
Evaluación ambiental basado en el análisis del ciclo de vida (ACV) en la fase de construcción de una edificación en Cataluña

Ortiz O.O*, Pasqualino J, Castells F

Universidad Rovira i Virgili, Grupo de Análisis y Gestión Ambiental (AGA), Departamento de Ingeniería Química, Av. Països Catalanes 26, 43007 Tarragona

Environmental assessment based on life cycle analysis (LCA) in the construction phase of a building in Catalonia

Avaluació ambiental basat en l'anàlisi del cicle de vida (ACV) en la fase de construcció d'una edificació a Catalunya

Recibido: 13 de abril de 2010; revisado: 18 de junio de 2010; aceptado: 21 de junio de 2010

RESUMEN

Mediante la aplicación de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida es posible evaluar el impacto ambiental de la fase de construcción a partir de los materiales de construcción, transporte, energía, y la gestión de residuos. Por lo tanto, un caso de estudio de una construcción en Cataluña ha sido aplicado. Toda la masa de materiales usados durante el ciclo de vida de la fase de construcción fue determinado en $1.88E+03$ kg/m² del cual la estructura representa el 41%, cimientos 25% y cerramientos (exteriores e interiores) 11%. El total del impacto ambiental del cambio climático en la fabricación de materiales fue de $8.40E+02$ kg CO₂-Eq/m². El consumo de energía total fue de $2.88E+04$ MJ (4% recursos renovables y 96% para recursos no renovables). Finalmente, comparando las diferentes alternativas de gestión de residuos muestran que el escenario de incineración es la mejor opción ambiental para la mayoría de categorías de impacto, a excepción de la categoría de uso de recursos donde la mejor opción es el reciclaje.

Palabras claves: ACV, materiales de construcción, residuos de construcción y demolición, RCDs.

SUMMARY

By applying Life Cycle Assessment (LCA) it is possible to evaluate the environmental impact of the construction phase starting from the building materials, transport to the construction site, the energy consumed by machinery, and the disposal of material and packaging wastes. Therefore, a typical Catalanian building with external and internal walls has been applied as a case study.

Results shows that the total life cycle mass of all construction materials consumed was determined to be $1.88E+03$ kg/m² in which structure represented 41%, foundation 25% and walls (ext./int.) 11%. The total climate change impact during the fabrication phase is $8.40E+02$ kg CO₂-Eq/

m². The total energy used during the construction phase is $2.88E+04$ MJ (4% for renewable and 96% for non-renewable resources). Finally, comparing the different alternatives for waste management, the scenario of incineration is the best environmental option, except for the category of resource consumption in which the best option is recycling.

Key words: LCA, building materials, construction and demolition wastes, C&D Waste.

RESUM

Mitjançant l'aplicació de la metodologia de l'Anàlisi del Cicle de Vida és possible avaluar l'impacte ambiental de la fase de construcció a partir dels materials de construcció, transport, energia, i la gestió de residus. Per tant, un cas d'estudi d'una construcció a Catalunya ha estat aplicat. Tota la massa de materials usats durant el cicle de vida de la fase de construcció

va ser determinat en $1.88E+03$ kg/m² del qual l'estructura representa el 41%, fonaments 25% i tancaments (exteriors i interiors) 11%. El total de l'impacte ambiental del canvi climàtic en la fabricació de materials va ser de $8.40E+02$ kg CO₂-Eq/m². El consum d'energia total va ser de $2.88E+04$ MJ (4% recursos renovables i 96% per a recursos no renovables). Finalment, comparant les diferents alternatives de gestió de residus mostren que l'escenari d'incineració és la millor opció ambiental per a la majoria de categories d'impacte, a excepció de la categoria d'ús de recursos on la millor opció és el reciclatge.

Mots clau: ACV, materials de construcció, residus de construcció i demolició, RCD.

Autores para la correspondencia: oscar.ortiz@urv.cat
Fax: +34 977 55 9621*, jorgelina.pasqualino@urv.cat (J. Pasqualino); francesc.castells@urv.cat (F. Castells)

INTRODUCCION

La construcción sostenible se puede definir como aquella que teniendo especial respeto y compromiso con el medio ambiente, implica el uso eficiente de la energía y del agua, los recursos y materiales no perjudiciales para el medioambiente [1]. Es así como países industrializados y en vía de desarrollo ven en la construcción sostenible una oportunidad para mejorar los aspectos medioambientales del entorno urbano y al desarrollo del mismo de los procesos constructivos de una construcción que van desde la selección de materiales hasta la disposición final de residuos.

Ambientalmente este sector es el principal responsable hoy día del agotamiento de los recursos naturales, por ejemplo en España en el año 2007 tuvo un consumo per cápita de cemento de 1200kg y 400kg de consumo de acero [2]. Aparte del agotamiento de los recursos naturales, otro impacto negativo del sector son los residuos que se generan en los procesos de la construcción y demolición. Por ejemplo, la cantidad de residuos generados en la construcción y demolición de edificios se está convirtiendo en uno de los problemas más serios de Europa. Aproximadamente se calcula que cada año se producen más de 300 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD). En el año 2006, España tuvo una producción de RCD de 1000kg/habitante por año [3].

De cara a lograr una construcción sostenible se deben por tanto considerar el pensamiento del ciclo de vida desde la conceptualización del proyecto para minimizar los impactos ambientales ocasionados durante los procesos constructivos de una construcción. Se ha estimado que la fase de ocupación de una edificación o vivienda representa aproximadamente un 80%-90% del consumo energético, 10%-20% durante la fase de extracción y fabricación de los materiales y un 1% en el tratamiento de residuos y disposición final [4]. Ortiz et al, 2008 realizo un estudio de una vivienda típica residencial localizada en Barcelona, España de 160 m² y aplico el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Este estudio concluyo que en relación con el problema ambiental del cambio climático, la vivienda tuvo un total de 2.34E+03 kg de CO₂-eq/m² para una vida útil de 50 años, de los cuales aproximadamente el 90.5% fue durante la fase de operación (88.9% uso y 1.6% mantenimiento) y la fase previa a la construcción contribuyo con un total de 9.5% [5].

Queda por tanto implícito que para buscar una construcción sostenible es importante que en la etapa de construcción, donde se conceptualiza el proyecto se tengan en cuenta parámetros de sostenibilidad desde la apropiada combinación de los materiales de construcción, el transporte a la obra, la energía consumida por la máquina, y la gestión de residuos de los materiales y de los envases. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es aplicar la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) a un caso estudio de una construcción localizada en Barcelona, España durante la fase de construcción (fabricación de los materiales, transporte, ejecución del proyecto y tratamiento de residuos). Tres diferentes escenarios de la gestión de residuos se han comparado: vertedero, incineración y reciclado. Finalmente, eco-indicadores como recursos renovables y no renovables, consumo de agua se han calculado, junto con otros impactos ambientales como: cambio

climático, agotamiento abiótico, toxicidad humana, acidificación y eutrofización.

METODOLOGÍA: ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV)

Las técnicas basadas en la ACV aplicadas al sector de la construcción representan una metodología medioambiental innovadora para mejorar los criterios de la sostenibilidad en este sector industrial. El crecimiento, tanto en el número de trabajos como de instituciones dedicadas al tema del ACV, ha generado un gran número de publicaciones científicas que a su vez han permitido unificar criterios de sostenibilidad [6]. Organismos como la UNEP (United Nations Environment Programme) y SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) han propuesto conjuntamente la "Iniciativa del Ciclo de Vida". Con esta iniciativa se propone desarrollar e implementar conceptos prácticos y herramientas para evaluar las oportunidades, riesgos y ventajas asociadas con productos y servicios a lo largo de todo su ciclo de vida [7].

Por lo tanto, la metodología ACV se aplica de acuerdo a estándares internacionales de la Norma ISO 14040 [8]. Para la evaluación de los impactos ambientales se han utilizado el método desarrollado por el Centre of Environmental Science (CML 2 baseline 2000). Las categorías de impacto CML2000 analizadas con este método son: cambio climático (kg CO₂ eq), agotamiento de recursos abióticos (kg 1,4-DCB eq), acidificación (kg SO₂ eq) y Eutrofización (kg NO_x eq).

A parte de los indicadores ambientales considerados anteriormente, también se han analizado otros indicadores de eco-eficiencia de uso general, y específicos para el sector de la construcción, que reflejan los resultados del análisis de una forma clara y fácil de entender para usuarios no especializados en el medioambiente, ver tabla 1. Estos indicadores se obtienen con el software LCA Manager desarrollado por SIMPPLE SL, y trabaja a partir de los datos de Ecoinvent [9].

Tabla 1. Descripción de los eco-indicadores.

| Indicador | Unidad | Descripción |
|--------------------------|----------------|--|
| Consumo de recursos | kg | Consumo de recursos, a excepción del agua y combustibles u otras fuentes de energía, durante todo el ciclo de vida. |
| Energía total | MJ | Consumo de energía durante todo el ciclo de vida. Suma de los MJ de energía renovables (energía solar, eólica, hidráulica y biomasa) y los no renovables (energía geotérmica, nuclear, petróleo, carbón, hulla y gas natural). |
| Consumo de agua global | m ³ | Consumo de agua de diferentes tipos de fuentes de agua fresca superficial y subterránea, incluida el agua de refrigeración, durante todo el ciclo de vida. |
| Residuos sólidos totales | kg | Cantidad de residuos sólidos totales generados durante F2 (suma de residuos sólidos reciclables + sólidos especiales + sólidos no especiales + sólidos inertes). |

Finalmente, este artículo también evalúa tres escenarios de gestión de residuos: vertedero, incineración y reciclaje teniendo en cuenta las recomendaciones del Catálogo

Tabla 2. Escenarios de los tratamientos de residuos analizados.

| Escenario de residuos a vertedero | |
|--|--|
| Residuos enviados a vertedero Planta de Tratamiento: Atlas Gestión Medioambiental, S.A. Dipost controlat de runes I altres residus de la construcció de Badalona. | Residuos de puesta en obra Residuo procedente de aditivos que contienen sustancias peligrosas (070214). Hormigón (170101) Ladrillos (170102) Tejas y materiales cerámicos (170103) Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos que contienen sustancias peligrosas (170106) Plástico (170203) Mezclas bituminosas que no contienen alquitrán de hulla (170302) Hierro y acero (170405) Materiales de aislamiento que no contienen amianto ni otras sustancias peligrosas (170604) Materiales de construcción realizados con yeso que no estén contaminados con sustancias peligrosas (170802) |
| | Residuos de embalaje Envases de papel y cartón (150101) Envases de plástico (150102) Envases de madera (150103) Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas (150110) |
| Escenario de residuos a Incineración | |
| Enviados a incineración. Planta de Tratamiento: Gestió de residus especials de Catalunya, S.A. (GRECAT). Uniland, SA. | (070214) (170203) (170302) (170604) (150101) (150102) (150103) (150110) |
| No incinerables (enviados a vertedero) | (170101) (170102) (170103) (170106) (170405) (170802) |
| Escenario de residuos a Reciclaje | |
| Enviados a reciclaje. Planta de Tratamiento: Centre de triatge Barcelona, S.A. CESPA, Gestió de Residuos, S.A. FEMAREC, S.C.C.L. GELABERT S.A. | (170101) (170102) (170103) (170203) (170405) (170604) (170802) (150101) (150102) |
| No reciclables enviados a incineración | (070214) (170302) (150103) (150110) |
| No reciclables o incinerables enviados a vertedero | (170106) |

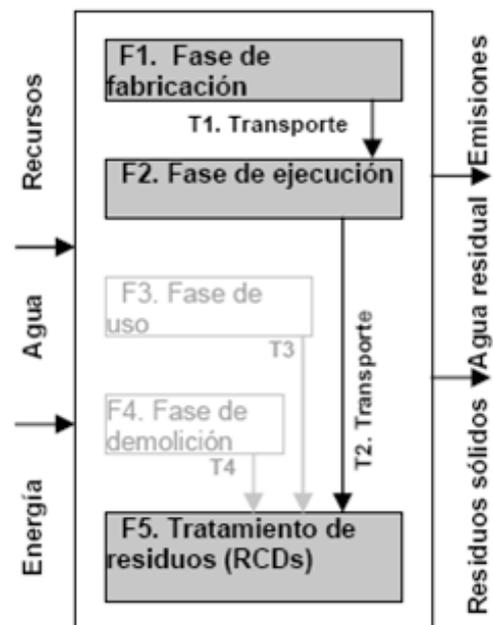
Europeo de Residuos (CER) [10]. La Tabla 2 detalla los posibles escenarios de tratamiento aplicados a cada tipo de residuos para los materiales puesto en obra y envases de acuerdo al mencionado catalogo CER y las plantas de tratamiento de Cataluña que trata los respectivos residuos.

figura 1 muestra los límites y el alcance detallando las fases dentro del caso de estudio. Los procesos en gris claro (fase de uso y fase de demolición) no se consideran en el presente estudio. Por lo tanto, el presente caso de estudio se dividió en las siguientes fases durante su construcción:

CASO DE ESTUDIO: DETERMINACION DE LOS ESCENARIOS

Para reducir los impactos ambientales en la fase de construcción se han tomado escenarios reales que permiten combinar materiales y parámetros de diseño tomando en cuenta requerimientos normativos del código técnico de la edificación (CTE) Español [11]. Para ello se han escogido dos sistemas constructivos: cerramientos exteriores verticales (Cev) para fachadas y cerramientos interiores verticales (Civ) para tabiques y divisorias. Así mismo, para el análisis de las unidades o capas que componen el subsistema (por ejemplo, para un cerramiento exterior vertical o fachada el subsistema quedará compuesto en 3 unidades: hoja exterior + aislamiento térmico/cámara + hoja interior), y determinación de los elementos que nos permiten definir cada unidad (por ejemplo, para la unidad de aislamiento térmico, en el caso del subsistema Cev – fachada –, se selecciona el poliuretano proyectado, poliestireno extruido, poliestireno expandido, fibra de vidrio y lana de roca). En cuanto al Civ es la combinación de la hoja interna + aislamiento térmico. La tabla 3 y tabla 4 presentan los detalles de los escenarios de diseño para los Cev y los Civ tomando como referencia en el presente estudio el caso (1 ref). Para el presente trabajo se ha definido como 1m2 construido la unidad funcional con una vida útil final de 50 años. La

Figura 1. Límites y alcance



F1. Fase de fabricación: se evalúa el material y el consumo de energía asociados con la extracción de materias primas, su transporte a la fábrica, su proceso de fabricación y la gestión de los desechos internos.

T1. Transporte de los materiales de la fábrica a la obra de construcción.

F2. Fase de ejecución: evalúa la energía utilizada por la maquinaria de construcción.

T2. Transporte de los desechos generados en la obra (res- tos de materiales y embalaje) hasta su destino final (verte- dero, incineración o planta de reciclaje).

F5. Gestión de residuos de construcción y demolición (RCDs).

Adicionalmente, las siguientes son las hipótesis plantea- das durante el presente estudio:

Transporte T1: considera una distancia media de 50 km.

Transporte T2: esta distancia se ha calculado estudiando las plantas de tratamiento más cercanas a la obra dónde se llevarían los residuos (según el CER) y analizando los km de este recorrido.

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de la electricidad para España se baso en los datos tomados de Ecoinvent. Este inventario no incluye el transporte ni las pérdidas por dis- tribución. La producción de electricidad doméstica neta y las partes importadas están basadas en medias anuales para el año 2007.

Finalmente, durante la fase de gestión de los residuos (F5) se consideran 3 escenarios para el tratamiento de resi- duos:

Escenario vertedero: considera que todos los residuos se destinan a vertedero.

Escenario incineración: los residuos incinerables se desti- nan a una planta incineradora, y aquellos que no son inci-

nerables se destinan a vertedero. Para los residuos incine- rables se calcula el crédito de energía producida (a partir de datos de capacidad calorífica), y las cenizas que se obtienen como residuos del proceso de incineración (para las cuales se calcula su envío a vertedero).

Escenario reciclaje: los residuos reciclables se destinan a una planta de reciclaje, aquellos residuos que no son reci- cables se destinan a una planta incineradora, y aquellos residuos que no son reciclables ni incinerables se destinan a un vertedero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ciclo de vida total en masa de todos los materiales de construcción (90 aproximadamente) fue determinado en $1.88E+03$ kg/m² del cual la estructura representa el 41%, cimientos 25% y cerramientos (exteriores e interiores) 11%. El consumo final de energía primaria fue $5.04E+03$ MJ/m². El total de impacto ambiental del cambio climático fue de $8.40E+02$ kg CO₂-Eq/m² del cual el acero galvanizado representa el 35%, seguido del aluminio anodizado 25% y cemento 16%. En cuanto al consumo de energía total fue de $2.88E+04$ del cual, 4% es para recursos reno- vables y el 96% para recursos no renovables. En cuanto a residuos totales en la obra la combinación de los cerra- mientos ocupa el primer lugar con un 27% del total, segui- do de acabados 22%, estructura 17% y cimientos 16%. El presente trabajo estudia los 10 primeros materiales de acuerdo a su peso total que se necesita en la fase de eje- cución de la obra. Por lo tanto, la tabla 5 resume la energía primaria, los impactos ambientales y los eco-indicadores de los respectivos materiales de construcción.

Tabla 3. Cerramientos exteriores verticales (CEV)

| Cev. | Composición | | | Costo (€) |
|-------|---|----------------|---------------------|-----------|
| | Hoja Exterior | Hoja Interior | Aislamiento Térmico | |
| 1 ref | Ladrillo perforado con acabado monocapa | Cerámica | Poliuretano | 75.50 |
| 2 | Ladrillo con acabado monocapa | Cerámica | XPS | 73.65 |
| 3 | Ladrillo hueco con acabado monocapa | Cerámica | XPS | 70.63 |
| 4 | Bloque de arcilla aligerada (termoar- cilla) con acabado monocapa | Yeso laminado | Lana mineral | 77.37 |
| 5 | Bloque de arcilla expandida (arli- bloc) con acabado monocapa | Yeso laminado | Lana mineral | 73.62 |
| 6 | Ladrillo perforado visto | Cerámica | XPS | 67.74 |
| 7 | Ladrillo perforado visto | Yeso laminado | Lana mineral | 72.33 |
| 8 | Bloque de arcilla expandida (arlbloc) visto | Yeso laminado. | Lana mineral | 69.32 |

Tabla 4. Cerramientos interiores verticales (Civ).

| Civ | Composición | | Costo (€) |
|-------|--|---------------------|-----------|
| | Hoja Interior | Aislamiento Térmico | |
| 1 ref | Divisoria entre estancias de ladrillo hueco e=4cm y acabado enlucido a dos caras | - | 22.32 |
| 2 | Divisoria entre estancias de placas de yeso laminado (YL) sobre entramado metálico. | Lana mineral | 40.84 |
| 3 | Divisoria zonas húmedas de ladrillo hueco e=10 cm, aca- bado enlucido a 1 cara y alicatado a 1 cara. | - | 58.61 |
| 4 | Divisoria zonas húmedas de placas de yeso laminado (YL) so- bre entramado metálico, acabado alicatado a una cara | Lana mineral | 59.38 |
| 5 | Divisoria zonas comunes de ladrillo perforado tipo 9, e=14cm y acabado enlucido a dos caras. | - | 35.76 |
| 6 | Divisoria zonas comunes de doble placa de yeso lamina- do (YL) a ambas caras sobre entramado metálico. | Lana mineral | 94.89 |
| 7 | Divisoria zonas comunes de doble placa de yeso laminado (YL) a am- bas caras sobre entramado metálico y placa intermedia de acero. | Lana mineral | 98.61 |

ABREVIACIONES:

CC: Cambio climático
 EH: Ecotoxicidad humana
 A: Acidificación
 CA: Consumo de agua global
 CR: Consumo de recursos
 EU: Eutrofización
 ETR*1: Energía total renovable
 ETNR*2: Energía total no-renovable

El presente artículo también presta especial atención a los impactos ambientales de las diferentes alternativas que se pueden tener en la fase de diseño mediante la combinación de las diferentes alternativas de los escenarios Civ y Cev. En cuanto a la influencia del impacto global del cambio climático, la fase de fabricación (F1) es el mayor contribuyente a los efectos ambientales de la situación con un 88.3%. El transporte de los materiales a la obra (T1) tuvo una contribución de 9.9%, seguido de la contribución conjunta del transporte de los residuos (T2) y la gestión de los RCD (F5) con 1.6% y finalmente la fase de construcción (F2) un 0.2%.

Si se compara el coste de los diferentes escenarios en función del impacto que producen en la categoría del cambio climático, se puede apreciar que en los escenarios Civ hay una tendencia prácticamente lineal, de la que se puede concluir que los escenarios más económicos son aquellos que menor impacto generan, en tanto que en los escenarios Cev no hay una tendencia clara, debido a la similitud de costes entre los escenarios, ver figura 2 y figura 3.

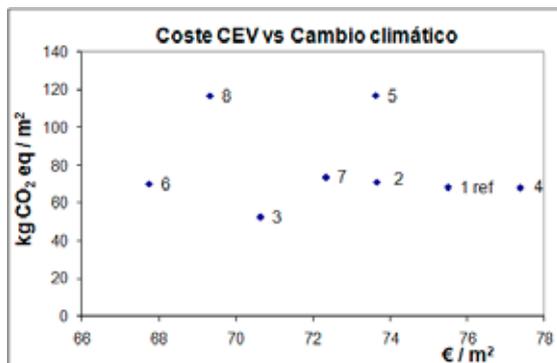


Figura 2. Coste de los distintos escenarios Cev versus el impacto ambiental relativo a la categoría de impacto "cambio climático".

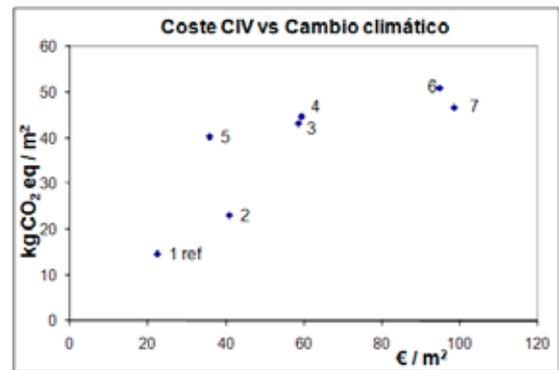


Figura 3. Coste de los distintos escenarios Civ versus el impacto ambiental relativo a la categoría de impacto "cambio climático".

De otra parte, los escenarios que contienen acero entre sus materiales presentan un impacto más elevado debido a las altas emisiones presentadas durante la fabricación del material y al proceso de galvanización. Esto es cierto para la mayoría de las categorías ambientales estudiadas. Por lo tanto la eficiencia en el uso de materiales de todos los escenarios estudiados se encuentra dentro del rango 70 - 90%. En cuanto al impacto ambiental del cambio climático se aprecia que es debido a los escenarios que contienen bloques de mortero prefabricado de arcilla expandida y cerámica esmaltada. El consumo de agua es más elevado en aquellos escenarios que contienen cal como material, seguidos de los que contienen acero galvanizado. Con respecto al consumo de energía, se observa que en todos los escenarios hay una mayor proporción de uso de energía renovable con respecto a la no-renovable, y que en los escenarios que no contienen acero el consumo de energía es menor al resto de escenarios. La tabla 6 y tabla 7 resumen los perfiles ambientales de los escenarios Cev y Civ.

Tabla 5. Impactos ambientales y eco-indicadores (10 primeros materiales por peso)

| Material de construcción | Cantidad (kg/m²) | CC (kg CO2 eq/m²) | EH (kg 1,4-DCB eq/m²) | A (kg SO2 eq/m²) | EU (kg NOX eq/m²) | CR (kg/m²) | Energía | | CA m³/m² |
|--------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|------------|---------------|----------------|----------|
| | | | | | | | ETR*1 (MJ/m²) | ETNR*2 (MJ/m²) | |
| Acero Estructural | 3.70E+01 | 5.49E+01 | 1.81E+01 | 1.90E-01 | 1.41E-01 | 4.81E+01 | 1.98E+01*1 | 1.26E+03*2 | 1.02E+00 |
| Agua | 1.15E+02 | 3.65E-02 | 7.03E-03 | 1.60E-04 | 8.86E-05 | 6.11E-02 | 7.16E-02*1 | 9.64E-01*2 | 1.31E-01 |
| Árido | 9.04E+02 | 2.22E+00 | 1.41E+00 | 1.35E-02 | 2.20E-02 | 9.42E+02 | 4.13E+00*1 | 9.21E+01*2 | 1.29E+00 |
| Cal | 5.78E+00 | 4.80E+00 | 1.73E-01 | 6.46E-03 | 8.82E-03 | 1.03E+01 | 1.33E+00*1 | 3.35E+01*2 | 3.50E+00 |
| Cemento | 1.63E+02 | 1.34E+02 | 5.82E+00 | 1.87E-01 | 2.51E-01 | 2.47E+02 | 3.43E+01*1 | 9.39E+02*2 | 5.28E-01 |
| Cerámica esmaltada | 1.06E+01 | 8.65E+00 | 2.99E+00 | 3.08E-02 | 2.11E-02 | 1.82E+01 | 7.88E+00*1 | 4.12E+02*2 | 1.67E-01 |
| Ladrillo | 1.57E+02 | 3.75E+01 | 3.54E+00 | 8.61E-02 | 8.94E-02 | 2.27E+02 | 4.02E+01*1 | 5.21E+02*2 | 2.29E-01 |
| Mortero prefabricado | 8.89E+01 | 1.69E+01 | 1.14E+00 | 2.80E-02 | 3.55E-02 | 1.07E+02 | 1.87E+01*1 | 1.65E+02*2 | 2.15E-01 |
| Terrazo | 5.12E+01 | 9.85E+00 | 7.32E-01 | 1.79E-02 | 2.43E-02 | 1.13E+02 | 1.09E+01*1 | 9.77E+01*2 | 1.26E-01 |
| Yeso | 2.52E+01 | 2.00E+00 | 3.60E-01 | 5.36E-03 | 5.20E-03 | 2.98E+01 | 5.09E+00*1 | 4.31E+01*2 | 3.06E-02 |

Tabla 6. Perfil ambiental de los escenarios Cev.

| Escenario Impacto Ambiental | 1 ref | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Cambio climático (kg CO2 eq/m2) | 6.84E+01 | 7.12E+01 | 5.28E+01 | 6.82E+01 | 1.17E+02 | 7.01E+01 | 7.37E+01 | 1.17E+02 |
| Agotamiento de recursos abióticos (kg antimonio eq/m2) | 3.18E-01 | 3.02E-01 | 2.27E-01 | 4.76E-01 | 6.08E-01 | 3.00E-01 | 3.65E-01 | 6.10E-01 |
| Ecotoxicidad humana (kg 1-4-DCB eq/m2) | 5.60E+00 | 5.64E+00 | 4.41E+00 | 2.14E+01 | 2.10E+01 | 5.60E+00 | 1.55E+01 | 2.10E+01 |
| Acidificación (kg SO2 eq/m2) | 1.76E-01 | 1.64E-01 | 1.24E-01 | 2.19E-01 | 7.03E-01 | 1.62E-01 | 2.40E-01 | 7.06E-01 |
| Eutrofización (kg NOX eq/m2) | 1.66E-01 | 1.57E-01 | 1.20E-01 | 2.21E-01 | 3.58E-01 | 1.55E-01 | 1.95E-01 | 3.58E-01 |
| Consumo de recursos (kg/m2) | 3.75E+02 | 3.72E+02 | 3.06E+02 | 3.75E+02 | 3.40E+02 | 3.70E+02 | 3.02E+02 | 3.41E+02 |
| Energía renovable (MJ/m2) | 6.13E+01 | 5.68E+01 | 4.53E+01 | 6.86E+02 | 5.79E+01 | 5.66E+01 | 6.02E+01 | 5.80E+01 |
| Energía no renovable (MJ/m2) | 7.27E+02 | 6.81E+02 | 5.14E+02 | 1.05E+03 | 1.41E+03 | 6.76E+02 | 8.30E+02 | 1.42E+03 |
| Consumo de agua global (m3/m2) | 6.18E+00 | 5.84E+00 | 5.54E-01 | 7.92E-01 | 1.18E+00 | 5.84E+00 | 6.15E+00 | 1.18E+00 |

Tabla 7. Perfil ambiental de los escenarios Civ.

| Escenario Impacto Ambiental | 1 ref | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Cambio climático (kg CO2 eq/m2) | 1.47E+01 | 2.31E+01 | 4.31E+01 | 4.46E+01 | 4.03E+01 | 5.08E+01 | 4.66E+01 |
| Agotamiento de recursos abióticos (kg antimonio eq/m2) | 7.30E-02 | 1.78E-01 | 2.33E-01 | 3.44E-01 | 1.81E-01 | 3.91E-01 | 3.60E-01 |
| Ecotoxicidad humana (kg 1-4-DCB eq/m2) | 1.53E+00 | 1.06E+01 | 7.69E+00 | 2.11E+01 | 3.74E+00 | 2.19E+01 | 2.14E+01 |
| Acidificación (kg SO2 eq/m2) | 3.94E-02 | 1.35E-01 | 1.33E-01 | 2.21E-01 | 9.99E-02 | 2.90E-01 | 2.73E-01 |
| Eutrofización (kg NOX eq/m2) | 3.75E-02 | 9.62E-02 | 1.10E-01 | 1.51E-01 | 9.95E-02 | 2.08E-01 | 1.94E-01 |
| Consumo de recursos (kg/m2) | 1.10E+02 | 4.19E+01 | 2.37E+02 | 8.07E+01 | 2.64E+02 | 9.87E+01 | 8.43E+01 |
| Energía renovable (MJ/m2) | 1.77E+01 | 2.56E+01 | 3.99E+01 | 4.44E+01 | 4.17E+01 | 5.67E+01 | 5.16E+01 |
| Energía no renovable (MJ/m2) | 1.66E+02 | 4.18E+02 | 5.32E+02 | 8.00E+02 | 4.08E+02 | 9.17E+02 | 8.44E+02 |
| Consumo de agua global (m3/m2) | 1.56E-01 | 5.77E-01 | 6.05E-01 | 1.11E+00 | 3.53E-01 | 1.24E+00 | 1.17E+00 |

ACV DE LA GESTION DE RESIDUOS

Al clasificar el tipo de residuos, se puede concluir que los escenarios Civ generan entre un 89%-97% de los residuos reciclables, mientras que los Cev entre el 72%-94%. La mayoría de los residuos en ambos casos son inertes o no especiales. Al comparar la cantidad de residuos generados (RCD) en el consumo de materiales en la obra, se observa que los escenarios Civ generan un promedio de 5.7% de los residuos, a excepción del escenario 2 que genera un 7.5%. Este resultado se debe a la utilización de baldosas cerámicas. En el caso de los Cev, el porcentaje de los residuos generados es del 4.5%, excepto para el escenario de Referencia con 5.6% de los residuos es debido a la utilización de aislamiento de poliuretano, y el escenario 2 con 3.7% de los residuos debido a la combinación de la capa de mortero y bloques de arcilla.

El impacto ocasionado durante el transporte y el tratamiento de residuos (T2 + F5) de los Cev y Civ fueron evaluados separadamente con el fin de comparar las diferentes opciones de la gestión de residuos. Los resultados de estas fases se muestran en la figura 4. Por lo tanto, cuando se comparan las combinaciones Civ y Cev, se aprecia que aquellas que contienen residuos peligrosos, presentan un elevado crédito energético en el escenario de incineración, debido a la alta capacidad calorífica de estos residuos. El indicador ambiental del cambio climático para el tratamiento de RCDs a vertederos es la peor alternativa para todos los escenarios analizados, mientras

que la incineración y el reciclaje ofrece beneficios para el medio ambiente debido a la producción de energía y el ahorro de material, respectivamente. También se concluye que para los escenarios que contienen lana de vidrio como material aislante, plástico y residuos de envases, la mejor opción es el reciclaje.

CONCLUSIONES

El presente estudio permite concluir que la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta ambiental que permite la evaluación del impacto ambiental en los diferentes procesos constructivos que van desde la fabricación de los materiales hasta la fase de gestión de residuos. Como ejemplo ilustrativo se ha aplicado el ACV a una edificación en Cataluña durante la fase de construcción tomando escenarios reales que permiten combinar materiales y parámetros de diseño en dos sistemas constructivos: cerramientos exteriores verticales (Cev) para fachadas y cerramientos interiores verticales (Civ) para tabiques y divisorias. Un análisis más detallado de los resultados presentados permiten concluir que:

La utilización de acero representa el mayor aporte al impacto ambiental en la mayoría de las categorías estudiadas, en particular en la acidificación, cambio climático y el consumo de energía.

El uso de cal incrementa el consumo de agua como recurso, en tanto que el resto de materiales no requiere un elevado consumo de agua para su obtención.

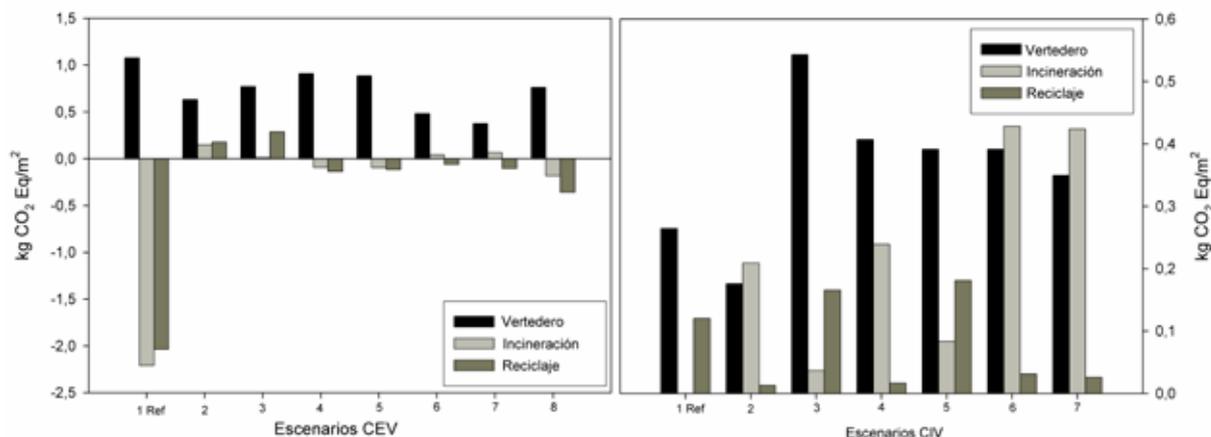


Figura 4. Impacto ambiental en los escenarios analizados.

La eficiencia en el uso de recursos se encuentra en el rango 70-90% para todos los escenarios comparados.

El crédito energético obtenido por la incineración de residuos hace que este tratamiento sea el más recomendado, en particular en aquellos casos en que se generan residuos peligrosos.

El reciclaje de los residuos es el tratamiento recomendado en el caso que se generen residuos plásticos.

Finalmente, la combinación del análisis de los materiales y la gestión de los residuos refleja la importancia de maximizar el reciclaje de aquellos materiales que generen un elevado impacto durante su fabricación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en colaboración con el Centro Tecnológico de la Construcción (iMat, www.imat.cat), de Barcelona, España. El primer autor agradece al convenio de cooperación entre la Universidad Rovira i Virgili (Cataluña, España) y la Universidad de Pamplona (Colombia). Finalmente los autores agradecen al Ministerio del Medio Ambiente Español por su financiación en el proyecto "PRO-DECO" MMA A435/2007/3-03.1.

BIBLIOGRAFIA

1. La construcción sostenible. Construcción verde, España. Física y Sociedad. http://www.cofis.es/pdf/fys/fys13_09.pdf. último acceso 2008-12-12
2. SEOPAN. Observatorio de la Construcción. Annual report on the construction 2006. <http://www.seopan.es/>, último acceso 2008-07-09
3. Comisión Europea (2000). Directorate-General Environment, Directorate E-Industry and Environment, ENVE.3-Waste Management, Management of Construction and Demolition Waste. Working Document No 1.
4. Kotaji S, Schuurmans A, Edwards S (2003): Life Cycle Assessment in building and construction: a state of the art report. Published by the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). ISBN 1880611597
5. Ortiz O, Bonnet C, Bruno JC, Castells F. (2009): Sustainability based on LCM of residential dwellings: A

case study in Catalonia, Spain. Building and Environment. Volume 44, Issue 3, March 2009, pages 584 – 594.

6. Ortiz O, Francesc C, Sonnemann G. (2009): Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA. Construction and Building Materials. Volume 23, Issue 1, January 2009, pages 28-39.
7. Iniciativa del Ciclo de Vida. <http://lcinitiative.unep.fr/> último acceso 2008-06-04
8. International standardization Organization (ISO) (2006): Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO 14040.
9. Ecoinvent Centre (2006): ecoinvent data v1.3, Swiss Centre for life cycle inventories, www.ecoinvent.ch. último acceso 2009-07-05
10. CER. Catalogo Europeo de Residuos (2000). 2000/532/EC. <http://www.environment-agency.gov.uk/commondata/acrobat/ewc.pdf>. último acceso 2008-06-04
11. Código Técnico de la Edificación. <http://www.estif.org/fileadmin/downloads/CTE_solar_thermal_sections_ENGLISH.pdf>. último acceso 2009-02-07