemente, die mit Produkten verknüpft sind, für die vollständige Informationen zur Demontierbarkeit vorliegen. Jedes Produkt wird anhand der Verbindungsart, der Zugänglichkeit der Verbindung, der Kreuzungen und der Produktanten bewertet. Die Masse der betreffenden Elemente wird als Gewichtungsfaktor verwendet.

Indexqualität

Die Indexqualität gibt die Anzahl der Elemente an, bei denen die Informationen zur Demontierbarkeit vorliegen, im Verhältnis zur Gesamtzahl der Elemente des Objekts (in den betreffenden Gebäudeschichten).

Demontierbarkeit

	Baukonstruktionen Fassade	Technische Anlagen	Innenausbau	Möbiliar	Umgebung
Demontierbarkeitsindex	14%	94%	0%	0%	0%
Indexqualität	54%	4%	-%	0%	-%



Materialpass
TFM_Vivienda unifamiliar_Pasaporte de Materiales/Construcción Circular

Rohstoff-Restwert

Der Rohstoff-Restwert misst den zukünftigen Geldwert der Materialien unter Berücksichtigung der Kosten für Rückbau, Transport und Aufarbeitung.

Diskontierter Kapitalwert des Rohstoff-Restwerts

69.566 €

219 €/m²

Aktueller Rohstoff-Restwert

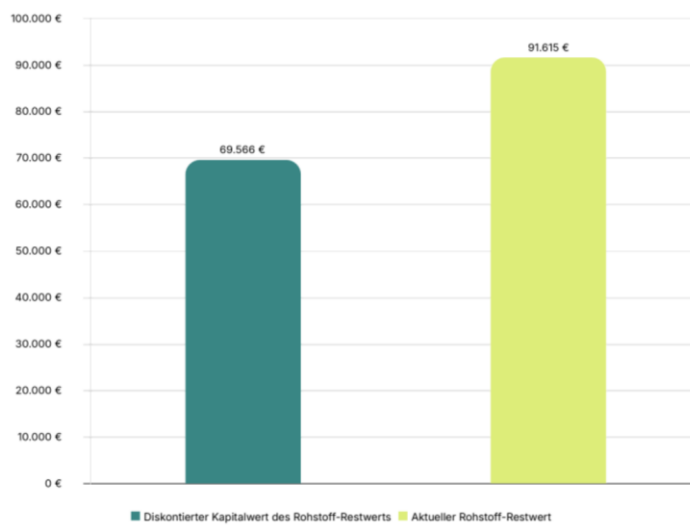
91.615 €

289 €/m²

Madaster-Finanzmodul

Das Madaster Finanzmodul wurde entwickelt, um den Rohstoff-Restwert von Objekten zu kalkulieren. Es visualisiert den Wert der Materialien und Produkte zum Zeitpunkt des Baus und am Ende der Lebensdauer des Objekts.

Rohstoff-Restwert

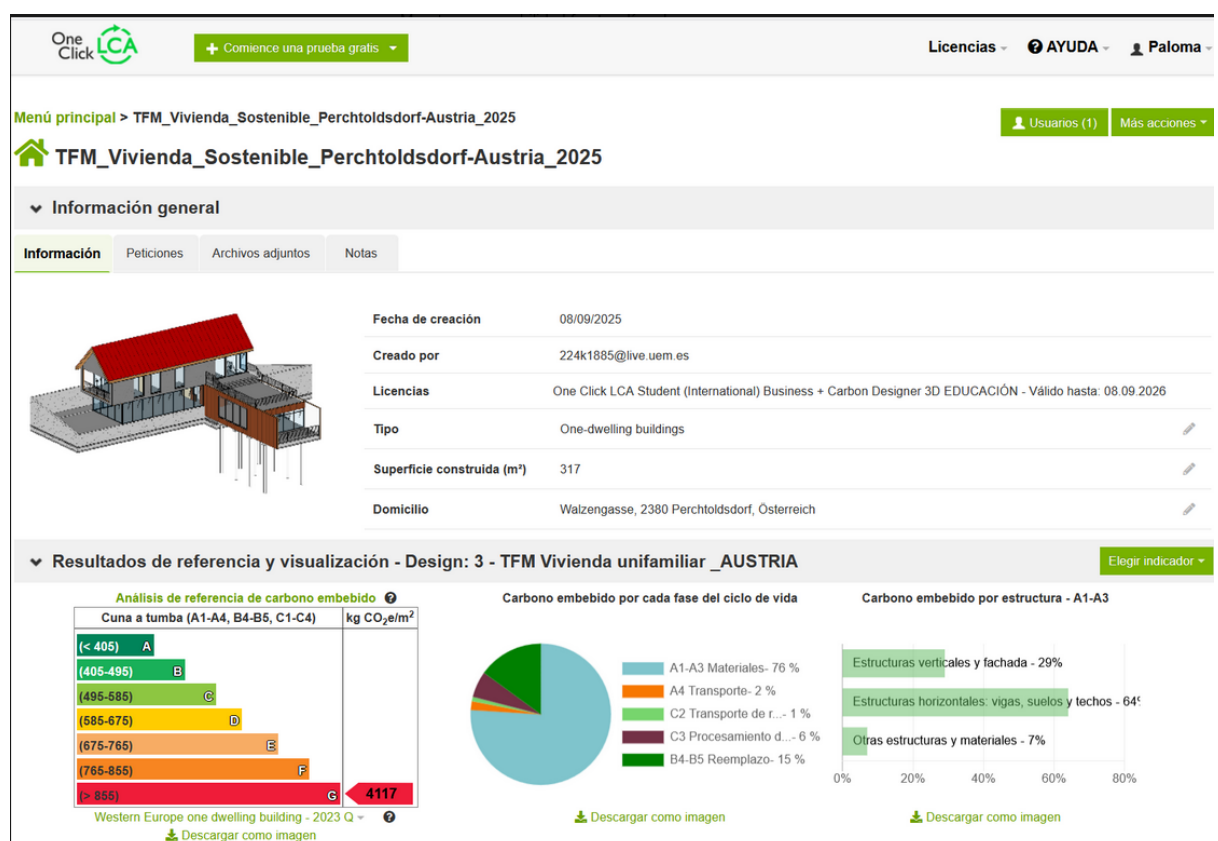


2.1.3 Extracto del Informe de ACV – One Click LCA

Resultados principales de la evaluación de ciclo de vida (ACV) conforme a EN 15978, con desglose por módulos (A1–C, D), huella de carbono en kg CO₂e/m² y *hotspots* materiales.

























2.1.3.1 Extracto para el escenario austriaco (Perchtoldsdorf)

Extracto del informe completo de ACV generado con One Click LCA (21 págs., adjunto en anexo digital). Se presentan las visualizaciones principales para Austria: resultados globales A1–C, comparativa Carbon Heroes Benchmark, distribución de impactos por fases, materiales, elementos y categorías ambientales.



Nota aclaratoria sobre la tabla de materiales (Austria):

En los resultados de One Click LCA para Austria, todos los materiales aparecen con valores distintos de cero, lo que refleja la mayor cobertura de EPDs (Declaraciones Ambientales de Producto) disponibles en bases de datos vinculadas al software (IBU, Ökobau.dat, Baubook). Esta diferencia respecto a España no implica que los materiales austriacos tengan necesariamente un mayor nivel de detalle ambiental, sino que la infraestructura de datos está más consolidada y permite un mapeo más completo. Por tanto, la comparación debe interpretarse como evidencia de la desigual madurez de las bases de datos locales y no como un resultado técnico absoluto de mayor precisión del modelo.

▼ Materiales más influyentes (Potencial de calentamiento global fósil)			
No.	Recurso	Impactos de cuna a puerta (A1-A3)	De cuna a puerta (A1-A3)
1.	Hot finished structural hollow sections,  ?	311 toneladas CO ₂ e	31.1 %
2.	Cold-rolled steel wall studs,  ?	188 toneladas CO ₂ e	18.9 %
3.	Ready-mix concrete, C30/37  ?	93 toneladas CO ₂ e	9.3 %
4.	Steel sheet (20µm hot dip galvanized), 7850 kg/m3, EN15804+A2, ref. year 2023  ?	83 toneladas CO ₂ e	8.4 %
5.	Structural fibreglass mesh, with anti-alkal treatment, 4 x 4 mm, 0.150 kg/m2 ?	73 toneladas CO ₂ e	7.3 %
6.	Ready-mix concrete, C30/37 (B30), 2350 kg/m3  ?	67 toneladas CO ₂ e	6.7 %
7.	Aluminium mullion-transom system with triple glazing, 16.5 kg/m2, EN15804+A2, ref. year 2021  ?	15 toneladas CO ₂ e	1.5 %
8.	Wooden door, unglazed, 77 mm, 0.988x2.080 m, 35.46 kg/m2  ?	14 toneladas CO ₂ e	1.4 %
9.	Ready-mix concrete, C50/60 (B50/60) XC4 X0 XS4 DC-4m, 2400 kg/m3  ?	13 toneladas CO ₂ e	1.3 %
10.	Reinforced polyamide vapour barrier sheet with non-woven polypropylene fabric, 0.22 mm, 80.6 g/m2  ?	13 toneladas CO ₂ e	1.3 %
11.	Cement bound particle board, L = 0.35-0.4 W/mK, 1200 kg/m3, EN15804+A2, ref. year 2021  ?	12 toneladas CO ₂ e	1.2 %
12.	Mineral wool pipe jacket, 151 kg/m3, EN15804+A2, ref. year 2023  ?	10 toneladas CO ₂ e	1.0 %
13.	Ready mix concrete,  ?	10 toneladas CO ₂ e	1.0 %
14.	Surface finished stainless steel sheet, 7850 kg/m3  ?	9.4 toneladas CO ₂ e	0.9 %
15.	Hot rolled tube section, 0.5-5 mm, 7850 kg/m3  ?	7.3 toneladas CO ₂ e	0.7 %
16.	Ready-mix concrete, C20/25 X0, 2367 kg/m3  ?	6.6 toneladas CO ₂ e	0.7 %
17.	Polyethylene vapour barrier membrane, 0.11 mm, width: 2000-6000 mm, length: 25-230 m, 0.102531 kg/m2  ?	6.3 toneladas CO ₂ e	0.6 %
18.	PVC and steel sandwich roof panel with foam core, 100 mm, 11.4 kg/m2  ?	5.4 toneladas CO ₂ e	0.5 %
19.	Roof cladding from painted aluminium, 0.7 mm, 2.70 kg/m2  ?	5.2 toneladas CO ₂ e	0.5 %
20.	Ready-mix concrete C20/25, C20/25, 2360 kg/m3, EN15804+A2, ref. year 2023  ?	5.1 toneladas CO ₂ e	0.5 %
21.	Mixed aluminium/wood framed window, 25 kg/m2, 1.23x1.48 m  ?	4.2 toneladas CO ₂ e	0.4 %
22.	XPS insulation panels, L=0.033 W/mK, R=1.20 m2K/W, 40 mm, 1.2 kg/m2, 30 kg/m3, Lambda=0.033 W/(m.K)  ?	4.1 toneladas CO ₂ e	0.4 %
23.	Prefabricated wooden wall element with mineral wool insulation, 19.6 kg/m2  ?	3.7 toneladas CO ₂ e	0.4 %
24.	Ready-mix concrete, C20/25  ?	3.1 toneladas CO ₂ e	0.3 %
25.	Ready-mix concrete, C40/45, 40 MPa, 2367 kg/m3  ?	2.5 toneladas CO ₂ e	0.3 %

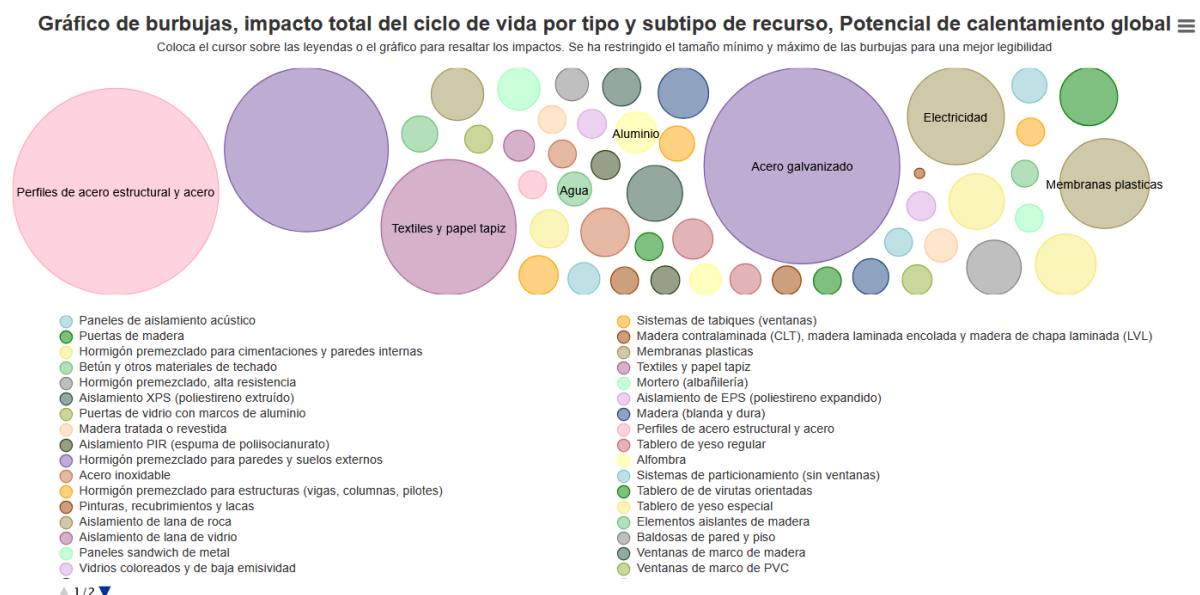
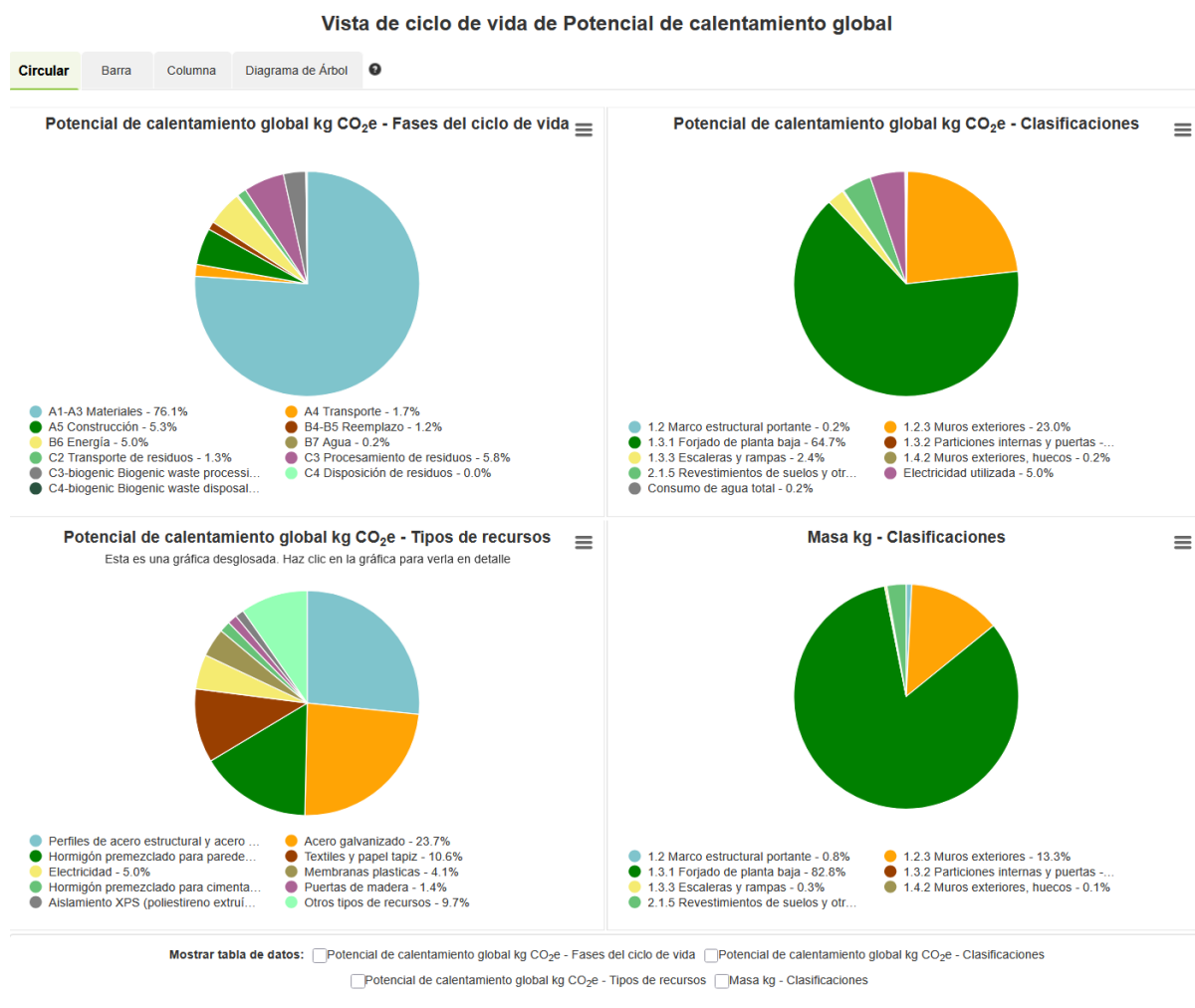
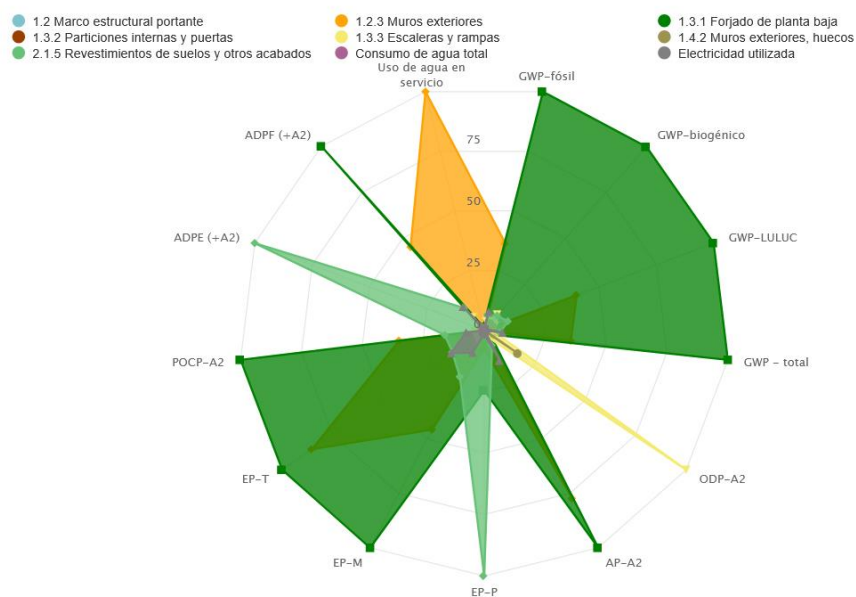


Gráfico de araña agrupado por Partes del edificio desglose de elementos



Impactos del ciclo de vida por fase como columnas apladas

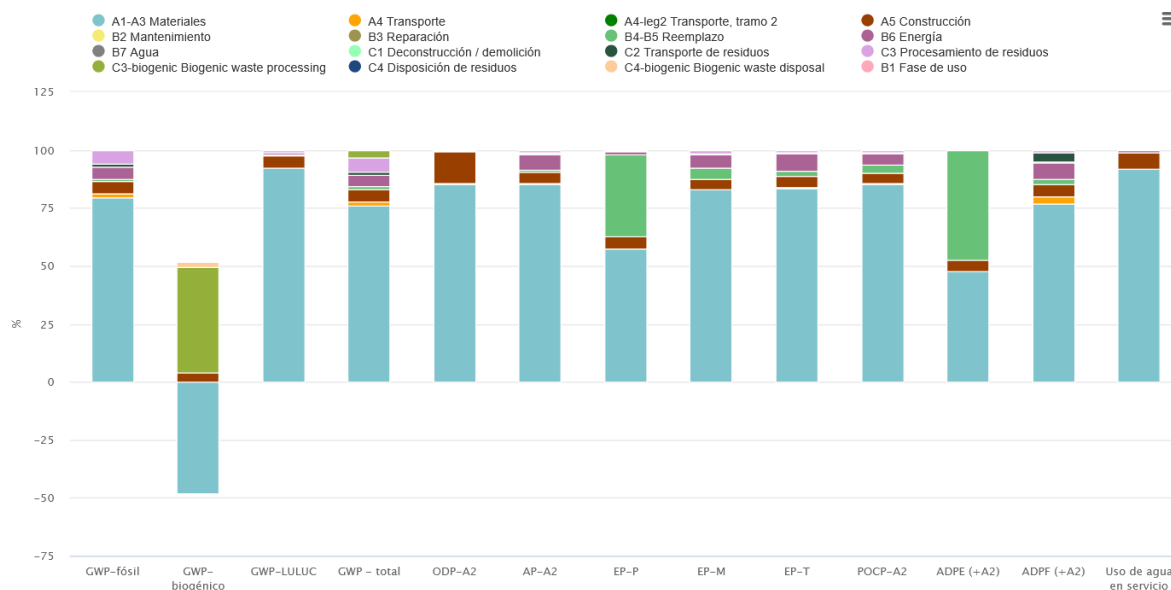
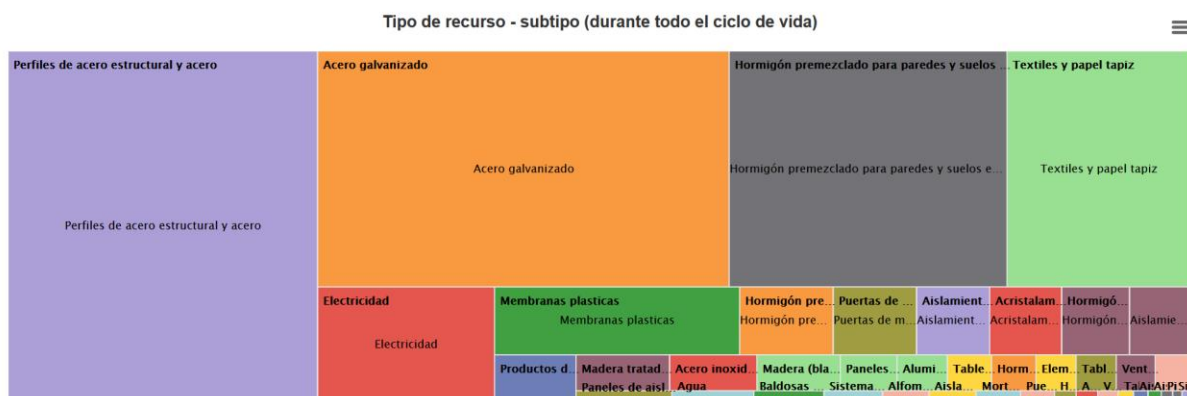
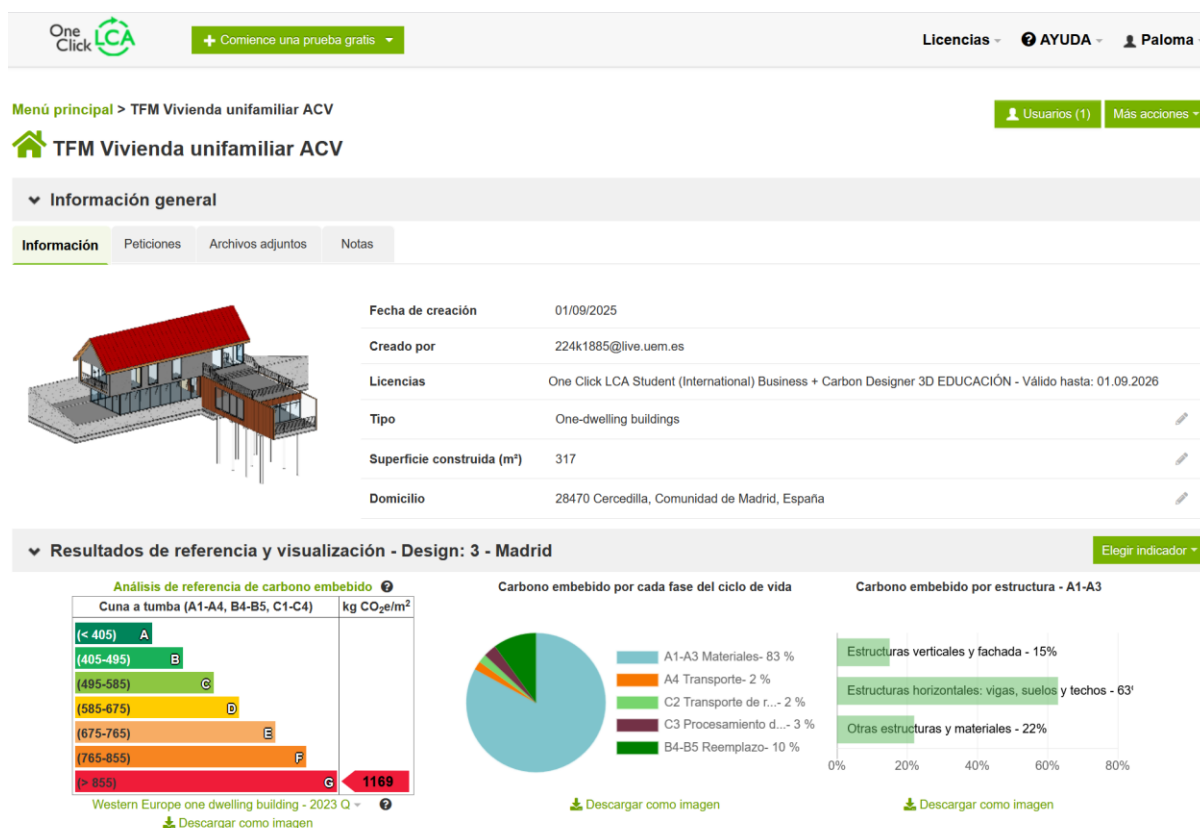


Diagrama de Árbol , Potencial de calentamiento global














2.1.3.2 Extracto para el escenario español (Madrid)

Extracto del informe completo de ACV generado con One Click LCA (21 págs., adjunto en anexo digital). Se presentan las visualizaciones principales para Madrid/España: resultados globales A1–C, comparativa Carbon Heroes Benchmark, distribución de impactos por fases, materiales, elementos y categorías ambientales.



Nota aclaratoria sobre la tabla de materiales (España):

En los resultados de One Click LCA para España, a partir de la fila 11 algunos materiales aparecen con impacto “0” en el potencial de calentamiento global. Esto no significa ausencia real de emisiones, sino que refleja una limitación de la herramienta en su versión estudiante: cuando no existe una EPD específica disponible o el mapeo automático no reconoce el material en la base de datos, el software asigna un valor nulo en lugar de una estimación genérica. Por tanto, estos valores deben interpretarse como “sin datos” y no como “impacto cero”. Esta situación se explica y discute en el apartado de Limitaciones (7.6), en relación con la disponibilidad desigual de EPDs locales y genéricas en Austria y España.

▼ Materiales más influyentes (Potencial de calentamiento global fósil)			
No.	Recurso	Impactos de cuna a puerta (A1-A3)	De cuna a puerta (A1-A3)
1.	Steel heavy plates, 5-120 mm, 7850 kg/m ³  ?	41 toneladas CO ₂ e	41.9 %
2.	Aluminium frame window, coated, 40.45 kg/m ²  ?	30 toneladas CO ₂ e	30.1 %
3.	Metal framing components for gypsum plasterboard walls,  ?	8,6 toneladas CO ₂ e	8.7 %
4.	Clear float glass, toughened and/or laminated, thickness range 2-19 mm, 1 mm, 2.5 kg/m ²  ?	6,8 toneladas CO ₂ e	6.8 %
5.	Clear float glass, 15 mm, 37.5 kg/m ² , LT 87.4%, RLE 7.9%, SF 0.78  ?	5,6 toneladas CO ₂ e	5.7 %
6.	Hot-dip galvanized steel coils, 1.5 mm, 0.31 kg/m ² coating  ?	2,5 toneladas CO ₂ e	2.5 %
7.	Magnesium coated metal sheet for roof, 0.42 mm, 3.64 kg/m ²  ?	2,4 toneladas CO ₂ e	2.4 %
8.	Aluminium frame glass door, coated, 40.12 kg/m ²  ?	0,97 toneladas CO ₂ e	1.0 %
9.	Aluminium frame glass sliding door, single glazed, HxW=2180x1230 mm, 12 mm glass, 41.5 kg/m ²  ?	0,53 toneladas CO ₂ e	0.5 %
10.	Structural steel hot-rolled coils, 1.5-25.4 mm, width = 45-2150 mm  ?	0,39 toneladas CO ₂ e	0.4 %
11.	Flat sponge underlays, Thickness: 8.25 -11.4 mm, 3.8 – 3.9 kg/m ²  ?	48 kg CO ₂ e	0.0 %
12.	Gypsum board, fire resistant, 15 mm, 12 kg/m ² , 800 kg/m ³ ?	kg CO ₂ e	0.0 %
13.	Screed mortars, 6-30 mm, 1.7 kg/m ² , 1600 kg/m ³ ?	kg CO ₂ e	0.0 %
14.	Ready-mix concrete, Spanish average, 25 Mpa ?	kg CO ₂ e	0.0 %
15.	PUR insulation, L=0.025 W/mK, R=1.6 m ² K/W, 40 mm, 1.6 kg/m ² , 40 kg/m ³ ?	kg CO ₂ e	0.0 %
16.	PVC waterproofing membrane, 2 mm, 2.74 kg/m ² ?	kg CO ₂ e	0.0 %
17.	High density bituminous sheet, with acoustic insulation properties, 2 mm, 3.24 kg/m ² , sound reduction: 2 dB ?	kg CO ₂ e	0.0 %
18.	Regular gypsum board, 15 mm, 10.6 kg/m ² , 706.66 kg/m ³ ?	kg CO ₂ e	0.0 %
19.	XPS insulation panels, 60 mm, L = 0.030 W/mK, R = 1.80 m ² K/W, 20-160 mm, 30-40 kg/m ³ , Lambda=0.03 W/(m.K) ?	kg CO ₂ e	0.0 %
20.	EPS insulation, L = 0.033 W/mK, 33 mm, 0.990 kg/m ² , 30 kg/m ³ , Lambda=0.033 W/(m.K) ?	kg CO ₂ e	0.0 %
21.	Wood floor covering, 22 mm, 11.40 kg/m ² ?	kg CO ₂ e	0.0 %
22.	Fibre cement façade cladding panels for external use, 3600 x 180 x 8 mm, 11.2 kg/m ² , 1300 kg/m ³ , Fire resistance class = A2, s1-d0 ?	kg CO ₂ e	0.0 %
23.	Resin bonded cotton fiber thermal and acoustic insulation, fire resistant, L = 0.033 W/mK, R = 1.56 m ² K/W, 50 mm, 2 kg/m ² , 40 kg/m ³ , Lambda=0.033 W/(m.K) ?	kg CO ₂ e	0.0 %
24.	Gypsum board, fire resistant, 25 mm, 20.5 kg/m ² , 820 kg/m ³ ?	kg CO ₂ e	0.0 %
25.	Ready-mix concrete, Spanish average, 30 Mpa ?	kg CO ₂ e	0.0 %

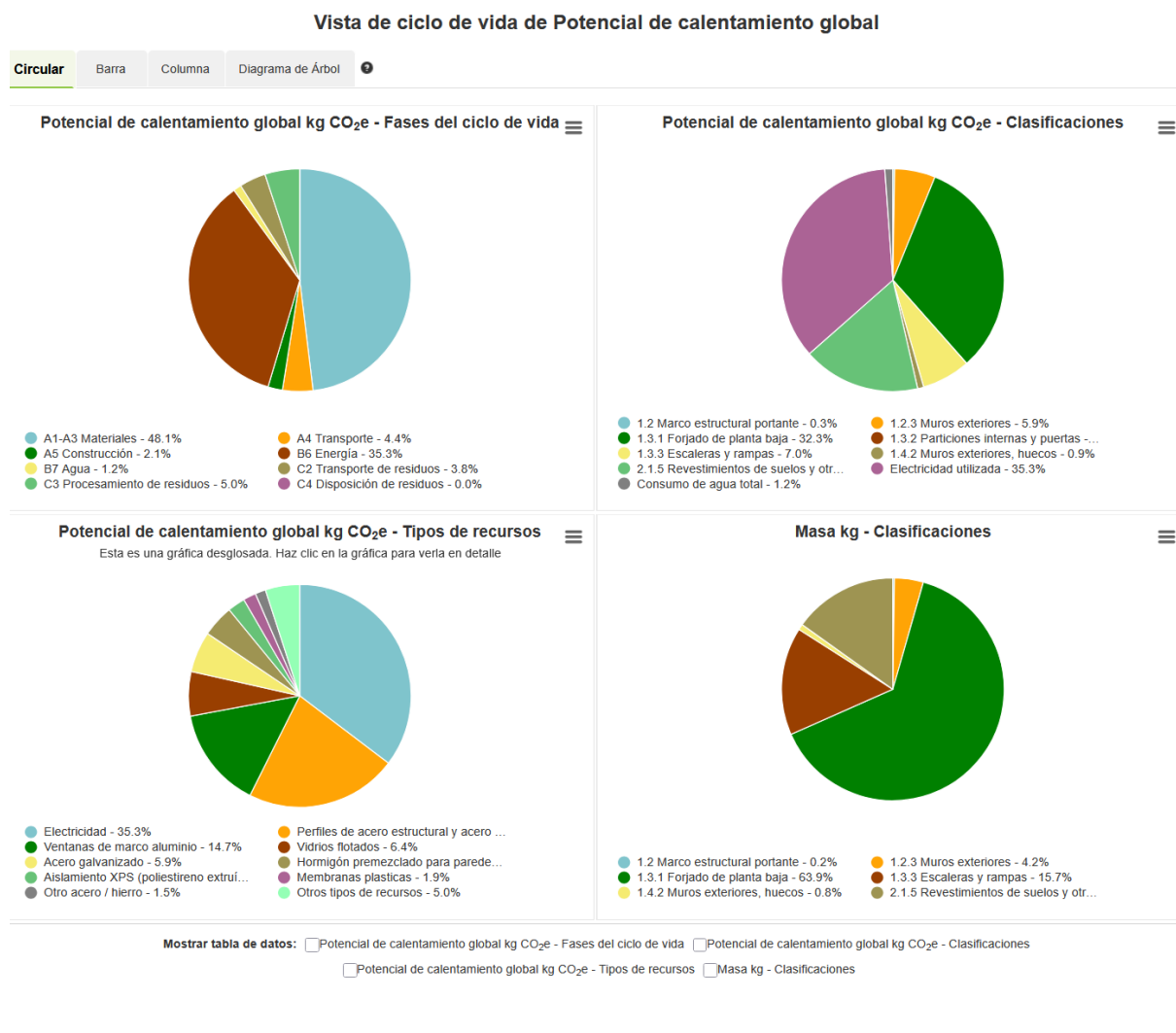


Gráfico de burbujas, impacto total del ciclo de vida por tipo y subtipo de recurso, Potencial de calentamiento global

Coloca el cursor sobre las leyendas o el gráfico para resaltar los impactos. Se ha restringido el tamaño mínimo y máximo de las burbujas para una mejor legibilidad

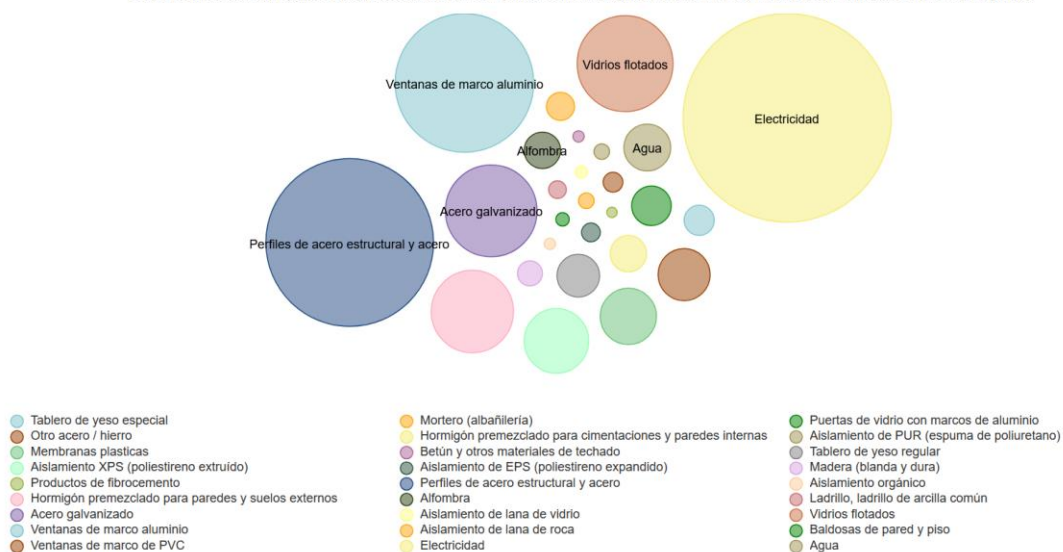
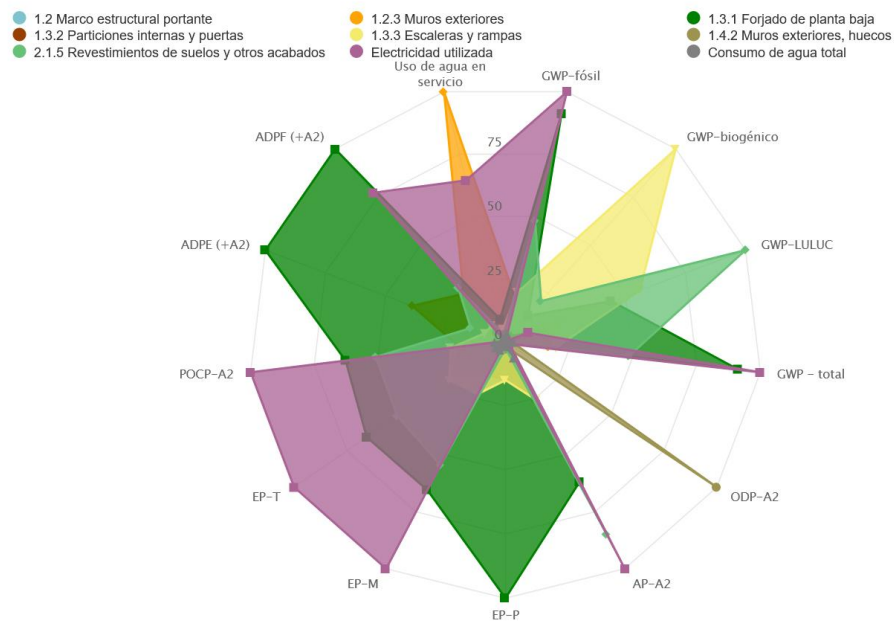


Gráfico de araña agrupado por Partes del edificio desglose de elementos



Impactos del ciclo de vida por fase como columnas apiladas

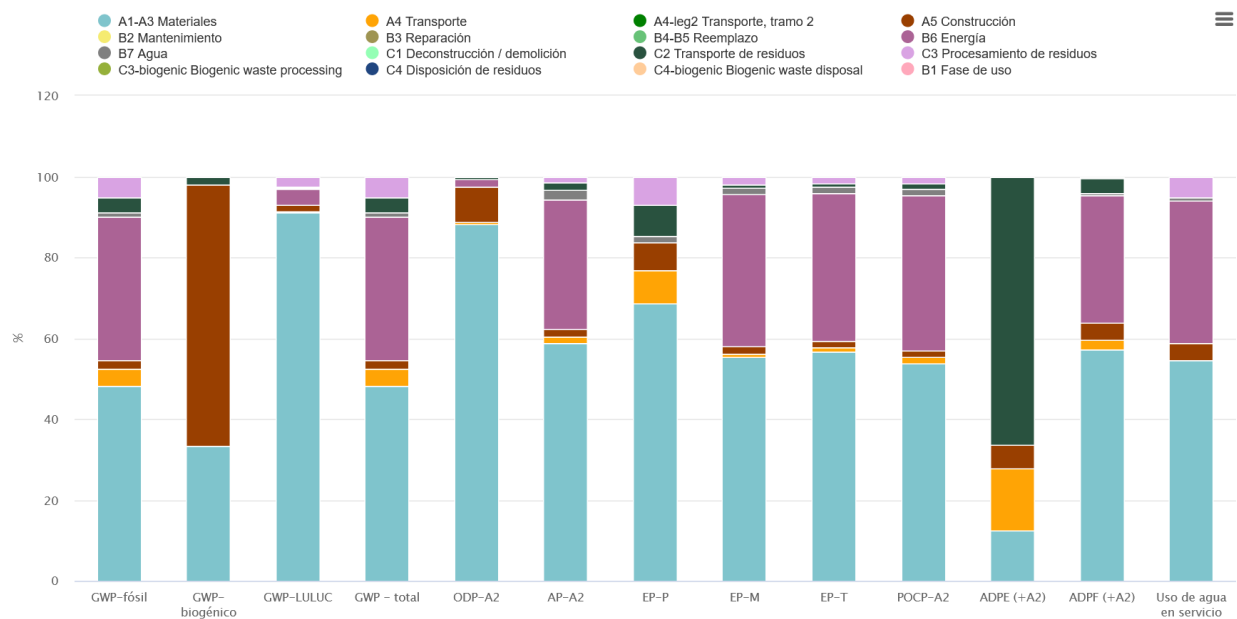
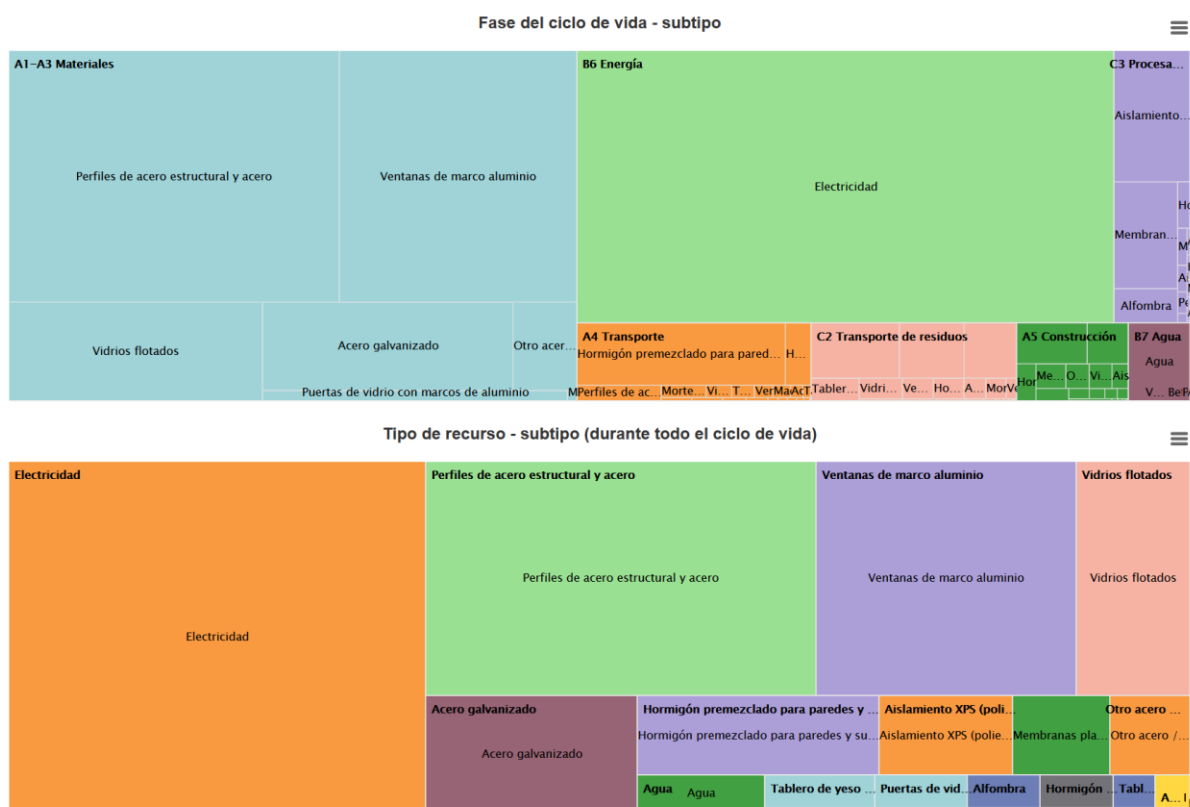


Diagrama de Árbol , Potencial de calentamiento global



2.2. Certificaciones Energéticas Comparativas

2.2.1. Energieausweis austriaco (Perchtoldsdorf)

Extracto del certificado energético oficial conforme a OIB-Richtlinie 6, obtenido mediante la herramienta GEQ. Se incluyen indicadores de demanda energética, $E_{p,tot}$ y verificación nZEB –10 %.



Energieausweis für Wohngebäude

OiB ÖSTERREICHISCHES
INSTITUT FÜR BAUTECHNIK
OIB-Richtlinie 6
Ausgabe: Mai 2023

GEBÄUDEKENNDATEN

Brutto-Grundfläche (BGF)	317,5 m ²	Heiztage	213 d	Art der Lüftung	Fensterlüftung
Bezugsfläche (BF)	254,0 m ²	Heizgradtage	3.732 Kd	Solarthermie	- m ²
Brutto-Volumen (V _B)	958,1 m ³	Klimaregion	N	Photovoltaik	10,0 kWp
Gebäude-Hüllfläche (A)	492,9 m ²	Norm-Außentemperatur	-12,4 °C	Stromspeicher	-
Kompaktheit (A/V)	0,51 1/m	Soll-Innentemperatur	22,0 °C	WW-WB-System (primär)	
charakteristische Länge (l _c)	1,94 m	mittlerer U-Wert	0,28 W/m ² K	WW-WB-System (sekundär, opt.)	
Teil-BGF	- m ²	LEK _T -Wert	21,14	RH-WB-System (primär)	
Teil-BF	- m ²	Bauweise	mittelschwer	RH-WB-System (sekundär, opt.)	
Teil-V _B	- m ³				

EA-Art:

WÄRME- UND ENERGIEBEDARF (Referenzklima)

Nachweis über den Gesamtenergieeffizienz-Faktor

	Ergebnisse		Anforderungen
Referenz-Heizwärmebedarf	HWB _{Ref,RK} = 28,3 kWh/m ² a	entspricht	HWB _{Ref,RK,zul} = 34,2 kWh/m ² a
Endenergiebedarf	EEB _{RK} = 17,6 kWh/m ² a		
Gesamtenergieeffizienz-Faktor	f _{GEE,RK} = 0,61	entspricht	f _{GEE,RK,zul} = 0,75
Erneuerbarer Anteil	alternatives Energiesystem	entspricht	Punkt 5.2.3 a, b oder c
Heizwärmebedarf	HWB _{RK} = 28,3 kWh/m ² a		
Primärenergiebedarf n.em. für RH+WW	PEB _{HEB,n.em.,RK} = 2,9 kWh/m ² a		

WÄRME- UND ENERGIEBEDARF (Standortklima)

Referenz-Heizwärmebedarf	Q _{h,Ref,SK} = 10.780 kWh/a	HWB _{Ref,SK} = 34,0 kWh/m ² a
Heizwärmebedarf	Q _{h,SK} = 10.780 kWh/a	HWB _{SK} = 34,0 kWh/m ² a
Warmwasserwärmebedarf	Q _{tw} = 2.433 kWh/a	WWWB = 7,7 kWh/m ² a
Heizenergiebedarf	Q _{HEB,SK} = 4.776 kWh/a	HEB _{SK} = 15,0 kWh/m ² a
Energieaufwandszahl Warmwasser		e _{AWZ,WW} = 0,58
Energieaufwandszahl Raumheizung		e _{AWZ,RH} = 0,31
Energieaufwandszahl Heizen		e _{AWZ,H} = 0,36
Haushaltsstrombedarf	Q _{HHSB} = 4.410 kWh/a	HHSB = 13,9 kWh/m ² a
Endenergiebedarf	Q _{EEB,SK} = 6.241 kWh/a	EEB _{SK} = 19,7 kWh/m ² a
Primärenergiebedarf	Q _{PEB,SK} = 10.985 kWh/a	PEB _{SK} = 34,6 kWh/m ² a
Primärenergiebedarf nicht erneuerbar	Q _{PEBn.em.,SK} = 4.931 kWh/a	PEB _{n.em.,SK} = 15,5 kWh/m ² a
Primärenergiebedarf erneuerbar	Q _{PEBem.,SK} = 6.054 kWh/a	PEB _{em.,SK} = 19,1 kWh/m ² a
äquivalente Kohlendioxidemissionen	Q _{CO2eq,SK} = 974 kg/a	CO _{2eq,SK} = 3,1 kg/m ² a
Gesamtenergieeffizienz-Faktor		f _{GEE,SK} = 0,62
Photovoltaik-Export	Q _{PVE,SK} = 5.145 kWh/a	PVE _{EXPORT,SK} = 16,2 kWh/m ² a

ERSTELLT

GWR-Zahl		ErstellerIn	Masterarbeit Umwelt- und Energiemanagement Walzengasse, 2380 Perchtoldsdorf,
Ausstellungsdatum	30.08.2025	Unterschrift	
Gültigkeitsdatum	29.08.2035		
Geschäftszahl			

Die Energiekennzahlen dieses Energieausweises dienen ausschließlich der Information. Aufgrund der idealisierten Eingangsparameter können bei tatsächlicher Nutzung erhebliche Abweichungen auftreten. Insbesondere Nutzungseinheiten unterschiedlicher Lage können aus Gründen der Geometrie und der Lage hinsichtlich ihrer Energiekennzahlen von den hier angegebenen abweichen.

Nicht für kommerzielle Zwecke

GEQ von Zehentmayer Software GmbH www.geq.at
v2025,516601 REPEA23 o23 - Niederösterreich

Demo-Modus

Bearbeiter Paloma García (TFM)
Seite 2

WP-Eingabe

TFM_Einfamilienhaus_Perchtoldsdorf

Wärmepumpe

Wärmepumpenart	Außenluft / Wasser		
Betriebsart	Monovalenter Betrieb		
Anlagentyp	Warmwasser und Raumheizung		
Nennwärmeleistung	7,50 kW	freie Eingabe	
Jahresarbeitszahl	3,9	berechnet lt. ÖNORM H5056	
COP	4,2	Defaultwert	Prüfpunkt: A7/W35
Betriebsweise	gleitender Betrieb		
Baujahr	ab 2023		
Modulierung	modulierender Betrieb		

Photovoltaik Eingabe

TFM_Einfamilienhaus_Perchtoldsdorf

Photovoltaik

Kollektoreigenschaften

Art des PV-Moduls	Monokristallines Silicium		
Peakleistung	10,00 kWp	<input checked="" type="checkbox"/> freie Eingabe	
Ausrichtung	0 Grad		
Neigungswinkel	45 Grad		

Systemeigenschaften und Verschattung

Gebäudeintegration	Mäßig belüftete (< 0,5 m) oder auf Dach aufgesetzte Module		
Systemwirkungsgrad	0,80		
Geländewinkel	0 Grad		

Stromspeicher

Erzeugter Strom 9.376 kWh/a
Peakleistung 10 kWp

2.2.2. Certificado de Eficiencia Energética español (Madrid)

Extracto del certificado energético oficial conforme al CTE DB-HE, obtenido mediante la herramienta HULC. Se presentan la calificación global, $E_{p,tot}$ y demanda de calefacción/refrigeración.

CERTIFICADO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

IDENTIFICACIÓN DEL EDIFICIO O DE LA PARTE QUE SE CERTIFICA:

Nombre del edificio	TFM_Vivienda_Unifamiliar_Madrid		
Dirección	C/-----		
Municipio	Cercedilla	Código Postal	28470
Provincia	Madrid	Comunidad Autónoma	Madrid
Zona climática	D3	Año construcción	Posterior a 2013
Normativa vigente (construcción / rehabilitación)	CTE_DB_HE_2019		
Referencia/s catastral/es	ninguno		

Tipo de edificio o parte del edificio que se certifica:

<input checked="" type="checkbox"/> Edificio de nueva construcción	<input type="checkbox"/> Edificio Existente
<input checked="" type="checkbox"/> Vivienda <input checked="" type="checkbox"/> Unifamiliar <input type="checkbox"/> Bloque <input type="checkbox"/> Bloque completo <input type="checkbox"/> Vivienda individual	<input type="checkbox"/> Terciario <input type="checkbox"/> Edificio completo <input type="checkbox"/> Local

DATOS DEL TÉCNICO CERTIFICADOR:

Nombre y Apellidos	Nombres Apellido1 Apellido2	NIF/NIE	CIF
Razón social	Razón Social	NIF	-
Domicilio	Nombre calle -----		
Municipio	Localidad	Código Postal	Código postal
Provincia	- Seleccione de la lista -	Comunidad Autónoma	- Seleccione de la lista -
e-mail:	-	Teléfono	-
Titulación habilitante según normativa vigente	-		
Procedimiento reconocido de calificación energética utilizado y versión:	HU CTE-HE y CEE Versión 2.0.2540.1182, de fecha 12-ago-2025		

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA OBTENIDA:

CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE (kWh/m ² ·año)	EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (kgCO ₂ /m ² ·año)
<div> <div><54.20 A</div> <div>54.20-87.8 B</div> <div>87.80-136.10 C</div> <div>136.10-209.30 D</div> <div>209.30-375.60 E</div> <div>375.60-473.20 F</div> <div>=>473.20 G</div> </div> <div>21,06 A</div>	<div> <div><12.20 A</div> <div>12.20-19.9 B</div> <div>19.90-30.80 C</div> <div>30.80-47.30 D</div> <div>47.30-83.70 E</div> <div>83.70-100.40 F</div> <div>=>100.40 G</div> </div> <div>4,27 A</div>

El técnico abajo firmante declara responsablemente que ha realizado la certificación energética del edificio o de la parte que se certifica de acuerdo con el procedimiento establecido por la normativa vigente y que son ciertos los datos que figuran en el presente documento, y sus anexos:

Fecha 06.09.2025

Firma del técnico certificador:

- Anexo I.** Descripción de las características energéticas del edificio.
Anexo II. Calificación energética del edificio.
Anexo III. Recomendaciones para la mejora de la eficiencia energética.
Anexo IV. Pruebas, comprobaciones e inspecciones realizadas por el técnico certificador.

Registro del Organismo Territorial Competente:

Fecha de generación del documento
Ref. Catastral

06.09.2025
ninguno

Página 1 de 7

ANEXO II CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO

Zona climática	D3	Uso	CertificaciónVerificaciónNuevo
----------------	----	-----	--------------------------------

1. CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO EN EMISIONES

INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES			
<div><div><12.20 A</div><div>12.20-19.9 B</div><div>19.90-30.80 C</div><div>30.80-47.30 D</div><div>47.30-83.70 E</div><div>83.70-100.40 F</div><div>=>100.40 G</div></div>	<div>4,27 A</div>	CALEFACCIÓN		ACS	
		Emisiones calefacción (kgCO2/m2 año)	A	Emisiones ACS (kgCO2/m2 año)	A
		3,91		0,14	
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN	
Emisiones globales (kgCO2/m2 año)1		Emisiones refrigeración (kgCO2/m2 año)	A	Emisiones iluminación (kgCO2/m2 año)	-
		0,22		-	

La calificación global del edificio se expresa en términos de dióxido de carbono liberado a la atmósfera como consecuencia del consumo energético del mismo.

	kgCO2/m2.año	kgCO2/año
Emisiones CO2 por consumo eléctrico	0,75	198,43
Emisiones CO2 por combustibles fósiles	3,52	927,98

2. CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO EN CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE

Por energía primaria no renovable se entiende la energía consumida por el edificio procedente de fuentes no renovables que no ha sufrido ningún proceso de conversión o transformación.

INDICADOR GLOBAL		INDICADORES PARCIALES			
<div><div><div><54.20 A</div><div>54.20-87.8 B</div><div>87.80-136.1 C</div><div>136.10-209.3 D</div><div>209.30-375.60 E</div><div>375.60-473.20 F</div><div>=>473.20 G</div></div><div>21,06 A</div></div>		CALEFACCIÓN		ACS	
Consumo global de energía primaria no renovable (kWh/m2año)1		Energía primaria no renovable calefacción (kWh/m2año)	A	Energía primaria no renovable ACS (kWh/m2año)	A
		18,90		0,85	
		REFRIGERACIÓN		ILUMINACIÓN	
		Energía primaria no renovable refrigeración (kWh/m2año)	A	Energía primaria no renovable iluminación (kWh/m2año)	-
		1,31		-	

3. CALIFICACIÓN PARCIAL DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN

La demanda energética de calefacción y refrigeración es la energía necesaria para mantener las condiciones internas de confort del edificio.

DEMANDA DE CALEFACCIÓN		DEMANDA DE REFRIGERACIÓN	
<div><div><28.90A</div><div>28.90-46.8B</div><div>46.80-72.60C</div><div>72.60-111.60D</div><div>111.60-178.30E</div><div>178.30-208.60F</div><div>=>208.60G</div></div>	<div>30,62B</div>	<div><div><10.00A</div><div>10.00-14.3B</div><div>14.30-20.40C</div><div>20.40-29.70D</div><div>29.70-36.70E</div><div>36.70-45.10F</div><div>=>45.10G</div></div>	<div>9,93A</div>
Demanda de calefacción (kWh/m2año)		Demanda de refrigeración (kWh/m2año)	

1El indicador global es resultado de la suma de los indicadores parciales más el valor del indicador para consumos auxiliares, si los hubiera (sólo ed. terciarios, ventilación, bombeo, etc...). La energía eléctrica autoconsumida se descuenta únicamente del indicador global, no así de los valores parciales.

Fecha de generación del documento
Ref. Catastral

06.09.2025
ninguno

Página 5 de 7