



Received: 19-02-2017
Accepted: 03-03-2017

Herramienta de evaluación para la toma de decisiones sostenibles, durante el anteproyecto arquitectónico

Evaluation tool for sustainable decision-making during the architectural design.

¹Jorge Orondo; ²Luis A. Alonso; ³César Bedoya

¹Universidad Francisco de Vitoria (jorgeorondo@gmail.com), ²Massachusetts Institute of Technology (alonsolp@mit.edu),
³Universidad Politécnica de Madrid (cesar.bedoya@upm.es)

Resumen— Desde hace tiempo, muchos especialistas señalan que la clave para incorporar la sostenibilidad a una propuesta, de manera económicamente viable, es considerar los objetivos y criterios sostenibles desde los primeros pasos del proyecto, porque es cuando la relación entre la efectividad de las estrategias planteadas y el coste de implementarlas es más beneficiosa. El principal objetivo de este trabajo ha sido el desarrollo de una herramienta, denominada Green Improvement Tool v1.7, que simplifica al máximo las cuestiones relativas a la sostenibilidad, dando solución a las necesidades de sus potenciales usuarios y reuniendo al mismo tiempo varias características: claridad en sus términos y objetivos (para evitar confusiones y fallos de implementación), viabilidad técnica y económica en su aplicación, flexibilidad suficiente para adaptarse a situaciones y contextos diversos, capacidad de promover el uso de diferentes tecnologías y, ante todo, estimular el interés de dichos usuarios en un proceso de mejora continua. Los ensayos realizados en casos de estudio reales, durante el proceso de validación, indican que la herramienta permite anticipar desde las fases iniciales, con una fiabilidad media superior al 95%, más del 80% de los resultados al final del proceso.

Palabras clave— Metodología de diseño, evaluación de la sostenibilidad, herramienta de toma de decisiones.

Abstract- Many experts have long pointed out that the key to incorporating sustainability into a proposal in an economically viable way is to consider sustainable objectives and criteria from the very first steps of the project because the relationship between the effectiveness of the strategies proposed and The cost of implementing them is more beneficial. The main objective of this work has been the development of a tool, called Green Improvement Tool v1.7, which simplifies as much as possible the questions related to sustainability, giving solution to the needs of its potential users and bringing together several characteristics: Clarity in terms and objectives (to avoid confusion and failure to implement), technical and economic feasibility in its application, sufficient flexibility to adapt to different situations and contexts, ability to promote the use of different technologies and, above all, to stimulate interest of these users in a process of continuous improvement. During the validation process, the tests carried out in real cases indicate that the tool allows more than 80% of the results at the end of the process to be anticipated from the initial phases, with an average reliability of more than 95%.

Index Terms— Design methodology, sustainability assessment, decision-making tool.

I. INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de un edificio se suele idealizar como un proceso lineal y secuencial, con un claro conjunto de decisiones y acciones implementadas para alcanzar el resultado final: el edificio terminado. En realidad el proceso de diseño convencional no consigue una definición tan precisa y suele desarrollar las soluciones conforme avanza (Warren, 2003). Habitualmente la evaluación de la sostenibilidad de una propuesta se inicia en la fase del Proyecto Básico y se documenta durante el desarrollo del Proyecto de Ejecución, cuando ya se han perdido muchas oportunidades de mejora, por no haber considerado distintos objetivos y opciones de diseño lo antes posible y haber incorporado al equipo de consultores clave demasiado tarde (Lupísek et al., 2010). Por ejemplo, la decisión adecuada en cuanto a la compacidad del edificio y su orientación, puede reducir el consumo de energía entre el 30% y el 40%, sin costes adicionales (Wang et al., 2005).

Por este motivo, desde hace tiempo, muchos especialistas señalan que la clave para incorporar la sostenibilidad a una propuesta de manera económicamente viable es considerar los objetivos y criterios sostenibles desde los primeros pasos del proyecto, en la fase de Estudios Previos o como tarde en el Anteproyecto, porque es cuando la relación entre la efectividad de las estrategias planteadas y el coste de implementarlas es más beneficiosa (Crosbie et al., 2011). En otras palabras, tal como ilustra la “Curva MacLeamy”, la oportunidad de incorporar cambios en el proyecto para mejorar su rendimiento sostenible disminuye significativamente durante el avance del proceso, mientras que el coste de introducir cualquier tipo de cambio aumenta dramáticamente (Zimmerman, 2006). Hacer sostenible una propuesta en la que no se consideró la sostenibilidad desde el inicio es, sin lugar a dudas, mucho más caro (entre un 15% y un 30% superior al coste habitual por m²) y además se conseguirá un resultado mucho peor en términos de bienestar de los ocupantes y beneficios económicos, por la reducción de los costes de operación durante el ciclo de vida del edificio (Eddington and Axford, 2009; VERDE, 2012).

Esto es así porque en la primera fase del diseño, aunque no se tenga información exhaustiva de la propuesta, la libertad del diseñador es mucho mayor, ya que aún no se ha establecido prácticamente ninguna restricción. Durante el desarrollo del proyecto se obtiene más información sobre el rendimiento del mismo, pero las posibilidades de cambio y adaptación son menores, porque las decisiones principales ya

han sido tomadas (Allione et al., 2011). Por este motivo es necesario encontrar y evaluar múltiples posibles soluciones a una misma cuestión, y no tomar una decisión definitiva hasta el “último momento responsable” para hacerlo, entendido este momento como el punto donde no tomar una decisión elimina otras posibles alternativas de mejora (Hansen and Olsson, 2011). Si se establecen correctamente los objetivos a cumplir desde el inicio y se aprovechan las sinergias entre las diferentes estrategias a adoptar durante el desarrollo de un proyecto integrado, se ha calculado que se pueden conseguir ahorros en el coste de construcción entre el 2% y el 10%, y este porcentaje puede llegar a incrementarse hasta el 30%, si se cuenta con equipos pluridisciplinares con experiencia en este tipo de proyectos (Cook et al., 2007).

Considerando que al iniciar un proyecto, resulta inviable asumir el tiempo y coste de realizar un análisis del ciclo de vida (ACV) de cada posible alternativa, debido a la gran cantidad de datos que necesita analizar (generalmente no disponibles en esta fase) y porque se requiere mucho tiempo para aplicarlo (en una fase con unos plazos de desarrollo muy limitados) (Orondo and Bedoya, 2012), el principal objetivo y logro de la investigación, ha sido el desarrollo de una herramienta que simplifica al máximo las cuestiones relativas a la sostenibilidad, dando solución a las necesidades de sus potenciales usuarios y reuniendo al mismo tiempo varias características: claridad en sus términos y objetivos (para evitar confusiones y fallos de implementación), viabilidad técnica y económica en su aplicación, flexibilidad suficiente para adaptarse a situaciones y contextos diversos, capacidad de promover el uso de diferentes tecnologías y, ante todo, estimular el interés de dichos usuarios en un proceso de mejora continua (Atanasiu, 2011). Además, esta herramienta está basada en las normativas y metodologías existentes y tiene en consideración, en todo caso, el ciclo de vida del edificio.

II. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

El objetivo de esta investigación ha sido el desarrollo de una herramienta de cálculo para el apoyo en el proceso de toma de decisiones relativas a la sostenibilidad durante las fases iniciales del desarrollo del proyecto, que se ha denominado Green Improvement Tool v1.7. En este apartado, se procede a definir la herramienta diseñada desde el punto de vista instrumental, anticipando que su aplicación no es suficiente para obtener ningún tipo de certificación del edificio, ya que no garantiza la obtención de los créditos incluidos en la evaluación, si no que ofrece una hoja de ruta que apoya la toma de decisiones sostenibles.

La herramienta se compone de un archivo, en formato Microsoft Excel versión 2007 con macros habilitados,

J. Orondo es profesor en la ETS Arquitectura de la Universidad Francisco de Vitoria (Madrid).

L.A. Alonso está en el MIT Media Lab, Massachusetts Institute of Technology (USA).

C. Bedoya es catedrático en la ETS Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid.

compuesto por 8 hojas: portada e instrucciones, introducción de datos previos, una hoja por cada uno de los cinco grupos de estrategias considerados y otra hoja adicional como resumen de los resultados de la evaluación. Para que la herramienta pueda realizar los cálculos previstos en algunas prácticas, hay que introducir al inicio de la evaluación los datos de partida en la hoja destinada a tal fin. Para el correcto funcionamiento de la herramienta es necesario introducir todos los datos de partida y marcar, al menos, una práctica en cada estrategia.

Las cuestiones a considerar por el usuario de la herramienta se dividen en grupos relacionados con temas de arquitectura, ingeniería y construcción, para que en el momento en que se esté desarrollando cada uno de estos temas durante el proyecto, se tenga presente cuáles son las posibles estrategias a considerar y así mejorar la sostenibilidad de cada estrategia, de cada grupo y del conjunto del edificio. Partiendo de las categorías de los diferentes sistemas de certificación, se han seleccionado los que mayoritariamente dependen de decisiones tomadas durante el anteproyecto (primeras fases de toma de decisiones) y qué además suponen un amplio porcentaje del presupuesto de ejecución material de la obra.

Tal como se muestra en la figura 1, esta metodología ha permitido dividir las entradas de la herramienta en cinco grupos: proyecto (G1 Project), emplazamiento (G2 Location), parcela (G3 Site), energía (G4 Energy) y agua (G5 Water).

A continuación se procede a exponer el sistema de

introducción de datos en la herramienta. En la pestaña de datos previos (Preliminary data) se requiere la superficie total de la parcela, la ocupada por el edificio, la total ajardinada (incluyendo cubierta y/o patios), la ajardinada con plantas autóctonas, y la no ajardinada (referida a las zonas peatonales y el aparcamiento en superficie). También se han de introducir los datos climáticos, donde se tiene que indicar la media de las precipitaciones pluviométricas anuales de la zona, la temperatura interior anual media pretendida, la temperatura base en verano e invierno (en función del uso previsto de refrigeración y calefacción), la temperatura media anual exterior y media anual de las máximas y de las mínimas, así como los grados-día anuales con base 15/15.

En el apartado referido a la envolvente térmica, hay que aportar la superficie total de cubierta y su transmitancia térmica, la superficie de lucernarios y su transmitancia térmica, la superficie de fachada y la transmitancia térmica de la parte opaca, la superficie acristalada de fachada, su transmitancia térmica y su factor solar, la superficie útil acondicionada interior, las condiciones de compacidad y de soleamiento por orientación, la inercia térmica del edificio en función de la masividad de sus elementos constructivos y la estanquidad al aire de la carpintería.

En cuanto a las instalaciones hay que introducir el rendimiento instantáneo de calefacción y refrigeración y las emisiones de CO₂ y NO_x asociadas al tipo de combustible

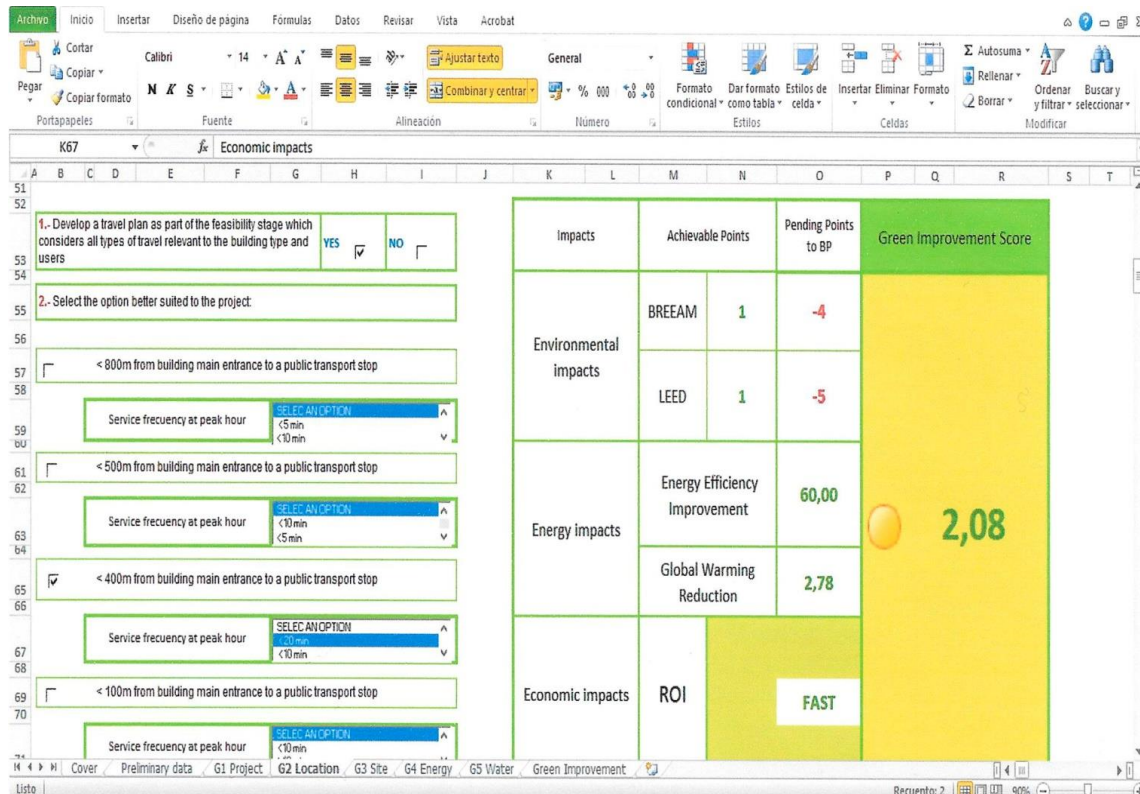


Fig. 1. Hoja de cálculo que conforma la herramienta GIT v1.7.

prioritario y a la eficiencia de los equipos.

Para el cálculo del consumo de agua de riego se necesita aportar el coeficiente de jardín en función de las especies vegetales previstas, la evapotranspiración de referencia (ET_o) del emplazamiento, la media mensual de las precipitaciones pluviométricas de la zona, la eficiencia del sistema de riego previsto y la superficie destinada a la captación de pluviales (incluyendo su coeficiente de escorrentía y el rendimiento del filtro hidráulico utilizado en el aljibe).

Por último, para el consumo de agua potable en el interior del edificio, se debe determinar la ocupación diaria prevista, diferenciando entre empleados y clientes, y los consumos y caudales de los aparatos sanitarios previstos (indicando cero si se utilizara agua reciclada).

A. Grupos y estrategias consideradas

En este apartado se define la estructura de los cinco grupos, con sus correspondientes estrategias, en las que se ha dividido la toma de decisión en el inicio del proyecto. Esta división se ha basado en el análisis de los sistemas de certificación más relevantes a nivel Europeo, como son BREEAM ES Comercial 2010 (BREEAM, 2010), BREEAM International 2013 (BREEAM, 2013), LEED CS v2009 (LEED, 2009), LEED CS v4 (LEED, 2013), DGNB International (DGNB, 2013), HQE International (HQE, 2013), VERDE (VERDE, 2012; Macías and García, 2010) y la propuesta de eco-etiqueta para edificios de la UE (de acuerdo a la directiva EC 66/2010) (EU Eco-label Project, 2011).

El peso de cada grupo dentro de la herramienta (proyecto, localización, emplazamiento, energía y agua), ha sido determinado mediante el análisis de estos sistemas: de cada

uno se ha extraído el peso relativo de las estrategias que abarca cada grupo y, tal como se muestra en la figura 2, se ha obtenido el peso final por cada grupo. Gracias a esta operación, los resultados que se obtienen por la herramienta quedan validados, en una primera fase, ya que el peso de cada grupo se balancea con los diferentes puntos de vista metodológicos de los sistemas de certificación elegidos.

1 - Grupo Proyecto

Estrategia 1.1 Proceso:

Considera, en las fases de diseño, construcción, puesta en marcha y ocupación, el grado de involucración de los principales responsables del proyecto (propiedad, equipo de diseño, especialista en sostenibilidad y ocupantes), especificando las cuestiones consideradas.

En esta estrategia, la propiedad debe evaluar el grado de compromiso que asumirá al definir sus propios requerimientos, en cuanto a la sostenibilidad del proyecto, en un documento específico (Owner Project Requirements - OPR), que actualizará durante el desarrollo del proyecto. En este documento definirá si desarrollará estrategias para intentar conseguir que los futuros inquilinos cumplan con estos objetivos; si identificará y consultará a los principales agentes externos afectados por el proyecto (responsables políticos, portavoces de la comunidad, futuros usuarios, personal de mantenimiento, etc.) y si tendrá en cuenta su opinión para el desarrollo del mismo; si existe la voluntad de realizar una consulta posterior a la ocupación, para establecer el grado de satisfacción de los ocupantes con el rendimiento del edificio; y, por último, si difundirá los resultados de esta

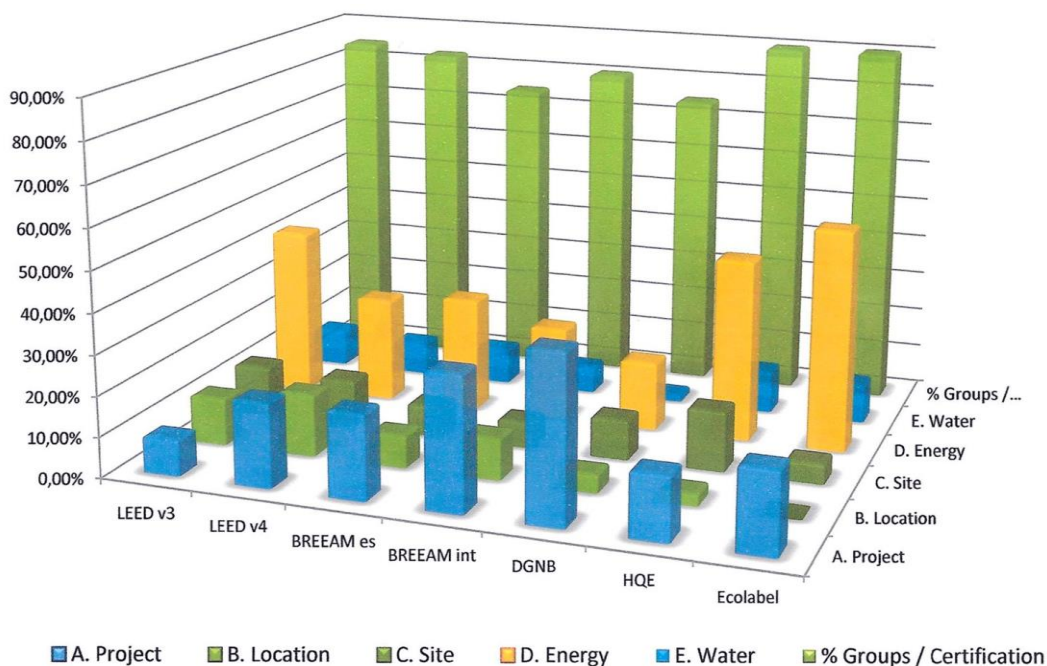


Fig. 2. Peso de los diferentes grupos en relación con los sistemas de certificación. Estudio realizado para definir los pesos de la herramienta.

consulta para compartir cualquier buena práctica y/o lección aprendida.

Respecto al equipo de diseño (arquitectura e ingeniería), la estrategia 1.1 evalúa si se redactarán y actualizarán las bases del diseño (BOD), en base a los requerimientos de la propiedad (OPR); si se realizará una simulación preliminar energética y del consumo de agua; si se analizará la viabilidad de instalar diferentes sistemas de energías renovables; si se elaborará un plan de medida y verificación; y si se desarrollará una guía del edificio para los futuros ocupantes, en la que se expliquen las estrategias de diseño y construcción y las recomendaciones sobre el uso y mantenimiento del edificio.

Estrategia 1.2 Consultores:

En esta estrategia, la herramienta evalúa el nivel de integración de especialistas externos al equipo de proyecto. Se analiza si un ecólogo acreditado realizará todas o alguna de las siguientes tareas: evaluación ambiental de la parcela y el porcentaje de sus recomendaciones que se seguirán; confirmar el cumplimiento de las normativas locales; redactar un plan de gestión de la biodiversidad local; y/o formar a los trabajadores sobre cómo proteger el medio ambiente, durante la ejecución de la construcción.

Verifica si se realizará un análisis de ciclo de vida (ACV - LCA), indicando los elementos considerados en su alcance (incluso si se tendrá en cuenta la incorporación de sistemas de energía renovable); si la metodología usada cumplirá con la ISO 14044, y si las categorías de impacto en las que se pretende conseguir algún tipo de reducción.

También, se considera si se realizará un análisis del coste de ciclo de vida (ACCV - LCC), indicando los elementos incluidos en su alcance; si su resultado influirá en la toma inicial de decisiones; si se actualizará durante el desarrollo del proyecto; y si determinará la estrategia de mantenimiento a implementar durante la fase de operación del edificio. Considera si se realizará la verificación de la puesta en marcha (commissioning - Cx), indicando los sistemas incluidos en su alcance, incluso si se tendrá en cuenta la envolvente (building envelope commissioning - BECx) y las comprobaciones a realizar durante, al menos, el primer año de operación del edificio.

Además se tiene en cuenta si se va a incluir en el equipo de trabajo a un especialista en acústica, desde las fases iniciales de proyecto, para verificar el impacto sobre el emplazamiento de los focos externos de ruido, para recomendar tratamientos diferenciados de zonas y cerramientos, para verificar la zonificación adecuada de los espacios interiores y para garantizar la satisfacción de las necesidades de los futuros usuarios con necesidades especiales.

Estrategia 1.3 Contratista:

Con esta estrategia la herramienta analiza las medidas que se implantarán para reducir los impactos ambientales durante

la construcción: si se contará con un sistema de gestión ambiental acreditado (ISO 14001 o similar); si se registrarán los consumos de energía, de agua y de transporte asociados a la ejecución de los trabajos; si se implementará un plan de control de erosión y sedimentación (PCES) y/o un plan de calidad ambiental interior (PCAI); si se formará a los trabajadores en materia de medio ambiente; y si se registrarán todas las medidas implementadas para la protección del entorno natural.

Al mismo tiempo, se evalúa el porcentaje de residuos de construcción y demolición que se pretende valorizar, evitando su envío a vertedero (mediante una adecuada clasificación in situ); si al terminar la construcción se ha previsto realizar ensayos y pruebas mediante termografía, de estanquidad, acústicos y/o de calidad del aire.

Por último, considera si los materiales y sistemas constructivos de los principales componentes del edificio contarán con algún tipo de certificado ambiental (eco-etiquetas o similares) y si los productos químicos aplicados en el interior (adhesivos, sellantes, pinturas, recubrimientos y suelos) tendrán un bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles (según los límites máximos definidos en las normas de referencia).

2 - Grupo Emplazamiento

Estrategia 2.1 Entorno:

La estrategia 2.1 toma en consideración las características de la parcela, su probabilidad de inundación y si está considerada como previamente contaminada por alguna directiva local. Analiza el porcentaje de urbanización previo de la parcela y la densidad construida (entendida como superficie construida total del edificio por unidad de superficie de parcela) del proyecto y de las parcelas colindantes. También evalúa los servicios básicos existentes en la comunidad próxima (teniendo en cuenta la distancia peatonal aproximada entre cada uno y la entrada principal del edificio) y los servicios que el futuro edificio va a proporcionar a esta comunidad; si existen actividades acústicamente sensibles en el entorno de la parcela (viviendas, centros sanitarios, colegios, etc.) o si se van a implantar medidas para garantizar que no serán afectadas por las actividades del futuro edificio.

Estrategia 2.2 Conectividad:

En la estrategia de conectividad se analiza la distancia desde la entrada principal del edificio a la parada de transporte público más cercana y la frecuencia del servicio en hora punta, incluyendo las futuras paradas y líneas que se vayan a generar por el desarrollo del proyecto (incluso si son privadas).

3 - Grupo Parcela

Estrategia 3.1 Paisajismo:

La herramienta calcula automáticamente el porcentaje de la

superficie de parcela no ocupada, ajardinada y ajardinada con especies autóctonas. Evalúa el acabado de cubierta, a través del índice de reflectancia solar (SRI), las prácticas previstas para gestionar el agua de lluvia y si se implantarán sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDs) y cuál es la principal práctica prevista para reducir el efecto isla de calor a nivel de suelo.

Estrategia 3.2 Aparcamiento:

En esta estrategia se toma en consideración el porcentaje de plazas de aparcamiento cubiertas por algún dispositivo o si están situadas bajo rasante; si la capacidad del aparcamiento excede el mínimo exigido por la normativa (si no hubiera normativa se pueden tomar como referencia las guías de buenas prácticas); si se reservarán plazas preferentes para vehículos compartidos y para vehículos clasificados como de combustible eficiente y si, además de la reserva de plazas, se instalarán puntos de carga eléctrica o estaciones de servicio de combustible alternativo y si se va a contar con las instalaciones adecuadas de aparca-bicicletas y vestuarios adaptados.

También se incluye en esta estrategia si se instalarán puntos de recogida fácilmente accesibles y almacenes centralizados destinados a la recolección de residuos reciclables.

Estrategia 3.3 Iluminación exterior:

En función de la zona lumínica en la que se localiza la parcela, la herramienta, mediante la estrategia 3.3, evalúa el porcentaje de iluminación emitido sobre la horizontal de las luminarias y la iluminancia vertical en los límites de la parcela (cuanto mayor sea la zona lumínica, mayores son los niveles permitidos en las otras dos prácticas).

También se requiere el análisis del porcentaje de la iluminación interior que se apagará automáticamente durante el horario nocturno y se deben marcar las condiciones que cumplan con la estrategia de iluminación exterior prevista.

Por último, se ha de considerar si la eficacia luminosa en el aparcamiento, viales, carteles e iluminación vertical, se garantizará mediante dispositivos de regulación automática y la prescripción de lámparas energéticamente eficientes.

4 - Grupo Energía

Estrategia 4.1 Bienestar:

En Bienestar se evalúa si el proyecto cumplirá con la normativa de calidad del aire (EN 15251 y EN 13779 o ASHRAE 62.1); si cumplirá con la normativa de bienestar térmico (ISO 7730); si los niveles de bienestar se definirán de forma analítica (PMV y PPD) o si se realizará un análisis térmico dinámico completo; y si se desarrollará un plan de acciones correctivas, si después de una año de ocupación más del 20% de los ocupantes no se encontraran en condiciones de bienestar térmico.

Esta estrategia también analiza el porcentaje de superficie

útil, regularmente ocupada, que cumple con las condiciones recomendadas de distancia máxima hasta la ventana y proporción de hueco respecto al muro; si las vistas están disponibles a una altura desde el suelo mínima y máxima, así como las características de las vistas de las que se disfrutarán desde el interior del edificio; si se realizará una simulación lumínica que demuestre unos niveles de iluminación natural suficientes; si se instalaran dispositivos para controlar el deslumbramiento y las características de estos dispositivos; y, por último, si se pretenden incluir estrategias de ventilación natural, considera si el caudal necesario se garantizará de forma prestacional o no.

Estrategia 4.2 Eficiencia energética:

Definiendo un factor de corrección de la temperatura, en función del aislamiento previsto y de los puentes térmicos, la herramienta calcula automáticamente el porcentaje de reducción del consumo de energía y de las emisiones de CO₂, respecto a los valores de referencia del sector. También considera las emisiones de NO_x, introducidas en la hoja datos de partida, y las características del refrigerante previsto, en base a su potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) y a su potencial de calentamiento global (GWP).

En cuanto a la controlabilidad y gestión energética, la herramienta analiza las zonas en las que se permitirá un control independiente de los sistemas de iluminación artificial, de acuerdo a las mejores prácticas nacionales; si se instalarán contadores de energía en los principales sistemas del edificio; si los futuros ocupantes tendrán la capacidad de medir sus propios consumos y si se monitorizará que los sistemas de ventilación cumplan con las condiciones de diseño (específicamente el flujo de entrada de aire en los espacios con ventilación mecánica y la concentración de CO₂ en los espacios con ventilación natural).

Estrategia 4.3 Energías renovables:

Esta estrategia evalúa si se contratará, durante un periodo de tiempo mínimo, un porcentaje del suministro energético procedente exclusivamente de fuentes renovables ex situ y el porcentaje de reducción del consumo energético que supondrá la instalación de sistemas de energía renovable in situ, en función del tipo de sistema.

5 - Grupo Agua

Estrategia 5.1 Riego:

La herramienta calcula automáticamente el porcentaje de reducción del consumo de agua respecto a un jardín de referencia, en base a la selección de especies vegetales definidas en los datos de partida. También tiene en cuenta si la reducción del consumo de agua se conseguirá con alguna de las prácticas previstas para el sistema de riego. En caso de pretender usar agua de lluvia, la herramienta calcula automáticamente el volumen óptimo del aljibe, en base a las

precipitaciones de la localización y a la demanda de riego.

Estrategia 5.2 Consumo de agua:

La herramienta calcula automáticamente el consumo de agua potable de cada aparato sanitario y el porcentaje de reducción del consumo, respecto a los aparatos de referencia. También evalúa el porcentaje de aguas grises y/o negras que se van a reciclar in situ y si se va a reducir el consumo de agua potable en la red de saneamiento.

Estrategia 5.3 Monitorización:

En este apartado se consideran los principales usos en los que se instalarán contadores individuales de consumo y sus características; y si se incluirán detectores de fugas, al menos en la red principal y en los aparatos sanitarios.

B. Metodología para la interpretación de resultados

Para dividir una decisión compleja en un conjunto de cuestiones simples y facilitar la comprensión y solución del problema propuesto, ha sido necesario definir con claridad qué se está evaluando (estrategias), cómo se cuantifican sus características (indicadores y rendimiento), con qué se compara la evaluación (benchmarking) y de qué manera se comunica el resultado (potencial de mejora) (Álvarez et al., 2010).

1 - Evaluación de las estrategias

Cada una de las estrategias consideradas en la herramienta, presenta una evaluación relativa y otra absoluta. La evaluación relativa se ofrece en verdadera magnitud para los indicadores ambientales (puntos BREEAM y LEED), en porcentaje para los indicadores energéticos (mejora de la eficiencia energética y reducción del calentamiento global) y de forma cualitativa para los indicadores económicos (sobrecoste y retorno de la inversión).

La evaluación de los indicadores ambientales presenta los puntos que se podrían conseguir tanto en LEED como en BREEAM en dos formatos: “viables” y “pendientes”. Los puntos viables son los que supondría la implementación de la práctica elegida (siempre que a lo largo del proceso se completaran los requerimientos específicos del sistema de certificación), mientras que la puntuación pendiente establece la diferencia de puntos hasta alcanzar la mejor práctica. De esta forma se puede conocer la relevancia de las prácticas implementadas en la obtención de una posible certificación y el margen de mejora hasta la mejor práctica. En ningún caso una evaluación “viable” garantiza la obtención futura del crédito y, por tanto, un determinado nivel de certificación.

La evaluación de los indicadores energéticos se expresa en porcentaje en el rango [+100%, -100%] correspondiente al conjunto de mejores y peores prácticas consideradas en la estrategia. La combinación de diferentes prácticas obtendrá un porcentaje, obtenido mediante interpolación no lineal, comprendido en ese rango. Esto supone que obtener un

resultado positivo representa que la práctica implementada contribuye a mejorar el rendimiento energético de la estrategia.

El primer indicador económico “sobrecoste” expresará su evaluación en términos de “sin coste”, “coste bajo” o “coste alto”, asignándose a cada práctica de forma teórica y en base a las tendencias históricas del mercado y a la experiencia profesional. El segundo indicador económico, “retorno de la inversión”(ROI), representa el periodo de tiempo en el que se recupera cualquier inversión inicial gracias al ahorro en los costes de operación, por lo que se evalúa en términos de “rápido” (menos de 3 años para las cuestiones relativas al proyecto y menos de 5 para las relativas a la construcción), “lento” (entre 3 y 5 o entre 5 y 7 años), o “muy lento” (más de 5 o 7 años).

Para obtener la evaluación absoluta de la estrategia, a partir de la evaluación relativa de los indicadores, es preciso definir una práctica habitual del sector para cada una. En esta versión de la herramienta las prácticas habituales se han definido de forma teórica y en estos momentos se están actualizando con la recopilación de datos que se van obteniendo del uso de la herramienta en diferentes encargos profesionales y proyectos.

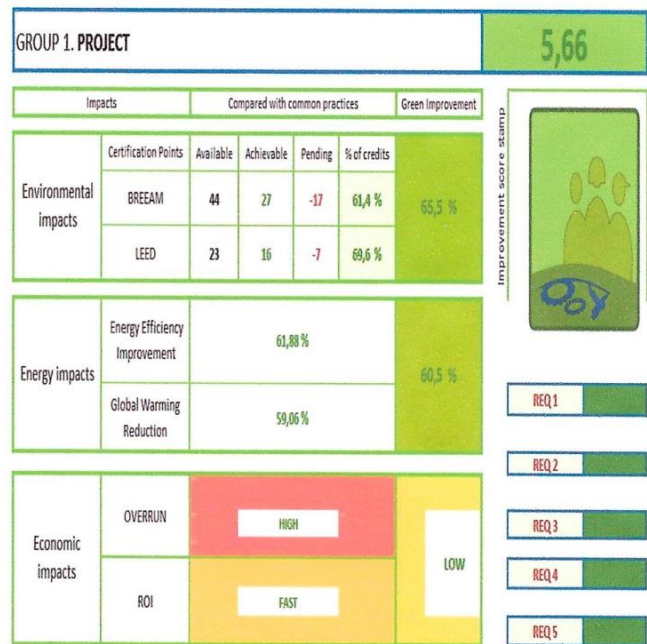


Fig. 3. Evaluación relativa y absoluta del grupo Proyecto.

La evaluación relativa de cada uno de los 6 indicadores de la práctica habitual se normalizará con el valor [0]. En el resto de prácticas la evaluación relativa se normalizará en el rango [-10, 0] y [0, +10], siendo [-10] el valor asociado a la peor práctica y [+10] la valoración de la mejor práctica. Los valores intermedios se obtienen al dividir el rango en deciles. La evaluación absoluta de cada estrategia se obtiene de la media aritmética de los valores normalizados de cada uno de los

indicadores, sin incluir ningún factor de ponderación que priorice alguno de ellos. Una evaluación absoluta positiva, en el rango [0, +10], significa que las prácticas analizadas mejoran el nivel de sostenibilidad, comparadas con las prácticas habituales consideradas.

2 - Evaluación de los grupos

Al igual que las estrategias, cada uno de los grupos considerados en la caracterización de la herramienta presenta una evaluación relativa y otra absoluta y, por tanto, tienen la misma base de interpretación que éstas (figura 3). La evaluación relativa presenta los puntos BREEAM y LEED (viabiles y pendientes) que consigue el conjunto del grupo, el porcentaje de mejora de los indicadores energéticos, y la calificación de los indicadores económicos.

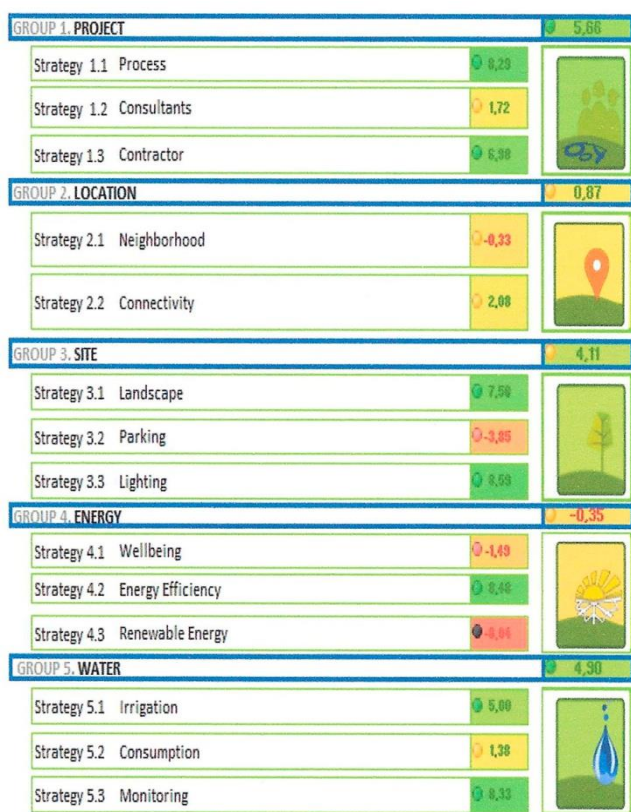


Fig. 4. Evaluación absoluta de los grupos y estrategias.

La evaluación absoluta del grupo se obtiene mediante la media ponderada de la evaluación absoluta de cada estrategia. Como factor de ponderación se considera el peso de cada estrategia en el conjunto del grupo, asignado en base al análisis de las diferentes metodologías de evaluación consideradas para el desarrollo de la herramienta. También se ofrece el potencial de mejora del grupo, que refleja el margen de mejora existente hasta alcanzar el mejor resultado posible, con las prácticas implementadas en cada estrategia.

3 - Evaluación del proyecto

La evaluación del conjunto del proyecto se ofrece en una

pestaña independiente de la herramienta y está compuesta por tres hojas resumen imprimibles. La primera (figura 4) recoge la evaluación absoluta obtenida en cada una de las estrategias y de los grupos. Los valores positivos representan que las prácticas implementadas en las estrategias y grupos mejoran el rendimiento que se obtendría con las prácticas habituales.

Esta interpretación se acompaña visualmente con el efecto de que las celdas son cada vez más verdes con los resultados positivos hasta la mejor evaluación [+10] y cada vez más rojas hasta la peor evaluación [-10]; también convierte estos datos en un gráfico de líneas con las tres referencias de rendimiento consideradas.

La segunda hoja de resultados (figura 5), ofrece la evaluación, relativa y absoluta, del proyecto y su potencial de mejora respecto a las prácticas habituales, de la misma forma que en cada uno de los grupos. La evaluación absoluta del proyecto se obtiene mediante la media ponderada de la evaluación absoluta de cada grupo, usando como factor de ponderación el peso de cada grupo en el conjunto del proyecto, asignado de forma subjetiva en base a la importancia de sus indicadores ambientales (a mayor número de créditos LEED y BREEAM relacionados con un grupo, mayor peso de este grupo en el conjunto del proyecto).

En la tercera y última hoja (figura 6), se presenta el gráfico de la huella de la evaluación del proyecto (green improvement footprint). Dentro del contorno exterior, que representa la huella de implementar las peores prácticas, se superponen la huella de las prácticas habituales y las prácticas implementadas. El objetivo siempre debe ser que la huella de las prácticas implementadas sea lo menor posible y, en cualquier caso, menor que la huella de las prácticas habituales.

III. RESULTADOS Y DISCURSIÓN

En este apartado se realiza un análisis de los resultados de la investigación, priorizando en dos campos fundamentales, la validación de la herramienta y la fiabilidad de los resultados.

A. Validación de la herramienta

El proceso de validación de la evaluación realizada por la herramienta se divide en tres fases: revisión de la operatividad de la herramienta, calibración de los cálculos y comprobación de los resultados.

La revisión de la operatividad de la herramienta se realiza con la colaboración de sus potenciales futuros usuarios (participantes en el proyecto de investigación), que han comprobado las características funcionales de la interfaz: la viabilidad de obtener los datos que demanda para su funcionamiento, la facilidad de entendimiento de los resultados que ofrece, la aplicabilidad que tendrá a su trabajo cotidiano, etc. Sus comentarios se han analizado para establecer la viabilidad de introducir los posibles cambios



Fig. 5. Evaluación del proyecto y determinación de su potencial de mejora.

propuestos para la mejora de la herramienta.

Aunque el proceso de calibración y validación de la herramienta es constante y aún se continúa trabajando en el mismo, ya se ha realizado una serie de calibraciones que ofrecen un nivel de fiabilidad media superior al 95%. La calibración de los cálculos internos de la herramienta consiste en realizar un número suficiente de ensayos (al menos 6 en cada versión de la herramienta, lo que representa un mínimo de partida de más de 50 ensayos), introduciendo datos de partida teóricos y comprobando que los resultados obtenidos se ajustan a las estimaciones iniciales. De esta forma se han revisado tanto las fórmulas de cálculo del rendimiento de los indicadores, como las interacciones entre los diferentes apartados. Si los resultados obtenidos presentaban una desviación significativa respecto a los estimados, se ha realizado una revisión de la calibración hasta su completo ajuste.

La validación de los resultados de la herramienta, se ha realizado ensayándola con dos casos de estudio reales (Caso A y B). Se han introducido en la herramienta los datos disponibles al inicio del proyecto y los resultados obtenidos se han comparado con la evaluación real de cada proyecto, una vez desarrollado.

Para esta comparación se cuenta con la colaboración de sus respectivos project managers y con los consultores responsables de obtener la certificación BREEAM en cada proyecto. Este análisis ha permitido detectar ajustes a realizar en la configuración de la herramienta y, sobre todo, ha

determinado el grado de fiabilidad de los resultados que ofrece (92,7% en el caso más desfavorable). Si los resultados obtenidos hubieran presentado una desviación significativa respecto a los reales, hubiera sido necesario revisar la calibración y volver a realizar la validación, hasta ajustar los resultados.

B. Fiabilidad de los resultados

La validación de los resultados de la herramienta se ha realizado tanto de forma subjetiva como objetiva. La primera consiste en discutir con los project managers de cada caso de estudio las conclusiones del análisis ofrecido por la herramienta, por lo que se basa en la opinión de especialistas con amplia experiencia en el desarrollo de este tipo de proyectos, pero no expertos en el campo de la sostenibilidad.

La evaluación objetiva se ha basado en comparar la evaluación relativa, ofrecida por la herramienta para los puntos BREEAM adquiribles, con el resultado de la pre-evaluación BREEAM realizada por el asesor acreditado dentro del proceso de certificación del edificio.

En el Caso A se pre-evaluaron como posibles 70 créditos sin coste y 11 con coste bajo, lo que supondría, después de incluir los factores de ponderación asignados al país, un nivel de certificación “Muy Bueno”. El resultado ofrecido por la herramienta es que sería posible conseguir 64 créditos con un sobrecoste bajo, lo que comparado con los 81 pre-evaluados significaría una fiabilidad del 79%. En esta comparación básica no se está considerando el diferente alcance de ambos análisis (la pre-evaluación BREEAM considera el 100% de los

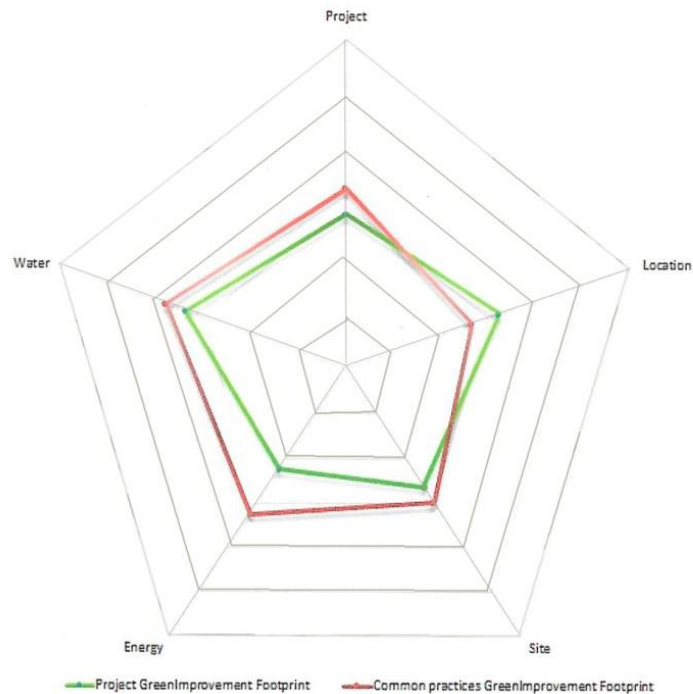


Fig. 6. Gráfico de la huella de evaluación "green improvement footprint".

créditos posibles, mientras que la herramienta propuesta solo incluye el 79,4%) ni tampoco que no se ha utilizado la misma información de partida (por la diferencia de casi 4 meses en la fecha de realización de los análisis).

Por lo tanto, teniendo en cuenta los créditos pre-evaluados, tanto por exceso como por defecto, la fiabilidad del resultado en este caso se ha establecido en un 92,7%, ya que la herramienta ha identificado como posibles con un sobrecoste bajo 64 créditos, frente a los 69 que se obtienen en la pre-evaluación. Esto significa que incluso incluyendo los créditos no considerados en la metodología desarrollada, el uso de la herramienta durante el anteproyecto favorecería la obtención del 83,11% de los créditos que finalmente se podrían conseguir.

En el Caso B, el informe de evaluación provisional solicita la aprobación de 70 créditos, que representa un nivel de certificación "Muy Bueno", considerando los factores de ponderación asignados al país. Aunque no se especifica en el informe, se considera que todos estos créditos se obtienen con un sobrecoste bajo. El resultado ofrecido por la herramienta es que sería posible conseguir 68 créditos con un sobrecoste bajo, aunque el análisis detallado establece la fiabilidad en un 96,77%, ya que la herramienta ha identificado como posibles con un sobrecoste bajo 60 créditos, frente a los 62 que se obtendrían en la certificación. Como en el estudio anterior, el uso de la herramienta durante el anteproyecto favorecería la obtención del 85,71% de los créditos finales.

IV. CONCLUSIONES

La herramienta desarrollada no pretende convertirse en una herramienta más, que repita en mayor o menor medida las fortalezas y debilidades de los sistemas ya establecidos. Partiendo del análisis profundo de éstos, esta herramienta define un denominador común a todos ellos y una metodología de evaluación, que permite orientar la toma de decisiones en las fases iniciales del proyecto arquitectónico, cuando se produce una mejor relación entre el rendimiento de las estrategias y el nivel de esfuerzo de implementarlas.

Su configuración permite establecer, al inicio del proyecto, los objetivos de rendimiento a alcanzar por el edificio terminado, anticipando el futuro resultado y facilitando el seguimiento de las repercusiones de cualquier cambio que se pudiera producir durante su desarrollo.

Esto es factible ya que los ensayos realizados, tras la calibración de la herramienta, en casos de estudio reales para su validación, indican que la herramienta permite anticipar desde las fases iniciales, con una fiabilidad media superior al 95%, más del 80% de los resultados al final del proceso, en sintonía con el Principio de Pareto que desencadenó la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente subvencionada a través del proyecto P140310086 de la Universidad Politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- Allione, C., De Giorgi, C., Lerma, B. & Petrucci, L. (2011). From ecodesign products guidelines to materials guidelines for a sustainable product. Qualitative and quantitative multicriteria environmental profile of a material. *Energy*, 39(1):90-99.
- Álvarez, M., Arquero, A. & Martínez, E. (2010). Empleo del AHP (Proceso Analítico Jerárquico) incorporado en SIG para definir el emplazamiento óptimo de equipamientos universitarios. Aplicación a una biblioteca. *Informes de la Construcción*, 62(519).
- Atanasiiu, B. (2011). Principles for Nearly Zero-Energy Buildings: paving the way for effective implementation of policy requirements, Brussel: Buildings Performance Institute Europe (BPIE).
- BREEAM (2010). Manual BREEAM ES Comercial, La Coruña: ITG.
- BREEAM (2013). BREEAM International New Construction Technical Manual SD5075. London: BRE Global.
- Cook, R., Lott, F., Milton, B., O'Connor, P., Smith, C., Seheiro, J., Price, B., Harness, S., Bomba, M., Allison, M., Eckblad, S., Ashcraft, H., Bedrick, J., Hartung, R., Rubel, Z., Touchsner, P. & Stephens, N. (2007). *Integrated Project Delivery: A Guide*. California: American Institute of Architects.
- Crosbie, T., Dawood, N. & Dawood, S. (2011). Improving the energy performance of the built environment. The potential of virtual collaborative life cycle tools. *Automation in Construction*, 20(2): 205-216.
- DGNB (2013). DGNB International Certification System. Stuttgart: DGNB.
- Eddington, C. & Axford, N. (2009). Who pays for green? The economics for sustainable buildings. CB Richard Ellis.
- EU Eco-label Project (2011). *Ecobuildings, EU Ecolabel and Green Public Procurement for buildings*. European Union.
- Hansen, G. & Olsson, N. (2011). Layered project - Layered process: lean thinking and flexible solutions. *Architectural Engineering and Design Management*, 7(2): 70-84.
- HQE (2013). HQE International certification scheme for buildings under construction. Paris: CERWAY.
- LEED (2009). LEED v3 Reference Guide for Green Building Design and Construction. Washington DC: USGBC.
- LEED (2013). LEED v4 for Building Design and Construction. Washington DC: USGBC.
- Lupísek, A., Häkkinen, T., Hájek, P., Pavlu, T., Immendörfer, A. & Supper, S. (2010). Literature and interview survey about stakeholders' needs and requirements for SB assessment and benchmarking methods. Prague: SuPerBuildings.
- Macías, M. & García Navarro, J. (2010). Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Informes de la construcción*, 62(517): 87-100.
- Orondo, J. & Bedoya, C. (2012). Sustainability assessment of materials used in façade cladding. *International Journal of Sustainable Construction*, 1(1): 43-50.
- VERDE (2012). *Guía para los Evaluadores Acreditados. Nueva edificación: multirresidencial y oficinas*. Madrid: GBCe.
- Wang, W., Zmeureanu, R. & Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment*, 40(11): 1512-1525.
- Warren, P. (2003). IEA ECBCS Annex 32: Integral building envelope performance assessment. Birmingham: Faber Maunsell.
- Zimmerman, A. (2006). *Integrated Design Process Guide*. Ottawa: Canada Mortgage and Housing Corporation.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.