





Recibido 22/02/2021
Aceptado 24/07/2021

APLICACIÓN DE LA "FOOTPRINT FAMILY" PARA LA EVALUACION AMBIENTAL DE EDIFICIOS PUBLICOS EN ESPAÑA. ESTUDIO DE CASO: CENTRO EDUCATIVO.

APPLICATION OF THE "FOOTPRINT FAMILY" FOR THE ENVIRONMENTAL
EVALUATION OF PUBLIC BUILDINGS IN SPAIN. CASE STUDY:
EDUCATIONAL CENTER.

CRISTINA RIVERO-CAMACHO
Doctora en Arquitectura
Investigadora del grupo ARDITEC. ETS Ingeniería de Edificación
- Departamento de Construcciones Arquitectónicas II.
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0001-9411-7311>
cririvcam@gmail.com

ANTONIO FERREIRA-SÁNCHEZ
Doctor en Arquitectura
Funcionario del Ministerio
"Misterios de Defensa de España"
Madrid, España
<https://orcid.org/0000-0001-5814-4179>
ferreirasanchez@hotmail.com

RESUMEN

Dentro de los compromisos de la Agenda 2030, destacan los objetivos socioeconómicos para un desarrollo sostenible del conjunto de la sociedad, que plantean minimizar el impacto producido por la Administración Pública sobre el medio ambiente en todas sus actividades. Por ello, la creación y reforma de sus infraestructuras, necesarias para su funcionamiento y los servicios que presta, supone un gran impacto. El objetivo del presente trabajo se centra en una adaptación metodológica para evaluación ambiental de las obras promovidas por entes públicos, cuantificando y localizando los focos de impacto para poder tomar las medidas que los minimicen. Para ello, se proponen como indicadores la familia de las huellas, ecológica, de carbono e hídrica, caracterizadas por la simpleza del mensaje y la facilidad para implantarse en el sector de la construcción, a través del control de costes de los proyectos. En concreto, se presenta un estudio de caso, la construcción de un centro de educación infantil en la ciudad de Madrid, para cuyo análisis se exponen y analizan los datos necesarios. Los resultados reflejan información interesante, en términos de huellas, sobre los elementos que deben ser controlados y mejorados en el diseño del proyecto, tales como el hormigón y acero.

Palabras clave

Ingeniería de la construcción, impacto ambiental, indicadores ambientales.

ABSTRACT

Within the commitments of the 2030 Agenda, the socio-economic objectives for a sustainable development of society as a whole, stand out, which propose minimizing the impact produced by all the activities of the Public Administration on the environment. Therefore, the creation and retrofitting of its infrastructures, needed for its operation and the services it provides, has a great impact. The goal of this work focuses on a methodological adaptation for the environmental evaluation of the works promoted by public organizations, quantifying and locating the sources of impact with the purpose of taking the measures to minimize them. For this, the footprint family, ecological, carbon, and water, are proposed as indicators, characterized by the simplicity of their message and the ease of their implementation in the construction sector, by controlling project costs. A case study is presented, the construction of an early childhood education center in the city of Madrid, for which the data needed for the calculation are presented and analyzed. The results reflect interesting information in terms of footprints, on the elements that must be controlled and improved in the project design, such as concrete and steel.

Keywords

Construction engineering, Environmental impact, Environmental indicators.

INTRODUCCIÓN

Dentro de las directrices indicadas por la Agenda 2030 para un desarrollo sostenible de la sociedad española, se establecen objetivos como elaborar infraestructuras sostenibles y aminorar su impacto, además de orientar la actividad empresarial y pública hacia una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Dentro de las actividades propias de la Administración Pública, la construcción de nuevas edificaciones o la reforma de las existentes, suponen un impacto que es necesario cuantificar para poder tomar las medidas que lo minimicen y, a la vez, ayuden en la toma de decisiones. Se ha determinado que el sector de la construcción, en su actividad productiva, supone el consumo del 40% del total de los recursos naturales, así como del 30% de la energía consumida y produce por encima del 30% de los gases de efecto invernadero emitidos (Fundación General de la Universidad Complutense de Madrid, 2010). Considerando que la actividad relacionada con la contratación pública de obras representó en 2019 hasta un 23% del importe total contratado por la Administración General del Estado en España (Comisión Nacional del Mercado y la Competencia, 2019) y que ascendió a casi 1.000 millones de euros, lo cual constituye un 5% del PIB del país, es posible ofrecer una idea de del importante impacto del sector de la construcción en la actividad productiva.

La necesidad de definir indicadores cuyas aplicaciones sean rápidas y cuyas interpretaciones sean simples, hacen de la Huella de Carbono (HC), la ecológica (HE) y la hídrica (HH), valiosas herramientas para la evaluación del impacto del proceso constructivo (Zhang, Dzakpasu, Chen y Wang, 2017). Son, asimismo, exitosas gracias a que los resultados que producen son comprensibles por la sociedad no científica, y a su facilidad de aplicación en la toma de decisiones (Bare, Hofstetter, Pennington y Udo de Haes, 2000) y políticas, por lo que en su conjunto reciben el nombre de "footprint family" (Vanham et al., 2019). Las huellas son ideales como indicadores ambientales dentro de la contratación pública (Kairies, Muñoz y Martínez, 2021) y el desarrollo legislativo en materia de sostenibilidad, a pesar de que se necesitan avances en la estandarización de su uso (Laurent y Owsianiak, 2017).

En primer lugar, por ser la más empleada, la HC mide la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y se expresa en unidades de masa de CO₂ equivalente. Existe una gran cantidad de revisiones bibliográficas relacionadas con el empleo del indicador HC en la construcción (Geng, Mansouri y Aktas, 2017), sin embargo, los resultados no son siempre comparables, debido a la ausencia de una metodología que siga los estándares internacionales (Dossche, Boel y De Corte 2017). Por ello, también

se han realizado estudios en los últimos años para establecer baremos que permitan definir intervalos razonables de emisiones de CO₂ en los procesos constructivos (Chastas, Theodosiou, Kontoleon y Bikas, 2018).

En segundo lugar, destaca el consumo de agua, para ello el indicador HH, mide el volumen de agua empleado, tanto de forma directa (agua consumida desde la red de suministro), así como indirecta, conocida también como Agua Virtual (AV). El concepto fue formulado por Allan (1993) como indicador del agua dulce que se consume en cualquier proceso productivo. Aún puesto en crisis (Velázquez, Madrid y Beltrán, 2011; Beltrán y Velázquez, 2015), el concepto ha tenido un gran desarrollo y resulta de utilidad para conseguir una mejor gestión del agua asociada a los edificios. No obstante, son pocos los estudios sobre edificación que emplean este indicador. El AV en construcción se define como el volumen de agua dulce consumida para producir materiales de construcción a utilizar desde su cuna a la puerta de la fábrica. Sobresalen los estudios australianos del sector terciario que se abocan al consumo de AV durante la etapa de construcción respecto al resto del Ciclo de Vida del Edificio (CVE) (McCormack, Treloar, Palmowski y Crawford, 2007). También Crawford y Pullen (2011) analizaron el agua en el CVE residenciales durante un periodo de 50 años y concluyeron que el AV en materiales de construcción es mayor que el consumo directo de las viviendas, por lo que las políticas sobre el agua deben incluir también los consumos virtuales. Ferriz Papí (2012) realizó un estudio sobre el consumo de agua que utilizan los materiales de construcción a lo largo de su ciclo de vida y obtuvo unos resultados estadísticos similares, durante 3 años en 200 proyectos en Cataluña.

El tercer indicador de la familia de huellas es la HE que se concibe como la superficie de tierra necesaria para suministrar los recursos (cereales, pienso, leña, pescado y terreno urbano) y absorber las emisiones (CO₂) de la sociedad mundial, es decir, mide la superficie de terreno productivo en hectáreas globales (hag). En los últimos años, algunas investigaciones avalan la idoneidad del indicador para el análisis del impacto ambiental de la edificación. Respecto al ciclo de vida del edificio, destacan los trabajos de González, Marrero y Solís (2015), que desarrollan la metodología de cuantificación para la construcción del edificio. Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán y Marrero (2016b), por su parte, diseñan un método de cálculo de los costes económicos e impacto ambiental durante el uso y mantenimiento, arrojando datos en términos de HE. Alba-Rodríguez (2016) propone el desarrollo de una metodología para conocer la viabilidad ambiental de la recuperación de edificios frente a su demolición. Freire, Alba y Marrero (2019) determinan la HE de los elementos que forman parte de las tradicionales bases de costes de la construcción

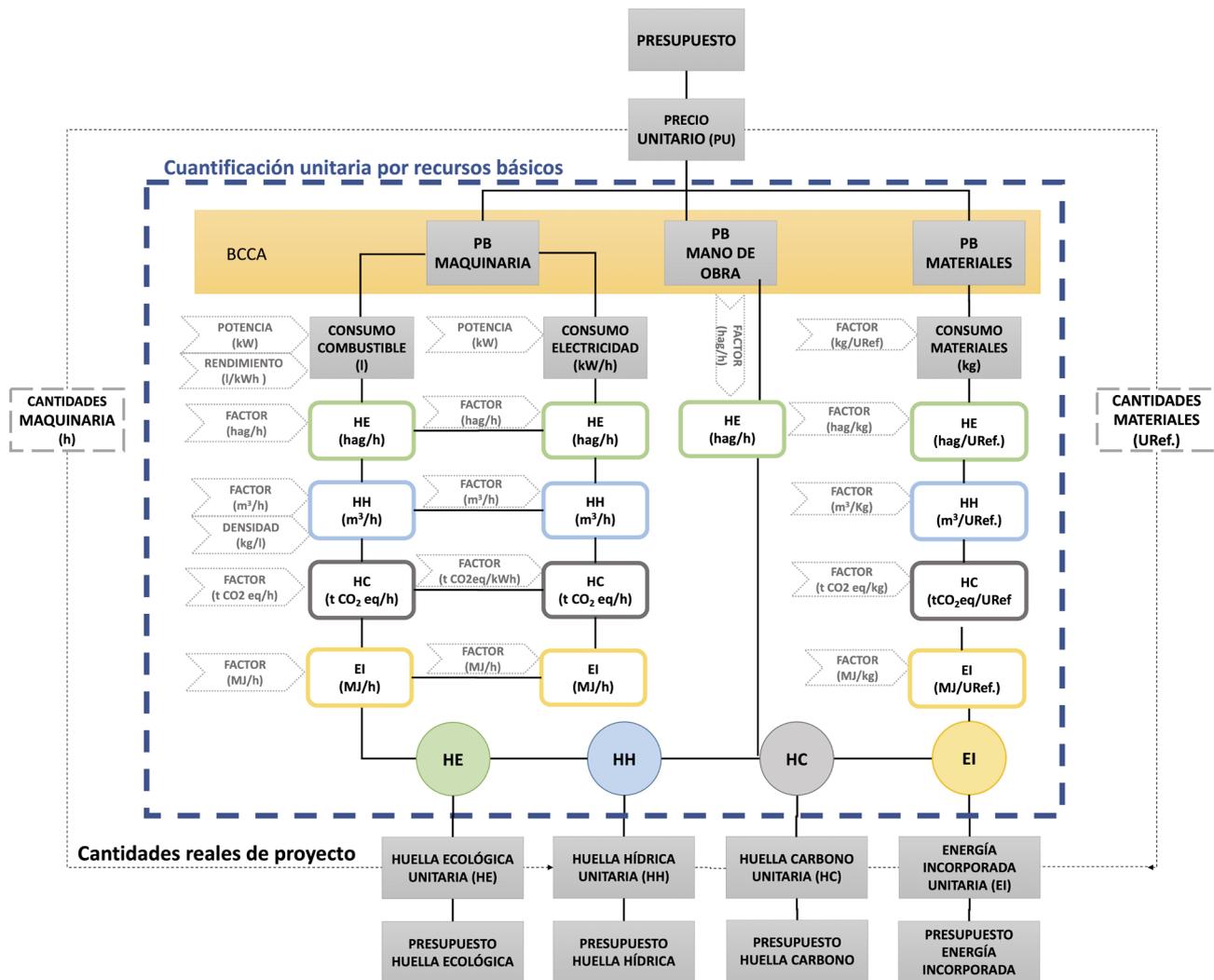
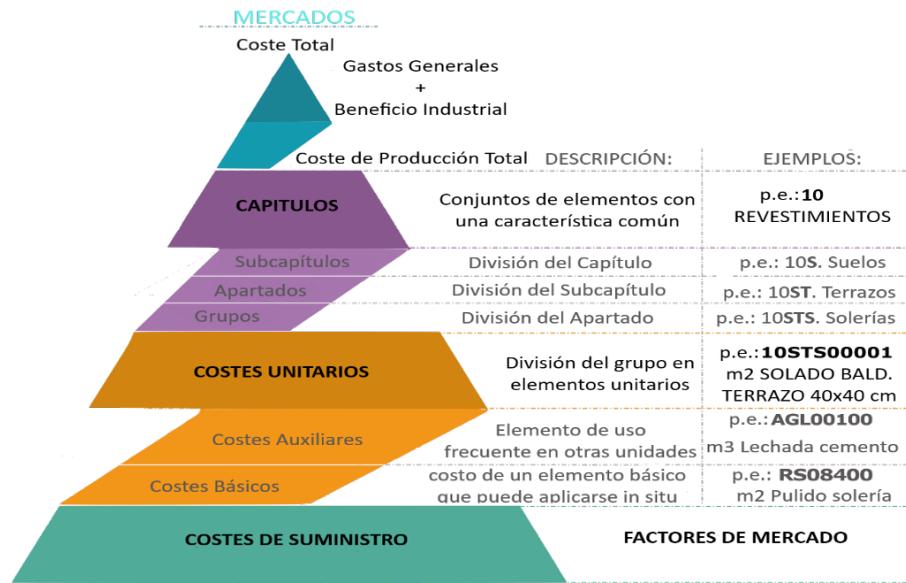


Figura 1. (a) Estructura de precios del BCCA. (b) Aplicación de la metodología general a los costes/precios unitarios. La energía incorporada (EI) es un impacto intermedio que también se calcula. Fuente: (a) Elaborado a partir de Marrero et al., 2020. b) (Rivero, 2020, p. 39).

y, finalmente, Rivero (2020) verifica todas las etapas del CVE de construcciones residenciales desde una nueva perspectiva de "presupuesto ambiental".

Actualmente, la administración pública española ha adquirido el compromiso de minimizar el impacto de su actividad en el medio ambiente. Esto se ve reforzado por las políticas públicas provenientes de la Unión Europea para la contratación pública, las cuales instan a que las adjudicaciones de los contratos se realicen en base a una pluralidad de criterios, económicos, cualitativos y sociales, dotando de gran relevancia los aspectos medioambientales (Ley Contratos del Sector Público, 2017). En consecuencia, se requiere del acercamiento de los presupuestos de los proyectos a este tipo de metodologías de evaluación de impacto ambiental, de manera que estas se adapten a las singularidades de las infraestructuras públicas. Desde esa perspectiva, y siguiendo la línea del presupuesto ambiental, se evalúa aquí el impacto que supone la construcción de un edificio del sector terciario, concretamente, un centro de educación infantil en Madrid, España. Se plantea su análisis global a partir de las tres huellas presentadas: de carbono, hídrica y ecológica.

METODOLOGÍA

Para la consecución del objetivo propuesto, se parte del presupuesto económico de la obra que, siguiendo la estructura de costes establecida por la Ley de Contratos del Sector Público y su reglamento de desarrollo (Reglamento de la Ley de Contratos del Sector Público, 2001), establece la subdivisión del presupuesto en Precios Básicos (PB), Auxiliares (PA) y Unitarios (PU) a los que se asignan los costes directos e indirectos de cada unidad de obra. En la Figura 1a se muestra la clasificación piramidal de dicha estructura de costes/precios en el caso particular de su aplicación en el Banco de Costes de la Construcción de Andalucía (Marrero y Ramírez de Arellano, 2010). Posteriormente, con la medición de unidades de obra o PU, se obtiene el importe de cada uno y, por agregación, el presupuesto total de la obra.

La determinación de los distintos indicadores, HE, HC y HH (Figura 1-b) se realiza siguiendo la metodología definida por Freire y Marrero (2015a). El impacto de los materiales y maquinaria, se calcula mediante la conversión de la unidad de medida del presupuesto a kg. Los impactos por kg se obtienen de la base de datos de análisis de ciclo de vida, Ecoinvent LCA (Ecoinvent Center, 2013), conocida por ser una de las bases más completas a nivel europeo (Martínez-Rocamora *et al.*, 2016a) y por su integración con el software Simapro LCA (PRé Sustainability, 2016). El trabajo es similar al realizado para el cálculo de la HC con la herramienta SOFIAS, que utiliza datos de las

declaraciones ambientales de productos, OpenDAP, o de la plataforma BEDEC, desarrollada por el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña [ITeC] (ITeC, 2013). En la Figura 1-b se expone de forma esquematizada la integración de las huellas en los presupuestos de obra para el caso particular del Banco de Costes de la Construcción de Andalucía (BCCA) (Marrero y Ramírez de Arellano, 2010). La formulación se resume en la Tabla 1, relativa a la HE, y en la Tabla 3, relativa a la HC y la HH. La metodología, que se ordena en tres niveles (datos de entrada, impactos y huellas), permite, desde los datos generales de la obra y los económicos del presupuesto, obtener el impacto ambiental del proyecto. El presente estudio evalúa, dentro del ciclo de vida, la etapa de construcción que incluye lo que se consume dentro de la obra, por lo que los contornos de los impactos corresponden a los criterios de medición en el presupuesto.

La maquinaria de obra se calcula en función de la potencia de motor y las horas de uso en la obra, y se determina la energía consumida en kWh que se transformará en emisiones de CO₂ (Freire y Marrero, 2015a). También se incluye en el cálculo la maquinaria del transporte de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Esta parte del presupuesto de obra se incorpora, en un capítulo independiente, tal y como establece el RD 105/2008 (Marrero y Ramírez de Arellano, 2010) que regula la gestión de RCD en España.

En el caso particular del impacto de la mano de obra, que solo se calcula en el indicador HE, se determina el alimento consumido como fuente energética del trabajador (Tabla 2). Se utiliza como base un menú típico para un adulto compuesto por carnes, pescados, cereales y agua (Grunewald, Galli, Katsunori, Halle y Gressot, 2015), y se determina la HE relativa en: pastos, mar y cultivo. La HE de la mano de obra incluye asimismo sus Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que corresponde a la media generada por cada trabajador y sus correspondientes factores de emisiones.

La HE tiene en cuenta, además, el impacto debido a la superficie de terreno ocupada, que no será productiva agrícolamente, y el agua consumida en la ejecución. A todos los impactos se asigna una HE parcial en distintas categorías del indicador (mar, pastos, cultivos, suelo) para, en definitiva, a través de factores de conversión, obtener la huella global en una superficie equivalente.

En los consumos directos de agua y energía en la propia ejecución de la obra, se han establecido de manera empírica el valor del consumo en metros cúbicos de agua en función de la superficie construida (González *et al.*, 2015), a la que se aplica la transformación en emisiones de CO₂ a través de la energía en kWh necesarios para obtener un metro cúbico de agua. De manera análoga, se determina la energía eléctrica consumida (Freire y Marrero, 2015b).

HUELLA ECOLÓGICA		n° ecuación
Mano de obra		
HE _{COMIDA} : HE producida por el consumo de alimentos (hag)		
$HE_{COMIDA_i} = (H_{TRAB} / H_D) \times (PC/100) \times (HE_i / 365)$		1
H _{TRAB} : Número de horas trabajadas (h)		
H _D : Número de horas trabajadas por día (8h/día/persona)		
PC: Porcentaje que representa el desayuno y el almuerzo de la comida del trabajador (60%)		
HE _i : Huella del consumo de comida en categoría i de HE (gha/persona) (Tabla 2)		
365: días en un año		
HE _{RSU} : HE producida por los residuos sólidos urbanos (hag)		
$HE_{RSU} = (H_{TRAB} \times R_{RSU} \times E_{RSU} \times 0.72) / A_F \times FE_B$		2
R _{RSU} : Cantidad de RSU producido por hora de trabajo (0.000077 t/h por persona) (EUROSTAT 2015);		
E _{RSU} : factor de emisiones por residuo (0.244 t CO ₂ /tRSU) (Almasi y Milios, 2013)		
0.72: CO ₂ absorbido por los bosques. El 28% restante, absorción de océanos (Borucke et al., 2013)		
A _F : factor de absorción de los bosques (3.59t CO ₂ /ha)		
FE _B : factor de equivalencia de los bosques (hag/ha)		
Materiales		
HE _{MAT} : HE de materiales de construcción (ha)		
$HE_{MAT} = ((\sum C_i \times E_{MAT_i}) \times 0.72) / A_F \times FE_B + HE_{TRAN} \times Cm$		3
C _i : consumo del material i (kg)		
E _{MAT} : emisiones por material (kg CO ₂ /kg material)		
HE _{TRAN} : huella ecológica del transporte de materiales de construcción (ha/kg)		
Maquinaria		
V: consumo de combustible (litros) (50)		
$V = (Pot \times TU \times Rend)$		4
Pot: potencia de motor de la maquinaria eléctrica (kW)		
TU: tiempo utilización según mediciones (horas)		
Rend: combustible consumido por el motor según sea gasoil o gasolina (l/kWh)		
HE _{COMB} : HE consumo combustible (fósil) de maquinaria (hag)		
$HE_{COMB} = (V \times E_{COMB} \times 0.72) / A_F \times FE_B$		5
E _{COMB} : factor de emisión del combustible (kg CO ₂ /litros). Dato español: 2.616 kg CO ₂ /l (IDAE, 2011);		
HE _{ELEC} : HE consumo electricidad de maquinaria (hag)		
$HE_{ELEC} = ((Pot \times TU) \times E_{ELEC} \times 0.72) / A_F \times FE_B$		6
E _{ELEC} : factor de emisión del mix energético (kg CO ₂ /kWh). Dato español: 0.248 kg CO ₂ /kWh (REE, 2014).		
Agua consumida		
HE _{AGUA} : HE de agua consumida (hag)		
$HE_{AGUA} = ((C \times IE_{AGUA} \times E_{AGUA} \times 0.72) / A_F) \times FE_B$		7
C: consumo (m ³)		
IE _{AGUA} : intensidad energética del agua (0.44 kWh/m ³) (EMASESA, 2005)		
E _{AGUA} : factor de emisión de electricidad (0.000248 kg CO ₂ /kWh) (REE, 2014)		
Superficie consumida		
HE _{sup} : HE de superficie consumida (hag)		
$HE_{sup} = S \times FE_x$		8
S: superficie de ocupación directa (ha)		
FE _x : factor de equivalencia de la superficie construida (hag/ha).		

Tabla 1. Formulación del modelo HE. Fuente: Elaboración de los autores.

Cultivos (10 ⁻³ gha)	Pastos (10 ⁻³ gha)	Mar (10 ⁻³ gha)	Fósil (10 ⁻³ gha)
1,45	0,27	0,41	0,49

Tabla 2. HE del consumo de comida diario por año y persona en España. Fuente: González Vallejo (2017, p. 270).

HUELLA DE CARBONO	
Materiales	
HC _{MAT} : HC de materiales de construcción (tCO ₂ ,eq)	
$HC_{MAT} = (\sum_i C_{m_i} \times E_{MAT}) + (HC_{TRAN} \times C_m)$	9
C _m : consumo del material i (kg)	
E _{MAT} : emisiones por material (tCO ₂ ,eq/kg material)	
HC _{TRAN} : huella de carbono del transporte de materiales de construcción (tCO ₂ ,eq/kg)	
Maquinaria	
V: consumo de combustible (litros)	
$V = (Pot \times TU \times Rend)$	10
Pot: potencia de motor de la maquinaria eléctrica (kW)	
TU: tiempo utilización según mediciones (horas)	
Rend: combustible consumido por el motor según sea gasoil o gasolina (l/kWh)	
HC _{COMB} : HC consumo combustible (fósil) de maquinaria (tCO ₂ ,eq)	
$HC_{COMB} = V \times E_{COMB}$	11
E _{COMB} : factor de emisión del combustible (tCO ₂ ,eq/litros). Dato: 2.616 kg CO ₂ /l (IDAE, 2011);	
HC _{ELEC} : HC consumo electricidad de maquinaria (tCO ₂ ,eq)	
$HC_{ELEC} = (Pot \times TU) \times E_{ELEC}$	12
E _{ELEC} : factor de emisión del mix energético (kg CO ₂ /kWh). Dato: 0.248 kg CO ₂ /kWh (REE, 2014).	
HUELLA HÍDRICA	
Materiales de construcción	
<i>WF_{ma}: Huella Hídrica parcial del consumo de materiales (m³)</i>	
$WF_{ma} = \sum (C_{mai} \cdot VW_{mai})$	13
C _{mai} : Consumo de materiales i (kg)	
VW _{mai} : Agua virtual del material i (m ³ /kg)	
WF _{tr} : Huella parcial del transporte del material (m ³)	
$WF_{tr} = \sum (\frac{W_{mai}}{T_{cap}} \cdot D_{ma}) \cdot T_{con} \cdot VW_f$	14
W _{mai} : Peso del consumo material i (t)	
T _{cap} : Capacidad del transporte (t)	
D _{ma} : Distancia media de transporte (km)	
T _{con} : Consumo de combustible del transporte (l/100 km)	
VW _f : Factor de agua virtual del combustible (m ³ /l)	
Maquinaria.	
WF _{mc} : Huella hídrica parcial de la maquinaria (m ³)	
$WF_{mc} = \sum (H_{mci} \cdot C_{fi} \cdot VW_{fi})$	15
H _{mci} : Horas de uso de la maquinaria i (h)	
C _{fi} : Factor de consumo de la maquinaria i (l/h or kW)	
E _{fi} : Factor de agua virtual del combustible usado por la maquinaria i (m ³ /l or m ³ /kWh)	

Tabla 3. Formulación modelos HC y HH. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 2. a) Foto real b) Alzado principal y laterales del CEI en El Goloso. Fuente: a) Elaborada a partir de Google map. b) Extraída de Barbero (2018, p. 352).

ESTUDIO DE CASO

España cuenta con 34.168 centros educativos no universitarios, según el Registro Estatal de Centros Docentes no Universitarios del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. De ellos, la mayoría son públicos (el 65,9%). Por ello, como edificio público representativo, para el estudio de caso se calcula el impacto de la construcción de un centro de educación infantil en El Goloso, Madrid. El edificio es dos plantas, posee una superficie construida total de 874,72m² y está completamente dotado para dar cabida a 84 niños. Se ha seleccionado un edificio con soluciones constructivas más frecuentes de las edificaciones públicas actuales en España y que, a su vez, contempla una amplia variedad de partidas de obra distintas al albergar diferentes dotaciones e instalaciones. Está compuesto por aulas, aseos, servicio de cocina, asistencia médica y administración. Su planta se desarrolla en U, alrededor del patio de juegos parcialmente cubierto y su acceso se realiza a través de la fachada principal (Figura 2). Su presupuesto es 1.834.831,14€ y se ha ejecutado en un plazo de 12 meses.

Constructivamente, se soporta sobre cimentación por losa armada de hormigón, estructura de forjado sanitario en planta baja y losa superior de hormigón armado, apoyada esta última sobre pilares de hormigón armado. El cerramiento principal se caracteriza por su fachada

ventilada con acabado en paneles de aluminio lacado y aislamiento de lana de roca, mientras que las fachadas laterales y la trasera se resuelven con un cerramiento de doble hoja de fábrica de ladrillo revestida con mortero monocapa de acabado blanco. Las divisiones interiores se realizan con sistema de paneles de yeso laminado y falsos techos desmontables. La cubierta del edificio es plana y ajardinada, y el patio de juegos cuenta con un muro verde y pavimentos de caucho adaptados al uso infantil. Las carpinterías interiores son de madera y las exteriores de aluminio, con rotura de puente térmico y acristalamiento doble. Los acabados interiores son suelos en linóleo, salvo en la cocina y aseos, que son de gres antideslizante. A nivel de instalaciones, el edificio dispone de los elementos básicos de saneamiento, agua, electricidad, climatización, comunicaciones y protección contra incendios. En cuanto a la urbanización, se sustituyen parcialmente pavimentos, acerados y conexión a las instalaciones generales y viales del entorno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer paso consiste en obtener de las bases de datos de análisis de ciclo de vida el impacto por familias de materiales de construcción, (Tabla 4). Estos datos se aplican las cantidades de unidades del proyecto recogidas en el presupuesto.

MATERIAL	HH (m ³ /t)	HE (hag/t)	HC (t CO ₂ eq. /t)
Suelo	0	0,005	0,004
Madera	2,62	-0,483	-0,990
Hormigón	1,68	0,057	0,112
Asfalto	3,0	0,098	0,21
Cerámica	1,0	0,107	0,22
Áridos y piedras	1,2	0,005	0,004
Metales	81	0,907	2,01
Plásticos	456	0,898	1,97
Vidrio	17	0,30	0,669
Morteros y pastas	67	0,294	0,610

Tabla 4. Huellas de las familias de materiales por tonelada. Fuente: Elaboración de los autores.

Capítulos del proyecto	HE (hag)	HC (tCO ₂ eq)	HH (m ³)
C01.: Demoliciones	22,747	53,426	685,630
C02.: Acondicionamiento de terrenos	23,270	57,177	705,403
C03.: Cimentación	52,062	122,665	2012,721
C04.: Saneamiento	7,056	17,153	301,713
C05.: Estructura	50,776	116,693	1904,439
C06.: Albañilería	62,697	138,381	2107,457
C07.: Cubierta	13,188	26,854	723,513
C08.1: Inst. Climatización y ventilación	5,812	11,913	387,321
C08.2: Inst. Eléctrica	4,988	15,967	176,894
C08.3: Inst. Agua (Suministro y evacua)	13,206	26,404	190,653
C08.4: Inst. Producción agua caliente	9,524	23,723	759,060
C08.5: Inst. Accesibilidad	14,628	32,875	297,379
C09. Aislamientos	3,133	8,874	148,149
C10. Revestimientos	30,980	66,404	1783,008
C11. Carpintería, seguridad y protección	7,866	16,487	380,069
C12. Vidriería	3,719	8,292	250,583
C13. Pinturas	6,671	10,516	268,751
C15. Urbanización	29,263	64,923	949,244
TOTAL	361.586	818,728	14031,988

Tabla 5. Resultados obtenidos por capítulos de proyecto. Fuente: Elaboración de los autores.

En el proyecto se obtiene una HE total de 361,6 hectáreas globales/ año (Tabla 5), donde las actividades relacionadas con los trabajos de albañilería corresponden a un 17,3% del total, los que presentan una mayor HE, seguidos de la cimentación y la estructura, con un 14,4% y 14,0%, respectivamente. El peso total de los materiales del edificio es de 1.986.086,61 kg, los cuales suponen una

repercusión de 2.270,54 kg/m². Y se generan 95.136,07 kg de RCD o 108,76 kg /m² de superficie construida.

Los materiales con un mayor impacto ambiental, con más del 69% de la HE, se presentan en este orden: hormigones, metales y aleaciones y cerámicas (Figura 3). Dado lo anterior, cambios en la energía incorporada en los

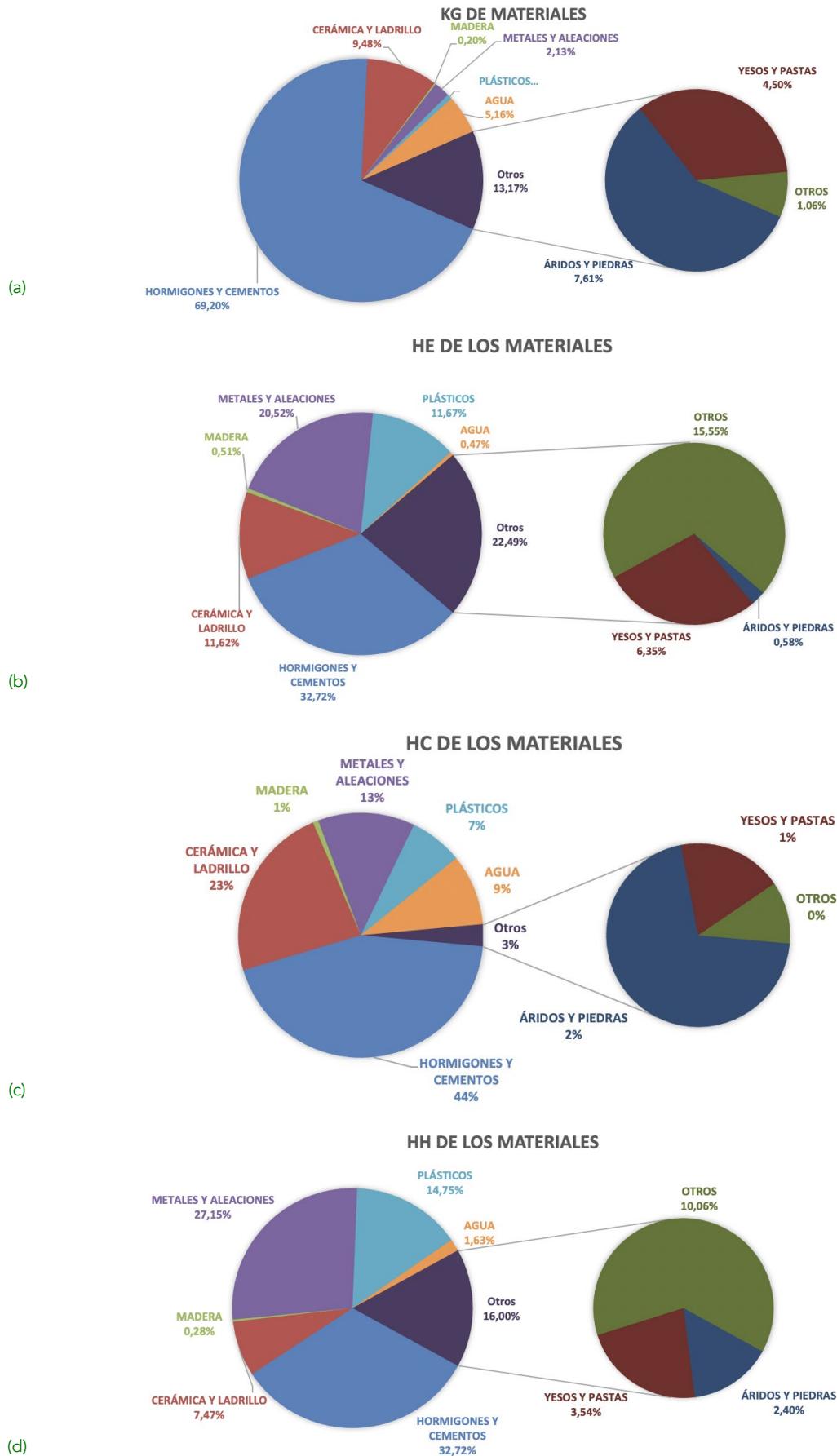


Figura 3. (a) El peso de los materiales en el proyecto. Huellas de los materiales: (b) ecológica; (c) carbono; (d) hídrica. Fuente: Elaboración de los autores.

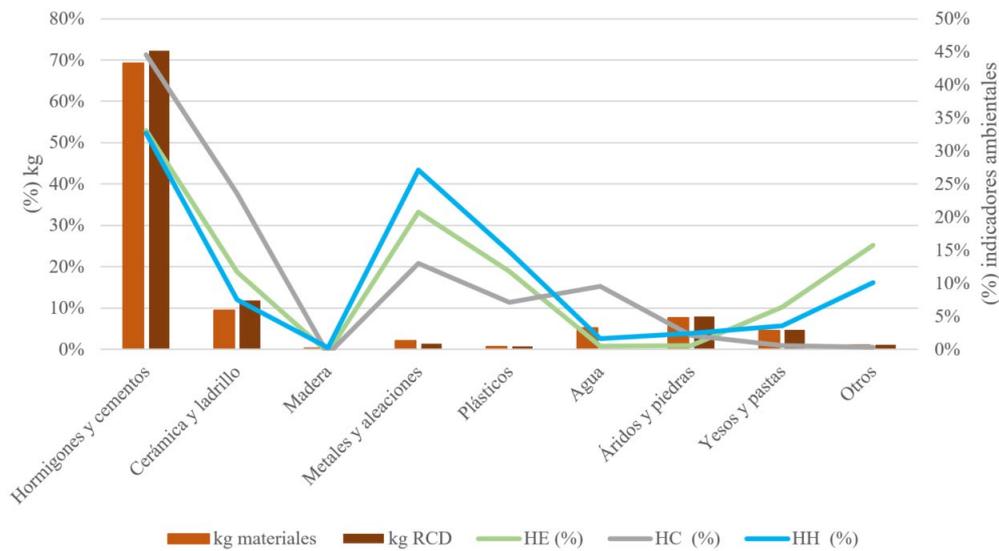


Figura 4. Impactos por familias de materiales. Fuente: Elaboración de los autores.

procesos de manufactura, o en las emisiones de sus procesos, como por ejemplo el empleo de materiales reciclados en estos o con un alto contenido de residuos, pueden reducir significativamente la huella del proyecto (Freire *et al.*, 2019). Estos materiales son igualmente los que más pesan dentro del conjunto: el hormigón corresponde a casi el 70% del peso total, y destaca el peso del agua que representa el 15% del total. En el cálculo de las otras huellas, tal como en el trabajo de Marrero, Rivero y Alba (2020), son los mismos materiales los que registran el mayor impacto. La HE de los materiales de construcción representa el 80% del total del proyecto, frente a un 18,5% de la maquinaria; mientras que el impacto de los trabajadores apenas supone un 1,5% del total.

En relación a la HC (Figura 3), se comprueba el alto impacto de los hormigones en el proceso con un 44%, seguidos de los elementos cerámicos con un 23%, mientras que los materiales metálicos y las aleaciones suponen un 13% de su HC. En el extremo opuesto se encuentran las maderas, con sólo un 1% del impacto. Esta huella tiene las mismas proporciones que la ecológica debido a la gran importancia de los materiales de construcción en ambos cálculos. A nivel total se calcula un impacto de HC de 653,62 tCO₂eq y una repercusión de 0.7472 tCO₂eq/m².

La HH de los materiales mantiene la línea de las dos anteriores, según se exhibe en la Figura 4, pese a que se reduce el impacto del hormigón respecto a la HC, bajando hasta el 32%. Por el contrario, se observa el aumento del impacto en metales y aleaciones, frente a la reducción en importancia de los materiales cerámicos, al 7%. Destaca el bajo impacto mantenido de la madera. El volumen total de la HH se estima en 12.601m³, lo que significa una

repercusión de 14,340 m³/m² de construcción. En la Figura 4 se muestran los resultados de los impactos de los materiales de construcción en porcentajes, que permiten comparar la importancia de cada tipo y, simultáneamente, exponer los respectivos residuos generados. Se puede apreciar cómo la huella hídrica es menos importante en los materiales cerámicos que en el caso de los metales, al contrario que la huella de carbono, por lo que un solo indicador no parece suficiente para resaltar los materiales que se deben mejorar en el proyecto. Hormigones y cementos son los materiales más masivos, con mayor cantidad de RCD y, a su vez, los más impactantes en todas las categorías, de manera que ejercer acciones en la reducción de su impacto representarán una mejora global del proyecto. Por otro lado, los metales, aunque en peso y residuos no son significativos, su impacto es muy alto en todas las huellas y debe ser la segunda categoría a mejorar en la sustitución por soluciones constructivas más sostenibles.

En el análisis por capítulos de proyecto, los resultados son muy similares a los obtenidos por otras autoras (González, Muñoz Sanguinetti y Marrero, 2019). En el caso del análisis de vivienda social, donde los capítulos con mayor impacto son la cimentación, las estructuras y la albañilería, una vez más, debido a los materiales que se emplean en grandes volúmenes, estos suponen el uso de mucha energía y emisiones de CO₂ incorporados en sus procesos de manufactura. Se puede, por ello determinar que, a pesar de las diferencias constructivas y técnicas de los edificios públicos educativos, que se dotan de mayores instalaciones electromecánicas y materiales más singulares, el impacto medioambiental de los mismos se encuentra en línea con los edificios residenciales.

CONCLUSIONES

El modelo propuesto por Rivero (2020) combina la evaluación de las huellas junto a la valoración económica de la construcción de edificios. Con el presente trabajo se comprueba la adaptabilidad de la metodología consolidada existente para la evaluación y control ambiental de los proyectos de cualquier tipología de edificaciones, ya que se basa en una estructura de costes o sistemas de clasificación sistemática de precios.

Siendo una metodología nutrida desde los actuales sistemas de clasificación, permite a los profesionales del sector desarrollar rápidamente un presupuesto económico y que puede llegar a incorporar el impacto medioambiental. El análisis de las huellas incluye los materiales de construcción desde la cuna de hasta el sitio (obra) de todos los elementos que forman parte del proyecto. También se incluye la mano de obra, por su fuente de energía (ingesta de alimentos), y la maquinaria, por sus consumos energéticos.

La presente metodología puede ser implementada de una forma fácil y satisfactoria por la administración pública española. Esto es gracias a que proviene del modelo de tradicional de clasificación de los trabajos, el cual es ampliamente utilizado por los técnicos intervinientes en el proceso constructivo. En el presente estudio se empleó la clasificación sistemática del Banco de Costes de la Construcción de Andalucía, pero bien podría replicarse con otras clasificaciones o banco de costes nacionales. La claridad de los datos obtenidos y su fácil interpretación por el personal no especializado hacen del modelo una valiosa herramienta para la evaluación del impacto medioambiental de la construcción.

La principal diferencia entre los proyectos públicos y los privados radica en las soluciones constructivas empleadas, así como en el consumo de recursos por superficie construida. Sería recomendable aplicar el modelo a otros tipos de construcciones públicas como museos, oficinas, centros de comunicación, etc., tanto en los que se ejecuten en nueva planta como en los que reformen en edificaciones existentes, dentro del espectro de las infraestructuras públicas, dadas las singularidades constructivas de cada uno de ellos. De ese modo, es posible definir impactos de referencia que sirvan como base para la toma de decisiones ambientales en el proceso constructivo. Los resultados obtenidos en este trabajo sirven como punto de partida para generar nuevas referencias de impacto de edificaciones públicas y bases de datos para futuras investigaciones con las que comparar y efectuar propuestas de mejora en los diseños de los proyectos evaluados.

Como conclusión, y debido a que el cálculo de las huellas se fundamenta en el presupuesto de la obra,

dentro de los procedimientos de contratación pública pueden desarrollarse sistemas de valoración de las propuestas de los licitadores para minimizar el impacto de la construcción que, además, formen parte de los pliegos de contratación. Así se podría ofrecer un soporte técnico a la valoración de medidas de mejora medioambientales en la licitación pública.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al VI Plan Propio de la Universidad de Sevilla por financiar parte del trabajo de investigación contenido en la presente comunicación, a través de un contrato pre-doctoral o PIF, referencia VIPPIT-2016-IV.3, para el desarrollo del programa I+D+i, durante cuatro años, desde 2016 a 2020.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAN, J. A. (1993). Fortunately there are Substitutes for Water Otherwise our Hydro-political Futures would be Impossible. En *Priorities for Water Resources Allocation and Management* (13-26). London: ODA.

ALMASI, A. M. Y MILIOS, L. (2013). *Municipal waste management in Spain*. European Environment Agency. Recuperado de https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/UD8Z6VW5GB

BARBERO ARRABÉ, I. (2018). *Proyecto de construcción de Centro de Educación Infantil*. Madrid: Centro de Proyectos del Ejército. Dirección de Infraestructura (DIIN).

BARE, J., HOFSTETTER, P., PENNINGTON, D.W. Y UDO DE HAES, H.A. (2000). Life cycle impact assessment workshop summary. Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6), 319-326.

BELTRÁN, M. J. Y VELÁZQUEZ, E. (2015). La ecología política del agua virtual y huella hídrica. Reflexiones sobre la necesidad de un análisis crítico de los indicadores de flujos virtuales de agua en la economía. *Revista de Economía Crítica*, (20). Recuperado de <http://www.revistaeconomiacritica.org/node/770>

COMISIÓN NACIONAL DEL MERCADO Y LA COMPETENCIA (2019). *Radiografía de los procedimientos de contratación pública en España*. Madrid: Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. Recuperado de <https://www.cnmc.es/expedientes/ecnmc00418>

CHASTAS, P., THEODOSIOU, T., KONTOLEON, K. J. Y BIKAS, D., (2018). Normalizing and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings. *Building and Environment*, 130, 212-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.032>

CRAWFORD, R. H. Y PULLEN, S. (2011). Life cycle water analysis of a residential building and its occupants. *Building Research and Information*, 39(6), 589-602. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.584212>

DOSSCHE, C., BOEL, V. Y DE CORTE, W. (2017). Use of life cycle assessments in the construction sector: critical review. *Procedia Engineering*, 171, 302-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.338>

ECOINVENT CENTER (2013). *Ecoinvent database v3 Ecoinvent Report*. Recuperado de www.ecoinvent.org

EMASESA (2005). *Sostenibilidad y Gestión. Éramos así, así somos (1975-2005)*. Recuperado de <https://www.emasesa.com/asi-eramos-asi-somos-1975-2005/>

FÉRRIZ PAPÍ, J.A. (2012). Water consumption in buildings: Embedded water in construction materials. Trabajo presentado en *1st International Congress on Water, Waste and Energy Management*. Salamanca. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/277716798_Water_Consumption_in_Buildings_Embedded_Water_in_Construction_Materials

FREIRE GUERRERO, A., ALBA RODRÍGUEZ, M^a D. Y MARRERO MELÉNDEZ, M. (2019). A budget for the ecological footprint of buildings is possible: a case study using the dwelling construction cost database of Andalusia. *Sustainable Cities and Society*, 51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101737>

FREIRE GUERRERO, A. Y MARRERO, M. (2015a). Ecological Footprint in Indirect Costs of Construction. *Proceedings of the II International congress on sustainable construction and eco-efficient solutions: Seville 25-27 may 2015* (pp. 969-980). Recuperado de <http://hdl.handle.net/11441/59685>

FREIRE GUERRERO, A. Y MARRERO, M. (2015b). Evaluación a través del presupuesto de la energía incorporada al proyecto de edificación. *Revista Hábitat Sustentable*, 5(1), 54-63. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/1812>

FUNDACIÓN GENERAL DE LA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID (2010). *Cambio Global España 2020/50. Sector edificación*. Programa Cambio Global España 2020/50 del Centro Complutense de Estudios e Información Medioambiental. Madrid.

GENG, R., MANSOURI, A. Y AKTAS, E. (2017). The relationship between green supply chain management and performance: A meta-analysis of empirical evidences in Asian emerging economies. *International Journal of Production Economics*, 183, 245-258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.10.008>

GONZÁLEZ VALLEJO, P., MUÑOZ SANGUINETTI, C. Y MARRERO MELÉNDEZ, M. (2019). Environmental and economic assessment of dwelling construction in Spain and Chile. A comparative analysis of two representative case studies. *Journal of Cleaner Production*, 208, 621-635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.063>

GONZÁLEZ VALLEJO, P. (2017). *Evaluación económica y ambiental de la construcción de edificios residenciales. Aplicación a España y Chile*. Tesis doctoral de Arquitectura, Universidad de Sevilla.

González Vallejo, P., Marrero, M. y Solís Guzmán, J. (2015). The ecological footprint of dwelling construction in Spain. *Ecological Indicators*, 52, 75-84, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.016>.

GRUNEWALD, N., GALLI, A., KATSUNORI, I., HALLE, M. Y GRESSOT, M. (2015). *The Ecological Footprint of Mediterranean Diets*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/275349456_The_Ecological_Footprint_of_Mediterranean_Diets

IDAE (2011). *Factores de Emisión de CO₂*. Recuperado de <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones>

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN DE CATALUÑA (ITEC) (2013). Recuperado de <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx> (accessed on Dec 3, 2013).

KAIRIES ALVARADO, D., MUÑOZ SANGUINETTI, C. Y MARTÍNEZ ROCAMORA, A., (2021). Contribution of energy efficiency standards to life-cycle carbon footprint reduction in public buildings in Chile, *Energy and Buildings*, 236, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110797>

LAURENT, A. Y OWSIANIAK, M. (2017). Potentials and limitations of footprints for gauging environmental sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 25, 20-27, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.04.003>

MARTÍNEZ-ROCAMORA, A., SOLÍS-GUZMÁN, J. Y MARRERO, M. (2016a). LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 565-573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.243>

MARTÍNEZ-ROCAMORA, A., SOLÍS-GUZMÁN, J. Y MARRERO, M. (2016b). Toward the Ecological Footprint of the use and maintenance phase of buildings: Utility consumption and cleaning tasks. *Ecological Indicators*, 69, 66-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.007>

MARRERO, M. Y RAMÍREZ DE ARELLANO, A. (2010). The building cost system in Andalusia: application to construction and demolition waste management. *Construction Management and Economics*, 28(5), 495-507. DOI: <https://doi.org/10.1080/01446191003735500>

MARRERO, M., RIVERO, C. Y ALBA, M^a D. (2020). What are we discarding during the life cycle of a building? Case studies of social housing in Andalusia, Spain. *Waste Management: international journal of integrated waste management, science and technology*, 102, 391-403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.002>

MCCORMACK, M., TRELOAR, G.J., PALMOWSKI, L. Y CRAWFORD, R. (2007). Modelling direct and indirect water requirements of construction. *Building Research and Information*, 35(2), 156-162. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613210601125383>

PRÉ SUSTAINABILITY (2016). Simapro 8. Recuperado de <https://simapro.com/>

REE (2014-2018). El Sistema Eléctrico Español / The Spanish Electric System. Recuperado de <https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/informe-anual-sistema/informe-del-sistema-electrico-espanol-2018>

RIVERO, C. (2020). *Estudio de Huellas en el Ciclo de Vida del Edificio Residencial*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.

VANHAM, D., LEIP, A., GALLI, A., KASTNER, T., BRUCKNER, M., UWIZEYE, A., VAN DIJK, K., ... Y HOEKSTRA, A. (2019). Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs. *Science of The Total Environment*, 693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133642>

VELÁZQUEZ, E., MADRID, C. Y BELTRÁN, M. J. (2011). Rethinking concepts of virtual water and water footprint in relation to the production–consumption binomial and the water–energy nexus. *Water Resources Management*, 25, 743–761. DOI:10.1007/s11269-010-9724-7

ZHANG, L., DZAKPASU, M., CHEN, R. Y WANG, X. (2017). Validity and utility of ecological footprint accounting: A state-of-the-art review. *Sustainable Cities and Society*, 32, 411-416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.016>