



XII CONFERENCIA INTERNACIONAL DE CIENCIAS
EMPRESARIALES (CICE 2019)
(IX Conferencia sobre Economía Empresarial)

Título

ECO-EFICIENCIA EN CADENAS PRODUCTIVAS DE VIVIENDAS EN CUBA. ESTUDIO DE CASO: CEMENTO DE BAJO CARBONO (LC³:50)

Title

***ECO-EFFICIENCY IN THE SUPPLY CHAIN OF BUILDINGS IN CUBA.
CASE STUDY: LOW CARBON CEMENT (LC³: 50)***

**Yudiesky Cancio Díaz¹, Sofía Sánchez Berriel², Inocencio Raúl Sánchez Machado³, José
Fernando Martirena Hernández⁴**

Resumen

El cemento de bajo carbono (LC³:50) es un tipo de cemento mezclado desarrollado por CIDEM-UCLV-Cuba, MAADRAS-India y EPFL-Lausana. Es un sustitutivo cercano del cemento Portland puzolánico y su desempeño es comparable con el cemento Portland ordinario. La presente investigación tiene como objetivo evaluar la eco-eficiencia en cadenas productivas de viviendas en Cuba, a través del estudio de caso del cemento LC³:50. Se presenta el procedimiento diseñado por Cancio (2018) para la evaluación de la eco-eficiencia en el sector constructivo cubano y se valida el mismo a través de aplicaciones prácticas en edificaciones construidas en la provincia Villa Clara entre 2014-2017. Los resultados obtenidos sugieren que la eficiencia económico-ambiental del cemento LC³:50 depende no solo de la tecnología de construcción, sino del aprovechamiento de las economías de escala y la combinación óptima de factores de producción, en cuya matriz juega un rol fundamental la selección de materiales de construcción. Se demuestra que el uso potencial del LC³:50 contribuye a reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono antropogénico provenientes de la industria constructiva (entre 30% y 35%), al tiempo que se generan considerables ahorros en costos económicos (entre 15% y 20%). La reducción de clínquer en la matriz del cemento trae consigo grandes ahorros en portadores energéticos. Se recomienda introducir el LC³:50 en el país en dos fases: a corto plazo, sustituyendo al cemento PP25 y a mediano plazo, sustituyendo también al cemento P35.

Palabras Clave: Eco-eficiencia; Cadenas productivas; Cemento; Viviendas; ACV; VAB.

¹ Doctor en Ciencias Económicas. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

yudieskycd@uclv.edu.cu

² Doctora en Ciencias Económicas. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

ssanchez@uclv.edu.cu

³ Doctor en Ciencias Económicas. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. raulsm@uclv.edu.cu

⁴ Doctor en Ciencias Técnicas y Doctor en Ciencias. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

martirena@uclv.edu.cu



Abstract

Low carbon cement (LC³:50) is a kind of blended cement developed by CIDEM-UCLV-Cuba, MAADRAS-India and EPFL-Lausanne. It is a near substitutive of Portland Pozzolanic cement and its performance is comparable with Ordinary Portland cement. The present research aims at assessing the eco-efficiency in the supply chain of buildings in Cuba, by means of LC³:50 case study. The procedure designed by Cancio (2018) for assessing the eco-efficiency in Cuban construction sector is presented, as well as it is validated by means of empirical applications in buildings built in Santa Clara within the period 2014-2017. The results suggest that the economical-ecological efficiency of LC³:50 depends not only on the technology of construction but on the use of economies of scale and the optimal combination of production factors, in which matrix of analysis the selection of building materials plays a fundamental role. It is proved that the potential use of LC³:50 contributes reducing the anthropogenic carbon dioxide emissions coming from the construction industry (around 30% y 35%), as well as great economic cost savings are simultaneously generated (about 15% y 20%). The clinker reduction within the concrete matrix brings about huge savings in energy carriers. It is recommended to introduce LC³:50 in the country in two phases: in the short-term, substituting PP25 and, in the long-term, replacing P35 as well.

Keywords: *Eco-efficiency; Supply chains; Cement; Buildings; LCA; GVA.*

1. Introducción

Uno de los problemas socioeconómicos más acuciantes de Cuba en la actualidad lo constituye el déficit habitacional existente. Es por ello que la rama constructiva se encuentra entre los sectores priorizados del país, lo que ha derivado en un conjunto de políticas y estrategias gubernamentales, sectoriales y empresariales, en aras de desatar las fuerzas productivas en la industria de materiales de construcción y, con ello, acelerar la construcción de viviendas.

El desarrollo de nuevos productos que impacten favorablemente en el sector constructivo ha sido parte de la acción científica en los últimos dos lustros. Entre estos nuevos productos se encuentra el cemento de bajo carbono, LC³:50, desarrollado por el CIDEM (Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales), Facultad de Construcciones, UCLV. La propuesta se ha desarrollado en alianza con científicos de MAADRAS-India y EPFL-Lausana, Suiza. El cemento LC³:50 se puede obtener con bajo contenido de clínquer (50%), arcilla calcinada (30%), caliza (15% y yeso (5%). Por su composición, en especial el bajo factor de clínquer, este producto reduce costos de producción y evita emisiones de CO₂ en cantidades muy significativas. Además, permite producir volúmenes más elevados de cemento cada año debido a que se consume menos clínquer.

Si importante es producir más con menos costos, trascendente es reducir el impacto ambiental. La industria constructiva representa el tercer sector industrial en importancia como fuente emisora de dióxido de carbono antropogénico (10 % del total de emisiones globales). La mayor parte de estas emisiones se asocia con la producción de hormigón. A pesar de constituir el cemento apenas el 15 % del hormigón, el 85 % de las emisiones provienen del proceso de fabricación del cemento (IPCC, 2005); (Habert *et al.*, 2010); (Scrivener, 2014). Si a lo anterior se le suma que el hormigón constituye el material de mayor volumen de uso, después del agua, a nivel global (Aïtcin, 2000); (Alujas *et al.*, 2015); (Martirena y Scrivener, 2015) y que su demanda se estima crecerá geométricamente en las próximas décadas (CEMBUREAU, 2015), entonces se sitúa a la industria cementera y al sector constructivo dentro de las actividades



económicas que mayores esfuerzos de intervención requieren para reducir el potencial de calentamiento global del planeta.

La entrada del LC³:50 al sector constructivo cubano presupone una gama versátil de posibilidades de asignación del cemento en la cadena productiva de viviendas potencialmente construibles con el nuevo cemento. Las condiciones imperantes exigen la necesidad de un uso eficiente del cemento LC³:50, desde el punto de vista económico con enfoque ambiental, examinando la anterior relación bajo el prisma del sistema de relaciones sociales de producción en el cual tiene lugar la eficiencia del proceso económico de la cadena productiva.

La combinación de eficiencia económica y eficiencia medioambiental ha sido reconocida en la literatura científica en la categoría eco-eficiencia, que surge en la última década del siglo XX, para referirse a la capacidad de maximizar el beneficio económico con el menor impacto ambiental posible. La terminología fue introducida por primera vez en la literatura científica por (Schaltegger y Sturm, 1990) en la forma de eficiencia económico-ecológica, interpretándola como la maximización de la “productividad de los recursos naturales”. A pesar del trabajo seminal pionero de Schaltegger y Sturm, se reconoce que la eco-eficiencia es popularizada por (Schmidheiny, 1992), en un libro donde se defiende la tesis de que la inversión ambiental —en contraposición a la falacia de que significa solo un costo empresarial— produce beneficios económicos. Liderado por el Consejo Empresarial Mundial por el Desarrollo Sostenible (CEMDS), en la Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro en 1992, la eco-eficiencia se introduce en el debate económico y comienza a erigirse como una categoría con contenido económico propio, más que una simple agenda política para la acción medioambiental.

En este trabajo se presenta un procedimiento de evaluación de eco-eficiencia y su validación por estudios de caso en edificios construidos en Villa Clara, donde se analizan los potenciales usos del cemento LC³:50 en diferentes cadenas productivas de viviendas construidas con diferentes métodos constructivos. Se determina el impacto sobre la eco-eficiencia en el sector constructivo, bajo el supuesto de que se emplee el nuevo cemento en la construcción de edificios que tradicionalmente se están construyendo en la provincia (como es el caso de los objetos de obra analizados en 14 investigaciones y cuyos resultados se pueden consultar en (Cancio, 2018)).

2. Desarrollo

2.1. La eco-eficiencia. Revisión teórico-conceptual

La eco-eficiencia es un concepto originado como parte de los esfuerzos por medir la sostenibilidad, a raíz de que el desarrollo sostenible se ha convertido en un asunto de interés global (Cha, Lim y Hur, 2008). Aunque las bases conceptuales de la eco-eficiencia se pueden encontrar en las nociones de eficiencia medioambiental aparecidas en la literatura económica de los años setenta (Freeman, Haveman and Kneese, 1973); (McIntyre y Thornton, 1974); (McIntyre y Thornton, 1978), en los noventa (Schaltegger y Sturm, 1990) introducen la eco-eficiencia como “el vínculo empresarial hacia el desarrollo sostenible” (Huppel and Ishikawa, 2005); (Zhang *et al.*, 2008).

(Schaltegger, 1998) presenta la eco-eficiencia como la eficiencia económico-ecológica derivada de la actividad productiva, entendida como una medida de la productividad del uso de los recursos naturales involucrados en la creación de riqueza material y espiritual. “El principio rector del enfoque de eco-eficiencia es optimizar el ratio económico-ecológico de un *output* deseado y sus necesarios *inputs*” (Schaltegger y Burritt, 2000). El prefijo “eco” se suele atribuir al hecho de combinar en un mismo término las categorías economía y ecología.



**II Convención Científica Internacional 2019
CIENCIA Y TRANSFORMACIÓN SOCIAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**



El término se populariza por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible en el libro de (Schmidheiny, 1992), dado a conocer en el marco de la Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro. En dicha obra se documentan ejemplos de empresas líderes en innovación y uso racional de los recursos. Es el primer trabajo escrito que compila casos prácticos sobre la adopción del concepto de eco-eficiencia.

En una publicación a cargo del CEMDS, (Schmidheiny y Stigson, 2000) explican que en un taller realizado en 1993 con numerosas partes interesadas en la eco-eficiencia, se produjo el consenso de asumir como definición la siguiente: “La eco-eficiencia se obtiene por medio del suministro de bienes y servicios a precios competitivos, que satisfagan las necesidades humanas y proporcionen calidad de vida, mientras progresivamente reducen los impactos ecológicos y el consumo de recursos a lo largo de su ciclo de vida, por lo menos hasta un nivel acorde con la capacidad de carga estimada de la Tierra”.

Los siguientes sustratos conceptuales pueden ser extraídos de la anterior definición, la cual posee contenido económico, social y medioambiental:

- En lo económico, “precio competitivo” implica una motivación *de facto* hacia la reducción de costos de producción como forma básica para la determinación de precios. Alcanzar competitividad en precio viene determinado en lo fundamental por las restricciones tecnológicas de la producción; de ahí que el incentivo a la creatividad y la innovación estén presentes en esta noción. La innovación tecnológica expande las potencialidades productivas, cuya concreción microeconómica sería mover la isocuanta y la frontera de posibilidades de producción hacia niveles superiores. Sin embargo, esta categoría restringe el contenido económico de la eco-eficiencia al pretender encerrar en la variable precio todo el valor creado por la actividad productiva.
- En lo social, “satisfacer necesidades humanas” es una cualidad inherente a los bienes comercializables, que la literatura económica reconoce como valor de uso. “Proporcionar calidad de vida” es una aspiración más alineada con el desarrollo sostenible y contiene la dimensión social, sin embargo, deja fuera el aspecto de la distribución y alcance de estos beneficios. ¿Cuál es el alcance social de crear mayor calidad de vida? ¿Mayor calidad de vida para unos pocos o para todos? Ahí radica precisamente una de las mayores limitaciones de la eco-eficiencia, lo cual pone de manifiesto la necesidad de replanteo conceptual.
- En lo medioambiental, el principio de reducción de impactos ecológicos y el consumo de recursos encierra una de las aspiraciones básicas de los pilares del desarrollo sostenible. No obstante, el término ecológico ignora los aspectos culturales y el enfoque espacial-contextual del concepto medioambiental. Una segunda consideración de gran importancia es la relación antropogénica con la capacidad de carga del planeta. La actividad productiva del hombre genera siempre, en diferentes manifestaciones, agotamiento y estrés de la Tierra. El planeta en el que se desarrolla la vida humana es finito y posee capacidades limitadas de regeneración. Se advierte, por tanto, el imperativo de no rebasar sus niveles máximos de asimilación de cargas.

La idea central expresada en el concepto de desarrollo sostenible es el principio de la equidad intergeneracional. Resume en el sentido normativo la característica que debería tener la dinámica de la actividad humana en la búsqueda de la satisfacción de sus necesidades *per se* ilimitadas. En cambio, la eco-eficiencia surge como una respuesta pragmática —más en el sentido positivo que normativo— a la necesidad de operacionalizar el contenido de la categoría desarrollo sostenible.

Según (Huppel e Ishikawa, 2005), la eco-eficiencia es usualmente descrita como el ratio entre dos elementos: valor de la producción (cuya tendencia debiera ser a incrementarse) y el impacto



medioambiental (cuya tendencia debiera ser a reducirse). Es decir, mientras mayor es el ratio, mayor es el valor creado con menos impacto inducido (Schmidheiny y Stigson, 2000). Este enfoque, con el cual coincide el autor, ha sido tratado en la mayoría de los trabajos publicados sobre eco-eficiencia.

El concepto ha devenido herramienta analítica valiosa para reportar el resultado de los esfuerzos administrativos en función de armonizar el crecimiento económico con la conservación del medioambiente, de forma exhaustiva, sistemática y consistente (Van Caneghem *et al.*, 2010). Ha sido aplicado a diversas áreas (Sturm, Müller y Upasena, 2004), aunque aún las aplicaciones a la construcción de edificaciones se consideran limitadas. El concepto ha sido adoptado por algunos países en lo que se ha dado en llamar “la clasificación verde de los edificios”, entre cuyos programas se pueden mencionar: Sistema de Evaluación Exhaustiva de la Eficiencia Medioambiental de Edificios (CASBEE), en Japón y Eco-Efecto, en Suecia (Malmqvist y Glaumann, 2009). Métodos como el Insumo Material por Servicio (MIPS) han sido propuestos para vincular entradas y salidas en la evaluación integral de edificios (Sinivuori y Saari, 2006). Existen numerosos trabajos que abordan el desempeño ecológico de las edificaciones, pero la literatura existente no establece consenso en tal sentido (Gangolells *et al.*, 2009). Tampoco existen suficientes precisiones en torno a su conceptualización.

De acuerdo con (Picazo, Beltrán y Gómez, 2012), la eco-eficiencia se refiere a la capacidad de empresas, industrias o economías, de producir bienes y servicios mientras incurren en un menor impacto ambiental y consumen menor cantidad de recursos naturales.

Hacia fines de la década de los noventa, la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCED), definió la eco-eficiencia como “la eficiencia con la cual los recursos ecológicos son utilizados para satisfacer las necesidades humanas” (Korhonen y Seager, 2008). (Rüdenauer *et al.*, 2005) incorporan la noción de ciclo de vida a la definición de eco-eficiencia, al considerarla como “enfoque de evaluación integrada de aspectos económicos y medioambientales de productos o procesos desde la perspectiva del ciclo de vida”. Las consideraciones anteriores derivan en una redefinición conceptual de la eco-eficiencia. Los autores del presente trabajo definen la eco-eficiencia como la capacidad de un sistema productivo de maximizar el valor económico de la riqueza material creada por unidad de recurso empleado, con el menor impacto medioambiental posible. Dicha definición es asumida por los autores a lo largo de toda la investigación.

2.2. Propuesta de procedimiento para la evaluación de la eco-eficiencia

El procedimiento, cuyo diagrama general se presenta en la figura 1 de los anexos, consta de 6 fases y 10 etapas, interrelacionadas orgánicamente; entre las cuales se concibe la necesaria retroalimentación, confiriéndole a estas un carácter iterativo en dependencia del proceso de evaluación que se desee acometer y, sobre todo, de la demanda informativa del estudio y la disponibilidad de información requerida en cada etapa y fase.

La Fase 1 está dirigida a establecer el contexto del análisis de eco-eficiencia, el cual permite aislar el subsistema que se desea evaluar como parte simplificada de un sistema de relaciones más complejo e integrado. Establece los límites sistémicos con que se opera en el estudio de eco-eficiencia, declarando la(s) unidad(es) de análisis y el alcance.

La Etapa 1.1 constituye la base de todo el esquema analítico. Se deben definir los objetivos perseguidos con el estudio de eco-eficiencia, lo cual implica la identificación del sistema técnico-económico que se pretende abordar. Por ejemplo, se puede analizar la eco-eficiencia de la producción de hormigón dentro de las fronteras de una planta de producción en un horizonte temporal como un estudio de desempeño, comparar sistemas alternativos de producción (o tecnologías de construcción), evaluar usos alternativos de materias primas, evaluar factores de



**II Convención Científica Internacional 2019
CIENCIA Y TRANSFORMACIÓN SOCIAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**



localización. El estudio podría estar centrado en un material de construcción en particular (p.ej., el bloque) o incluir diversos niveles de integración vertical hasta alcanzar un producto terminado de mayor valor agregado dentro de la misma cadena productiva.

Esta etapa (y la siguiente) constituyen el soporte conceptual de la evaluación de eco-eficiencia que se pretenda realizar, por lo que deben ser precisas con respecto a la delimitación del propósito (o propósitos), debido a que las fases subsiguientes dependen de las especificaciones aquí preconcebidas.

Caracterizar el sistema de producción que se aborda posibilita comprender las relaciones tecno-productivas de este como un mecanismo sistemático que produce regularidades económicas. Por ejemplo, si se pretende evaluar la eco-eficiencia del uso del cemento LC³:50 en la construcción de edificios tipo Gran panel, se debe caracterizar dicho sistema productivo, así como aquellos subsistemas que le son inherentes, como la producción de hormigón de prefabricado. La caracterización del sistema productivo sirve de base para la determinación de las fronteras analíticas del estudio, tarea técnica contenida en la próxima etapa.

La Etapa 1.2 establece los límites sistémicos. Existe una relación dialéctica entre los conceptos unidad funcional (UF) y límites sistémicos en un análisis de eco-eficiencia. Las unidades funcionales dependen del valor de uso del producto que se analiza, esto es, la función que cumplen o la necesidad que satisfacen. En el contexto del sector constructivo, ejemplos típicos de UF son: m² de pared, m³ de hormigón, una unidad de bloque, metro lineal de cimentación, m² de viga o columna, m² de superficie construida, m² de superficie útil.

La discusión sobre la UF apropiada en el sector constructivo posee diferentes vertientes. Se puede estudiar la producción de bloques de hormigón ante diversas opciones tecnológicas y el mismo análisis para cualquier tipo de material de construcción. No obstante, el fin último de los materiales es proporcionar solución habitacional, lo cual solo es posible cuando todos los materiales se combinan por medio de una tecnología apropiada y da lugar a una vivienda. No se construyen casas de cemento, no se construyen casas de áridos, ni siquiera se construyen viviendas únicamente de bloques: la vivienda es la combinación técnica de una cantidad apropiada de todos estos materiales. Una vivienda es un sistema complejo y, debido a que el fin último es dinamizar la producción de hábitat de manera sostenible. El uso del cemento solo puede ser juzgado con criterio de racionalidad bajo el prisma de la edificación, lo cual supone la valoración de alternativas tecnológicas de construcción, con diferentes contribuciones a las variables de estado que definen el comportamiento eco-eficiente.

Como resultado del análisis anterior, se propone utilizar como UF la superficie útil de la vivienda, cuando se estudia la eco-eficiencia en la cadena productiva de la vivienda como totalidad. No obstante, cualquier subsistema intermedio "aguas abajo" de la vivienda construida, permite realizar un estudio de eco-eficiencia sin pérdida de objetividad y podría resultar de mucha utilidad práctica para la toma de decisiones en materia de sostenibilidad en la producción y el uso de los materiales.

Los límites de sistema (o límites sistémicos) se refieren a los procesos que intervienen en la evaluación, que a su vez están asociados al ciclo de vida de los materiales y a la unidad funcional. Por ejemplo, si se analiza la producción de hormigón de prefabricado desde el origen de las materias primas en cantera hasta el justo instante en que se produce el elemento prefabricado, se adopta un enfoque que la metodología ACV reconoce como "de la cuna a la puerta". Estos límites sistémicos se definen en las normas ISO-14 040, 14 044 y 14 045. Este estudio ignora los impactos del uso de los materiales más allá de la puerta de la fábrica de hormigón. El estudio que implica la fase de uso del material durante el tiempo que transcurre la vida útil de una vivienda, se suele denominar análisis "de la cuna a la tumba" (consultar las normas ISO-14 040, 14 044 y 14 045). Si se estudia el reciclado o disposición de los materiales



II Convención Científica Internacional 2019
CIENCIA Y TRANSFORMACIÓN SOCIAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas



una vez demolida la construcción, al enfoque se le refiere como “de la cuna a la cuna” (consultar las normas antes referidas). Las anteriores convenciones han sido reconocidas en estudios económicos y ambientales de procesos y productos como parte de la necesidad de acotar las escalas o ámbitos de evaluación, lo cual a su vez facilita la comparabilidad e interpretación entre estudios de similar naturaleza.

Con independencia de la unidad funcional, límite sistémico y objetivos, como regla no se logra abarcar la totalidad de variables y relaciones que ocurren en el sistema analizado. Del conjunto de restricciones que se imponen al análisis se derivan los supuestos del estudio de eco-eficiencia, los cuales se deben especificar en esta etapa ya que estos influyen la implementación de las fases posteriores e imponen restricciones a la interpretación de los resultados.

La Fase 2 debe proporcionar un sistema de información que soporte la evaluación económica y ambiental inherente al estudio de eco-eficiencia. La Etapa 2.1 consiste en representar el entramado de relaciones técnico-productivas entre los procesos unitarios circunscritos en los límites sistémicos antes definidos, tomando como patrón de referencia la unidad funcional. Se puede realizar mediante un mapeo de la cadena productiva, sin embargo, la diagramación de los entes productivos que intervienen en la CP no proporciona toda la información referente a los procesos unitarios que intervienen en el sistema en consideración y, por consiguiente, no refleja la totalidad de los flujos físicos que se producen en su estructura. De manera que se debe realizar un flujograma de procesos unitarios de producción, identificando los componentes de entrada y salida de cada operación como expresión de la dinámica del flujo material. Esta etapa posibilita distinguir los centros generadores de valor agregado, que a su vez son consumidores de materias primas y emisores ambientales. Los softwares que, como SimaPro y OpenLCA, procesan las evaluaciones ambientales de productos y sistemas, poseen la opción de generar este tipo de diagrama, aunque se puede utilizar cualquier herramienta que genere un árbol de procesos estructurados de forma tal que garantice la obtención del inventario de datos. Los procesos generalmente se deben subdividir en subprocesos (o actividades que tributan a los procesos principales).

En la Etapa 2.2 se registra la información relevante de los procesos antes descritos en función de los análisis que se desarrollarán en las fases 3 y 4. En el inventario de datos, la cuantificación de materiales ocupa un lugar trascendente. Esta tarea técnica descansa en el concepto de *dosificación* que se utiliza en la Ingeniería Civil, el cual se considera piedra angular de los procesos referidos a materiales y sistemas constructivos.

Las Fases 3 y 4 se pueden desarrollar en paralelo durante la implementación del procedimiento porque ambas reciben *inputs* de la fase anterior y su tipología de análisis difiere en el método que utilizan. En estas dos fases se sintetizan las vertientes económica y ambiental que definen la cuantificación de la eco-eficiencia.

El inventario de datos no solo contiene los denominados *datos de primer nivel*; además, requiere *datos de referencia*. Las aplicaciones de eco-eficiencia en Cuba deben actualizar continuamente los componentes de la matriz energética del país, ya que esta varía en dependencia de la procedencia del combustible utilizado en la generación, y produce un sesgo en los factores de impacto ambiental del combustible y la electricidad, lo cual a su vez modifica los resultados del ACV.

La Fase 3 está dirigida a evaluar la capacidad del sistema que se analiza para generar valor económico. En esta fase se determinan los criterios económicos que caracterizan a los productos, sistemas o unidades funcionales que se someten a evaluación. La eficiencia económico-ecológica viene determinada por la productividad en el uso de los recursos empleados. El proceso de creación de valor es fundamental en este sistema. Para determinar la



**II Convención Científica Internacional 2019
CIENCIA Y TRANSFORMACIÓN SOCIAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**



eficiencia económica la literatura reconoce numerosos métodos, indicadores, ratios. Entre los más destacados se encuentran la utilidad, el rendimiento del capital, el valor agregado, el costo de producción.

En este procedimiento se propone utilizar el método del valor agregado (VA), debido a su consistencia interna para capturar la naturaleza económica del concepto de flujo material en las operaciones sucesivas que se interrelacionan en la cadena productiva de una vivienda. El VA se utiliza como método de cálculo para contabilizar la renta nacional, con el objetivo de evitar duplicidades, por lo que también permite observar las contribuciones de una o varias entidades de un mismo sector al producto interno bruto. De esta forma, proporciona el marco metodológico apropiado para establecer nexos económico-productivos entre los procesos que tienen lugar en la cadena productiva. Se le define como el valor económico que encierra un bien cuando es modificado en el marco del proceso productivo, es decir, el valor económico que se le añade a la producción de un bien en cada proceso unitario o “proceso transformativo de entradas en salidas”. Se distingue entre valor agregado bruto y valor agregado neto. El valor total de la producción una vez deducido el consumo intermedio, se conoce por valor agregado bruto. El valor agregado neto resulta de deducir, además, el consumo de capital fijo (trabajo pretérito).

La Etapa 3.2 se destina al cálculo del valor agregado y su proceso de conformación en espiral a través del ciclo de operaciones. Se entiende al valor agregado como el valor que se le añade a la producción en cada proceso unitario o “proceso transformativo de entradas en salidas”.

En la Fase 4 se realiza la evaluación medioambiental de la unidad funcional o sistema analizado, a partir de aplicar la metodología internacionalmente aceptada para evaluaciones medioambientales (ACV). El ACV queda definido en la norma ISO 14 040 y su instrumentación se estandariza en la norma 14 044. Para un estudio más profundo, puede consultarse (Cancio, 2018).

La Etapa 4.1 está dedicada a la aplicación de la metodología ACV para todos los procesos y productos que componen la unidad funcional analizada (o que tributan a ella en el mecanismo medioambiental total). En esta etapa se determinan los factores de impacto de dichos procesos intermedios, los cuales al asociarse dan como resultado los factores de impacto de los productos. Por ejemplo, en la fabricación del bloque se deben modelar los procesos asociados a la fabricación del cemento, a la obtención de los áridos, la energía, etc. Los impactos conjuntos de todos los procesos hacen el factor de impacto del bloque. Así debe procederse con el resto de los materiales de construcción y sus procesos unitarios consiguientes.

El software SimaPro ofrece las herramientas básicas para modelar los procesos unitarios, e integrarlos posteriormente en segunda etapa hasta conformar los productos que se originan a partir de los procesos unitarios previamente definidos. El inventario de datos que se realizó en la Fase 2 sirve de insumo para generar estos productos y procesos.

En la Etapa 4.2 se construye el indicador de impacto medioambiental asociado a la unidad funcional que se analiza. Ello implica la agregación de todos los impactos ambientales individuales —medidos por los respectivos factores de emisión antes determinados— tomando en consideración los volúmenes de materiales empleados en la UF. En el caso de una vivienda como totalidad, en esta fase se deben considerar, además de todos los materiales empleados, la energía y el combustible que se utilice en el sitio de construcción.

La Fase 5 genera la medida cuantitativa agregada que sirve de referente como indicador de eco-eficiencia para evaluar el sistema que se analiza. Los criterios económico y ecológico se combinan en un ratio que expresa una medida del comportamiento eco-eficiente del sistema estudiado. Tal como la eficiencia técnica es un concepto relativo (y la eficiencia en general como categoría económica), la eco-eficiencia posee la misma naturaleza relativa. De ello se



deriva que, únicamente posee valor interpretativo cuando se le compara con un referente. El cociente del valor agregado/impacto ambiental agregado es el ratio que se propone para evaluar tecnologías alternativas o para analizar la evolución del comportamiento de un sistema productivo en distintos períodos de ejercicio económico. En el trabajo de (Pérez, 2014) se demuestra por qué el costo de producción al relacionarse con el impacto ambiental en un ratio de eco-eficiencia, carece de objetividad interpretativa al encubrir la verdadera relación entre las variables de estado que definen la eco-eficiencia. Aunque algunos autores utilizan el inverso del costo ($1/\text{costo}$) sin pérdida de objetividad, en esta investigación se propone construir el ratio entre valor agregado e impacto ambiental agregado a escala de la unidad funcional.

La comparación numérica de ratios de eco-eficiencia entre dos alternativas se puede axiomatizar de la siguiente forma:

Sean VA_j e IAA_j el valor agregado y el impacto ambiental agregado de la tecnología j -ésima ($j = \overline{1, n}$), y "Ref." designa la alternativa de referencia o benchmark. De manera que la eco-eficiencia de la j -ésima opción viene dada por la ecuación 1, donde k representa el factor de eficiencia económico-ecológica.

$$\frac{VA_{Ref.}}{VA_j} \times k = \frac{IAA_j}{IAA_{Ref.}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Una vez determinada la cuantificación de la eco-eficiencia, la Fase 6 se reserva para la correspondiente interpretación de los resultados y su calibración. Toda representación simplificada de la realidad objetiva hace uso de restricciones, que son abstracciones lógicas derivadas de la imposibilidad de captar todas las relaciones posibles existentes. Ello hace cualquier cuantificación de las variables de estado que definen un sistema, susceptible de variaciones, toda vez que las variables insumo en su curso normal sufren oscilaciones como reflejo de la dinámica del entorno que las regula.

Calibrar un modelo, procedimiento, sistema o cualquier esquema de deducción lógica basada en la abstracción científica para capturar alguna parte de la dinámica de la realidad objetiva, significa evaluar los grados de validez de los resultados ante posibles cambios de las variables que lo determinan. El tipo de análisis que cubre dicha demanda técnica en el orden investigativo se suele reconocer como análisis de sensibilidad. Los parámetros que definen el estado medioambiental y el estado económico del sistema deben ser sometidos a prueba de variabilidad para calibrar los resultados. Diferentes criterios relevantes, como p.ej., la localización de los yacimientos o canteras de las materias primas (es decir, distancias de transportación), política de precios, tipología de combustible, entre otros, pudieran resultar fuentes de gran varianza. El método ACV y su herramienta soporte computacional (el software SimaPro) proporcionan los recursos para la aplicación de la técnica de Monte Carlo, con altos grados de precisión. Sin embargo, mediante hojas de cálculo en Microsoft Excel se pueden desarrollar procedimientos de análisis de sensibilidad a partir de las fórmulas que este permite predeterminar.

2.3. Resultados de la validación del procedimiento. Aplicaciones en edificios construidos en la provincia Villa Clara

En el presente epígrafe se persigue establecer una comparación entre los resultados de eco-eficiencia obtenidos para diferentes tecnologías de construcción (bloques tradicionales, gran panel y forsa), revelando las potencialidades de uno u otro método constructivo para el uso potencial del cemento LC³:50 a gran escala. Los edificios Gran panel y el edificio forsa fueron construidos por la Empresa Constructora Militar No. 3; mientras que el edificio de bloques, por la Empresa de Construcciones del MININT, UEB Santa Clara.

El objetivo de aplicar el procedimiento es: evaluar, en forma comparada, la eco-eficiencia derivada de: (i) el tipo de cemento y (ii) el tipo de método constructivo, a través de los estudios



de caso antes descritos. El alcance de la evaluación de eco-eficiencia viene determinado por el tipo de *unidad funcional* que se declare. En estos estudios de caso se analiza la totalidad de la obra constructiva (lo que equivale a decir, la totalidad de la cadena productiva), lo cual involucra todos los flujos económicos y ambientales de la fase material del ciclo de vida del edificio. De ello se deriva que la unidad funcional empleada es: superficie útil, expresada en metros cuadrados. Sin embargo, las obras en estudio poseen diferentes dimensiones, es decir, la superficie útil difiere. Por consiguiente, para ciertos análisis comparativos particulares, las variables económicas y ambientales con las cuales se opera requieren ser normalizadas respecto al número de metros cuadrados construidos.

Se analizan, para cada tipo de edificio, 3 posibles escenarios futuros de uso potencial del nuevo cemento:

Escenario 1: Constituye la situación actual, por lo que se considera el escenario de control. Significa la coexistencia de los cementos P35 y PP25 (que son los cementos que actualmente se producen y utilizan en Cuba).

Escenario 2: Constituye la situación en la que se sustituye el cemento PP25 por el LC³:50, manteniendo la producción del P35. En el corto plazo, es el escenario más probable pues el LC³:50 puede considerarse el producto sustitutivo más cercano del PP25.

Escenario 3: Se caracteriza por el reemplazo de los cementos tradicionales existentes en el país, a partir de la introducción del nuevo cemento LC³:50. Deviene escenario de mediano y largo plazos.

Los resultados del cálculo del valor agregado bruto (para la fase de la evaluación económica) se presentan en la tabla 1 de los anexos. La evaluación medioambiental se resume en la tabla 2 de los anexos. Para el cálculo de las emisiones de CO₂ se tuvieron en cuenta los factores de impacto ambiental determinados por los autores en trabajos precedentes, para lo cual se utilizó el software SimaPro versión 8. Los resultados se pueden consultar en (Cancio *et al.*, 2017).

La contribución del cemento LC³:50 a la mitigación del daño ambiental resulta significativa y se encuentra estrechamente relacionada con el volumen de este material en cada uno de los sistemas constructivos. Las tipologías bloques tradicionales y forsa son las más contribuyentes, tanto a la contaminación ambiental como a la reducción de emisiones en el escenario LC³:50. Por ejemplo, para el caso de un biplanta de bloques tal como el especificado en uno de los estudios de caso de la investigación, la reducción de emisiones de CO₂ es potencialmente del 20 % en el escenario 2 (10,1 t de CO₂) y del 32 % en el escenario 3 (15.7 t de CO₂). Un simple cálculo ofrece una magnitud del impacto ambiental a escala de país, solo en lo relativo a construcción de viviendas. Suponiendo que las 22 106 viviendas construidas en Cuba en 2016 se hubiesen ejecutado bajo este tipo de método constructivo y con dicho tamaño promedio (área construida), la mitigación ambiental en términos de reducción de emisiones se ubicaría en el entorno de las 111 635 t de CO₂.

Los resultados de eco-eficiencia son reportados en la figura 2 de los anexos, en un estado comparativo entre las tecnologías constructivas en consideración. Los resultados obtenidos sugieren que la tecnología constructiva más eco-eficiente es el sistema de gran panel (29 % con respecto a bloques tradicionales y 20 % con respecto a forsa). El sistema de bloques posee el menor perfil de industrialización, caracterizado por un uso intensivo de fuerza de trabajo y manejo de materiales en el sitio de construcción con relativamente bajo valor agregado. Los tiempos de ejecución de una obra de bloques tradicionales, por lo regular, se extienden un 40 % más allá de los tiempos requeridos por el gran panel y un 80 % más allá del plazo de ejecución del edificio forsa, lo cual contribuye notablemente a las pérdidas de eficiencia.

El diferencial de eco-eficiencia proveniente del tránsito del escenario 1 al 3 refleja las reservas potenciales de eco-eficiencia como resultado de la posible sustitución gradual de los cementos



convencionales por el LC³:50, esto es, por la naturaleza tecnológica del cemento utilizado. Al considerar el uso del cemento LC³:50, las mayores reservas potenciales se tienen en las construcciones de bloques (21 % en el escenario 2 y 33 % en el escenario 3), lo cual está directamente relacionado con el volumen de cemento que se utiliza; seguido por la tipología forsa (4 % en el escenario 2 y 27 % en el escenario 3) y, por último, el sistema de Gran panel (7 % en el escenario 2 y 17 % en el escenario 3). El escenario 2 ofrece escasas reservas potenciales para las tipologías constructivas con mayores índices de industrialización (forsa y gran panel) debido a que en este escenario solo es posible sustituir el cemento PP25; sin embargo, dichas construcciones utilizan fundamentalmente el cemento P35. Es el escenario 3 el que ofrece mayores potencialidades en materia de eco-eficiencia para dichas tecnologías de construcción.

La escala de operaciones por lo regular ejerce influencia en la economía de los procesos productivos. El *ratio* de eco-eficiencia por su naturaleza algebraica “encubre” el efecto economía de escala que se produce entre el biplanta de gran panel y el edificio de cinco plantas del mismo sistema constructivo. Sin embargo, si se considera el costo de producción de ambos edificios, normalizado por la superficie útil, se tiene lo siguiente: \$ 547,93/m² y \$ 470,17/m² para los tamaños biplanta y cinco plantas, respectivamente. Lo anterior significa economías de escala del 15 %, que se deben al *efecto tamaño* de la escala de operaciones.

3. Conclusiones

La eco-eficiencia es una categoría que surge como instrumento para operacionalizar las variables del dominio del desarrollo sostenible y es expresión de la relación sinérgica entre los procesos productivos y su medioambiente natural, social, cultural e institucional. La potencial introducción del cemento de bajo carbono (LC³:50) en la fabricación de materiales de construcción y su uso ulterior en procesos constructivos, entraña significativas reservas de eficiencia económica y ambiental para el sector constructivo cubano. En términos comparativos y de acuerdo con los estudios de caso analizados, la tecnología constructiva gran panel reporta los mejores indicadores de eco-eficiencia en relación con el sistema forsa y la técnica de bloques tradicionales. Sin embargo, ningún método constructivo es *per se* superior a otro, pues ello depende de una multiplicidad de factores circunstanciales que determinan su carácter económico-productivo. A través del caso gran panel se evidencia la oportunidad económica y la viabilidad técnica de obtener economías de escala en los procesos asociados a la cadena productiva de viviendas, lo cual contribuye a incrementar la sostenibilidad del sector constructivo y el valor social de sus impactos.

4. Referencias

1. Aïtcin, P. (2000) ‘Cement of yesterday and today: concrete of tomorrow’, *Cement and Concrete Research*, 30(2000), pp. 1349–1359.
2. Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K. L. and Martirena, F. (2015) ‘Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration’, *Applied Clay Science*. Elsevier, 108, pp. 94–101.
3. Cancio, Y. (2018) *Procedimiento para la evaluación de la eco-eficiencia en las cadenas productivas de viviendas en Cuba. Estudio de caso: Cemento de Bajo Carbono (LC3)*. Tesis Doctoral. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
4. Cancio, Y., Sánchez, S., Heierli, U., Favier, A. R., Sánchez, I. R., Scrivener, K. L., Martirena, J. F. and Habert, G. (2017) ‘Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies’, *Development Engineering*, 2, pp. 82–91. doi: 10.1016/j.deveng.2017.06.001.



II Convención Científica Internacional 2019
CIENCIA Y TRANSFORMACIÓN SOCIAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas



5. Van Caneghem, J., Block, C., Van Hooste, H. and Vandecasteele, C. (2010) 'Eco-efficiency trends of the Flemish industry: decoupling of environmental impact from economic growth', *Journal of Cleaner Production*, 18, pp. 1349–1357.
6. CEMBUREAU (2015) *The role of cement in the 2050 low carbon economy*.
7. Cha, K., Lim, S. and Hur, T. (2008) 'Eco-efficiency approach for global warming in the context of Kyoto Mechanism', *Ecological Economics*, 67, pp. 274–280.
8. Freeman, A. M., Haveman, R. H. and Kneese, A. V (1973) 'Economics of environmental policy'. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY.
9. Gangoellis, M., Casals, M., Gassó, S., Forcada, N., Roca, X. and Fuertes, A. (2009) 'A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the construction process of residential buildings', *Building and Environment*, 44, pp. 558–571.
10. Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C. and Roussel, N. (2010) 'Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives', *Cement and Concrete Research*, 40, pp. 820–826.
11. Huppes, G. and Ishikawa, M. (2005) 'A framework for quantified eco-efficiency analysis', *Journal of Industrial Ecology*. Wiley Online Library, 9(4), pp. 25–41.
12. IPCC (2005) *Carbon dioxide capture and storage: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
13. Korhonen, J. and Seager, T. P. (2008) 'Beyond eco-efficiency: a resilience perspective', *Business Strategy and the Environment*, 17, pp. 411–419.
14. Malmqvist, T. and Glaumann, M. (2009) 'Environmental efficiency in residential buildings—A simplified communication approach', *Building and Environment*, 44, pp. 937–947.
15. Martirena, F. and Scrivener, K. (2015) 'Development and Introduction of a Low Clinker, Low Carbon, Ternary Blend Cement in Cuba', in *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, pp. 323–329.
16. McIntyre, R. J. and Thornton, J. R. (1974) 'Environmental divergence: air pollution in the USSR', *Journal of Environmental Economics and Management*. Elsevier, 1(2), pp. 109–120.
17. McIntyre, R. and Thornton, J. (1978) 'On the environmental efficiency of economic systems', *Europe-Asia Studies*, 30(1978), pp. 173–192.
18. Pérez, Y. (2014) *Evaluación de eco-eficiencia en la cadena productiva del biplanta con cemento de bajo carbono en Santa Clara*. Trabajo de Diploma. Universidad Central de Las Villas.
19. Picazo, A. J., Beltrán, M. and Gómez, J. A. (2012) 'Assessing eco-efficiency with directional distance functions', *European Journal of Operational Research*, 220, pp. 798–809.
20. Rüdener, I., Gensch, C. O., Griebhammer, R. and Bunke, D. (2005) 'Integrated environmental and economic assessment of products and processes', *Journal of Industrial Ecology*, 9, pp. 105–116.
21. Schaltegger, S. (1998) 'Accounting for eco-efficiency', *Environmental management in practice*, 1, pp. 272–287.
22. Schaltegger, S. and Burritt, R. (2000) 'Contemporary environmental accounting: issues, concepts and practice'. Greenleaf Sheffield.
23. Schaltegger, S. and Sturm, A. (1990) 'Ökologische Rationalität: Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von ökologieorientierten Managementinstrumenten', *die Unternehmung*. JSTOR, pp. 273–290.



**II Convención Científica Internacional 2019
CIENCIA Y TRANSFORMACIÓN SOCIAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**



24. Schmidheiny, S. (1992) *Changing Course: A global business perspective on the development and the environment*. Vol 1. MIT Press.
25. Schmidheiny, S. and Stigson, B. (2000) 'Eco-efficiency: creating more value with less impact'.
26. Scrivener, K. (2014) 'Options for the future of cement', *The Indian Concrete Journal*, 88(7), pp. 11–21.
27. Sinivuori, P. and Saari, A. (2006) 'MIPS analysis of natural resource consumption in two university buildings', *Building and Environment*, 41, pp. 657–668.
28. Sturm, A., Müller, K. and Upasena, S. (2004) *A Manual for the Prepares and Users of Ecoefficiency Indicators, Version 1.1. United Nations Conference on Trade and Development*.
29. Zhang, B., Bi, J., Fan, Z., Yuan, Z. and Ge, J. (2008) 'Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach', *Ecological Economics*, 68(2008), pp. 306–316.

5. Anexos (Tablas y figuras)

Figura 1. Procedimiento propuesto por Cancio (2018)

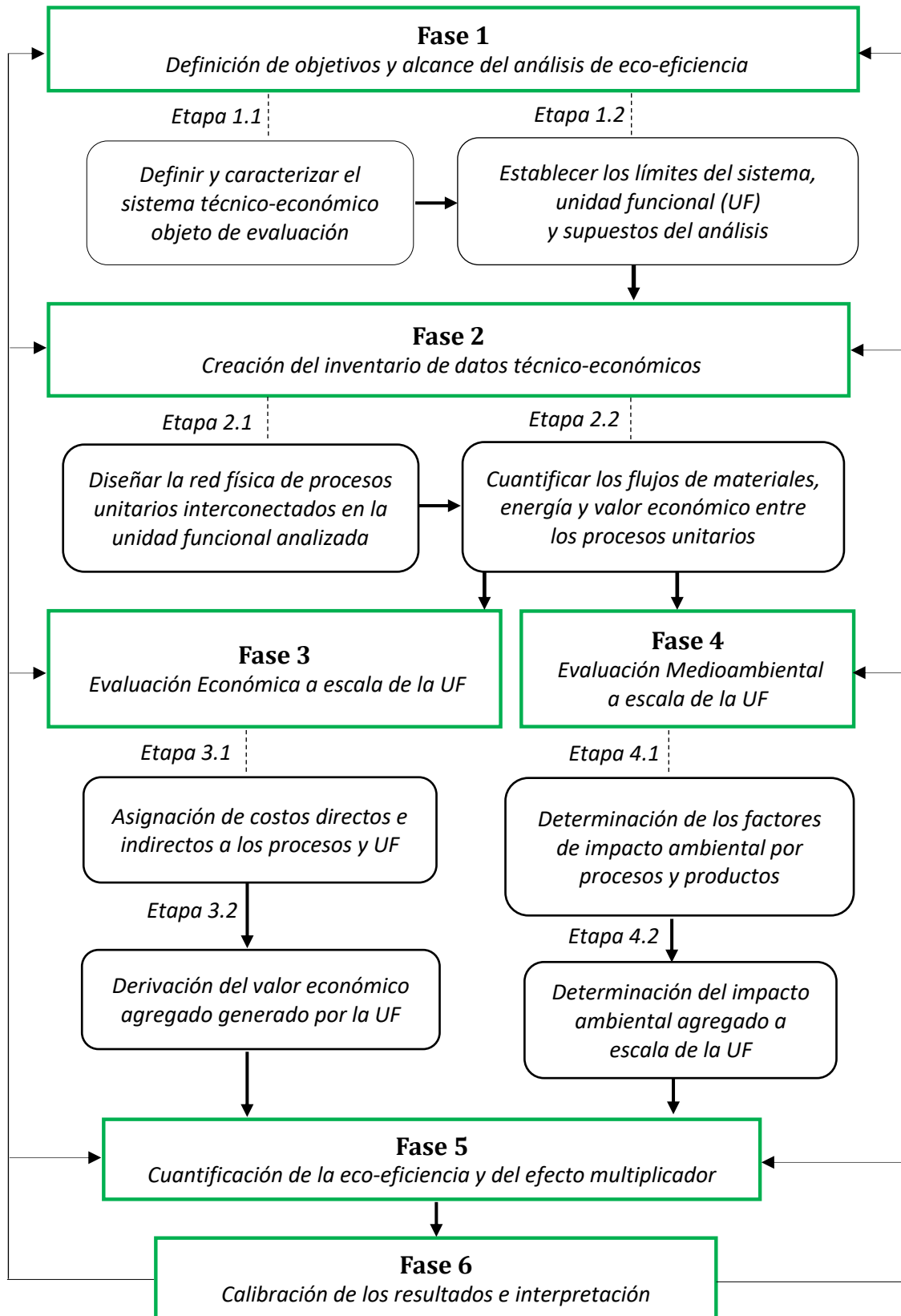




Tabla 1. Resumen del valor agregado, calculado por alternativa constructiva para cada escenario de alternativa cementera (\$).

Método constructivo	P35+PP25	P35+LC ³	LC ³
Bloques	225 124,14	226 007,43	227 057,78
Gran panel Biplanta	182 953,89	183 161,11	184 195,41
Gran panel 5 plantas	899 775,47	900 700,77	905 868,82
Forsa	966 824,78	967 478,97	975 609,93

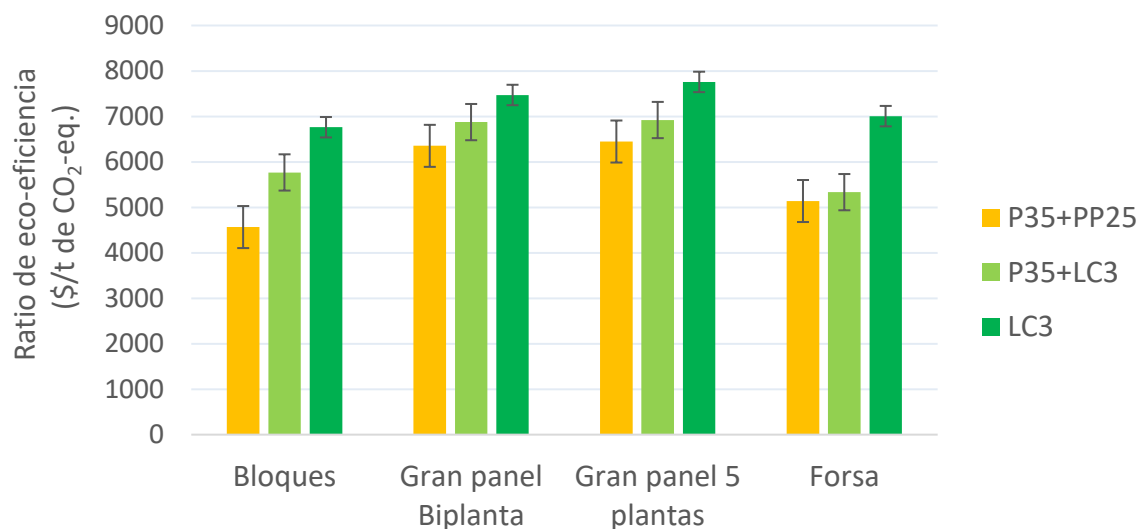
Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Resumen del impacto ambiental por sistema constructivo para los tres escenarios bajo consideración (kg CO₂/m²).

Método constructivo	P35+PP25	P35+LC ³	LC ³
Bloques	292,18	232,22	198,99
Gran panel Biplanta	178,41	165,05	152,73
Gran panel 5 plantas	161,59	150,70	135,19
Forsa	233,14	224,78	172,57

Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Ratio de eco-eficiencia: Comparación entre tecnologías constructivas



Fuente: Elaboración propia