

# Metodología de medición de la huella de carbono para edificaciones en Costa Rica y su aplicación en el módulo habitacional *Trópika*

Methodology for the quantification of the carbon footprint of buildings in Costa Rica and its application on the residential module *Trópika*

Silvia Solano-Quesada<sup>1</sup>, Edgar Ortiz-Malavassi<sup>2</sup>

---

*Fecha de recepción: 28 de agosto de 2015*

*Fecha de aprobación: 6 de enero de 2016*

Solano-Quesada, S; Ortiz-Malavassi, E. Metodología de medición de la huella de carbono para edificaciones en Costa Rica y su aplicación en el módulo habitacional *Trópika*. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, N° 3. Pág 73-84.

DOI: 10.18845/tm.v29i3.2889



<sup>1</sup> Arquitecta, Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción del Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: silviae.sq@gmail.com

<sup>2</sup> PhD. Ingeniero Forestal, Doctor en Manejo de Recursos Forestales. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Costa Rica. Correo electrónico: eortiz@itcr.ac.cr

## Palabras clave

Análisis de ciclo de vida; cambio climático; carbono-neutralidad; construcción sustentable; de la cuna a la construcción; gases de efecto invernadero; huella de carbono de producto; Decatlón Solar Europa 2014.

## Resumen

Se analizaron metodologías internacionales de medición de huella de carbono para productos, con el fin de identificar la que mejor se ajusta al sector de la construcción costarricense. Se concluyó que la metodología ISO/TS 14067:2013 *Carbon Footprint of products-Requirements and guidelines for quantification and communication* es la que mejor se adapta al contexto nacional, y se ajusta para su utilización en procesos constructivos en el país. Usando esta adaptación se diseñó una hoja de cálculo para medir la huella en edificaciones de Costa Rica, que se ha llamado *Construye Neutral*, que se puede configurar para usarla en la región latinoamericana.

La metodología seleccionada y la herramienta diseñada se aplicaron al caso del módulo habitacional *Trópika*. Este es un prototipo de vivienda diseñado y construido por estudiantes del Tecnológico de Costa Rica para participar en la competencia internacional sobre diseño y construcción sostenible, Solar Decathlon Europe 2014.

Se elaboró un análisis de ciclo de vida parcial, *de la cuna a la construcción*, para *Trópika*. La hoja de cálculo preparada estimó un total de 28 ton CO<sub>2</sub>e de carbono incorporado en la vivienda de 81 m<sup>2</sup> de construcción, o 345 kg CO<sub>2</sub>e por m<sup>2</sup> de superficie útil. La fijación de carbono fue de 15 ton CO<sub>2</sub>e y el balance final de emisiones de 13 ton CO<sub>2</sub>e. Estos resultados fueron validados comparándolos con los obtenidos en otras herramientas como SIMAPro V.7.3.3, así como datos de la literatura.

## Keywords

Carbon footprint of products; carbon neutrality; climate change; cradle to construction; greenhouse gases; life cycle analysis; Solar Decathlon Europe 2014; sustainable construction.

## Abstract

International methodologies for measuring carbon footprint of products have been analyzed in order to identify which is the best suited for the Costa Rican building sector. The ISO / TS 14067: 2013 *Carbon Footprint of products-Requirements and guidelines for quantification and communication*, have been selected and tailored to better fit conditions Costa Rica. A spreadsheet tool to calculate the carbon footprint of any building project in the local context or regionally (if tailored) was designed and called *Construye Neutral*.

Both, the selected methodology and the tool have been applied to *Trópika*, a habitation module designed and built for the Solar Decathlon Europe 2014 by students of the Tecnológico de Costa Rica.

A partial LCA, from *cradle to construction* was conducted for the *Trópika* house unit. The estimated embodied carbon was 28 tons CO<sub>2</sub>e for the 81 m<sup>2</sup> house, or 345 kg CO<sub>2</sub>e per m<sup>2</sup> of useable floor area. Carbon fixation was 15 tons of CO<sub>2</sub>e, and the final balance was 13 tons of CO<sub>2</sub>e. These results were validated by comparing them with those obtained in other tools such as SimaPro V7.3.3 as well as data in literature.

## Introducción

Según el *Quinto Informe* del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la influencia del ser humano en el sistema climático es clara y las emisiones antropogénicas recientes de gases de efecto invernadero (GEI) son las más altas de la historia. El documento indica que “existen múltiples vías de mitigación que pueden limitar el calentamiento a menos de 2 °C con respecto a los pre-niveles industriales. Estas vías requerirían reducciones de emisiones sustanciales en los próximas décadas y cerca de cero emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero de larga vida para el final del siglo” (IPCC, 2014).

Frente a este reto global, en 2007 Costa Rica declaró su meta de llegar a ser carbono-neutral para el año 2021. La Estrategia Nacional de Cambio Climático describe este concepto como “la práctica de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la fijación de carbono atmosférico en los sistemas terrestres, de tal manera que resulte un balance neto igual a cero” (MINAET, 2009). Al ser una meta que busca el establecimiento de una economía baja en emisiones, todos los sectores, organizaciones y empresas del país deben iniciar la implementación de estrategias que les permitan contribuir al logro de estos objetivos.

En el sector de la construcción, las emisiones de GEI producidas por el consumo energético de los edificios en funcionamiento son las que generan mayor impacto negativo para la atmósfera (van Gorkum, 2010). Estudios realizados en Inglaterra indican que en el ciclo de vida de un edificio en ese país, la etapa de uso representa cerca del 83% de las emisiones, la construcción de la obra el 17% y el mantenimiento el 0,4% (Department for Business, Innovation & Skills, 2010). Las emisiones de CO<sub>2</sub> se cuantifican generalmente en la etapa operativa y las medidas de reducción se llevan a cabo en la vida útil del edificio. Pocas veces se trabaja en esta problemática de manera integral desde el diseño e inicio de la concepción de la obra.

La industria de la construcción requiere de la extracción y fabricación de grandes cantidades de materiales. Esto se convierte a la vez en consumo de energía y en emisiones contaminantes de la atmósfera. Cada material de construcción debe ser extraído, procesado y transportado a su lugar de uso, por lo que se considera que los materiales tienen energía y dióxido de carbono incorporado (Hammond & Jones, 2008). Además, se consume energía durante el proceso constructivo y se generan residuos de construcción que al final se convertirán en emisiones hacia la atmósfera.

Existen metodologías específicas a nivel internacional que permiten inventariar y cuantificar los GEI emitidos por las edificaciones: las corporativas y las de productos (Lemaignan & Wilmotte, 2013). Las primeras se centran en la operación de la organización, mientras que las segundas se centran en el análisis de productos o servicios e incluyen elementos de su ciclo de vida. Cuando el interés es conocer la huella de carbono generada por la construcción de una edificación, pensándose esta como un producto final que se entrega a un cliente determinado, se deben utilizar las metodologías relacionadas con productos.

Estos procedimientos internacionales aún no han sido ajustados al contexto del sector de la construcción costarricense. En el presente trabajo se analizaron estas metodologías con el fin de determinar cuál de ellas se puede adaptar a actividades de construcción en Costa Rica, y poder calcular un *factor de emisión en kg CO<sub>2</sub>e por m<sup>2</sup> de construcción*, es decir, la huella de carbono incorporada en una edificación. Se analizaron cualitativa y cuantitativamente, y se buscó hacer una adaptación al contexto nacional para diseñar una hoja de cálculo para la medición de la huella de carbono incorporada en las edificaciones en Costa Rica.

## Materiales y métodos

Se evaluaron tres metodologías internacionales para el análisis del ciclo de vida (ACV) de las emisiones de GEI de productos y servicios. El diseño, la escala y los procesos constructivos de las edificaciones, así como el manejo del sitio de construcción, varían ampliamente entre proyectos, países y zonas geográficas. Por esta razón, es importante establecer los criterios bajo los cuales se delimita su aplicación.

Las metodologías identificadas fueron: a) *PAS 2050:2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*, b) *GHG Protocol. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard* y c) *ISO/TS 14067:2013. Greenhouse Gases. Carbon footprint of products: Requirements and guidelines for quantification and communication*.

*PAS 2050:2011* es de acceso público. Esta metodología busca una mejor comprensión de las emisiones derivadas de las cadenas de suministros. Su objetivo principal es proporcionar una base común para cuantificar, informar y desarrollar programas significativos de reducción de emisiones (British Standards Institute, 2011).

*GHG Protocol. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard* también es de acceso público. Su misión es desarrollar estándares o herramientas aceptadas internacionalmente para contabilizar y reportar emisiones de GEI que permitan alcanzar una economía mundial baja en emisiones (Greenhouse Gas Protocol, 2011). Se fundamenta en el enfoque de ciclo de vida, serie ISO 14040 (Chomkhamsri & Nathan, 2011). Permite centrar esfuerzos en las mayores oportunidades de reducción y responder con información ambientalmente acertada (Lemaignan & Wilmotte, 2013).

La metodología *ISO/TS 14067:2013* no es de acceso público. Detalla los principios, requisitos y lineamientos para la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de productos (CFP), en su ciclo de vida completo o parcial. Se basa en estándares ISO establecidos para el ACV (ISO 14040 y 14044), para etiquetado y declaración ambiental (ISO 14020, 14024 y 1025). La compensación de emisiones está afuera del alcance de esta metodología (ISO, 2013).

Se establecieron 10 criterios de aplicabilidad que se muestran en el cuadro 1. Estos delimitan las metodologías dentro del contexto nacional, específicamente en el sector de la construcción. La evaluación se realizó según el criterio de experto y se asignó un puntaje de 1 a 5 a cada variable seleccionada en la evaluación, en donde 5 representa el valor más alto. Entre más bajo sea el valor asignado, menor es el grado de relación entre la variable y la metodología evaluada. Por ejemplo, para la variable "Ámbito global", un valor entre 0 a 1 indicaría que esta no es aplicable en el ámbito internacional, un valor entre 2 y 3 indicaría que no es global pero que se podría adaptar a otros países y un valor entre 4 a 5 significaría que es de carácter internacional. Se graficaron los resultados obtenidos usando gráficos de tela de araña. Se escogió la metodología con mayor puntuación y se recomendó su aplicación en el estudio de caso.

Con el fin de dar practicidad a la solución de los problemas, se considera además que la metodología debería implementarse dentro del siguiente escenario de aplicabilidad:

1. Legalmente no existe cambio de uso de suelo. La Ley Forestal (No. 7575) de Costa Rica lo prohíbe en su artículo 19.
2. El inventario, cuantificación y reporte de emisiones será para determinar la huella de carbono parcial de la edificación.
3. La normativa nacional INTE 12-01-06:2011 debe ser complementaria pues permitirá cuantificar las emisiones durante la vida útil de las edificaciones.

4. El escenario de fin de vida útil de la edificación no será contemplado. Esto agregaría complejidad en una primera etapa en la que se busca promover una aplicación práctica en el ámbito de la construcción nacional.
5. Con el fin de ser conservadores en la cuantificación de emisiones, se asume que los residuos generados en obra se tratarán como desechos e irán al relleno sanitario más cercano al sitio de construcción.
  - 5.1. La premisa es diseñar para construir eficientemente, consumir la menor cantidad de material posible, reducir el desperdicio y la generación de residuos sólidos a través de prácticas de reuso y reciclaje de materiales.
  - 5.2 El desperdicio de materiales que se genera en proyectos sostenibles ronda entre 5% y 10% del peso según el material (Waste and Resources Action Programme, 2013). Si no se puede comprobar este porcentaje de desperdicio, se estima como igual al 15% del peso total de los materiales de construcción, el cual corresponde al desperdicio del material que se calcula comúnmente a nivel internacional (Barrett & Wiedmann, 2007) y en Costa Rica.
  - 5.2 Se evita la división de la carga ambiental de los residuos del sistema. Los residuos generados se clasificarán como desechos que irán al relleno sanitario. Estas emisiones deben ser cuantificadas y reportadas como si sucedieran en el momento de la evaluación (ISO; 2013).
6. Se deben incluir como mínimo en el inventario y cuantificación todas las emisiones directas e indirectas relacionadas con los materiales, su transporte al sitio de construcción, la energía y el combustible utilizados durante el proceso constructivo, los residuos generados y su traslado al relleno sanitario.

**Cuadro 1.** Criterios de Aplicabilidad utilizados en la evaluación de metodologías

Criterio	Concepto
1. Enfoque ACV	La aplicación del enfoque de análisis de ciclo de vida
2. Ámbito global	Se evalúa si es específica para un país o internacional
3. Credibilidad en sector de la construcción nacional	Conocimiento de las metodologías en el sector de la construcción costarricense
4. Aplicabilidad en sector de la construcción nacional	Factibilidad de aplicar la metodología en el sector de la construcción costarricense
5. Reporte y comunicación	Contempla la comunicación y el reporte al consumidor final
6. Guía para el usuario	Documento para guiar al usuario en los procedimientos
7. Unificación de sistemas	Su función es estandarizar normas a nivel internacional
8. Nivel de significancia (claridad en definición)	Especifica el porcentaje de emisiones que debe incluirse dentro de los objetivos y alcances del estudio
9. Calidad de datos	Adopta los lineamientos de la ISO 14044
10. Generación de electricidad renovable/compra de energía verde	Aborda específicamente las cuestiones energéticas y la doble contabilización en términos de energías renovables

Una vez seleccionada la metodología y establecidos los criterios de aplicabilidad, se procedió a emplearla en el estudio de caso y hacer un informe de resultados. Se desarrolló una hoja de cálculo en Excel parametrizada que se denominó *Construye Neutral*, que es adaptable a diferentes proyectos de construcción en el contexto nacional y regional. Esta permite inventariar y cuantificar las emisiones en términos de CO<sub>2</sub>e, así como la fijación de carbono por elementos de madera. La hoja de cálculo *CM Table* facilitada por la organización Solar Decathlon Europe 2014, sirvió de base para la generación de esta herramienta.

### Descripción del estudio de caso

El módulo habitacional *Trópika* es un prototipo de vivienda inteligente, autosuficiente energéticamente y de bajo consumo. Su sistema constructivo es modular y prefabricado. Fue diseñado y construido para la competencia internacional por la organización Solar Decathlon Europe 2014.

Su estructura principal y la secundaria se hicieron en madera laminada de melina (*Gmelina arborea*) costarricense con certificación FSC Forest Stewardship Council. La estructura interna de cerramientos, así como elementos arquitectónicos varios, se construyeron en madera de pino (*Pinus* sp.) costarricense. En cuanto a los cerramientos exteriores y el acabado del piso, fueron prefabricados en paneles de madera de teca certificada FSC, rescatada de los residuos de procesos industriales de una empresa maderera del país. Las paredes interiores son de fibrocemento y *plywood* de pochote nacional y el entrepiso es un panel estructural compuesto por tres capas de madera. Se instaló aislamiento térmico acústico de fibra mineral (*rockwool*) en paredes y en la cubierta de acero laminado.

No utiliza aire acondicionado, solamente técnicas pasivas de ventilación natural, mientras que la energía solar es su principal fuente energética. El área total de construcción es de 108 m<sup>2</sup>, de los cuales 53 m<sup>2</sup> (*lobby*, terraza y rampa de acceso) se consideran como media área.

### Resultados

Los resultados de la evaluación de las tres metodologías de cálculo de huella de carbono de productos se presentan en el cuadro 2. La metodología *ISO/TS 14067:2013* es la mejor para su adaptación al contexto nacional pues obtuvo 45 puntos de un máximo de 50, seguida por la *GHG Protocol*, con 37 puntos.

La metodología *PAS 2050:2011* fue desarrollada para Inglaterra, no es de ámbito global aunque se aplica internacionalmente. Su principal debilidad es que no se conoce en el contexto nacional, específicamente en el sector de la construcción. No incluye el tema de la comunicación ni el reporte de datos. Entre sus fortalezas se encuentra que ofrece guías didácticas para la recolección de datos del inventario y el análisis de la incertidumbre (fig. 1).

*GHG Protocol Product 2011* no incluye el tema de la producción de energía verde y no es exigente en la calidad de los datos. Es reconocida a nivel internacional, no así dentro del sector de la construcción costarricense. Entre sus fortalezas están que contempla la comunicación del reporte final, que es de ámbito global y que ofrece guías adicionales al usuario (fig. 2).

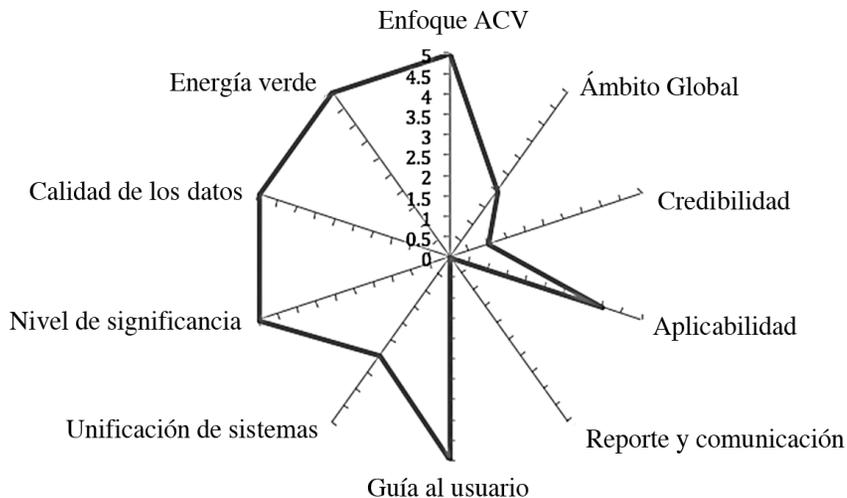
La metodología *ISO/TS 14067:2013* tiene como debilidades que no ofrece guías adicionales para el desarrollo de inventarios y no establece claramente el nivel de significancia. Como fortaleza está que las normas internacionales ISO buscan promover la armonización entre normativas y estándares y son reconocidas y utilizadas ampliamente a nivel internacional y nacional. Lo anterior permite la credibilidad y aplicabilidad en el sector de la construcción costarricense (ver fig. 3).

**Estudio de caso: Aplicación al módulo habitacional Trópika**

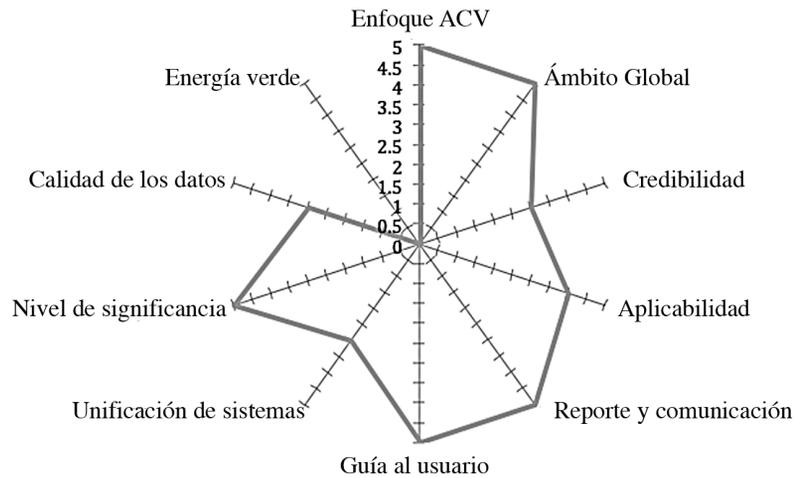
Por medio de la metodología *ISO/TS 14067:2013* adaptada al contexto costarricense se construyó la hoja de cálculo *Construye Neutral*, y se procedió a calcular la huella de carbono del módulo habitacional *Trópika*. El objetivo del estudio de caso fue realizar el análisis de ciclo de vida parcial de este módulo habitacional y determinar el impacto potencial sobre el calentamiento global de los procesos de adquisición de materiales, construcción de obra y distribución, generación de desechos y su correspondiente traslado al relleno sanitario. Las etapas de uso del edificio y el fin de su vida útil o deconstrucción estuvieron fuera del objeto de estudio. El alcance del estudio incluyó la contabilización de las emisiones directas e indirectas dentro del proceso.

**Cuadro 2.** Relación de variables y metodologías

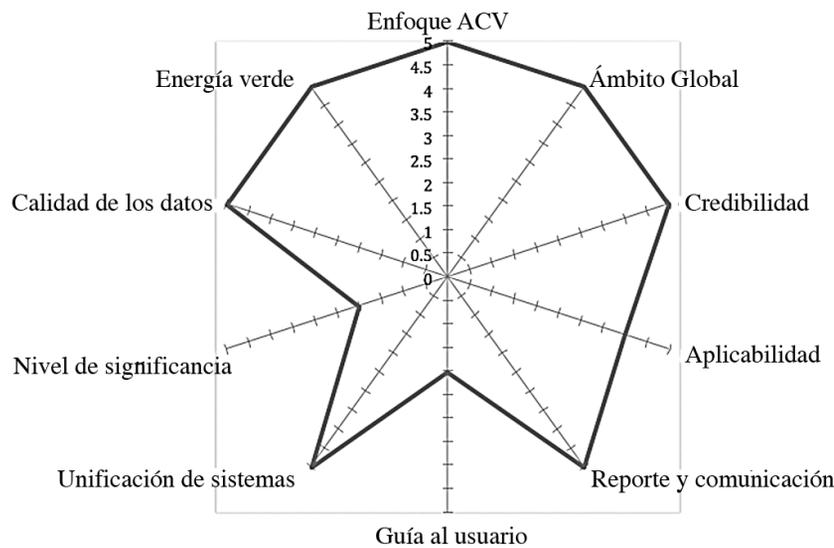
Variables	PAS 2050:2011	ISO/TS 14067:2013	GHG Protocol Product 2011
1. Enfoque ACV	5	5	5
2. Ámbito global	2	5	5
3. Credibilidad en sector construcción	1	5	3
4. Aplicabilidad en sector construcción	4	4	4
5. Reporte y comunicación	0	5	5
6. Guía para el usuario	5	3	4
7. Capacidad de unificación de sistemas	3	5	3
8. Nivel de significancia (claridad en definición)	5	3	5
9. Calidad de datos (ISO 14044)	5	5	3
10. Generación de electricidad renovable/compra de energía verde	5	5	0
TOTAL	35	45	37



**Figura 1.** Resultados de la evaluación de la metodología *PAS 2050:2011*



**Figura 2.** Resultados de la evaluación de la metodología *GHG Protocol Product 2011*



**Figura 3.** Metodología *ISO/TS 14067:2013* con relación a las variables analizadas

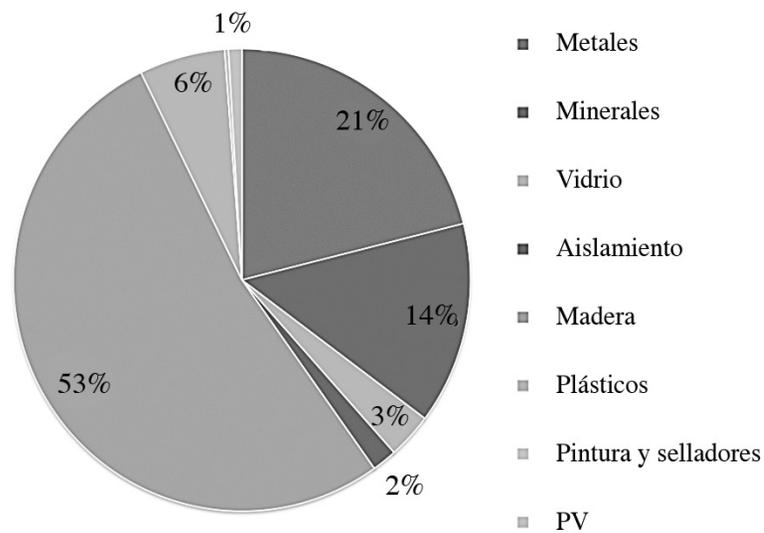
La unidad funcional se definió como el módulo habitacional constituido por la envolvente térmica, la estructura primaria, la estructura secundaria y el área construida exterior, con un total de 81 m<sup>2</sup> de construcción.

Los factores de emisión utilizados se obtuvieron en primera instancia de datos nacionales; en segundo lugar, se utilizaron fuentes secundarias como referencias bibliográficas y bases de datos internacionales (*benchmarking*) como Inventory of Carbon and Energy (ICE) Version 2.0, de Bath University.

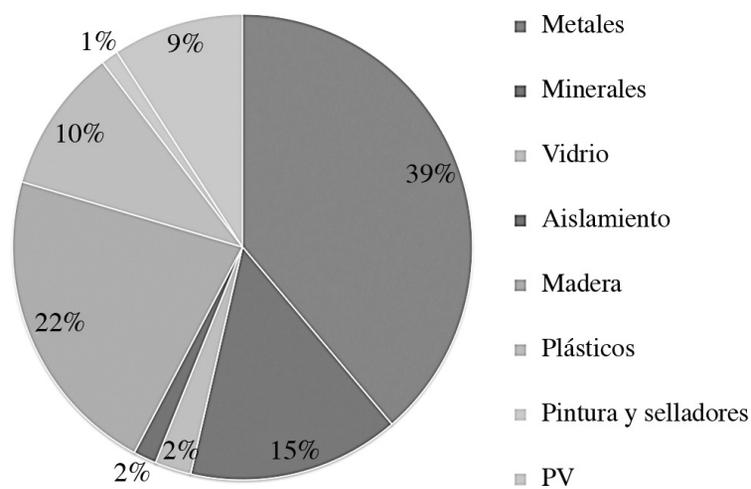
Los resultados indicaron que el carbono emitido por el módulo habitacional para los límites establecidos fue de 28 toneladas de CO<sub>2</sub>e, lo que corresponde a 350 kg CO<sub>2</sub>e por m<sup>2</sup> de construcción. Los materiales de construcción representaron el 80% de la huella de carbono total de la edificación y generaron 22,5 ton CO<sub>2</sub>e. Los desechos de construcción generaron 3,31 ton CO<sub>2</sub>e (12%), el transporte de materiales al sitio de construcción 1,86 ton CO<sub>2</sub>e (7%) y

el consumo de combustibles en obra 0,62 ton CO<sub>2</sub>e (2,20%). El transporte de desechos hasta el relleno sanitario generó 6 kg CO<sub>2</sub>e y el consumo eléctrico por el uso de herramientas e iluminación nocturna 0,08 kg CO<sub>2</sub>e.

El 50% de los materiales de construcción fue madera de melina, teca o pino. La madera representó el 53% del peso total del módulo, los metales el 21%, los minerales 14% y los plásticos 6%. Los metales generaron el 39% de las emisiones de GEI, seguidos por la madera, con el 22%.



**Figura 4.** Relación de porcentaje de masa (kg) entre los distintos materiales de construcción



**Figura 5.** Porcentaje según aporte de emisiones de GEI (kg CO<sub>2</sub>e) por categoría de material

De manera anexa al inventario de emisiones, se realizó la cuantificación de carbono fijado a partir de la biomasa acumulada en la edificación. El resultado final indicó que la fijación de carbono fue de -15 ton CO<sub>2</sub>e y el balance final de emisiones de 13 ton CO<sub>2</sub>e.

### Análisis de sensibilidad

Los resultados generados por medio de la hoja de cálculo *Construye Neutral* fueron validados mediante su comparación con los obtenidos con *software* especializado y otras calculadoras. Los datos constructivos de *Trópika* se introdujeron en el *software* para ACV llamado SimaPro 7.3.3, el cual utiliza datos de emisiones de Eco Invent versión 3.0. El proyecto se modeló para el ciclo de vida parcial con respecto a un único impacto ambiental, el Cambio Climático, método IPCC 2007. El resultado obtenido de 16 ton CO<sub>2</sub>e es un balance entre las emisiones generadas y la fijación del CO<sub>2</sub> (ver cuadro 3).

Se ingresaron los datos constructivos de *Trópika* en dos calculadoras libres: Build Carbon Neutral y Carbon Calculator, las cuales tienen un nivel de precisión de (+-) 25%. El resultado fue de 246 kg CO<sub>2</sub>e por m<sup>2</sup> y de 290 kg CO<sub>2</sub>e por m<sup>2</sup> de construcción, respectivamente.

Además, se compararon los resultados con datos de la literatura. Se encontró que la huella de carbono de *Trópika* es menor en comparación a la media de 403 kg CO<sub>2</sub>e por m<sup>2</sup> de Hammond y Jones (2008), y a la de un modelo de vivienda en madera de Monahan y Powell (2010) con 405 kg CO<sub>2</sub>e por m<sup>2</sup>.

**Cuadro 3.** Comparación del balance de emisiones según la hoja de cálculo *Construye Neutral* y el *software* SimaPro

Herramienta Ton CO <sub>2</sub> e		Resultados
<i>Construye Neutral</i>	Balance total	13
<i>Software</i> SimaPro	Balance total	16

**Cuadro 4** Comparación del cálculo de emisiones según la hoja de cálculo *Construye Neutral* con otras calculadoras y estudios de caso

Herramienta	Fuente	Resultados	
		Ton CO <sub>2</sub> e	Kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
<i>Construye Neutral</i>	Diseñada en el estudio	28	349
Calculadoras internet	Build Carbon Neutral	20	246
	Carbon Calculator	23,5	290
Casos en la literatura	Hammond & Jones	-	403
	Monahan & Powell	35	405

En cuanto a los estudios de caso en la literatura, Hammond y Jones (2008) establecen un promedio de 403 kg CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup> en 14 casos en Inglaterra. Cuantifican una amplia variedad de materiales y utilizan la base de datos abierta Inventory of Carbon and Energy (ICE) Version 2.0, que fue elaborada por ellos mismos, y es importante señalar hoja de cálculo *Construye Neutral*, también utiliza esa misma base de datos de emisiones.

Monahan y Powell (2010) analizan el carbono incorporado de una casa con un área de 83 m<sup>2</sup> en tres diferentes escenarios constructivos en Inglaterra con límites establecidos “de la cuna al sitio de construcción” (ciclo de vida parcial). El primer escenario es una casa de bajo consumo energético, sistema constructivo modular, marcos de madera prefabricados y cerramientos en madera, similar al caso de estudio *Trópika*. Este escenario produjo un total de 405 kg CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup> de construcción.

## Conclusiones y recomendaciones

El estudio realizado permite comprobar que las metodologías internacionales de medición de huella de carbono de producto se pueden adaptar a los procesos constructivos en el contexto costarricense, a través del establecimiento de criterios de aplicabilidad que delimiten el análisis y contextualicen el problema.

El análisis de metodologías internacionales permitió seleccionar la ISO/TS 14067:2013 *Carbon Footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication*. Esta fue implementada de manera adecuada en el análisis de huella de carbono del módulo habitacional *Trópika* desde un enfoque de ACV parcial.

La hoja de cálculo *Construye Neutral* diseñada en este estudio, así como la adaptación de la metodología ISO/TS 14067:2013 al contexto nacional de la construcción, se validaron a través de su aplicación en el estudio de caso y un análisis de sensibilidad. Este comprobó que los resultados obtenidos fueron equivalentes y comparables con la literatura y con los datos generados por otras herramientas.

En cuanto a la implementación de la metodología para la cuantificación de la huella de carbono, se recomienda gestionar y promover en las universidades y entes nacionales relacionados con el sector construcción el análisis y la aplicación de herramientas sistemáticas y procedimientos adecuados, como la especificación técnica internacional ISO/TS 14067:2013 *Carbon Footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication*. Todo ello con el fin de impulsar el avance del sector construcción hacia el desarrollo de proyectos sustentables bajos en huella de carbono, con enfoque de ciclo de vida y generar datos nacionales comparables entre sí.

## Agradecimientos

Se agradece al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT) y al Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT), por el aporte brindado para realizar estos estudios.

## Bibliografía

- Barrett, J. & Wiedmann, T. (2007). *A comparative footprint analysis of On-Site Construction and an Off-Site Manufactured home*. Stockholm Environment Institute. York: University of York.
- British Standards Institute. (2011). *PAS 2050:2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. Obtenido de bsi. shop: <http://shop.bsigroup.com>
- Cámara Costarricense de la Construcción. (2013). *Informe económico del sector de la construcción. Enero 2013*. Dirección de investigación y desarrollo técnico. San José: Cámara Costarricense de la Construcción.
- Chomkhamsri, K. & Nathan, P. (29 de abril, 2011). *Sustainable development*. Obtenido de <http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/Deliverable.pdf>.
- Department for Business, Innovation & Skills. (2010). *Estimating the amount of CO<sub>2</sub> emissions that the construction industry can influence: supporting material for the low carbon construction IGT report*. Department for Business, Innovation & Skills. Londres: BSI.

- Granados Solís, A. (2014). *Decimonoveno Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Carbono Neutralidad: Avances y Desafíos de cara al año 2021*. San José: Programa Estado de la Nación.
- Greenhouse Gas Protocol. (noviembre, 2011). *Standards, Product Life Cycle Standard*. Obtenido de <http://www.ghgprotocol.org>
- Hammond, G. & Jones, C. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 161 (2), 87-98.
- INTECO (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica). (2011). *Inte 12-01-06:2011. Sistema de Gestión para demostrar la C-neutralidad. Requisitos*. 2 ed. San José: Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Summary for policymakers*. IPCC.
- ISO (International Organization for Standardization). (2013). *ISO/TS 14067:2013 Greenhouse gases: Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification and communication*. Geneva: ISO.
- Lemaignan, B. & Wilmotte, J.Y. (marzo, 2013). *How to use the tool*. Obtenido de <http://www.geotechnicalcarboncalculator.com>
- MINAE, IMN (Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Meteorológico Nacional) (2014). *Inventario nacional de gases efecto invernadero y absorción de carbono 2012*. MINAE, IMN, GEF, PNUD. San José: Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Meteorológico Nacional, GEF, PNUD.
- MINAET (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones). (2009). (2009). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. San José: Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. Obtenido de <http://www.cambio-climaticocr.com>
- Monahan, J., & Powell, J. (2010, Setiembre). An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a life cycle assessment framework. *Energy and Buildings* 43, 179-188.
- TEC Team. (2014). *Project Manual #4*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
- UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). (2011). *Guía de manejo de escombros y otros residuos de la construcción*. HOLCIM. San José: UICN, Oficina Regional para Mesoamérica y la Iniciativa Caribe.
- van Gorkum, C. (2010). *Research Report: CO<sub>2</sub> Emissions and energy consumption during the construction of concrete structures*. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences. Delft: Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences.