

# Estudio de la HUELLA ECOLÓGICA *de la transformación del uso del suelo*

La construcción no es solo un asunto de edificios y ciudades, sino que comprende más agentes, actuaciones y transformaciones que determinan la manera en que el fenómeno de la construcción respeta o incumple los principios y criterios del desarrollo sostenible a través de todo su ciclo de vida: urbanización del suelo rústico, construcción de edificios, uso y mantenimiento, y demolición o rehabilitación. Dentro de este ciclo, al principio se produce un fuerte impacto, al transformar el suelo rústico en urbano. Por ello, el presente trabajo analiza su huella ecológica (HE), teniendo en cuenta los siguientes impactos: maquinaria, mano de obra, materiales de construcción y superficie edificada.

El presente análisis se realiza desde una nueva perspectiva en la evaluación del impacto ambiental de la construcción, el presupuesto ecológico, incorporando dentro de la estructura la Base de Costes de la Construcción de Andalucía (BCCA), una parte medioambiental. Finalmente, la metodología propuesta permitirá obtener la HE producida por los proyectos de edificación junto con su presupuesto.

Por **MADelyn MARRERO MELÉNDEZ**. Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad de Sevilla. Profesora Titular de la Universidad de Sevilla (madelyn@us.es). **ANTONIO FREIRE GUERRERO**. Máster en Gestión Integral de la Edificación por la Universidad de Sevilla (afreire@us.es). **JAIME SOLÍS-GUZMAN**. Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad de Sevilla. Profesor Ayudante Doctor (jaimesolis@us.es). **CRISTINA RIVERO CAMACHO**. Máster en Gestión Integral de la Edificación por la Universidad de Sevilla (cririvcam@gmail.com).

**E**n 1993, la World Wildlife Fund (WWF) definió el término construcción sostenible no solo con los edificios propiamente dichos, sino también incluyendo su entorno y la manera en que «se comportan» para formar las ciudades. La construcción, y otros agentes intervinientes de forma directa o indirecta, tiene notables impactos ambientales en cuanto a consumo de recursos

naturales y energía, emisión de gases de efecto invernadero y generación de residuos; de ahí la necesidad de considerar la dimensión ambiental como clave en un enfoque de construcción sostenible. La construcción es responsable de más del 40 por ciento de los recursos naturales, el 30 por ciento del consumo de energía y el 30 por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero; y también





Se ha desarrollado una metodología para calcular la huella ecológica producida por la transformación del suelo rural a urbano

Latinstock

de una parte significativa del consumo de madera y de agua en el mundo <sup>[1]</sup>.

Ante el problema del cambio climático y las constantes necesidades de implantar mejoras en el aspecto medioambiental, dos profesores de la Universidad de la Columbia Británica, Wackernagel y Rees, definieron el concepto huella ecológica (HE). Estos investigadores crearon un indicador que permite la comparación

de la huella provocada por continentes, países, regiones, etc., definida como «el área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuático) necesaria para producir los recursos consumidos y asimilar los residuos producidos por una población dada, con un nivel de vida específico, de forma indefinida» <sup>[2]</sup>. Se muestra de forma esquemática en la Figura 1.

El indicador HE puede ser aplicado al proyecto íntegro de la edificación, donde calcula la huella generada por las diferentes fuentes de impacto (energética, suministro de agua, consumo de alimentos, movilidad, materiales de construcción, residuos y superficie ocupada directamente).

En nuestro caso, se desarrolla una metodología para determinar la huella

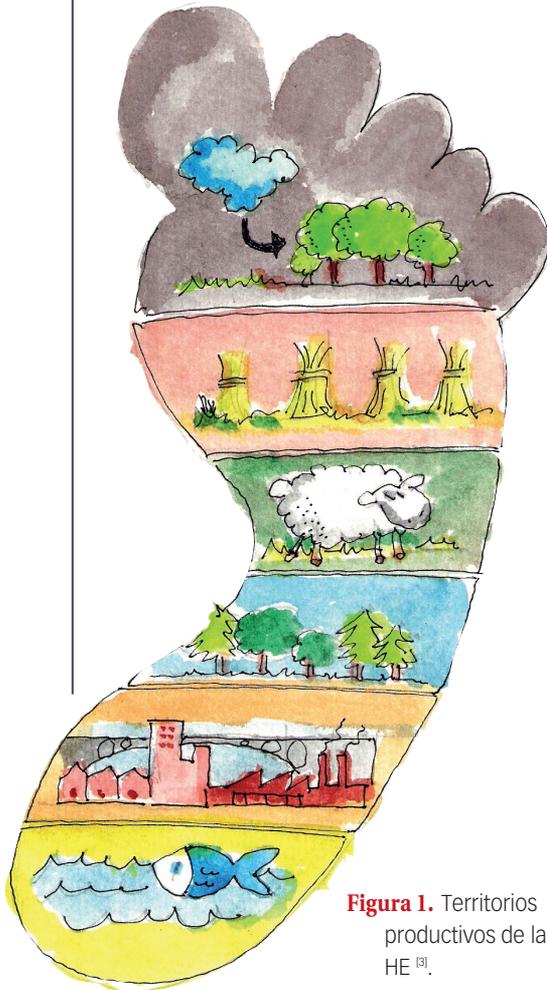


Figura 1. Territorios productivos de la HE [3].

ecológica de la transformación del uso del suelo partiendo de la medición del proyecto, su presupuesto y localización.

## Metodología

### La transformación del suelo

En la Figura 2 se pueden apreciar los diferentes componentes que forman parte de la huella ocasionada por la transformación del uso del suelo, conceptos clasificados en varios niveles. Los componentes se definen a partir de la medición en el proyecto de urbanización (caja naranja) y de los precios unitarios según su clasificación en la BCCA (caja azul). Otros componentes como el agua consumida o la ocupación directa del territorio se obtienen de la memoria general de proyecto o de datos empíricos de otros proyectos. Cada coste directo o indirecto necesita recursos: mano de obra, ma-

quinaria y materiales, que a su vez generan distintos tipos de huellas.

### Maquinaria

En este punto se estudia la huella provocada por la utilización de maquinaria, concretamente por su consumo de energía (tanto consumo de combustible como energía eléctrica), vinculándola a la potencia de su motor. Se ha diferenciado, por un lado, la huella producida por el propio empleo de la maquinaria y, por otro, la producida por el trabajador que la opera. La Figura 3 refleja el camino necesario para convertir las horas de trabajo de la máquina en HE de energía.

Para obtener el consumo de combustible se emplea el *Manual de maquinaria* elaborado por SEOPAN [4]. Una vez obtenidos los litros de combustible consumidos, se aplica la intensidad energética del combustible (MJ/l), que representa la energía producida por cada litro. Este dato se multiplica por la correspondiente productividad energética, o dicho de otro modo, por la cantidad de territorio de bosque necesario para absorber las emisiones producidas.

Para el consumo de energía eléctrica se sigue un camino similar al del combustible, ya que se ha analizado la ma-

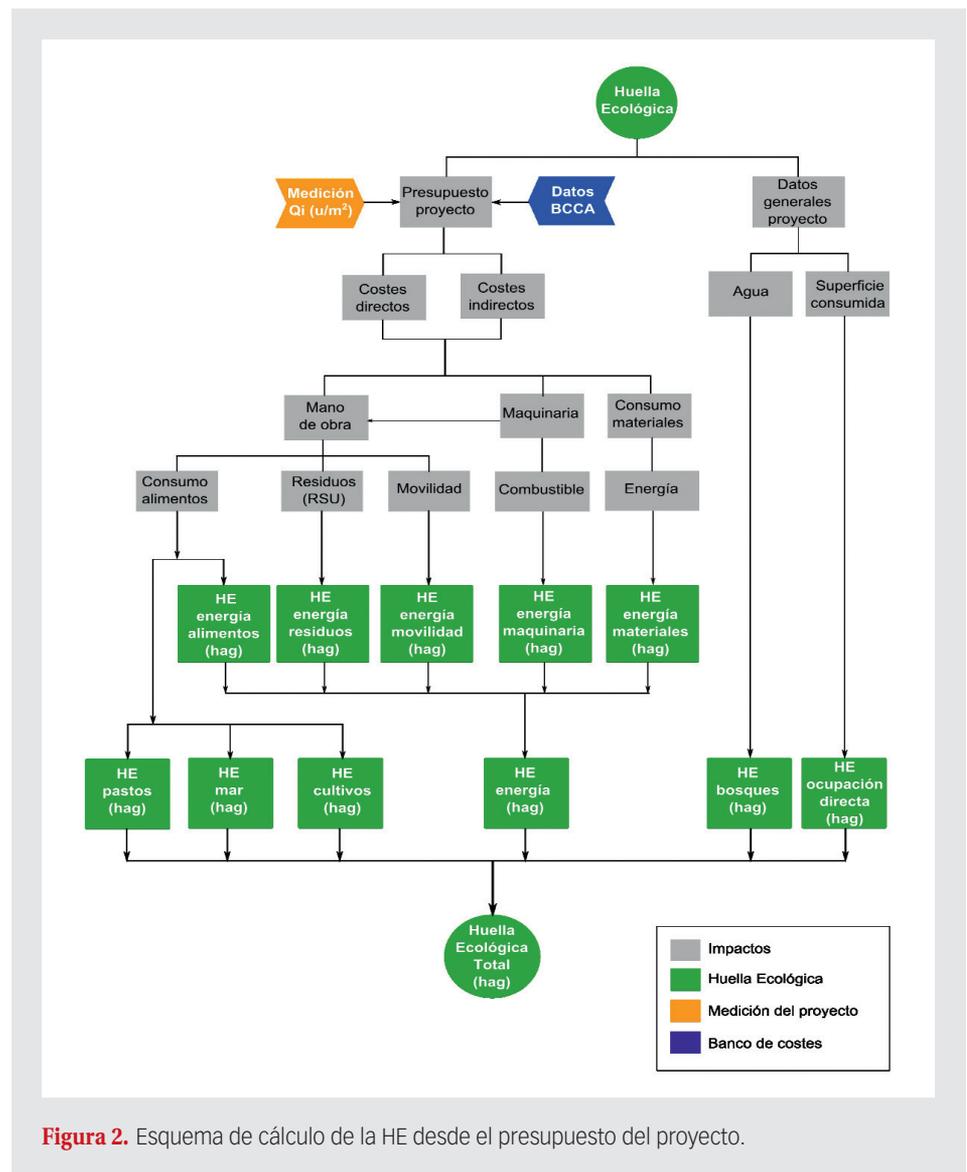


Figura 2. Esquema de cálculo de la HE desde el presupuesto del proyecto.

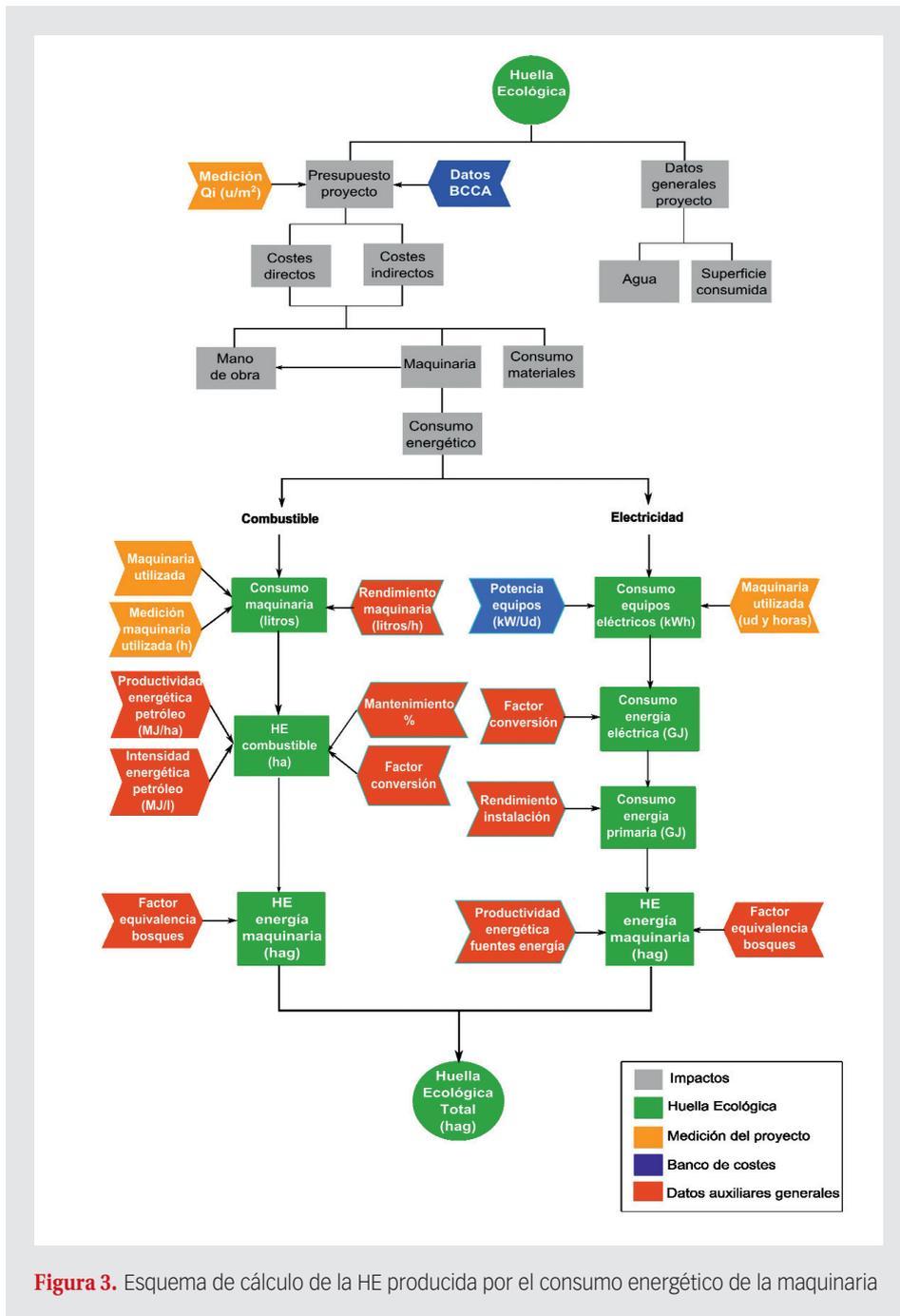


Figura 3. Esquema de cálculo de la HE producida por el consumo energético de la maquinaria

quinaria eléctrica, recogida en el BCCA, y a través de la potencia de motor y las horas trabajadas se obtienen los kilovatios/hora consumidos. Posteriormente, teniendo en cuenta que el rendimiento del sistema de producción

eléctrico es del 33 por ciento <sup>[5]</sup>, se calcula la cantidad de energía primaria consumida. En este caso se determinan las emisiones por fuente, carbón, petróleo, gas natural o energía nuclear, en la proporción del *mix* energético español <sup>[6]</sup>.

### Mano de obra

A continuación se realiza el análisis de los impactos generados por los trabajadores a través del consumo de alimentos, generación de residuos sólidos urbanos (RSU) y su movilidad (ida y vuelta a la obra), como se muestra en la Figura 4 y se define en las siguientes secciones.

#### HE provocada por alimentos

Para obtener la huella producida por la alimentación de los trabajadores, es necesario obtener el número total de horas de mano de obra necesarias en el proyecto de urbanización y el coeficiente  $HE_m$ , que representa la huella por cada comida realizada durante la jornada de trabajo.

Por lo tanto, es necesario conseguir el factor  $HE_m$  de los diversos tipos de alimentos que componen la comida diaria de cada trabajador <sup>[7]</sup>, que generará cuatro tipos de territorio productivo: pastos, tierras de cultivo, mar productivo y bosques. Cada alimento producirá dos tipos de huella: la provocada por el consumo del propio alimento y la producida por la manipulación y transformación del alimento durante todo su proceso.

Las huellas generadas según el tipo de alimentos (carnes generarán HE de pastos, pescados generarán HE de mar productivo, cereales generarán HE de tierras de cultivo...) se representan en la Figura 5 en función de las hectáreas globales que emplea cada tonelada de alimento en un año.

Cada coeficiente se sumará en función de su territorio productivo, obteniendo la huella provocada por cada alimento. Las cuatro categorías se suman a su vez para obtener un coeficiente general que nos relaciona la huella total producida por cada comida realizada. Aplicando estos datos a los menús servidos, que a su vez dependen de las ho-

Es posible añadir de forma estandarizada el aspecto medioambiental a los presupuestos de obras referenciándolo con la Base de Costes de la construcción de la Junta de Andalucía

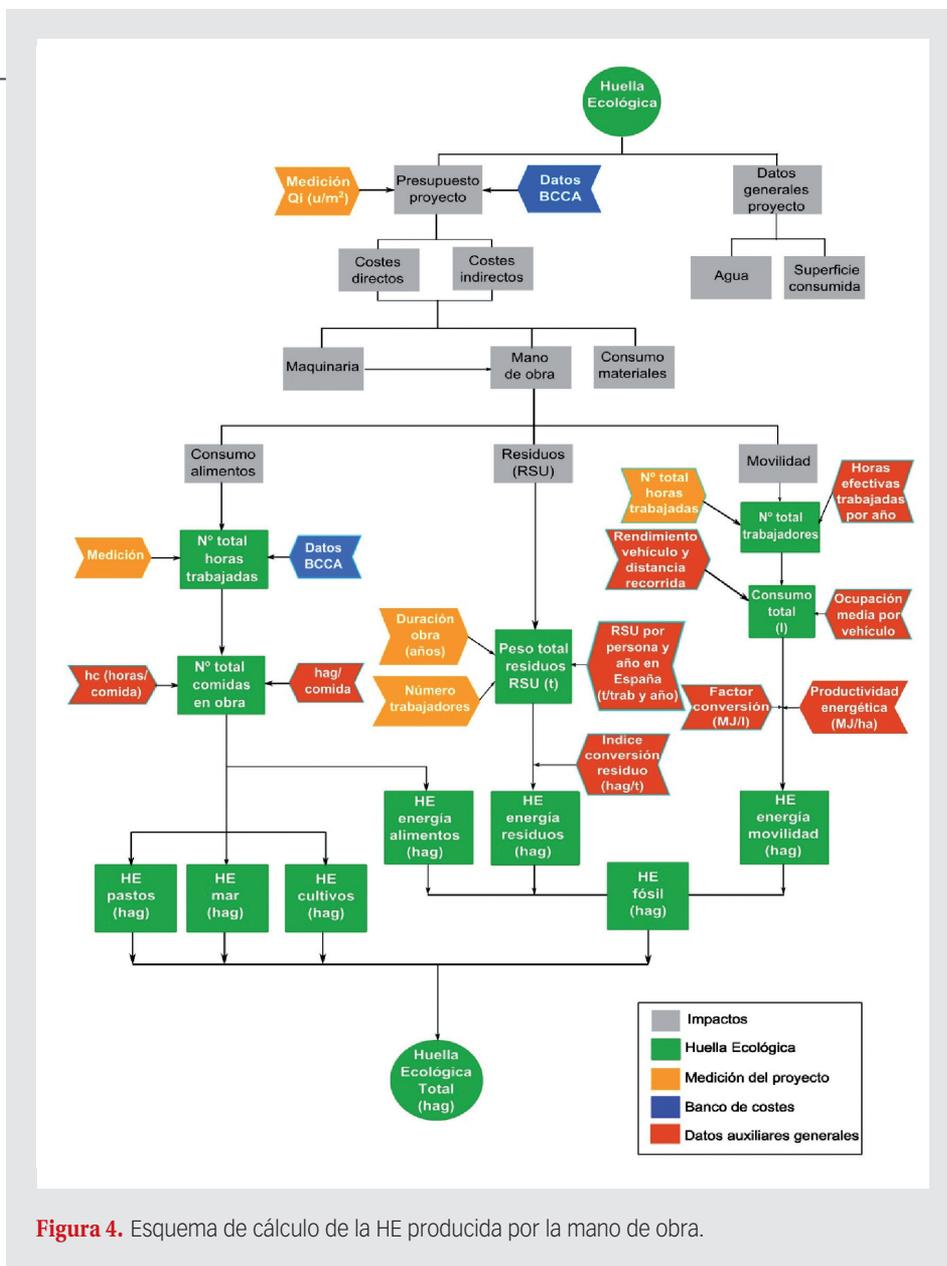


Figura 4. Esquema de cálculo de la HE producida por la mano de obra.

Los costes directos de la obra consumen recursos, bien a través del gasto de energía de la maquinaria o mediante la mano de obra y empleo de materiales de construcción

de residuos sólidos urbanos (RSU) del Informe de medio ambiente en Andalucía<sup>[8]</sup>; por lo cual, aplicando este indicador al número de trabajadores en obra, se obtiene la cantidad de RSU generados. Esta cantidad se dividirá en residuos de tipo orgánico, papel, plástico, vidrio y otros (donde se incluyen los metales), tal y como muestra la Figura 6; a ellos se les aplicarán los índices de conversión, basados en los estudios de Wackernagel<sup>[9]</sup>, que tienen en cuenta la intensidad energética necesaria para el tratamiento, la cantidad reciclada, la productividad energética y el factor de equivalencia de los bosques, que serán los encargados de absorber el CO<sub>2</sub> producido por todos los procesos. De este modo se obtiene un coeficiente que indica la HE producida por tonelada de RSU.

ras de trabajador, se obtiene la HE producida por el consumo de alimentos.

### HE de movilidad

Para analizar la movilidad de los operarios, se establece la hipótesis de que la obra está situada a una distancia de 30 kilómetros desde donde residen los operarios y que cuatro trabajadores compartirán un vehículo para acudir a trabajar. El rendimiento de los vehículos utilizados según la distancia recorrida genera los litros consumidos, y su huella se obtiene igual que en el caso previo de la maquinaria.

### HE de los residuos sólidos urbanos

En la evaluación de los residuos se emplea el índice de generación media

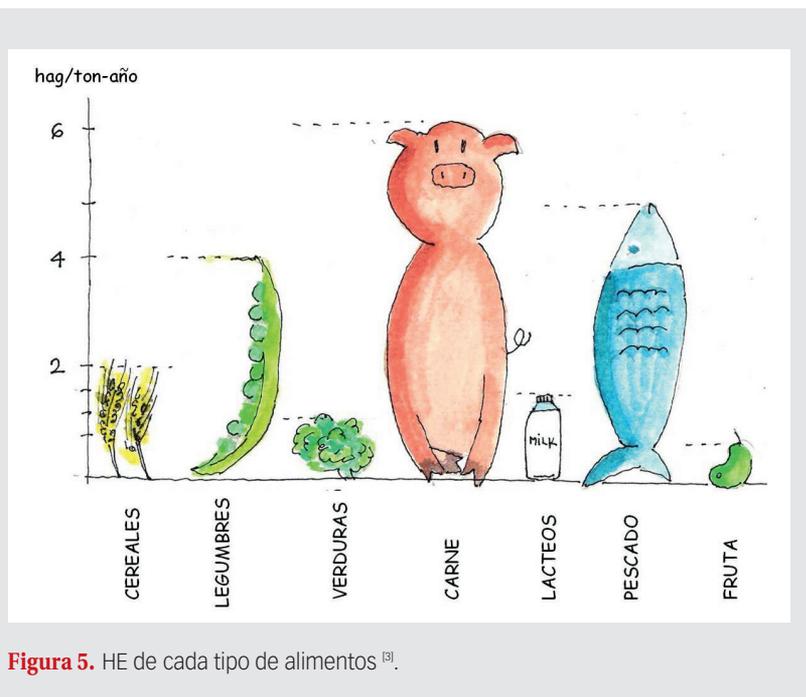


Figura 5. HE de cada tipo de alimentos<sup>[9]</sup>.

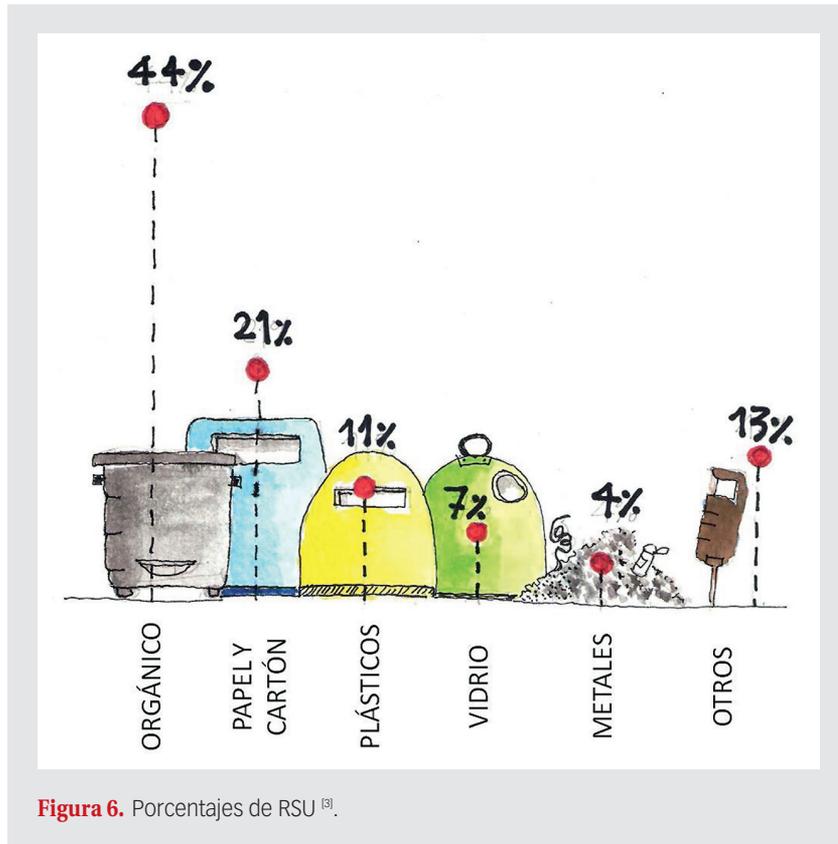


Figura 6. Porcentajes de RSU <sup>[9]</sup>.

### Materiales de construcción

La metodología para calcular la huella producida por los materiales tiene en cuenta la energía incorporada durante su ciclo de vida, se considera la vida desde la cuna al sitio, tal y como muestra la Figura 7. Esta energía será transformada en hectáreas teniendo en cuenta la productividad energética del combustible empleado en los trabajos de transformación, aplicándole a este resultado el factor de equivalencia de los bosques.

Para poder obtener los MJ de cada material de construcción, es necesario un proceso previo, en el cual se determinan los correspondientes pesos, ya que muchos materiales se compran por volumen o número de unidades. Se emplean diferentes normativas para poder obtener los volúmenes y densidades. Finalmente, en bases de datos de análisis de ciclo de vida se obtienen los MJ que incorpora cada kilogramo de material.

### Costes indirectos

Como elemento innovador en la presente investigación, se incluyen los costes indirectos al indicador HE. Los costes indirectos son los elementos que no pueden imputarse en el presupuesto del proyecto a una sola actividad debido a que forman parte de varios trabajos dentro de

**Los costes indirectos son elementos que no pueden ser atribuibles a un trabajo en concreto, ya que realizan tareas que sirven a varios elementos simultáneamente dentro de la obra**

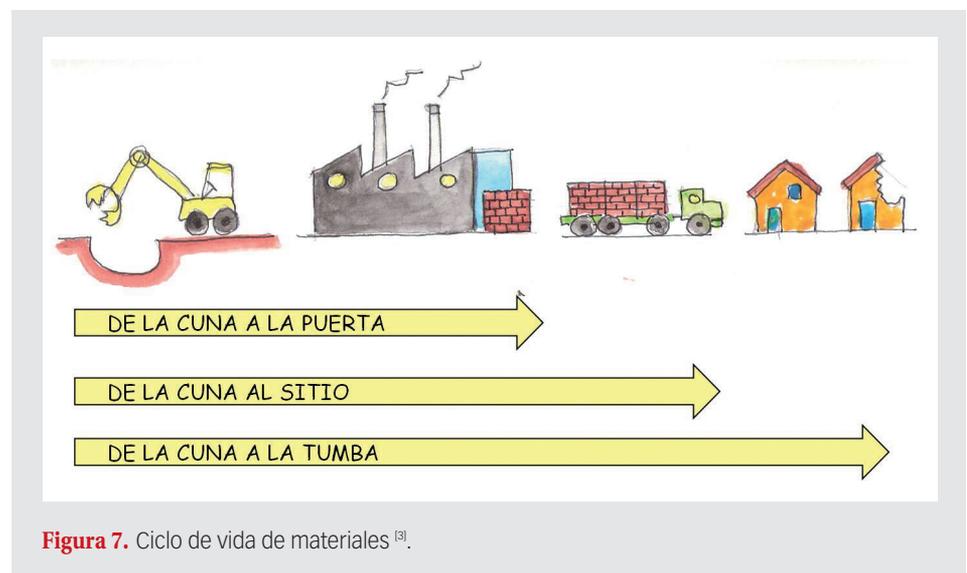


Figura 7. Ciclo de vida de materiales <sup>[9]</sup>.

la obra. Por ejemplo, el encargado de obra participa en la realización de todos los trabajos o en el uso de las grúas torre que se emplean desde la ejecución de la estructura hasta el montaje de instalaciones. Tomando como referencia la BCCA, se estudian los costes indirectos atribuibles a un proyecto de construcción.

Cada concepto de los costes indirectos se transforma en datos útiles para calcular la HE (horas anuales efectivas de trabajadores, consumos de combustible por la maquinaria, consumos de agua y electricidad en las casetas de obra, etc.), que se introducirán en el esquema de huella siguiendo el proceso comentado en los apartados anteriores, quedando como elementos singulares el consumo de energía eléctrica y agua por las casetas, la iluminación de la zona de obra y las pruebas iniciales de servicio de las instalaciones.



Figura 8. Absorción de CO<sub>2</sub> por la arboleda [9].

Para el consumo energético de las casetas se ha tenido en cuenta lo recogido en la ITC-BT-10, que establece un consumo de 0,10 kW/m<sup>2</sup> para usos de edificios comerciales y oficinas [10]. En el caso particular del consumo eléctrico en la iluminación de la parcela, se ha optado por aplicar a la superficie de la parcela el nivel mínimo de iluminación de 100 luxes (lumen/m<sup>2</sup>) [11].

Por último, se evalúa el consumo debido a las pruebas de servicio de las nuevas instalaciones ejecutadas, para lo cual se han analizado 30 proyectos facilitados por la compañía Endesa, generando un coeficiente que relaciona los kilovatios/hora consumidos con los metros cuadrados de parcela, determinándose un consumo medio de 1,11 kWh/m<sup>2</sup>.

Con respecto al consumo de agua, en los aseos y vestuarios de la obra se establece un consumo de agua caliente sanitaria por persona y día según el CTE [12] y se ha incrementado un 25 por ciento por la utilización de los inodoros; finalmente, con el número de trabajadores y días trabajados se obtienen los litros totales.

El agua total empleada en los trabajos de urbanización se completa con los costes directos del proyecto, donde el agua es un material de construcción más.

Este valor se añade al anterior para determinar la HE del agua.

### Superficie consumida

En este apartado se tendrá en cuenta el suelo que se consume directamente, ya que éste será biológicamente improductivo desde el momento en que sea ocupado. Por tanto, esta huella vendrá dada por la superficie donde se actuará, aplicándole el factor de equivalencia correspondiente al terreno (forestal o cultivos).

### Vegetación y arboleda afectada

Para analizar los elementos vegetales desde el punto de vista de la cantidad de CO<sub>2</sub> que pueden absorber (Figura 8), se han tomado como base los estudios del profesor Figueroa Clemente [13], donde se establecen los kilogramos de CO<sub>2</sub> que absorben las distintas especies arbóreas durante un año en función del tamaño y tipo de hoja.

Para obtener el número de árboles que se encuentran en la zona a urbanizar, se han definido tres niveles de intensidad de plantación por metro cuadrado. A estos árboles se les aplican los coeficientes de absorción. Este mismo proceso se repetirá con la nueva vegetación que vaya a colocarse durante la obra en la parcela; reflejando casos en los que la arboleda a colocar sea más beneficiosa que la retirada, mejorando con ello la capacidad de absorción de la zona.

En una obra de urbanización existen elementos que no son proporcionales al tamaño de la parcela, lo cual produce una mayor huella en parcelas pequeñas que en grandes

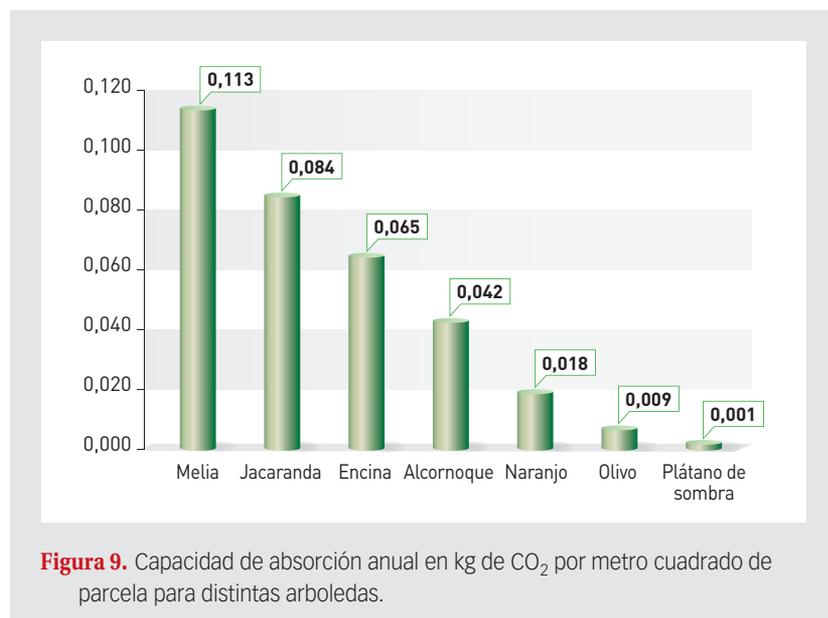


Figura 9. Capacidad de absorción anual en kg de CO<sub>2</sub> por metro cuadrado de parcela para distintas arboledas.

En la Figura 9 se muestran las diferencias en capacidad de absorción de distintos árboles con una alta densidad de plantación. Las melias son los árboles que más absorben, seguidos por las jacarandas.

## Casos prácticos

Para validar la metodología propuesta y ver el nivel de sensibilidad del indicador HE en trabajos de urbanización, se plantea el análisis de dos proyectos de urbanización de diferente naturaleza, siendo el primero una parcela residencial situada en La Palma del Condado, con un presupuesto de ejecución material de 187.613,37 euros y una superficie de actuación de 7.123,78 m<sup>2</sup> [14]. El segundo corresponde a un proyecto de urbanización de una zona industrial en Écija, con un presupuesto de ejecución material de 13.427.115,05 euros y una parcela de 620.256 m<sup>2</sup> [15].

La HE resultante de la urbanización residencial es de 260,00 hag y de 36,50 hag por 1.000 m<sup>2</sup> de parcela, lo que se muestra en la Tabla 1. En el caso de la urbanización industrial, la HE es de 12.834,46 hag y de 20,69 hag/1.000 m<sup>2</sup> de parcela, como refleja la Tabla 2.

A continuación se comparan los dos casos analizados, por tipo de huella producida y por fuente de impacto que la produce (Figuras 10 y 11, respectivamente). Los mayores porcentajes de huella obtenidos son de tipo fósil (78-80 por ciento); y los mayores elementos que producen la huella son los materiales (69-68 por ciento) y la mano de obra (14-17 por ciento).

En ambos casos la huella energética es la mayor, siendo significativamente alta en el proyecto residencial, debido

**Tabla 1.** Urbanización residencial

Huella total: 36,50 hag/1.000m <sup>2</sup>						
Impacto	Fósil	Bosques	Pastos	Mar	Cultivos	Superficie Construida
Maquinaria	1,20					
Mano de Obra	0,87		2,15	1,46	0,78	
Materiales	25,40					
Costes Indirectos	1,13	0,01	1,65	1,13	0,60	
Ocupación Directa						0,13
<b>Total</b>	<b>28,60</b>	<b>0,01</b>	<b>3,80</b>	<b>2,59</b>	<b>1,38</b>	<b>0,13</b>

**Tabla 2.** Urbanización industrial

Huella total: 20,69 hag/1.000m <sup>2</sup>						
Impacto	Fósil	Bosques	Pastos	Mar	Cultivos	Superficie Construida
Maquinaria	1,56					
Mano de Obra	0,69		1,41	0,96	0,51	
Materiales	13,90	0,15				
Costes Indirectos	0,46	0,00	0,39	0,27	0,14	
Ocupación Directa						0,25
<b>Total</b>	<b>16,61</b>	<b>0,15</b>	<b>1,80</b>	<b>1,23</b>	<b>0,65</b>	<b>0,25</b>

principalmente a los materiales de construcción. Es interesante notar que en ambas urbanizaciones los costes indirectos son tan significativos como la mano de obra, y son normalmente evitados en los análisis de huella.

Los resultados globales en hag/1.000 m<sup>2</sup> reflejan que el caso residencial es casi dos veces mayor que en el industrial debido a las características de las futuras construcciones (menor densidad de construcción en la nave industriales que en bloques de pisos).

Los materiales representan el mayor porcentaje en la generación de huella, ya que al urbanizar existen elementos que no son proporcionales al tamaño de la parcela, como válvulas, centros de transformación, instalaciones eléctricas..., lo cual produce una mayor huella en parcelas pequeñas que en grandes.

## Conclusiones

En la metodología propuesta y en los resultados de los casos analizados se observa lo siguiente:

- Los resultados obtenidos obedecen a las características del proyecto, poniendo de manifiesto la importancia de su correcta redacción. Este aspecto se refiere a que los equipos, maquinaria, materiales e instalaciones deben estar detallados al máximo para poder aportar la mayor cantidad de información posible y emplear datos exactos en el cálculo de la huella.
- Los materiales representan el mayor porcentaje sobre el total de la huella (69-68 por ciento), poniendo de manifiesto que un cambio de material, reciclar y/o reutilizar, puede afectar notablemente a los resultados globales.
- La mano de obra también tiene un peso importante (14-17 por ciento), indicando que es un elemento de consideración a la hora de plantear los tra-

**Los impactos sufridos por la arboleda de la zona donde se realiza la urbanización provocan alteraciones en la biocapacidad del territorio**

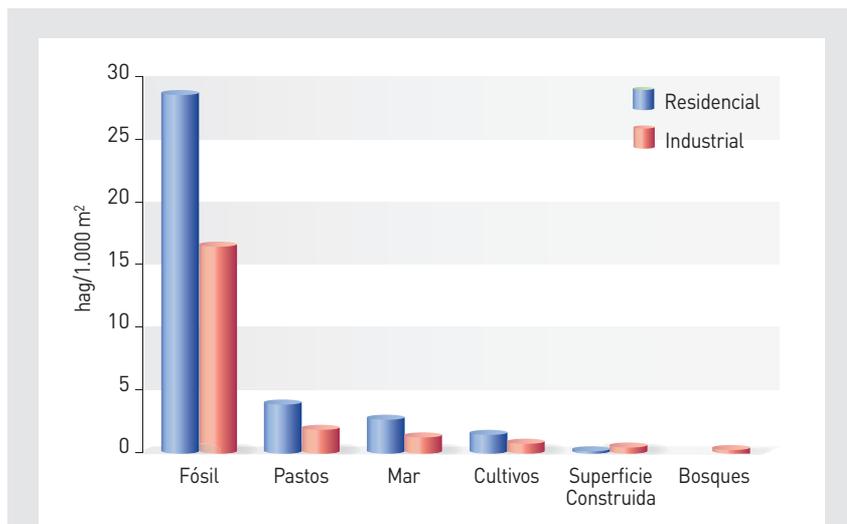


Figura 10. Huella ecológica por superficie de parcela por tipo de huella.

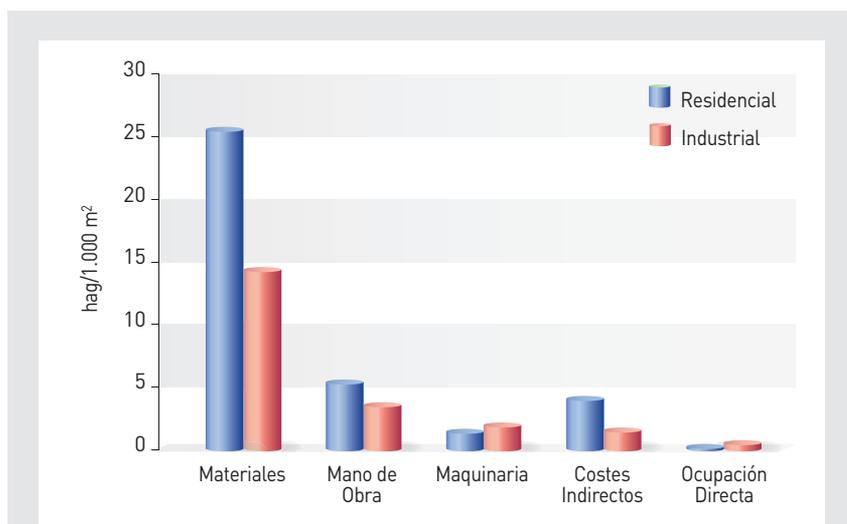


Figura 11. Huella ecológica por superficie de parcela según tipo de impacto.

bajos a realizar en los diferentes proyectos, añadiendo valor a la parte humana. El indicador permite identificar dónde y con qué intensidad se emplea el capital humano en las distintas actividades.

- La huella de tipo fósil es la que mayor porcentaje representa (78-80 por ciento), poniendo de manifiesto la importancia de impulsar los sistemas de producción energética limpios (solar, fotovoltaica, eólica...).
- La huella producida por ocupación directa no es significativa (0,35-1,21

por ciento), pero sí el cambio en la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> (por ejemplo, 0,065 toneladas de CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> de parcela al año en el caso de la tala de encinas).

Como conclusión general, se ha desarrollado una metodología que permite calcular la huella producida por la transformación del suelo rural en urbano. Todo ello, además, ha sido referenciado con el BCCA, demostrando que es posible añadir de forma estandarizada el aspecto medioambiental a los presupuestos de obras. ♦

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado gracias a una ayuda a la investigación concedida por FUNDACIÓN MAPFRE.

## Referencias

- [1] WWF (1993) The Built Environment Sector, Pre-Seminar Report (Council for Environmental Education WWF, Department of Environment, De Monfort University Leicester).
- [2] Wackernagel, Mathis y William E. Rees (1996). Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth.
- [3] Solís-Guzmán, J. Marrero, M. (2014). The Ecological Footprint of Dwelling Construction. Bentham eBooks [En edición].
- [4] SEOPAN. (2008). Manual de costes de maquinaria. ATENCOP.
- [5] Solís-Guzmán, J. Marrero, M. Ramírez de Arellano, A. (2013). Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain). Ecological Indicators 25, p. 239-249.
- [6] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2013. El Sistema eléctrico Español. Avance del informe 2013. Madrid, España.
- [7] Quesada J.L.: Huella Ecológica y Desarrollo sostenible. AENOR. Madrid, España. 2007.
- [8] Medio Ambiente en Andalucía. Informe 2011. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, 2012, España.
- [9] Wackernagel M., Rees W., 2001. Nuestra huella ecológica: reduciendo el impacto humano sobre la Tierra. LOM. Santiago de Chile, Chile.
- [10] Real Decreto 842/ 2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- [11] Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- [12] Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
- [13] Figueroa Clemente M.E., Redondo Gómez S. (2007): Sumideros Naturales de CO<sub>2</sub>. Secretariado de Publicaciones Universidad de Sevilla.
- [14] Solís Guzmán Jaime, 2010. «Evaluación de la Huella Ecológica del sector edificación (uso residencial) en la comunidad andaluza». Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- [15] Rivero Camacho Cristina, 2014. «Residuos de Construcción y Demolición en la transformación de terrenos rústicos a urbanos». Trabajo fin de máster. Universidad de Sevilla.