

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ciencias Económicas
Departamento de Economía



Trabajo de Diploma

Aplicación de un procedimiento para la evaluación de eco-eficiencia en el uso del cemento LC³. Estudios de caso en tecnologías de Gran Panel y Bloques Tradicionales en Santa Clara

Diplomante: Eunises Abreu Pérez

Tutores: MSc. Yudiesky Cancio Díaz

Dr. Inocencio Raúl Sánchez Machado

Santa Clara, 2017

PENSAMIENTO

“Es justamente la posibilidad de realizar un sueño lo que hace que la vida sea interesante.”

Paulo Coelho

DEDICATORIA

A Dios, pues a él le debo todos mis logros y todo lo que soy.

A mi madre por ser mi faro, mi luz, mi estrella.

A mi padre por ser mi guía, por su sacrificio y apoyo incondicional.

A mi abuelo por dejar en mi vida un hilo para que no me perdiera nunca.

A mi hermano por su ejemplo de valentía y sacrificio.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de todo corazón por hacer posible la realización de este Trabajo de Diploma a:

A mi madre por ser mi apoyo, mi guía, mi todo...Gracias por tu inmenso amor, por tantos años de sacrificio, dedicación y entrega total. A ti van dedicados todos mis logros.

A mi padre por cada esfuerzo que ha hecho por mí, por su comprensión y apoyo incondicional. Gracias por regalarme cada día todo tu amor, por dar tantas carreras conmigo para que todo me saliera bien. A ti va dedicado este logro ya que sin tu apoyo hubiese sido imposible.

A mi hermano Leduan por ser un ejemplo para mí de entrega y sacrificio. Gracias por tu apoyo, por cada palabra de aliento para que no me rindiera. Nunca tendré mejor modelo a seguir.

A mi nueva familia por llegar a mi vida y mostrarme que no hay nada imposible.

A mi tutor, por cada enseñanza y esfuerzo, y sobre todo por su apoyo incondicional para que este trabajo de diploma fuera posible.

A mis amigos (Yanelis, Neorge, Yandry...), gracias por sus risas y por pasar momentos inolvidables a su lado.

A mi amigo Yaisel, ya que sin su apoyo no habría podido cumplir este sueño.

A mis compañeros de aula, por los que llegamos, por los que quedaron, por todos los momentos que se construyeron juntos.

A todas las personas que tanto colaboraron desde las empresas (Yolaina, Alina, Yoanka y Jose), para que la información requerida estuviera en mis manos.

A todos los profesores que contribuyeron de una forma u otra a mi formación.

.....Nada hubiese sido posible sin ustedes, a todos mil gracias.....

RESUMEN

En la presente investigación se aplica el procedimiento propuesto por Cancio (2016) para evaluar la eco-eficiencia del uso del cemento LC3 en el sector constructivo de la provincia Villa Clara. La investigación se desarrolla mediante dos estudios de caso: el primero en un biplanta construido por el método de Gran Panel, y un segundo biplanta usando el método de Bloques Tradicionales, en Santa Clara. El análisis persigue poner de manifiesto la superioridad de un método constructivo con relación al otro atendiendo a las dimensiones de la eco-eficiencia, de manera que se puedan generar generalizaciones para la futura implementación del cemento LC3 en el país. Se emplea la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para determinar el impacto ambiental; en la evaluación económica se utiliza el análisis del costo de producción. Para reportar el estudio comparado que se realiza en la investigación, se emplea el portafolio de eco-eficiencia propuesto por Schaltegger (1998). La investigación arroja como resultados, entre otros, que: el método de Bloques Tradicionales resulta un 25% menos económico que el método de Gran Panel; el sistema Gran Panel permite ahorro de emisiones de CO₂ en el entorno del 22% con respecto al sistema de bloques; la sustitución potencial de cementos tradicionales por LC3 generaría ahorros económicos del 12-13% en estos tipos de edificaciones.

ABSTRACT

In the present research the procedure proposed by Cancio (2016) was applied in order to assess the eco-efficiency of using LC3 in the construction sector of Villa Clara province. The research is conducted by means of two case studies: the first one is a Grand Panel two-storey building and the second one is a Traditional Concrete Block two-storey building (both in Santa Clara). The assessment aims at disclosing the superiority of one construction technique over the other one, in a way that would lead to generalizations towards potential implementation of LC3 in Cuba. The well-known methodology Life Cycle Assessment (LCA) is employed to determine the environmental impact within the eco-efficiency umbrella; to complete the economic assessment, the production cost analysis was conducted. Both economic and environmental findings were integrated into an eco-efficiency portfolio, a tool early proposed by Schaltegger (1998). This research provides, among others, the following findings: the block method results in a 25% less cost-effective than Grand Panel technique; Grand Panel generates CO₂ saving around 22% with respect to block building; replacing traditional cements by LC3 might lead to an economic cost reduction of 12-13% within these two construction techniques.

ÍNDICE

RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS RELACIONADOS CON LA ECO-EFICIENCIA, LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y LAS TECNOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS.....	5
1.1. Fundamento conceptual de la eco-eficiencia.....	6
1.2. Eco-eficiencia y su relación con el desarrollo sostenible	10
1.3. Métodos de medición de eco-eficiencia	11
1.4. Del hormigón tradicional al hormigón más verde	15
1.4.1. El hormigón como material de construcción por excelencia: el cemento como componente activo del sistema	16
1.4.2. El cemento de bajo carbono (LC3): innovación tecnológica por la sostenibilidad de la industria constructiva	19
1.5. Análisis del ciclo de vida como metodología de impactos ambientales.....	21
1.6. Conclusiones parciales del capítulo	26
CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO APLICADO Y DE LAS EMPRESAS CONSTRUCTORAS QUE CONSTITUYEN OBJETOS DE ESTUDIO PRÁCTICO ESPECÍFICO	28
2.1. Procedimiento para la evaluación de eco-eficiencia en sistemas constructivos.....	28
2.2. Taxonomía del sistema de la vivienda en Cuba.	36
2.3. Caracterización de la empresa constructora objeto de estudio	37
2.4. Descripción de los sistemas constructivos evaluados.....	39
CAPÍTULO III. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE ECO-EFICIENCIA A LOS ESTUDIOS DE CASO BIPLANTAS DE GRAN PANEL Y DE BLOQUES TRADICIONALES EN SANTA CLARA.	46
3.1. Aplicación de la Fase 1: Definición de objetivos y alcance del análisis	46
3.2. Aplicación de la Fase 2: Mapeo y descripción de la cadena productiva	46
3.3. Aplicación de la Fase 3: Creación del inventario de datos asociado a la unidad funcional.....	49
3.4. Aplicación de la Fase 4: Evaluación medioambiental.....	52
3.5. Aplicación de la Fase 5: Evaluación económica	55
3.6. Aplicación de la Fase 6: Cuantificación de la eco-eficiencia.....	57
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA.....	62

INTRODUCCIÓN

Entre los problemas más acuciantes del desarrollo sostenible se encuentra la cuestión del hábitat humano. No pocas personas en el mundo carecen de una vivienda básica. Este problema se ha mantenido latente para Cuba por más de 50 años, a pesar de los inconmensurables esfuerzos realizados por el Estado y gobierno cubanos por solventar en lo fundamental dicha problemática.

El fondo habitacional del país se deteriora con mucha facilidad por la exposición de las construcciones a la penetración de cloruros en las estructuras del hormigón, provocando corrosión del acero (cuestión que ocurre por estar rodeado de mar), a lo cual se le suma el efecto nefasto de los huracanes, además de la débil intervención sobre los procesos de mantenimiento y reparación de las edificaciones y viviendas en general.

Junto con el tema del hábitat se encuentra la necesidad de infraestructura para los procesos de desarrollo económico-productivo, ambos requieren de materiales de construcción, en especial cemento, que constituye la base de casi todos los materiales. El país ha definido una Estrategia de Desarrollo Socio-económico hasta el año 2030, que para alcanzar sus objetivos principales debe contar con el respaldo de las inversiones planificadas en el corto, mediano y largo plazos, lo cual demanda materiales.

El hormigón es el material de construcción por excelencia de la civilización moderna. Se considera que es el material más consumido por el hombre después del agua. No es técnicamente posible, hasta el presente, producir hormigones sin cemento. La producción mundial de cementos ha estado basada fundamentalmente en un alto contenido de clínquer (más de un 75%). En Cuba el cemento P35 posee un 88% de clínquer y el cemento PP25 posee un 75%. El clínquer es un material muy costoso por emplear grandes cantidades de materias primas, energía y capital.

El clínquer se obtiene de calcinar la piedra caliza y otras arcillas a no menos de 1450 °C. Con los altos costos de producción, el clínquer le imprime al cemento una alta huella de carbono, siendo el volumen de CO₂ emitido a la atmósfera por tonelada de cemento entre un 0.8-1.0 (Patel, 2013). La producción de cemento es responsable del 8% de las emisiones globales de carbono, y se considera la tercera industria mundial emisora de CO₂, solo después del acero y los hidrocarburos.

Del lado de la demanda, queda justificada la carencia de cemento y materiales de construcción en general. Del lado de la oferta, Cuba cuenta con 6 plantas de cemento, en dos de las cuales se concentra el 70% de la producción total de cemento (Carlos

Marx, Cienfuegos y Mariel, Artemisa). El resto de las fábricas se encuentran descapitalizadas y con un deterioro tecnológico exacerbado, lo cual le permite aprovechar apenas el 43% de la capacidad instalada de producción de cemento. La falta de financiamiento se le suma al conjunto de condiciones, lo cual ha imposibilitado la reposición de hornos de clínquer y molinos para la producción de cemento.

No pocos ejemplos a nivel mundial se han centrado en el uso de materiales cementicios suplementarios (MCS) con la finalidad de sustituir parte del clínquer del cemento por dichos MCS, lo cual produce como resultado: (1) incrementar la capacidad productiva total de cemento con las mismas capacidades de producción de clínquer, (2) disminuir costos de producción y alcanzar precios más competitivos y (3) mitigar el impacto ambiental que proviene de los procesos del cemento. Entre los MCS que se manejan en el mundo existen: las cenizas volantes, las escorias de alto horno, desechos de la producción agrícola y el caolín. En Cuba las reservas probadas de arcilla caolinítica motivaron la consecución del proyecto internacional Cemento de Bajo Carbono, dando lugar a un producto de la innovación tecnológica entre el CIDEM y EPFL de Lausana, Suiza, cemento que se ha dado en llamar LC3 (del inglés Limestone Calcined Clay Cement). En el capítulo I de esta tesis se documentan referencias sobre estudios previos desarrollados en torno a la factibilidad técnica, económica y ambiental del cemento LC3, estudios llevados a cabo a partir de las pruebas industriales del nuevo cemento, ocurridas en el país desde el año 2013 hasta la fecha.

La dirección del proyecto LC3 ha puesto en manos de economistas la tarea técnica de demostrar la factibilidad del cemento en el orden económico y ambiental, estudios que se han desarrollado a nivel del cemento, y otros a nivel de materiales intermedios y de edificaciones. Se hace necesario evaluar las potencialidades económicas y ambientales derivadas de usar este cemento en la práctica constructiva del país. En el plano teórico, la herramienta o categoría eco-eficiencia ha sido empleada constructivamente para conducir los estudios en torno al uso del cemento.

La eco-eficiencia es un concepto originado en el seno del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD)¹, y hace referencia a la capacidad de las organizaciones empresariales de crear más valor en su negocio al tiempo que reduzcan los impactos negativos al medio ambiente. Desde su lanzamiento en 1992 en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, el concepto de eco-eficiencia ha sido introducido

¹ Por sus siglas en Inglés, World Business Council for Sustainable Development.

progresivamente en los sistemas de gestión de productos y procesos en el mundo de los negocios a escala internacional, con independencia de si es un país desarrollado, en vías de desarrollo o periférico. Esta filosofía de abordar el negocio de cara al cliente pero con responsabilidad social empresarial y ecológica, ha desatado la creatividad de múltiples organizaciones a nivel mundial en pos de producir más valor para el cliente con menos impacto ambiental.

Resulta una necesidad para la industria constructiva cubana obtener conocimiento fundamentado científicamente, sobre la eco-eficiencia del potencial uso del cemento en diversas tipologías constructivas que se ejecutan en el país. No existen estudios anteriores de eco-eficiencia que aborden la comparación entre los métodos constructivos Gran Panel y Bloques Tradicionales, imbricados en el mismo sistema analítico. Lo anteriormente expuesto constituye la **situación problemática** de la presente investigación, a su vez sustenta la formulación del siguiente problema científico.

Problema científico

¿Cómo contribuir a la evaluación de eco-eficiencia del uso del cemento de LC3, a partir de la aplicación de un procedimiento a dos estudios de caso en biplantas construidos por el método Gran Panel y por el método Bloques Tradicionales, en la ciudad de Santa Clara?

Objetivo general

Aplicar un procedimiento para la evaluación de eco-eficiencia del uso del cemento LC3 en biplantas construidos por el método Gran Panel y por el método Bloques Tradicionales, en la ciudad de Santa Clara.

Objetivos específicos

1. Sistematizar los fundamentos teórico-metodológicos relacionados con la eco-eficiencia, los materiales de construcción y las tecnologías constructivas, en la provincia de Villa Clara.
2. Describir la metodología aplicada en la investigación para el análisis de eco-eficiencia, los métodos constructivos analizados, así como las empresas constructivas que constituyen objetos de estudio práctico específico.
3. Aplicar un procedimiento de evaluación de eco-eficiencia en el uso de LC3, a los estudios de caso en biplantas construidos por el método Gran Panel y por el método Bloques Tradicionales, en la ciudad de Santa Clara.

Hipótesis de investigación

Si se aplica un procedimiento de evaluación de eco-eficiencia a los estudios de caso biplantas tipo Gran Panel y de Bloques Tradicionales, es posible contribuir a demostrar las ventajas económicas y ambientales derivadas de la potencial introducción del cemento LC3 en el país.

En el proceso investigativo se emplearon diversos métodos y técnicas de investigación. Del nivel teórico, el método inductivo-deductivo, analítico-sintético, histórico-lógico, triangulación de fuentes. Del nivel empírico, revisión documental, observación, entrevistas, observación, metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Norma ISO 14040, 14044 y 14045.

La tesis se estructura en tres capítulos. El capítulo I establece el marco teórico referencial de la investigación. El segundo, establece el procedimiento que se aplicó, así como las características centrales de las tipologías constructivas que fueron estudiadas. El tercer capítulo muestra la aplicación empírica del procedimiento de Cancio (2016) a los edificios biplantas antes mencionados.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS RELACIONADOS CON LA ECO-EFICIENCIA, LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y LAS TECNOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS.

En el presente capítulo se expone el Marco Teórico Referencial (MTR) de la investigación desarrollada, cuyo objeto de estudio teórico es la eco-eficiencia. Se abordan las nociones de eco-eficiencia documentadas en la literatura especializada sobre la temática, así como el tópico instrumental relativo a la medición de la eco-eficiencia en estudios aplicados. Debido a que el componente empírico del trabajo se desarrolla en el sector constructivo, con particular énfasis en el cemento y el hormigón, se explican los nexos de estos elementos con el análisis general de eco-eficiencia. En la figura 1.1 se muestra el hilo conductor del capítulo.

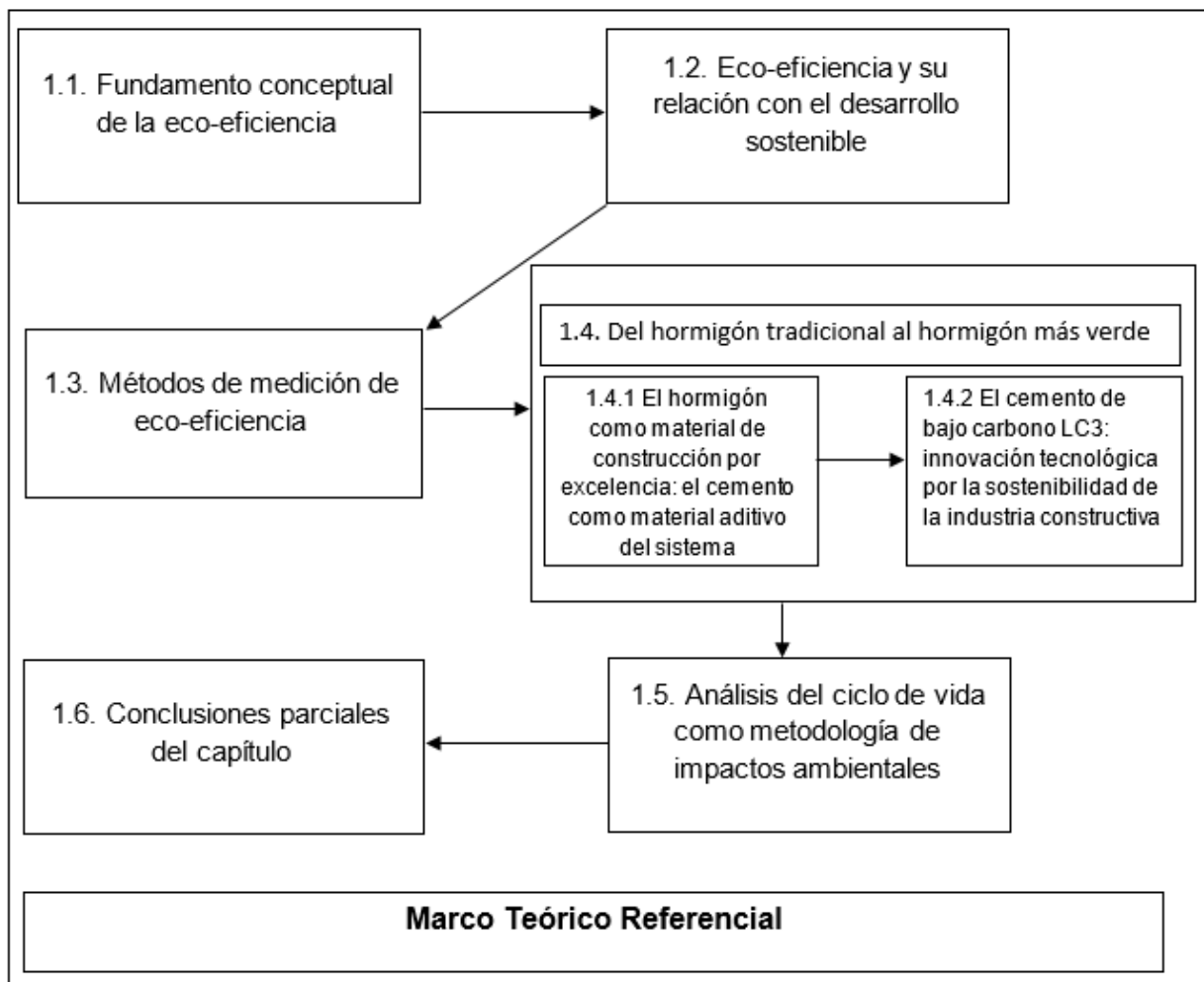


Figura 1.1. Hilo conductor del Capítulo I (Marco teórico referencial)

Fuente: Elaboración propia

1.1. Fundamento conceptual de la eco-eficiencia

Aunque las bases conceptuales de la eco-eficiencia se pueden encontrar en las nociones de eficiencia medioambiental aparecidos en la literatura económica de los años 1970 (Freeman et al., 1973),(McIntyre and Thornton, 1974),(McIntyre and Thornton, 1978), en los 90's (Schaltegger and Sturm, 1990) introducen la eco-eficiencia como “el vínculo empresarial hacia el desarrollo sostenible” (Huppel y Ishikawa, 2005),(Zhang et al., 2008). En un trabajo pionero (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 et al., 2000). El prefijo “eco” se suele atribuir al hecho de combinar en un mismo término las categorías economía y ecología.

El término se populariza por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD²) en el libro de (Schmidheiny, 1992), dado a conocer en el marco de la Cumbre de la Tierra, Río de Janeiro. En dicha obra se documentan ejemplos paradigmáticos 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 (WBCSD, 2000), Schmidheiny y Stigson 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”.

Sin ser una definición exhaustiva, se pueden relacionar un conjunto de núcleos racionales situados en el dominio de la eco-eficiencia, a partir de dicha consideración del WBCSD:

² WBCSD, acrónimo inglés de “World Business Council for Sustainable Development”.

- Al considerar la categoría *precios competitivos*, reconoce la necesidad de producir bienes materiales o servicios basados en eficiencia económica o, al menos, en eficiencia en costos.
- Declara el componente ecológico de la eco-eficiencia de manera precisa.
- Reconoce que los límites del planeta Tierra son finitos en función de asimilar la carga contaminante producida por la actividad económica del hombre.
- Reconoce que los recursos de la Tierra son limitados.
- Se refiere a la condición eco-eficiente a la luz del ciclo de vida de los productos.

Sin embargo, la definición posee limitaciones teórico-conceptuales en su formulación, tales como:

- Otorga primacía a la competitividad y la reduce a la competitividad en costos.
- No considera el concepto de unidad funcional en la definición, con lo cual produce dificultades metodológicas en el terreno de la cuantificación.
- No expresa las categorías que gobiernan la eco-eficiencia (economía y medioambiente) en relación directa con los recursos productivos como denominador común, aunque en la definición esta noción pudiera estar subyacente.

Pese a sus deficiencias, este enfoque ha estado presente en cientos de trabajos científicos relacionados con la temática, de manera que resulta difícil encontrar un trabajo aplicado que no haga alusión a la definición pionera del WBCSD.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 1998, citado por (Machado, 2016)) la define como la eficiencia con la cual los recursos ecológicos son utilizados para llenar las necesidades humanas y la define como una razón (ratio) de salida (el de productos y servicios producidos por una empresa, sector o economía completa) dividida por las entradas (la suma de las presiones ambientales generadas por la empresa, el sector o la economía).

La mayoría de los autores han divulgado con enfoques similares el término de eco-eficiencia, resaltando la importancia de establecer una relación armónica entre la conducta ambiental y el empleo eficiente de los recursos para lograr la competitividad de las empresas, y con ello satisfacer las necesidades humanas.

Clariond (1999) se refiere a la postura empresarial de utilizar la eco-eficiencia como un “escudo” para posicionar y preservar una imagen de empresa con responsabilidad

ecológica, sin embargo, debería ser una buena práctica empresarial para mejorar la estrategia de costos de la organización, progresando en la competitividad de la empresa. Garza y Farrera (2001), mencionan que la eco-eficiencia es producir más con menos, utilizar menos recursos naturales y menos energía durante el proceso productivo, reducir los desechos y atenuar la contaminación en beneficio del medio ambiente y de las PYMEs³, ya que se promueve la innovación y se disminuyen los costos de producción y operación. La meta final de la eco-eficiencia es buscar elaborar bienes y servicios a precios competitivos para satisfacer las necesidades humanas, elevar la calidad de vida de la población y promover la reducción progresiva del impacto ambiental negativo de los productos.

(Leal, 2005) define los dos pilares de la eco-eficiencia como la reducción de la sobre-explotación de los recursos naturales y la disminución de la contaminación. Muchos términos han sido asociados con este mismo concepto en el contexto de análisis de sistemas tecno-productivos: ecología industrial, análisis de ciclo de vida, desmaterialización de la producción (Ness, 2007).

Para (Kicherer et al., 2007) la eco-eficiencia es una eficiencia ecológica y económica que mide el impacto medioambiental causado por unidad monetaria ganada.

(Kuosmanen and Kortelainen, 2005) consideran útil el concepto de eco-eficiencia por dos razones: es el modo más efectivo de reducir los impactos ambientales y, además, las políticas derivadas son más fáciles de adoptar que las políticas que restringen el nivel de actividad económica.

Existe un número creciente de evidencias de que las grandes empresas y organizaciones en la actualidad emplean estrategias de eco-eficiencia mediante políticas orientadas a fomentar la conducta ambiental, siendo esto un elemento distintivo que le permita mejorar las ventas, generar mayores beneficios y al mismo tiempo llegar a ser competitivas.

Se trata de adoptar, desde el ámbito empresarial, un enfoque de mejora continua de los procesos de forma tal que se persigan simultáneamente los objetivos de reducir el impacto negativo al medio ambiente y el incremento del valor agregado de los productos de cara al cliente o al consumidor final (Cancio et al., 2014).

³ Pequeña y mediana empresa

Una lectura básica de las anteriores definiciones demuestra que el principio fundamental de la eco-eficiencia es la producción de bienes y servicios que generen menores impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida, permitiéndole a las empresas lograr competitividad, mejorando las ventas y, por lo tanto, generar mayores ganancias, ahorrando costos mediante el aprovechamiento de los recursos y el empleo de una conducta de respeto al medio ambiente.

La empresa, como agente económico del desarrollo local sostenible, tiene una cuota de responsabilidad muy alta en el deterioro del medio ambiente. Para alcanzar un alto nivel de crecimiento económico sostenido se deben priorizar en las organizaciones cuestiones esenciales que le permita a las mismas lograr competitividad mediante el vínculo entre la dimensión económica, la ambiental y la social.

La eco-eficiencia emerge como una respuesta administrativa frente a los asuntos asociados con los desechos provenientes de los procesos productivos (Jollands et al., 2004) y la eficiencia con la cual los recursos ecológicos son usados para satisfacer las necesidades humanas (Mickwitz et al., 2006).

Las tres categorías de enfoques de Eco-eficiencia según Fiksel (1997), son:

1. Procesos más limpios: modificando las tecnologías y los procesos de producción de forma que generen menos contaminación y residuos. En este enfoque se asume que la definición del producto ya ha sido establecida.
2. Productos más limpios: modificando el diseño y la composición de materiales de los productos de forma que generen menos contaminación y residuos a lo largo de todo su ciclo de vida. Puesto que la fabricación no es más que una de las fases del ciclo de vida, este enfoque implica el desarrollo de procesos más limpios, permitiendo cambios fundamentales del producto en sí.
3. Utilización sostenible de los recursos: modificando todo el sistema de producción e incluso las relaciones con los proveedores y los clientes, de manera que se consuma menos recursos materiales y energéticos por unidad de valor producida. Puesto que la reducción de la contaminación y de los residuos no es más que una de las formas de reducir la utilización de recursos, este enfoque incluye productos y procesos más limpios, permitiendo innovaciones técnicas y económicas más amplias, descritas frecuentemente como Ecología Industrial.

1.2. Eco-eficiencia y su relación con el desarrollo sostenible

La eco-eficiencia emerge a partir del debate científico en torno al desarrollo sostenible. De acuerdo con (Cha et al., 2008), 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. El presente epígrafe está dirigido a explicar el nexo epistemológico entre ambas categorías.

Aunque en la literatura contemporánea se pueden encontrar disímiles teorías sobre el desarrollo, las cuales han dado lugar a categorías vecinales como desarrollo humano, desarrollo humano sostenible, desarrollo sostenible, esta última constituye la categoría más relacionada con el concepto de eco-eficiencia. Se suele decir que la Cumbre de Río marcó un hito en la configuración de dicho concepto, sin embargo, en 1987 la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente de la Asamblea General de las Naciones Unidas resume su tesis sobre el desarrollo sostenible como "el desarrollo que satisface las necesidades actuales, sin comprometer la capacidad de que generaciones futuras puedan satisfacer sus propias necesidades". Argumentos en favor del equilibrio intergeneracional contenido en dicho postulado fueron expuestos en el conocido Reporte Brundtland, *Nuestro Futuro Común* (WCED, 1987).

(DeSimone and Popoff, 2000) consideran la eco-eficiencia como la respuesta de las empresas al desafío del desarrollo sostenible. Para (Hupples and Ishikawa, 2005b) la eco-eficiencia es un instrumento para el análisis de la sostenibilidad, indicando una relación empírica entre valor económico e impacto ambiental. El concepto de eco-eficiencia está ligado al concepto de sostenibilidad, si bien mejorar la eco-eficiencia no implica garantizar la sostenibilidad. En efecto, aunque se logre un nivel de impacto ambiental bajo en relación al valor económico obtenido, el impacto ambiental absoluto puede exceder la capacidad del ecosistema. Al respecto, Garza y Farrera (2001), (DeSimone and Popoff, 2000), (Hupples and Ishikawa, 2005b), destacan que el concepto de eco-eficiencia está ligado al concepto de sostenibilidad ya que pretende objetivos de crecimiento económico, equidad social y valor ecológico.

De acuerdo con (Cancio et al., 2016a), la eco-eficiencia es un instrumento para operacionalizar las variables del dominio del desarrollo sostenible.

Todas las definiciones de desarrollo sostenible sostienen como base común los tres pilares que se muestran en la Figura 1.2, a saber, economía, ecología y sociedad. En el enfoque de eco-eficiencia se relacionan directamente dos de estas dimensiones, razón

por la cual algunos autores se han mostrado críticamente señalando que esta noción ignora el componente social que persigue el desarrollo sostenible. A criterio de esta autora, cuando la gestión económica y ambiental se encuentran puestas al servicio de la sociedad, esta última transversaliza la actividad productiva en cualquiera de sus manifestaciones. De hecho, no es posible producir bienes y servicios ignorando que en rigor estos se generan a través de un conjunto de relaciones sociales de producción históricamente determinadas. Sería, por tanto, un error dialéctico razonar que el componente social se encuentra fuera del sistema.

El Instituto Wuppertal, en el año 2001, define eco-eficiencia como una estrategia social de acción que busca disminuir el uso de materiales en la economía para reducir impactos ambientales indeseables y producir un grado relativamente superior de riqueza económica más equitativamente distribuida.

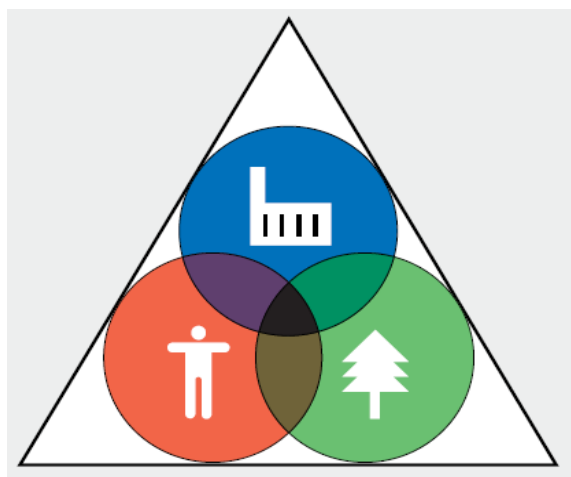


Figura 1.2. Representación esquemática del desarrollo sostenible

Fuente: (Soubotina y Sheram, 2000), publicación del Banco Mundial

1.3. Métodos de medición de eco-eficiencia

En el presente epígrafe se exponen las distintas aristas encontradas en la literatura sobre el tópico de la cuantificación de la eco-eficiencia. No existe consenso con relación a una fórmula ideal o un indicador que sintetice todo el contenido de la eco-eficiencia. Sin embargo, se pueden identificar ciertas tendencias y patrones ya utilizados empíricamente en trabajos aplicados sobre la temática.

Un significativo número de indicadores—por ejemplo, índice de sostenibilidad medioambiental, eco-medidas, retorno del medioambiente, productividad verde, etc.—han sido propuestos y utilizados extensamente para medir la eco-eficiencia (Hunkeler and Biswas, 2000, Vogtländer et al., 2002, Hur et al., 2004).

En las publicaciones del WBCSD sobre eco-eficiencia—difundidas y aplicadas crecientemente a partir de la Cumbre de la Tierra— se enuncia y propone una amplia gama de indicadores de evaluación. El punto de partida de todas las obras publicadas en torno a la medición es la llamada “fórmula de la eco-eficiencia”, presentada por el WBCSD en (Verfaillie and Bidwell, 2000); ver Ecuación 1.

$$\text{Eco - eficiencia} = \frac{\text{Desempeño económico}}{\text{Desempeño medioambiental}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

De acuerdo con esta formulación, varios pueden ser los indicadores de desempeño económico que pueden actuar en el ratio de eco-eficiencia, como por ejemplo, el costo de producción, las utilidades (bruta o neta), el valor agregado (bruto o neto), el volumen de producción. La dimensión económica es, por lo general, la menos controversial, puesto que los indicadores que la definen poseen un carácter universal. Sin embargo, la dimensión medioambiental puede ser tan abarcadora (o tan reduccionista) como sea el interés del investigador o el alcance del estudio que pretenda desarrollar. Además, el tipo de proceso, producto o servicio condicionan los indicadores medioambientales más apropiados en cada caso particular, puesto que las categorías de daño ambiental difieren con relación a la clase de actividad económica de que se trate. Por ejemplo, en el sector de la construcción la contribución al potencial de calentamiento global es altamente relevante debido a las emisiones de dióxido de carbono generadas durante el proceso de producción del cemento, compuesto que se encuentra presente en la mayoría de las aplicaciones constructivas de la civilización moderna.

Si se considera, por ejemplo, el valor económico generado por cierto proceso productivo en un período determinado, tal como se indica en la Ecuación 2, y el potencial de calentamiento global generado por dicho volumen productivo (medido a través de los kg de CO₂ emitidos), el ratio de eco-eficiencia podría interpretarse como el valor creado por unidad de perjuicio ecológico. Al decir de (Schaltegger, 1998), una medida de la eficiencia medioambiental.

$$\text{Eco - eficiencia} = \frac{\text{Valor del producto o servicio}}{\text{Impacto medioambiental}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

(Huppés and Ishikawa, 2005) analizan exhaustivamente el contenido empírico de la eco-eficiencia e identifican cuatro tipologías: (i) productividad medioambiental, (ii) intensidad medioambiental, (iii) costo de mejora medioambiental y (iv) costo-efectividad medioambiental (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Tipologías de eco-eficiencia según (Huppés and Ishikawa, 2005)

<i>Forma que adopta el ratio</i>	<i>Dominio de la creación de valor</i>	<i>Dominio de la mejora medioambiental</i>
$\frac{\text{Economía}}{\text{Medioambiente}}$	Valor de la producción por unidad de impacto medioambiental (productividad medioambiental)	Costo por unidad de mejora medioambiental (costo de la mejora medioambiental)
$\frac{\text{Medioambiente}}{\text{Economía}}$	Impacto medioambiental por unidad de valor creado (intensidad medioambiental)	Mejora medioambiental por unidad de costo (costo-efectividad medioambiental)

El análisis centrado en los ahorros económicos de la mejora medioambiental excluye el criterio de progreso económico que forma parte de todo proceso de gestión. Por ello, esta investigación adopta el enfoque de la creación de valor. Tal como lo plantearan (Huppés and Ishikawa, 2005), la elección de la dimensión apropiada para el numerador o denominador (economía o medioambiente) queda a la arbitrariedad del investigador, puesto que una medida es exactamente la inversa de la otra.

El WBCSD reconoce cinco criterios básicos de impacto ambiental. A saber, consumo de energía, consumo de materiales, consumo de agua, emisión de gases de efecto invernadero y emisión de sustancias agotadoras de la capa de ozono (Verfaillie et al., 2000). Los criterios de desempeño económico que se enuncian son: producción total, ventas netas, beneficios y valor agregado.

Para que la eco-eficiencia tenga valor instrumental para la toma de decisiones, se requiere medir la variación de eco-eficiencia entre opciones o la evolución de un mismo

sistema económico en el tiempo (Bohne et al., 2008), (Saling et al., 2002), (UNCTAD, 2003), (Verfaillie and Bidwell, 2000).

Para estos modelos se hace necesario indicadores o valores numéricos de eco-eficiencia que midan la relación entre el funcionamiento ambiental y el funcionamiento financiero de la empresa para los diversos problemas ambientales globales.

Siguiendo la definición dada en UNCTAD (Sturm et al., 2004), un indicador es una medida específica de cierto elemento para demostrar su rendimiento a través del reconocimiento y valoración de información relevante. Utilizando esta definición, se pueden construir diferentes indicadores para un mismo elemento, dependiendo de la información disponible; estos pueden ser tanto cualitativos como cuantitativos.

Los indicadores de eco-eficiencia son valores numéricos asociados a un proceso o producto, que pueden calcularse al incluir numeradores o denominadores tan diversos como el usuario lo desee (Nakaniwa 2004). Así se logra identificar aquellas áreas de la empresa en las cuales se están provocando mayores desperdicios o pérdidas de recursos, así como posibles oportunidades de inversión. Los indicadores, por esta razón, son considerados como una herramienta de toma de decisiones, de evaluación del funcionamiento de la empresa y de comunicación para inversionistas internos y externos; ver por ejemplo (Verfaillie and Bidwell, 2000), (Montes, 2008).

En uno de los trabajos pioneros del WBCSD dedicados al tópico de la medición de la eco-eficiencia, se realiza una distinción entre dos clases de indicadores de eco-eficiencia. A saber:

- Los primeros son válidos para virtualmente todos los negocios. Se les denomina indicadores de "aplicación general" o "genéricos" y están considerados por la mayoría de los modelos. Estos indicadores se han diseñado para temas o problemas ambientales mundiales que han sido discutidos y para los cuales hay un acuerdo o consenso internacional como son el deterioro de la calidad del agua, el calentamiento global, el deterioro de la capa de ozono y problemas de residuos peligrosos.
- Los segundos se ajustan al contexto particular de empresas individuales y no necesariamente son aplicables para las demás empresas; son llamados indicadores "específicos del negocio" (Verfaillie and Bidwell, 2000).

Las empresas deben escoger los indicadores de eco-eficiencia que mayor se ajusten a sus procesos de comunicación y de toma de decisiones, los cálculos específicos

dependerán de las necesidades individuales de quien toma las decisiones. El valor y la influencia ambiental también pueden ser medidos por distintas entidades como: líneas de producción, instalaciones de manufactura o corporaciones completas; también para productos, segmentos de mercado o economías completas. De la misma manera, los indicadores relativos de eco-eficiencia pueden ser calculados y utilizados por muchas de las entidades, aunque el mismo indicador puede que no sea adecuado para todas.

Actualmente, existen esfuerzos por parte de algunas naciones y regiones que han logrado consensos tales que trazan indicadores de eco-eficiencia con objetivos reales y apropiados. Aún así, es responsabilidad de los gobiernos fomentar políticas que conduzcan a gestionar mejor los procesos.

(Schaltegger, 1998) propone un instrumento analítico a partir de un diagrama en coordenadas rectangulares para interpretar la eco-eficiencia a partir de su medición relativa. La propuesta se basa en la filosofía de la matriz de la Boston Consulting Group, esta vez situando la dimensión económica en uno de los ejes de coordenadas y la dimensión ambiental en el otro.

En lo que a medición de eco-eficiencia respecta, existe una técnica que ha ganado un creciente número de adeptos, el Análisis Envolvente de Datos (conocido como DEA por sus siglas en Inglés). Los modelos DEA se han utilizado con mucha frecuencia en estudios de eco-eficiencia fundado en el éxito que han tenido estas estructuras lineales de optimización para la cuantificación de la eficiencia técnica. Pueden verse los trabajos de (Zhang et al., 2008).

La mayor debilidad estructural y conceptual presente en este tipo de modelos radica en que los resultados de la eco-eficiencia son estrictamente dependientes de las ponderaciones óptimas que el propio modelo selecciona para las diferentes categorías de impacto ambiental. Sería cuestionable la disonancia entre la relevancia teórica del valor de la ponderación y los pesos específicos que el modelo efectivamente determina. Una segunda insuficiencia no menos relevante estaría asociada al mecanismo de construcción de la envolvente de los datos (o la frontera eco-eficiente), debido a que se ejecutan programas de optimización independientes para cada alternativa.

1.4. Del hormigón tradicional al hormigón más verde

En un trabajo seminal de (Aïtcin, 2000), en el cual analiza la factibilidad de producir hormigones ecológicamente más sostenibles, Pierre-Claude plantea que “el hormigón

del mañana tendrá que ser verde, verde y verde”. El autor defiende las diferentes alternativas que tiene el hormigón como sistema para reducir progresivamente su impacto ambiental. A pesar de la evidencia irrefutable de que, al menos hasta hoy—y lo será por un tiempo considerable—, es técnicamente improbable producir hormigones que en rigor puedan denominarse *verdes*, ciertamente se ha venido empleando el término de *hormigones verdes* para referirse a aquellos compuestos derivados del cemento que posean bajo perfil de impacto ambiental. El presente epígrafe expone las nociones fundamentales relacionadas con el hormigón como el material de construcción más utilizado por la humanidad, estableciendo la relevancia del cemento en la transformación “más verde” del hormigón actual y futuro. En este contexto, el cemento de bajo carbono (LC3) alcanza trascendencia crucial. En epígrafes subsiguientes se describen las características esenciales de este nuevo material de construcción.

1.4.1. El hormigón como material de construcción por excelencia: el cemento como componente activo del sistema

El hormigón o concreto es un material compuesto, empleado en la construcción, formado esencialmente por un aglomerante al que se añade: partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos químicos específicos. El aglomerante es, en la mayoría de las ocasiones, cemento mezclado con una proporción adecuada de agua para que se produzca una reacción de hidratación. Las partículas de agregados, dependiendo fundamentalmente de su diámetro medio, son los áridos que se clasifican en normales, ligeros y pesados de acuerdo a la NC-120 2007.

El concreto es un material esencial para la construcción de infraestructuras que la sociedad utiliza alrededor del mundo. Es el segundo material más producido y consumido por la sociedad en todo el planeta, antecedido solo por el agua. El cemento es el “pegamento” esencial en el hormigón y como tal es usado en grandes volúmenes.

El hormigón no es tan fuerte ni tan resistente como el acero ya que no tiene buen comportamiento frente a tipos de esfuerzos como tracción, flexión, cortante, por lo que es habitual usarlo a ciertas armaduras de acero, recibiendo la denominación de hormigón armado. Aun así presenta otra serie de características que lo hacen ser el material más adecuado para satisfacer la creciente demanda constructiva asociada al desarrollo de los países. En primer lugar, presenta una excelente resistencia al agua, lo que hace de él un elemento ideal para aplicaciones que tengan que estar en contacto con agua. En segundo lugar, es un material que permite fabricar elementos estructurales con multitud de formas y tamaños, dada la consistencia plástica del hormigón fresco.

El cemento Portland (CPO) es el principal componente en la producción de concreto, pero durante su proceso de producción se daña considerablemente el medio ambiente, siendo el responsable de un alto consumo energético y de grandes volúmenes de CO₂ emitidos a la atmósfera influyendo negativamente en sus costos.

El cemento es un material pulverulento muy fino, que por sí mismo no presenta propiedades aglomerantes. Se trata de un aglomerante hidráulico, que desarrolla la resistencia y las propiedades aglomerantes al mezclarlo con agua, por medio de reacciones exotérmicas. Proviene de la molienda del clínquer de cemento y de un regulador de fraguado que habitualmente es yeso. El clínquer de cemento proviene de la cocción hasta sinterización de una mezcla de caliza y arcilla en las propiedades adecuadas (Segura et al., 2008).

La responsabilidad de la industria del cemento, hormigón y sistemas constructivos en la carga ambiental emitida al planeta: aproximadamente el 10 % del total de emisiones de CO₂ corresponden al sector, y un 5 % de la energía total consumida en el planeta.

La producción del hormigón es altamente nociva debido a la carga contaminante que emite, contribuyendo con un 5% a las emisiones globales de CO₂, producidas principalmente en la combustión necesaria para alcanzar el calor requerido en la zona de clinquerización y en la descomposición de la caliza para formar el clínquer.

En la elaboración del cemento Portland, la producción de clínquer representa el mayor consumo de energía y es responsable también de los mayores volúmenes de emisiones de CO₂, ya que más del 50% del CO₂ liberado se debe a la descomposición de la caliza durante el proceso de fabricación del clínquer (Alujas et al., 2015b). Se estima que por cada tonelada de cemento producida se emiten entre 0.65–0.90 toneladas de CO₂ (Habert et al., 2010) lo cual, llevado a los datos de producción anual, sitúan a la industria del cemento como responsable de la emisión de entre 5–8% del CO₂ a escala global (IPCC, 2014).

En el 2012 la producción global de cemento alcanzó los 3,6 billones de toneladas, lo que se traduce en un incremento del 3% en comparación al año anterior (CEMBUREAU, 2015). El incremento de la demanda de los últimos años tiene su fundamento en el desarrollo y crecimiento de las llamadas “economías emergentes” que necesitan construir la infraestructura de base para la industrialización y urbanización en sus países.

Solamente en 2010, países de Suramérica, África y Asia generaron el 85% de la producción anual de cemento (CEMBUREAU, 2011).

Según el WBCSD para el 2050 habrá un incremento de la producción que alcanzará los 4 400 millones de toneladas de cemento y otros pronósticos sitúan la demanda por encima de los 5 000 millones. Este incremento elevará a su vez los niveles de emisiones de CO₂, si se mantienen las condiciones de producción actuales (Vizcaíno et al., 2015b).

Debido a las presiones internacionales de la reducción de emisiones, así como el alto precio del cemento y otros materiales que de él se derivan, lograr la sostenibilidad de la industria cementera constituye un desafío de los tiempos actuales. Algunos caminos han apuntado hacia el incremento de los niveles de eficiencia energética del proceso de producción; otros, hacia la reducción del factor de clínquer del cemento. Para países como Cuba, cuyas posibilidades de optimización energética son tecnológicamente muy débiles, el uso de materiales cementicios suplementarios (MCS) ha constituido una vía alternativa para desarrollar cementos de nuevo tipo.

El uso de MCS constituye una práctica extendida a nivel mundial en la producción cementera. La mayor parte de los MCS empleados lo constituyen subproductos del sector industrial como las cenizas volantes (subproducto de la quema del carbón en las plantas de generación eléctrica), las escorias de altos hornos (subproducto de la industria siderúrgica), y el humo de sílice (subproducto de la producción de silicio⁴). Sin embargo, se conoce que las reservas de estos materiales son insuficientes para suplir a largo plazo su creciente demanda, además de que el acceso a estas fuentes está limitado por factores económicos y regionales. Mientras tanto, otras abundantes reservas de materiales puzolánicos permanecen sin explotación, como las puzolanas naturales, la ceniza de la cáscara de arroz y las arcillas activadas térmicamente (Martirena, 2003, Alujas, 2010), citados por (Machado, 2016).

La utilización de metacaolín como aditivo en la producción de cementos constituye una de las medidas de sustentabilidad económica y ambiental de la industria cementera, es uno de los MCS más estudiados por las ventajas en el ahorro de recursos energéticos y la disminución de las emisiones de CO₂ que provoca su utilización como sustituto de una porción de clínquer (Alujas et al., 2015a). El metacaolín es el resultado productivo de calcinar la arcilla caolinítica a una temperatura entre 650-800°C. La arcilla caolinítica,

⁴ Es un elemento químico metaloide. Es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre (27,7% en peso) después del oxígeno.

comúnmente llamada caolín, es el MCS del cual existe abundante reserva en Cuba, a diferencia de otros MCS que no se obtienen en el país debido a que la matriz productiva nacional no posee aquellas producciones que son generadoras de los subproductos potencialmente MCS.

1.4.2. El cemento de bajo carbono (LC3): innovación tecnológica por la sostenibilidad de la industria constructiva

El Cemento de Bajo Carbono es una formulación novedosa de cemento desarrollada por un equipo técnico del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructura y Materiales de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (CIDEM) y del Instituto Federal de Tecnología de Lausana, Suiza (EPFL), que permite sustituir una buena parte del clínquer— el componente más costoso del cemento— por una combinación de arcilla calcinada (metacaolín) y carbonato de calcio en forma de piedra caliza.

La fórmula de cemento desarrollada permite triplicar los niveles actuales de sustitución de clínquer que logra la industria de cemento en Cuba (alrededor del 15-18% en el cemento PP-25), para producir un cemento de similar resistencia mecánica, y una resistencia muy superior a la penetración de agentes como los cloruros, que pueden producir daños en la matriz de hormigón (Perez et al., 2015).

El LC3 es un tipo de cemento mezclado formado por un 50% de clínquer, 30% de metacaolín, 15% de caliza y 5% de yeso. Dicha formulación ha sido utilizada en la primera prueba piloto del cemento LC3, realizada a escala de prueba industrial en la fábrica de cemento Siguaney, Sancti-Spíritus, en el año 2013. Nuevas formulaciones— con incluso menor factor de clínquer—han sido utilizadas para diferentes estudios técnicos en torno a las propiedades físico-mecánicas de los materiales elaborados a partir del LC3, es decir, su resistencia a la compresión, durabilidad, consistencia, entre otras características. La figura 1.3 muestra la composición de los cementos que se producen históricamente en Cuba (P-35 y PP-25), así como el LC3.

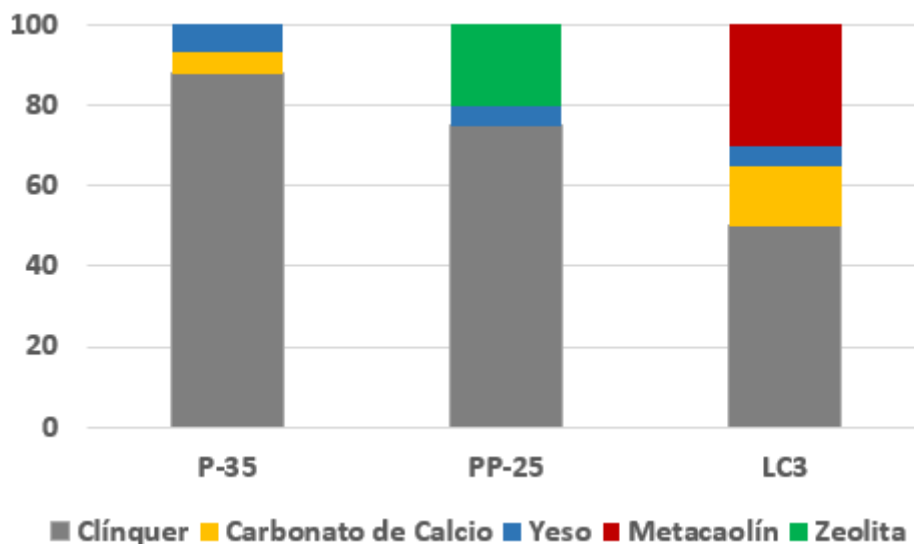


Figura 1.3. Composición de los cementos tradicionales del país
Fuente: Elaboración propia basado en los trabajos de LC3 referenciados en esta tesis

El LC3 permite a la industria hacer un mejor uso de sus capacidades actuales de producción y, con ello, abastecer de mejor manera la creciente demanda de cemento, el cual cumple con los requerimientos de comportamiento mecánico y durabilidad exigidos por las normas cubanas.

Las propiedades del cemento LC3 han sido ampliamente estudiadas por los ingenieros civiles y otros especialistas que forman parte del proyecto del mismo nombre, demostrándose la superioridad en resistencia a la compresión y en durabilidad con respecto al cemento P-35. Para profundizar en la comprensión de los aspectos técnicos de dicha tecnología, pueden consultarse los siguientes trabajos (Vizcaíno et al., 2015a),(Martirena y Scrivener 2015),(Díaz et al., 2015). En estos estudios se exponen ensayos de laboratorio aplicados al LC3 basado en el cemento producido en la prueba industrial del año 2013, utilizándose una amplia gama de materiales de construcción que fueron fabricados para desarrollar los estudios técnicos; entre ellos, bloques, baldosas, elementos de prefabricado, cilindros de hormigón fundidos para ensayos de laboratorio, entre otros.

En términos económicos, se ha demostrado que podrían obtenerse ahorros en costos produciendo LC3, en un 15-18% con relación a los cementos tradicionales. También ha sido comprobada la efectividad medioambiental de la nueva tecnología cementicia, mediante diferentes estudios de caso utilizando la metodología Análisis de Ciclo de Vida. Las potenciales reducciones de dióxido de carbono, principal responsable del calentamiento global y el cambio climático, se documentan en el orden del 30-34% con respecto a los cementos tradicionales que actualmente se producen en el país. Estos

análisis apuntan a que el cemento LC3 posee potencialidades para ser considerado en los esquemas internacionales de créditos de carbono, lo cual representaría beneficios financieros adicionales para el país. La industria del cemento a nivel mundial ha intentado reducir el factor de clínquer del cemento por disímiles vías alternativas, sin embargo, nunca antes consiguiendo una reducción tan drástica como lo consigue el cemento LC3, de ahí sus ventajas para competir con productos cementeros de alta tecnología. Para un estudio más exhaustivo de las bondades económicas y ecológicas del LC3, consúltense los trabajos siguientes (Cancio et al., 2014),(Sánchez et al., 2015),(Sánchez et al., 2016b),(Sánchez et al., 2016a),(Cancio et al., 2016a),(Cancio et al., 2016b).

1.5. Análisis del ciclo de vida como metodología de impactos ambientales

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) constituye una herramienta importante para la evaluación de impactos ambientales, ya que se encarga de examinar y analizar los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de una actividad.

Se presenta como una metodología sistémica que permite cuantificar dichos impactos ambientales de sistemas, procesos, servicios y productos mediante la elaboración de inventarios de los insumos materiales y energéticos, así como las emisiones y residuos involucrados en todas las etapas del ciclo de vida con miras al alcance de objetivos planteados para el desarrollo sustentable bajo criterios de eficiencia ambiental y tecnológica.

Vale la pena mencionar que el análisis del ciclo de vida según Naredo, (2001), es una herramienta que puede enfocarse desde la economía ecológica, ya que permite cerrar y analizar el ciclo completo de la utilización de materiales y recursos en la fabricación de un producto, lo cual le imprime una visión sistémica al enfoque. Sin embargo, no es suficiente para revisar de manera amplia el deterioro que ocasiona ese producto, que desde el sistema económico impacta sobre el patrimonio natural. Lograr un sistema que lo permita sería posible solo a través de la concertación de grupos de trabajo con convenciones, metodologías, nuevos sistemas contables y acuerdos internacionales, además de una voluntad política firme que amplíe los criterios económicos actuales y que finalmente nos llevaría a conocer el deterioro ecológico real más allá del análisis económico estándar.

El ACV constituye una herramienta reconocida y aceptada que tiene por objeto analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica el impacto ambiental ocasionado por los productos desde su origen, como la extracción de las materias primas necesarias para su fabricación, hasta que dichos productos se consumen y se convierten en residuos, pasando por el procesado del producto. Es por tanto una herramienta de gestión que sirve para evaluar el comportamiento ambiental de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida (Fenollosa et al., 2009).

Las categorías de impacto usualmente consideradas en un ACV son: efecto invernadero, disminución del ozono estratosférico, lluvia ácida, eutrofización, toxicidad y agotamiento de recursos no renovables. El resultado para cada categoría de impacto se determina multiplicando los recursos agregados utilizados y las emisiones agregadas de cada sustancia por un factor de caracterización para cada categoría de impacto a la que potencialmente puede contribuir. Estos factores de caracterización son específicos de cada sustancia y cuantifican la presión ambiental adicional por unidad de emisión de cada sustancia (Basset-Mens y van der Werf, 2005).

La integración de aspectos económicos y ambientales ha sido muy poco estudiada en la metodología ACV, lo cual presenta el problema de la agregación de los impactos ambientales. Este modelo se aplica para evaluar diferentes modos de elaborar un producto en cuanto a sus impactos ambientales y sus resultados se expresan en función de la unidad funcional (Fenollosa et al., 2009).

El Análisis del Ciclo de Vida se define como la herramienta adecuada para la recopilación y valoración de las entradas (materia y energía), salidas (productos, emisiones y residuos) e impactos potenciales de un sistema de producción o servicio a lo largo de su ciclo de vida. Conceptualmente este método se mantiene en natural y constante desarrollo, pues a medida que son divulgados nuevos trabajos prácticos con su aplicación se intercambian informaciones entre usuarios de esta metodología. Todo ello implica un constante proceso de retroalimentación evaluativa en el método, como ha ocurrido anteriormente con otras metodologías de gestión (ISO14040, 1997).

En medio de los modelos actuales de producción y consumo, es claro que el camino hacia la sostenibilidad y el desarrollo sostenible incluye la integración de manera constructiva de factores sociales, políticos, culturales, ecológicos y económicos. Todos los seres humanos se encuentran inmersos en un sistema con múltiples subsistemas, la sostenibilidad a la cual se hará referencia es la que visualiza ese sistema como un todo,

es la sostenibilidad que Gallopin (2003) denomina socio-ecológica, aquella donde se integra el subsistema humano con el subsistema biofísico. A través del desarrollo sostenible y esta visión sistémica, se construye una propuesta de herramientas que complementan la metodología del ACV, desarrolladas a partir de indicadores de desarrollo sostenible, para llegar a una metodología que realmente evalúe la sostenibilidad de un sistema productivo.

El ACV tiene como objetivos:

- I. Identificar oportunidades de mejoras en los aspectos ambientales de los productos en diversos puntos de su ciclo de vida.
- II. Tomar decisiones en organizaciones industriales.
- III. Seleccionar indicadores de desempeño ambiental, incluyendo técnicas de medición.
- IV. Implementar técnicas de mercadeo como eco-etiquetado o declaración de producción limpia.

La norma ISO 14040 reconoce las debilidades y limitaciones del ACV y plantea que no es la más indicada para ser aplicada en todas las situaciones debido a que no considera aspectos sociales y económicos, falencia que se busca reducir con las herramientas propuestas en este trabajo ya que pese a estas debilidades, el ACV es una de las técnicas más difundidas y utilizadas para evaluar los impactos ambientales de los productos y aunque es utilizado para tener una visión general del sistema, es necesario fortalecer sus debilidades e introducir los factores de los que adolece, para que sea realmente eficaz en el momento de evaluar un sistema productivo y permita llevar la industria hacia el desarrollo sostenible (Sanes,2011).

Etapas del ACV según la normalización de la ISO 14040

A continuación, se describen, las cuatro etapas del ACV que se encuentran estandarizadas en la norma ISO 14040 (véase figura 1.4).

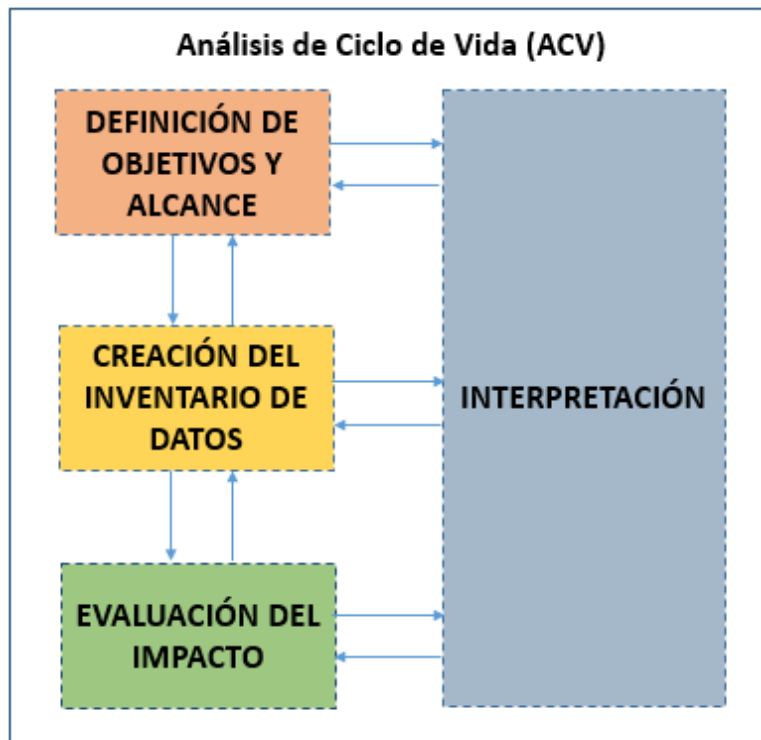


Figura 1.4. Marco general de análisis de la metodología ACV
Fuente: Elaboración propia a partir de la norma ISO 14040

1. Definición del objetivo y el alcance

En esta fase del ACV se realizan especificaciones orientadoras sobre los aspectos perseguidos con el estudio medioambiental, es decir, se formulan los objetivos del ACV, en el que quedará explícito el objeto de estudio práctico sobre el cual recaen las acciones de evaluación ambiental. Es usual que también se declare a quién va dirigido el estudio. Se especifican las funciones del sistema de producción, la unidad funcional, el sistema que va a estudiar, los límites del sistema, los requisitos de los datos, los supuestos y las limitaciones.

2. Análisis de inventario

Este es un análisis para cuantificar las entradas y salidas de un sistema productivo, para cada proceso unitario que se incluya en los límites del sistema se deben reunir datos cuantitativos y cualitativos, la recolección de estos datos y los procedimientos de cálculo variarán de acuerdo al alcance. Esta fase es en extremo importante, puesto que las cantidades especificadas de cada material y energía utilizado en el proceso o producto en cuestión, influenciarán en gran medida los resultados finales del impacto ambiental. Cada fase del ciclo de vida debe ser analizada de forma minuciosa, de manera tal que ningún proceso unitario quede excluido del inventario de datos. A menudo se recurre a

diagramas de flujo donde se describe todo el proceso productivo (o secuencia de procesos), de manera tal que se visualicen todas las entradas y salidas del sistema.

3. Evaluación de impacto

En esta fase se determinan los impactos ambientales potenciales para la unidad funcional analizada, a partir de los datos de entrada que se establecieron en la fase anterior mediante procedimientos de asignación. Existe una gran gama de métodos de evaluación de impacto ambiental que se encuentran documentados en la literatura sobre ACV, cada uno con sus fortalezas y debilidades, sin embargo, no existe consenso en que alguno fuera superior en todos los aspectos. Entre los métodos más utilizados en trabajos aplicados sobre ACV se pueden mencionar: Eco-indicador99, IMPACT 2002+, ReCiPe y el método del IPCC.

Los materiales y energía se traducen en sustancias que son asignadas a las diferentes categorías de impacto ambiental (caracterización), las cuales más tarde se agregan a diferentes categorías de daño (cambio climático, salud humana, ecosistemas). El proceso de evaluación concluye cuando estas macro-dimensiones se agregan por medio de un proceso de normalización, puesto que cada dimensión por lo regular se expresa en diferentes unidades de medida. Por lo general dichos procesos de cálculo interno no son de interés para los investigadores que son usuarios del ACV, debido a que los softwares profesionales que soportan esta metodología realizan dichos procedimientos de manera automática. Los softwares de mayor reconocimiento y difusión en artículos científicos son SimaPro y OpenLCA.

4. Interpretación de resultados

En esta fase se realizan juicios valorativos sobre la base de los impactos ambientales determinados en la fase anterior. Generalmente se utilizan patrones de comparación con base en unidades funcionales análogas, de manera que la interpretación realizada cobra sentido. Se suele utilizar estudios regionales para comparar los resultados, debido a que en ocasiones ciertos procesos productivos difieren sustancialmente de un contexto a otro.

La metodología ACV descrita en ISO 14040 y 14044 posee una gran flexibilidad, lo cual constituye una de sus grandes ventajas. El investigador puede adaptar los procesos preestablecidos en los softwares de ACV para contextualizarlos a su estudio particular.

El ACV es prácticamente aplicable a cualquier proceso productivo, producto a servicio con naturalezas muy diferentes.

Vale la pena resaltar que el ACV es una metodología reconocida, incluso por las normas ISO 14040, como un método en etapa temprana de desarrollo y algunas fases, como en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), están aún en sus comienzos, de ahí que el ACV posea oportunidades para ser modificado y mejorado con el fin de utilizarse como metodología para evaluar la sostenibilidad de procesos productivos.

Los parámetros generales de la metodología del ACV a través de sus cuatro etapas antes mencionadas, y las herramientas que actualmente se utilizan en las etapas de evaluación, solo permiten la evaluación de los impactos ambientales que un producto o sistema productivo genera al medio biofísico, y es precisamente en este punto sobre el cual gira la discusión, porque como herramienta, dentro de la estrategia de la producción limpia y consumo sostenible, no corresponde totalmente con los criterios que se promueven para la sostenibilidad de los sistemas industriales, ya que la sostenibilidad es la interacción constante de factores políticos, económicos, culturales, sociales y ecológicos, denominada ya con anterioridad como sostenibilidad socio-ecológica.

1.6. Conclusiones parciales del capítulo

2. La eco-eficiencia es una categoría económica que emerge de la necesidad teórico-práctica de la ciencia de operacionalizar las dimensiones del desarrollo sostenible.
3. La eco-eficiencia debe ser entendida como el proceso de mejora continua que logre producir bienes y servicios de mayor valor económico al mismo tiempo que reduzca el impacto medioambiental.
4. Aunque no existe consenso sobre cuál método de medición de eco-eficiencia resulta más conveniente y consistente conceptualmente, se pueden destacar entre los más difundidos, los siguientes: (i) construcción de ratios, (ii) portafolio de eco-eficiencia y (iii) Análisis Envoltante de Datos.
5. Frente a las alternativas tecnológicas existentes para reducir el contenido de clínker del cemento por la vía de los materiales cementicios suplementarios, el cemento LC3 con base en metacaolín constituye un producto innovador de grandes superioridades técnico-productivas, económicas y ambientales.

6. El Análisis de Ciclo de Vida proporciona una plataforma conceptual de gran aplicabilidad a los materiales de construcción para la evaluación de los impactos ambientales derivados de sus procesos de fabricación.

CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO APLICADO Y DE LAS EMPRESAS CONSTRUCTORAS QUE CONSTITUYEN OBJETOS DE ESTUDIO PRÁCTICO ESPECÍFICO

El presente capítulo está dedicado a exponer el cuerpo metodológico empleado para la obtención de los resultados investigativos de la tesis. En un primer apartado se expone el procedimiento diseñado por Cancio (2016), para evaluar la eco-eficiencia de sistemas constructivos, el cual es aplicado en la investigación y cuyos resultados se exponen en el capítulo tercero. Con posterioridad se describen tanto las tecnologías constructivas analizadas como las empresas constructoras involucradas como objeto de estudio práctico específico.

2.1. Procedimiento para la evaluación de eco-eficiencia en sistemas constructivos

El procedimiento descrito en la Figura 1 tiene como referente inmediato una primera versión del mismo, desarrollado por el propio autor en 2014. A su vez, el mismo adopta como principios centrales las ideas conceptuales expuestas en la norma ISO 14045 (2012), la cual constituye el primer documento que propone la estandarización de la instrumentación de la eco-eficiencia.

El procedimiento consta de 7 fases, las cuales se reflejan en la figura 1 y se explican a continuación en este epígrafe.

La Norma ISO 14045: "Gestión medioambiental. Evaluación de eco-eficiencia de un sistema productivo. Principios, requerimientos y directrices", ha servido de plataforma metodológica para diversas aplicaciones, sin embargo, tiene un carácter general, esto es, puede ser aplicada a cualquier producto o servicio y a cualquier sector productivo de bienes y/o servicios. Ello origina la necesidad de desarrollar instrumentos más contextualizados tanto a sistemas productivos enmarcados en sectores económicos específicos, como a espacios geográficos determinados. Hoy en día la eco-eficiencia se instrumenta en cientos de empresas y países, sin embargo, las condiciones propias del sistema socioeconómico cubano determinan nuevos requerimientos para la evaluación de eco-eficiencia, de manera que se puedan ofrecer coherentes y utilitarias interpretaciones.

Objetivo del procedimiento: Diseñar un instrumento metodológico para realizar evaluaciones de eco-eficiencia en edificaciones cubanas.

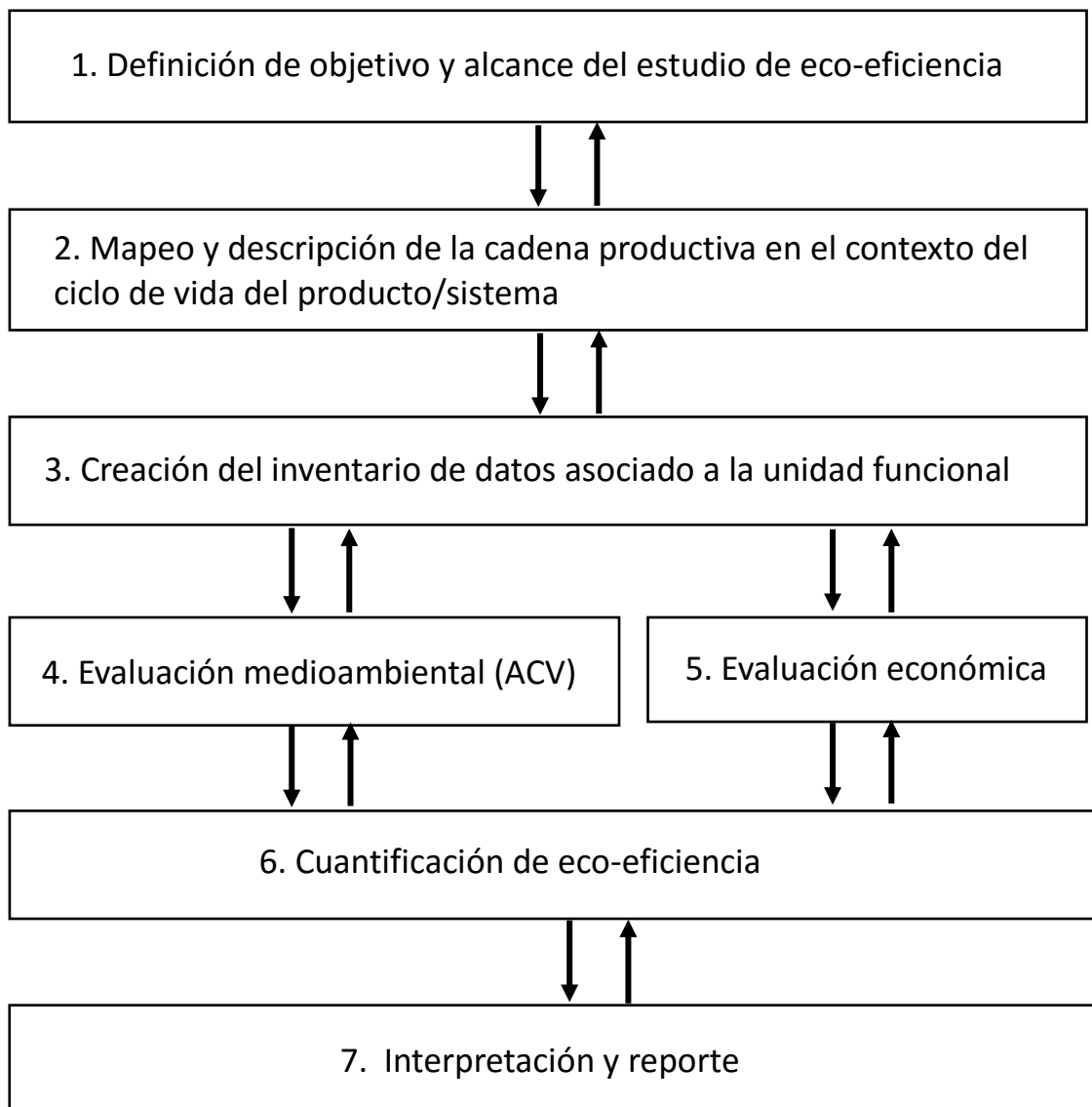


Figura 2.1. Procedimiento de eco-eficiencia en sistemas constructivos. Fuente: Cancio (2016)

Fase 1. Definición de objetivo y alcance del estudio de eco-eficiencia

La fase 1 establece los límites de sistema con que se operará en el estudio de eco-eficiencia, declarando la(s) unidad(es) de análisis y el alcance.

En esta etapa se declara la obra objeto de estudio práctico, tipificando si es un edificio multifamiliar, apartamento, vivienda independiente. Se enuncian todos los aspectos identificativos de la obra, su clasificación como sistema constructivo, tecnología constructiva empleada y las características esenciales que lo distinguen de otros sistemas.

En un segundo momento se define el alcance del estudio o límites del sistema (sistema estructural, función y unidad funcional). En esta etapa debe quedar declarado el ámbito del estudio de eco-eficiencia. Como se trata de obras constructivas, el límite del sistema a analizar dependerá del sistema estructural que comprenderá el estudio. Se puede alcanzar, en el más abarcador escenario, una edificación en su totalidad, o en su defecto, dependiendo de las condiciones concretas, se podría analizar un sistema estructural compuesto por paneles y losas, una unidad habitacional, un metro cuadrado de muro, un metro cuadrado de superficie de suelo, entre otras especificaciones posibles.

Esta etapa es crucial porque de ella dependerá la definición de aquellos datos de entrada requeridos para el cálculo de los indicadores de eco-eficiencia. La función dependerá del desempeño para el cual se produce el resultado. En soluciones constructivas ello equivale, por ejemplo, a prestaciones como la resistencia mecánica del hormigón, la durabilidad de la estructura, siendo estas dos las propiedades más focalizadas por los ingenieros y otros especialistas que analizan los sistemas constructivos. Cuando se analizan viviendas, edificios, es común que se utilice como unidad funcional el metro cuadrado de superficie habitable, pues en definitiva se construye para ser habitada por personas.

Fase II: Mapeo y descripción de la cadena productiva en el contexto del ciclo de vida del producto/sistema

Esta fase posee relevancia en la evaluación perseguida, puesto que es justamente en la cadena productiva donde se producen los flujos de materiales, energía y valor, los cuales resultan esenciales en el balance del flujo de materiales requerido en función de la determinación de emisiones ambientales y del valor agregado o costo que se produce en el entramado de la red física del sistema productivo.

Existe una relación entre los conceptos cadena productiva y ciclo de vida de un producto. En ocasiones se pretende analizar las prestaciones económicas y ambientales de un sistema constructivo más allá de la fase material, es decir, la vida de un edificio no termina cuando el mismo es demolido, pues el manejo de los residuos de construcción y demolición forman parte del ciclo de vida de los materiales empleados en la obra, muchos de los cuales pueden ser reciclados o reusados. Es por ello que en esta fase se debe especificar el fin último del estudio, el cual quedará reflejado en la cadena productiva. Algunos autores llaman al ciclo de vida que comprende el reciclado, cadena de producción extendida.

En esta fase se deben identificar todos los entes vinculantes de la cadena y su rol en el proceso de agregación de valor, declarando todas las entidades económicas que se involucran en la cadena de suministro, desde los proveedores de materias primas hasta la empresa constructora, pasando por la intermediación y las actividades de apoyo a la cadena central. Generalmente un gran número de actores se vinculan en el proceso constructivo de una edificación, con independencia de su tipología, debido a la propia naturaleza y complejidad del producto final y al sector productivo en el cual se circunscribe. Del correcto levantamiento realizado en esta etapa, dependerá en gran medida la calidad de las etapas subsiguientes.

Una vez identificados los eslabones de la cadena, se debe realizar mapeo de la misma por medio de un diagrama que permita el entendimiento de los procesos que ocurren al interior de la misma, esto es, el mecanismo de funcionamiento. El diagrama posibilita visualizar los vínculos entre los entes económico-productivos. De las precisiones acerca de los orígenes y destinos de los materiales y sus procesos transformativos dependerá en gran medida la correcta asignación de los flujos de entrada y salida durante todo el recorrido del sistema-producto.

Se recomienda utilizar una iconografía en el diagrama de forma tal que se distingan con facilidad los nodos donde ocurren los procesos transformativos, esto es, las materias primas se transforman en productos intermedios a lo largo de la red física de la cadena hasta la conformación definitiva del producto final. Clasifican en esta categoría, por ejemplo, las plantas de prefabricado de hormigón y las plantas productoras de hormigón de premezclado. Sin embargo, se puede ser tan preciso en el mapeo de la cadena como el alcance que se pretenda lograr.

Una obra utiliza el árido como materia prima o insumo productivo, que dependiendo del análisis concreto puede ser tomado como una simple entrada del proceso, sin embargo, en rigor, los áridos artificiales requieren de un proceso transformativo para convertirse en los materiales que posteriormente son utilizados en las soluciones constructivas. Similar punto de vista se aplica al bloque hueco de hormigón así como a otros muchos elementos que bien pueden ser considerados como una simple entrada, o mejor podrían ser analizados en toda su trayectoria. Es importante apuntar que la trazabilidad del producto de la construcción es el principio más riguroso que podría coadyuvar a los más precisos cálculos de emisiones ambientales y de valor agregado, toda vez que el proceso se origina en las canteras o yacimientos de los materiales primarios.

Fase 3: Creación del inventario de datos asociado a la unidad funcional

En esta fase se realiza el relevamiento de toda la información generadora de datos para la cuantificación de la eco-eficiencia. De una parte, las magnitudes asociadas a la caracterización/evaluación medioambiental, y de otra, las variables que caracterizan el desempeño económico. Este proceso transcurre a lo largo de toda la cadena productiva. Esta es la fase que determina los inputs necesarios para las fases 4 y 5.

Las cantidades físicas de materiales utilizados en la unidad funcional antes definida, la energía eléctrica, el combustible, así como las especificaciones relativas a la transportación de los materiales, son aspectos esenciales a identificar en esta fase. El concepto de dosificación (sea gravimétrica o volumétrica) desempeña un rol importante en los consumos físicos de materiales. Las dosificaciones no son estáticas. Aunque muchas vienen especificadas en normas o estándares nacionales, ellas varían con relación a los diseños estructurales, arquitectónicos, a la tecnología de construcción empleada, a la tipología de las viviendas, a la calidad de las materias primas utilizadas, entre otros factores. Es por ello que la dosificación es un aspecto crucial en esta fase. Las memorias descriptivas de los proyectos, los planos ingenieriles y otros materiales factuales asociados a las obras constructivas, resultan fuentes de datos, pero siempre es aconsejable la consulta a ingenieros y arquitectos, constructores a pie de obra, transportistas y todos los agentes que pueden dar soporte al levantamiento de datos.

En el inventario de datos de entrada, la energía consumida constituye un aspecto de gran relevancia, puesto que es un recurso no renovable por lo general, con un impacto ambiental considerable y un costo elevado. En ocasiones resulta una tarea no sencilla, puesto que las unidades productoras muchas veces cuantifican la energía como totalidad en el proceso productivo, y no logran identificar dentro del surtido de producción la parte que corresponde a cada producto. De ahí que el papel de investigador radica en desarrollar métodos de prorrateo para poder identificar el consumo de energía con los productos y unidades funcionales que se están considerando.

La recepción de información relativa al consumo de combustible durante la transportación de materiales es un proceso análogo al que ocurre con la energía en los procesos transformativos. Los medios de transporte poseen una capacidad de carga, y una eficiencia de tráfico que varía en dependencia de varios factores. Este dato puede ser diferente en todos los entes de la cadena de suministro, por lo que la gestión de información debe ser más minuciosa aun que en las dosificaciones. La transportación desempeña un importante

rol en la industria constructiva, debido al volumen de materiales que frecuentemente se requiere trasladar en cualquier proceso constructivo. Al resultar ser materiales pesados, el consumo de combustible es generalmente alto. Las distancias entre las canteras, los productos intermedios y la obra constructiva, son determinantes en la gestión de la productividad de los recursos empleados.

Fase 4. Evaluación medioambiental asociada a la unidad funcional

La fase 4 y 5 se pueden desarrollar en paralelo, porque no son dependientes en datos de entrada y salida.

La fase 4 se destina a realizar la evaluación medioambiental asociado a la unidad funcional que se analiza. Esta evaluación constituye insumo esencial para la fase 6. La metodología internacionalmente aceptada para evaluaciones medioambientales se conoce con el nombre de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El ACV queda definido en la norma ISO 14040 (1997), y el proceso analítico para su instrumentación se estandariza en la norma 14044. Debido a que esta metodología posee un cuerpo conceptual riguroso, sus fundamentos se explican en un epígrafe independiente en esta misma tesis.

Al finalizar esta etapa se deben tener criterios sintetizadores del impacto ambiental asociado al sistema, producto o unidad funcional que se analice. Este criterio constituye input para la cuantificación de eco-eficiencia, ya que esta depende de la eficiencia ecológica y económica, simultáneamente. Cuando el propósito es comparar sistemas constructivos, materiales alternativos, diseños arquitectónicos, se debe garantizar que los supuestos de partida en el análisis sean comunes para todos los sistemas sometidos a comparación.

Fase 5. Evaluación económica asociada a la unidad funcional

En esta fase se determinan los criterios económicos que caracterizan a los productos, sistemas o unidades funcionales que se someten a evaluación. Esta fase, conjuntamente con la anterior, proporciona los insumos esenciales de la cuantificación de eco-eficiencia. La eficiencia económico-ecológica viene determinada por la productividad de los recursos empleados. El proceso de creación de valor es fundamental en este sistema. Para determinar la 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, debido a que constituye la medida económico-productiva que más armoniza conceptualmente con el mecanismo de creación de valor al interior de una cadena de suministro.

El valor agregado es un concepto que ha sido presentado de manera polivalente en la literatura económica. A los efectos de la presente investigación, se asume por valor agregado el valor que se incorpora a un producto por medio de un proceso transformativo, lo cual es, en rigor, el valor que se crea en cada punto de la cadena. 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.

El consumo intermedio es frecuentemente la suma del gasto material y otros gastos monetarios asociados al producto. En las empresas cubanas se establece un concepto adicional en el cálculo del consumo intermedio, conocido como financiamiento entregado a la OSDE, y se refrenda en el Estado de Valor Agregado que rinde la contabilidad empresarial.

Este procedimiento propone calcular el valor agregado neto para los análisis de eco-eficiencia, ya que este posibilita una interpretación más rigurosa del verdadero valor creado en cada punto de la cadena de suministro.

Nuevamente las disquisiciones conceptuales en la clasificación de los costos resultan esencial en el análisis económico. El consumo intermedio debe ser identificado para cada unidad funcional de que se trate, y esta unidad funcional es la agregación de componentes sucesivos a través de un proceso en cadena. Muchas veces no resulta evidente en las unidades productivas la contabilidad de los costos y su clasificación de acuerdo a las normas estandarizadas, de ahí que muchas veces se debe realizar un proceso de identificación con base en métodos tradicionales de asignación de costos.

El consumo intermedio viene determinado por un sistema de precios, de ahí la importancia de aplicar un sistema de precios homogéneo en toda la cadena.

Fase 6. Cuantificación de eco-eficiencia

En esta fase se produce la cuantificación de eco-eficiencia para la unidad funcional analizada, distinguiendo entre los sistemas que se desean comparar, a partir de las evaluaciones ecológica y económica realizadas en las fases 4 y 5.

La eficiencia económico-ecológica se determina por medio de un indicador, un ratio, o un sistema de indicadores. La literatura de eco-eficiencia propone indicadores generales y específicos, dependiendo del sector productivo y las particularidades de cada estudio.

Debido a que la categoría más importante dentro del impacto ambiental lo constituye la emisión de dióxido de carbono, por el potencial de calentamiento global que este determina, se propone emplear este resultado como medida sintetizadora del impacto ambiental, el cual se obtiene de la fase 4. De la fase 5 se obtiene el valor agregado neto, y se propone combinar ambos resultados en un ratio de eco-eficiencia dado por el cociente valor agregado neto/impacto ambiental agregado. Este último es medido a través de las emisiones de CO₂ que se incorporan cada vez que se va agregando valor económico al producto final de la cadena.

El mecanismo de cálculo de eco-eficiencia posibilita identificar los nodos de mayor y menor contribución a la productividad de los recursos empleados.

Se pueden calcular indicadores complementarios que ayudan a comprender mejor el uso de recursos no renovables, como por ejemplo, gran parte de la energía total que se consume. En este caso, el ratio energía consumida/valor agregado ofrece un criterio de eficiencia en el uso energético. Un segundo ejemplo ilustrativo lo constituye el agua, que aunque es un recurso renovable, se encuentra en el centro de atención de los procesos de gestión, puesto que en los últimos años el cambio climático ha producido escasez de agua potable en numerosas regiones del planeta. De ahí que numerosos estudios de eco-eficiencia hoy en día incorporan el consumo de agua por valor generado.

Estos indicadores no son exhaustivos. Se pueden elaborar propuestas adicionales en dependencia de las características de cada estudio de caso.

En esta fase corresponde realizar análisis de sensibilidad, para evaluar la robustez de los resultados obtenidos cuando cambian los supuestos de partida, es decir, cuando se producen cambios en las variables de entrada.

Fase 7. Interpretación y reporte

Todos los indicadores calculados en la fase 6 se someten a interpretación en esta fase. La interpretación es el proceso de identificar conclusiones relevantes, regularidades, causalidades, a partir de los ratios de eco-eficiencia. Esta fase responde a las preguntas: ¿Qué material es más eco-eficiente? ¿Qué procesos resultan críticos en la maximización

de la productividad de los recursos empleados? ¿Qué variables afectan más la eco-eficiencia? ¿Qué tecnología de construcción resulta más apropiada? ¿Qué tipología de vivienda o diseño estructural es más idóneo en términos de eco-eficiencia?

En dependencia de los usuarios finales del estudio, esta fase debe concluir con un resumen abreviado del perfil de eco-eficiencia del producto, proceso o sistema sometido a evaluación, de manera que pueda ser comprendido en síntesis sin necesidad de profundizar en todo el mecanismo de cálculo y todos los supuestos del estudio.

Como lo indican las saetas bidireccionales entre las fases del procedimiento, el mismo posee un carácter iterativo, es decir, se producen intercambios entre las fases, de manera que siempre es posible regresar para perfeccionar los resultados de las fases subsiguientes. En numerosas ocasiones el investigador se ve obligado a regresar, inclusive a la fase 1, para redefinir el alcance del estudio, tal vez la unidad funcional, en dependencia de la disponibilidad de información relevante que vaya obteniendo. Otros factores que facilitan las iteraciones es la mayor comprensión del sistema que se analiza, lo cual permite redefinir conceptos y criterios en diversos momentos de la investigación.

2.2. Taxonomía del sistema de la vivienda en Cuba

El sistema de la vivienda en Cuba está presidido por el Ministerio de la Construcción (MICONS), al cual se le subordina la Dirección Nacional de Viviendas. Este Ministerio cuenta con diversas OSDE, de diseño e investigación, de construcción y montaje, y de producción de materiales. A la OSDE de diseño e investigación se le subordinan la ENIA, CEDI y la Empresa de Ingeniería, así como a la OSDE de construcción y montaje se le subordinan la Empresa Comercializadora Escambray, CUBIZA, EPSEG, Obras Marítimas, SOMEK, y la Empresa de Construcción y Mantenimiento. Además, la OSDE de producción de materiales cuenta con la Empresa de Materiales de la Construcción, Aluminio, EXPLOM.

El siguiente esquema muestra la taxonomía del sistema de la vivienda en Cuba, la relación entre las entidades que intervienen en el logro de la funcionalidad de la actividad constructiva, así como la relación entre las empresas objeto de estudio.

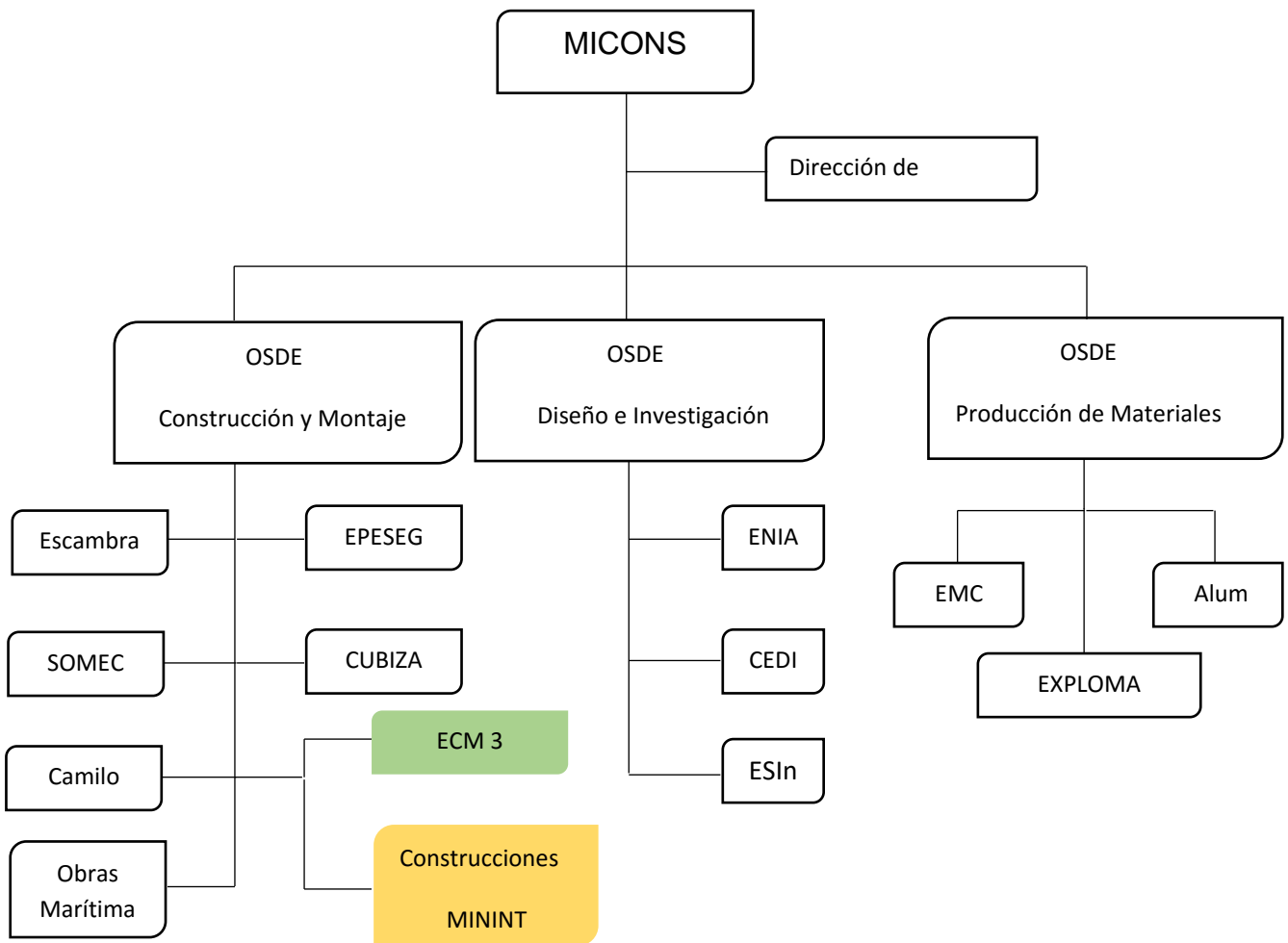


Figura 2.1. Taxonomía del sector
Fuente: Elaboración propia

2.3. Caracterización de la empresa constructora objeto de estudio

Entre las empresas involucradas en la construcción de elementos de prefabricados de tipo Gran Panel y Bloques Tradicionales se encuentra la Empresa Constructora Militar No 3 y la empresa de Construcciones del MININT, las cuales pertenecen al Ministerio de la Construcción.

La Empresa Constructora Militar No 3 ubicada en Calle 2da no3 entre Carretera de Sagua y Final, Reparto Guamajal, se subordina a la OSDE de Construcción y Montaje, perteneciente por tal razón al Ministerio de la Construcción (MICONS). Es una entidad del sistema empresarial de las FAR que tiene como objetivo la satisfacción de las necesidades y expectativas de sus clientes en cuanto a edificaciones y obras constructivas, así como en estructuras de prefabricado y carpintería de aluminio, con un sistema de gestión sustentado en la calidad de sus procesos y la profesionalidad y compromiso de su colectivo laboral.

Tiene como encargo social ser una empresa líder en la Unión de Construcciones Militares, con un sistema de gestión integral basado en los principios y concepciones del Perfeccionamiento Empresarial, distinguiéndose por la eficiencia y eficacia, la calidad de sus producciones expresada esta en un alto nivel de satisfacción de las expectativas de los clientes y colectivo laboral reconocido por su profesionalidad, sentido de pertenencia y compromiso con la revolución.

Sus principales producciones son: elementos prefabricados para viviendas de tecnología Gran Panel, Consejo de Administración Provincial, Vivienda GP FAR, Turismo, Tarea Refuerzo y otras. Ha contribuido al desarrollo social del territorio a través de la prefabricación de secundarias básicas, hospitales, hoteles, frigoríficos, círculos infantiles, etc. En la actualidad, su contribución fundamental ha estado encaminada al desarrollo del polo turístico de Caibarién, así como las obras destinadas a la construcción de viviendas y la Tarea Refuerzo. En el año 2010 la empresa cumplió con un plan de 12 edificios de tipo Gran Panel y en el año 2015 se hicieron 11 edificios de esta tipología constructiva.

Sus principales clientes son: El Ejército, las UEB de la propia entidad, ECOT- Cayo Santa María. Entre sus suministradores están: COPEXTEL, ACINOX S.A, Comercializadora Escambray, Empresa de Materiales de la Construcción, DIVEP, Industria de los materiales en Villa Clara y Cienfuegos, entre otros. Sus principales competidores son: Mantenimiento Constructivo, UEB Prefabricados de Remedios y la Empresa Materiales de la Construcción.

El pago de los salarios se realiza a partir de su salario básico además de otros pagos por concepto de perfeccionamiento empresarial (PAPE), Antigüedad (PAS), de acuerdo al coeficiente de interés económico social 30% (CIES). También se remunera de acuerdo al cumplimiento del Coeficiente de Participación Laboral (CPL) que se haya logrado en el mes.

Por su parte la Empresa de Construcciones MININT ubicada en el Reparto Guamajal, de igual modo se subordina a la OSDE de Construcción y Montaje, perteneciente por tal razón al Ministerio de la Construcción (MICONS). Su misión como entidad del sistema empresarial del MININT es satisfacer las necesidades constructivas del Ministerio del Interior, tanto de viviendas para los combatientes como para los trabajadores civiles y para las obras institucionales de manera eficiente, eficaz, económicamente sustentadas en un control interno satisfactorio y en el trabajo colectivo, unidos y altamente calificados.

La visión de la misma es lograr en la actividad constructiva funcionalidad, racionalidad, economía, calidad y estética que den plena satisfacción a los requerimientos de dicho organismo.

Tiene como objeto social brindar servicios de construcción civil y montaje de nuevas obras, edificaciones e instalaciones; restauración, demolición, desmontaje, remodelación, reconstrucción y rehabilitación de edificaciones, instalaciones y otros objetivos existentes; así como de reparación y mantenimiento constructivo. También, produce y comercializa áridos, elementos prefabricados, hormigones hidráulicos y asfálticos; así como productos derivados de canteras y yacimientos minerales.

2.4. Descripción de los sistemas constructivos evaluados

El término sistema tiene, en el diccionario de la Real Academia, dos acepciones principales:

1. Conjunto de reglas o principios sobre una materia racionalmente enlazados entre sí.
2. Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto.

Podemos entender por sistema constructivo el conjunto de elementos y unidades de un edificio que forman una organización funcional con una misión constructiva común, sea esta de sostén (estructura) de definición y protección de espacios habitables (cerramientos) de obtención de confort (acondicionamiento) o de expresión de imagen y aspecto (decoración). Es decir, el sistema como conjunto articulado, más que el sistema como método.

En este sentido, cabe recordar que los sistemas suelen estar constituidos por unidades, estas, por elementos, y estos, a su vez, se construyen a partir de unos determinados materiales.

Requieren un diseño, para lo cual se debe atender, en primer lugar, a las exigencias funcionales de cada uno y a las acciones exteriores que van a sufrir, además de tener en cuenta las posibilidades de los materiales que se utilicen, en función de sus calidades y, por tanto, de su vulnerabilidad. Van evolucionando con el tiempo, tanto en los materiales utilizados, como en las soluciones de diseño, y pueden mejorar gracias a la correcta aplicación de la Ciencia de la construcción (Escrig, 2005).

Los métodos convencionales han constituido uno de los principales sistemas constructivos, son la forma tradicional de construcción en cualquier obra.

Sistema de construcción tradicional: Es el sistema de construcción más difundido y el más antiguo ya que basa su éxito en la solidez, la nobleza y la durabilidad (dependiendo del material). Se constituye por paredes de ladrillo o bloque, unidos con un mortero, que resiste a las acciones producidas por las cargas de gravedad o las acciones de sismo o viento. La producción se realiza con equipos simples, ya que la mano de obra es simple, contando al igual que otros con instalaciones hidrosanitarias y eléctricas.

El sistema convencional, que representa las técnicas constructivas más difundidas en la construcción, prácticamente no incluye ningún elemento prefabricado sino que su proceso se basa en la adición de materiales y componentes mediante un intenso trabajo manual y mecánico en obra.

Ante el desarrollo de las nuevas técnicas de construcción, y la importancia de mejoras habitacionales en el país, se hace necesario empleo de sistemas de edificación que cumplan con las exigencias constructivas y que permita reducir el alto déficit habitacional existente en el país. La alternativa a la construcción convencional es la externalización de los elementos constructivos en centros de producción, o lo que es lo mismo, la prefabricación.

Prefabricados de hormigón: Son variados productos, que incluyen bloques huecos de hormigón, vigas, bovedillas y adoquines para pavimentos. Se producen generalmente por procesos de vibración-compactación en máquinas diseñadas para esto, que trabajan a pequeña escala. Se han reportado experiencias de sustitución de hasta un 50% del cemento Pórtland usado por cemento puzolánico CP-40, sin que se afecten las propiedades físico-mecánicas de los productos resultantes.

El concepto de la prefabricación industrializada está conformado con la idea de moldear las piezas o módulos de hormigón armado fuera de obra y luego ser montadas en la edificación a construir.

En nuestro país la Prefabricación de Elementos de Hormigón Armado para Viviendas, se ha desarrollado en gran magnitud, constituyendo una de las tecnologías constructivas más utilizadas en la construcción de viviendas en la actualidad.

Tipologías del Sistema Gran Panel

Sistema Gran Panel IV

El sistema está compuesto esencialmente por paneles transversales y longitudinales de carga HA⁵. Los transversales están espaciados a 3.60m y 2.70m lo que constituye la modulación del sistema. El módulo de 2.70 m es utilizado principalmente en las zonas de cajas de escaleras. El espesor de estos paneles de carga es de 10 cm.

Las losas de entrepiso y cubierta son prefabricadas, de 9 cm de espesor y apoyadas en sus cuatro bordes. La altura de edificios es de 4 y 5 plantas, de prefabricación cerrada. Las escaleras son prefabricadas de dos ramas. Cuatro cajas de escaleras como máximo en los edificios sin el empleo de juntas de expansión.

Sistema Gran Panel VI

La solución constructiva y estructural del sistema es el empleo de paneles transversales de carga de HA de 12cm de espesor espaciadas a 3,00m y el empleo de paneles rigidizadores, de igual espesor, ubicados en la parte central de las edificios. Las fachadas son libres, empleando paneles no estructurales de 10 cm. de espesor. Las losas son de HA prefabricadas, apoyadas en los paneles de carga con un espesor de 10 cm. El sistema posee igualmente, paneles divisorios y sanitarios de 6cm de espesor. Las escaleras son prefabricadas, de dos ramas sin descanso incluido. La junta entre los paneles de carga se resuelve por medio de ganchos salientes de los paneles que se unen por medio de una barra de acero vertical, para posteriormente hormigonar la junta.

Sistema Gran Panel 70

La solución básica del sistema es el empleo de paneles transversales de carga de HA de 10 cm. de espesor, espaciadas a 2,40; 3,60 y 4,80m y de losas de HA de 18 cm. de espesor, que unidas a los primeros y a algunos paneles rigidizadores longitudinales, garantizan la rigidez requerida por los edificios.

Los paneles rigidizadores, tanto longitudinales como transversales, llevan incorporados pernos para su reglaje y nivelación. Altura de edificios: hasta 20 plantas. Fachada libre. En las culatas de los edificios se colocan paneles de carga de 25cm de espesor (paneles piñones).

Sistema I.M.S

⁵Hormigón armado.

El fundamento del sistema es una estructura basada en una red modular simple conformada a partir de una, dos o tres losas casetonadas, de dimensiones igual al módulo con cuatro columnas ubicadas en las esquinas, que se unen por medio de una junta postensionada, formándose así una estructura de esqueleto carente de vigas.

Red modular del sistema: 4.20m a ejes de columnas. Los entrepisos terminan su perímetro con vigas de borde de varios tipos o con losas de voladizo de 1.20m de ancho. Desde un punto de vista estructural, el sistema de columnas y losas soporta las cargas verticales. La rigidez de los edificios a las cargas horizontales de viento y sismo se logra mediante tímpanos de H.A prefabricadas de 15 cm de espesor que se colocan entre dos columnas con una holgura de 43 cm a cada lado, con acero salientes para generar posteriormente la junta.

Para garantizar la rigidez requerida por los edificios se colocan barras de acero entre columnas y tímpanos que mantienen su continuidad desde la cimentación hasta el último nivel de la estructura.

Principales elementos prefabricados: columnas, losas, tímpanos, vigas de borde, paneles exteriores, escaleras

Sistema L.H

El sistema se basa en la utilización de losas planas, ahuecadas y pretensadas producidas por extrusión (tecnología Spiroll) como elemento constructivo de paredes portantes, entrepisos, cubierta y elementos de fachada.

La solución de cimentación es mediante un vaso corrido, solo en los ejes transversales (paredes portantes). En ellos se empotran 60 cm. las losas, unas al lado de las otras, formando las paredes portantes transversales, únicos muros portantes empleados en el sistema.

Los muros transversales portantes están constituidos por 5 ó 6 losas de 30 cm. de espesor de dos, tres y hasta cuatro plantas de altura, y espaciados a 6,00; 7,80 y 9,00; m en los apartamentos y de 2,70m en las cajas de escaleras.

Las losas de entrepisos y cubierta son de 20 cm. de espesor simplemente apoyadas sobre vigas de HA prefabricada que se fijan a las losas que constituyen las paredes portantes transversales. La fijación de estas vigas se produce mediante pernos roscados empotrados en las losas (dos pernos por cada losa).

Sistema Girón

El sistema está compuesto esencialmente por una estructura de esqueleto de HA con paredes del mismo material, algunas de las cuales, denominadas tímpanos, contribuyen a la resistencia global de los edificios. El esqueleto está compuesto por columnas, vigas y losas doble "T " entrepiso y cubierta.

Red modular del sistema: 6,00m en el sentido de la luz de las losas y 6,00ó 7,50 m en el sentido de la luz de las vigas, con posibilidad de voladizo a uno o a ambos lados. Altura de los edificios: hasta 5 plantas.

Elementos prefabricados componentes del sistema: vasos, pedestales losas, viga alero, columnas paneles (existen 7 tipos, espesor 10 cm.) y vigas de escalera.

Sistema de Losa Izada (Lift- Slab)

Este sistema de prefabricación a pie de obra, consiste en construir sobre el terreno, unas sobre otras, todas las estructuras de los diferentes pisos. Después de erigidas las columnas se coloca, apoyándose en el extremo superior de estas un conjunto de gatos hidráulicos, por lo general uno en cada columna, conectándose al piso que se va a izar por medio de dos barras especiales de acero, y tirando de estas se hacen subir cada piso hasta su nivel definitivo.

La estructura de los pisos está formada por un reticulado de vigas de 0,25m de ancho por 0,80 m de altura, espaciadas a 1,10; 1,65 o 2,20 m según convenga a cada edificio. Sobre este reticulado se apoya una losa con espesor de 6 – 7 cm, en dependencia de las cargas, que incluye integralmente el acabado de terrazo que se considera también como parte resistente de la losa. Las vigas adyacentes a las columnas junto con estas, forman pórticos rígidos que son los encargados de resistir las fuerzas laterales u horizontales. Red modular: 9,35m según el eje transversal y de 11,00m según el eje longitud.

Sistema Abierto de Esqueleto (SAE)

La solución básica del sistema consiste en una estructura mixta pórtico-tímpanos con columnas y dobles vigas que se apoyan sobre las ménsulas a cada lado de aquellas, los entrepisos y cubiertas se solucionan con losas Spiroll.

Luces de losas: 6,00; 7,20; 8,40 y 9,60 m, en dependencia de las cargas de uso. Las mismas se consideran simplemente apoyadas sobre las vigas y sus espesores pueden ser de 0,20 y 0,30 m.

Luces de viga de 6,00 y 7,20 m. Las vigas son compuestas, de sección canal invertida formada por dos vigas prefabricada de 0,25 x 0,50 m cada una, y una banda superior hormigonada in situ y una altura igual al espesor de losa utilizado. Las vigas se consideran simplemente apoyadas sobre las ménsulas de las columnas.

Las vigas pueden presentar voladizos de 0,90; 2,10 m del eje de la columna al extremo del voladizo, a uno o a ambos lados.

En el sentido de las losas se disponen de vigas de cierre cuyos extremos se apoyan en las vigas principales y rigidez de los entrepisos. Estas vigas de cierre pueden desplazarse a la largo de las vigas principales y fijarse en cualquier punto de ellas.

Las columnas se prefabrican de uno, dos o tres tramos o niveles. Las cargas ecológicas (viento y sismo) son tomadas por tímpanos de H.A. de 15 cm. de espesor, los cuales pueden ser colocados en la dirección de las vigas o en la dirección de las losas. Altura de los edificios: hasta 15 plantas.

Sistema SMAC

Sistema prefabricado de estructura de esqueleto para edificios desde una hasta 18 plantas, que satisfacía los requerimientos de un gran número de programas. Posee unión rígida viga- columna, sistema porticado que elimina el empleo de tímpanos. Se utilizan módulos de 6.0 y 7.20 metros para las luces de vigas y 6.0, 7.20, 8.40 y 9.60 metros para las luces de losas (cuando usa Doble "T" puede alcanzar hasta 21.80 de luz). Los puntales son de 3.60, 4.20 y 4.80 metros.

La cimentación consiste en vasos prefabricados y platos y vigas de cierre hormigonados in situ. Las columnas son de sección única (0.30 x 0.60 m) y de varias plantas. Las vigas están formadas por dos nervios longitudinales unidos por diafragmas verticales transversalmente y conectados en su parte superior por una lámina horizontal. Las losas pueden ser Spiroll o Doble "T" pretensadas de sección transversal constante, además cuenta con vigas de borde de sección única y muros cortinas. En el montaje de este sistema es vital el control de los errores planimétricos y altimétricos. Se ha considerado una carga de uso de 200 a 1,500 kg/m². Este sistema cuenta con tres plantas que lo

producen en las provincias La Habana y Ciudad de La Habana, con una capacidad potencial de 86 mil m² de edificios SMAC.

CAPÍTULO III. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE ECO-EFICIENCIA A LOS ESTUDIOS DE CASO BIPLANTAS DE GRAN PANEL Y DE BLOQUES TRADICIONALES EN SANTA CLARA.

El presente capítulo aplica el procedimiento descrito en el capítulo II para la evaluación de eco-eficiencia de los sistemas constructivos basados en las tecnologías Gran Panel y Bloques Tradicionales, construidos en la ciudad de Santa Clara.

3.1. Aplicación de la Fase 1: Definición de objetivos y alcance del análisis

El estudio de eco-eficiencia que se persigue en esta investigación se realiza sobre dos edificios tipo biplanta localizados en la ciudad de Santa Clara, específicamente en el Reparto José Martí. Uno de ellos es construido utilizando la tecnología de Gran Panel, por parte de la Empresa Constructora Militar Nro. 3. El segundo caso fue construido por la Empresa Constructora del MININT, basado en el sistema de construcción de bloques tradicionales.

El estudio comprende la totalidad de los materiales utilizados en las obras constructivas en todas las etapas de su producción, por lo que se realiza un análisis integral a nivel de toda la edificación. Sin embargo, para garantizar la comparabilidad entre ambos sistemas se emplea la unidad funcional *metro cuadrado de superficie útil*. Para el estudio ambiental se tuvo en consideración la energía consumida en los procesos intermedios que tuvieron lugar para la producción de los bloques, elementos de prefabricado, hormigón de premezclado, obtención de áridos, así como en la producción de cemento.

El objetivo del estudio empírico realizado se puede resumir como sigue: Evaluar comparativamente la eficiencia económico-ecológica resultante entre los dos tipos de edificios biplanta (Gran Panel y Bloques Tradicionales) en la ciudad de Santa Clara.

3.2. Aplicación de la Fase 2: Mapeo y descripción de la cadena productiva

En esta fase se realizó el mapeo y descripción de la cadena productiva de una edificación biplanta construida con el método de Gran Panel, así como una construida utilizando el método constructivo de bloques tradicionales. Las características técnicas que distinguen ambos tipos de sistemas constructivos fueron explicadas en el capítulo II de esta tesis. La figura 2.1 muestra el diagrama que describe el sistema productivo desde las materias primas, materiales intermedios hasta la obra o edificio, para el caso del biplanta tipo Gran Panel. Asimismo, la figura 2.2 ofrece el esquema general del sistema productivo para la tipología de bloques tradicionales. El biplanta de bloques no es

totalmente construido a base de bloques, sino que posee un índice de prefabricación de un 30%.

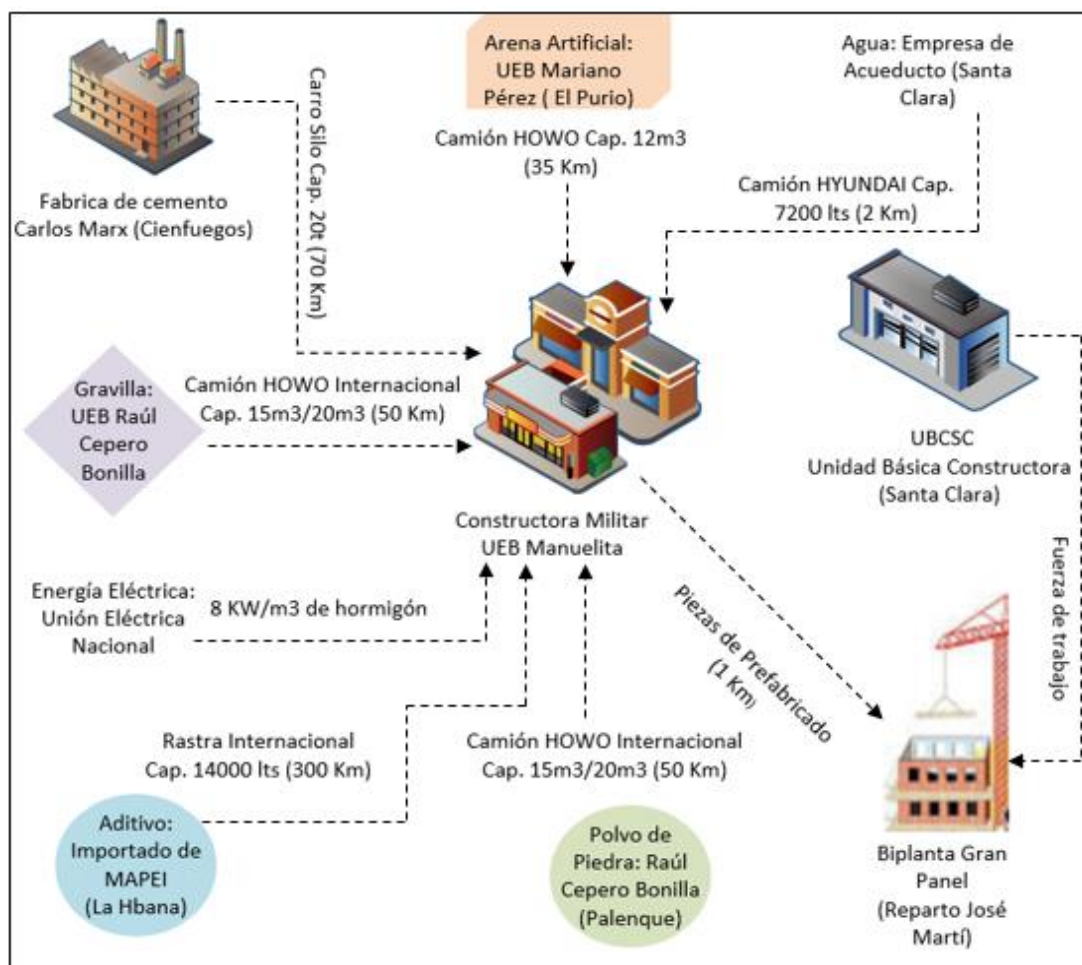


Figura 3.1. Diagrama de la cadena productiva del biplanta de Gran Panel
Fuente: Elaboración propia

Entre las obras más relevantes de los últimos años de la Empresa Constructora Militar No. 3 se encuentra la vivienda tipo Gran Panel. Para el logro de esta actividad constructiva intervienen diferentes entidades, entre ellas la UEB “Armando Mestre”, del Purio, subordinada a la Empresa Provincial de Materiales de la Construcción, la cual suministra arena artificial. La UEB “Raúl Cepero Bonilla” de Palenque suministra polvo de piedra y gravilla a la empresa constructora.

El cemento proviene de la Fábrica de Cementos “Carlos Marx”, de Cienfuegos, conocida como Cementos Cienfuegos S.A, la cual es una de las dos fábricas más eficientes del país (conjuntamente con Cementos Mariel-CEMEX). Cementos Cienfuegos es una empresa sociedad anónima con la firma HOLCIM. Posee una capacidad productiva anual de 1.5 millones de toneladas. Su proceso productivo es por vía seca, así como Mariel-CEMEX. Un componente fundamental de los biplantas de Gran Panel lo constituyen los

elementos de prefabricados, los cuales son fabricados en la “UEB Prefabricados Manuelita”.

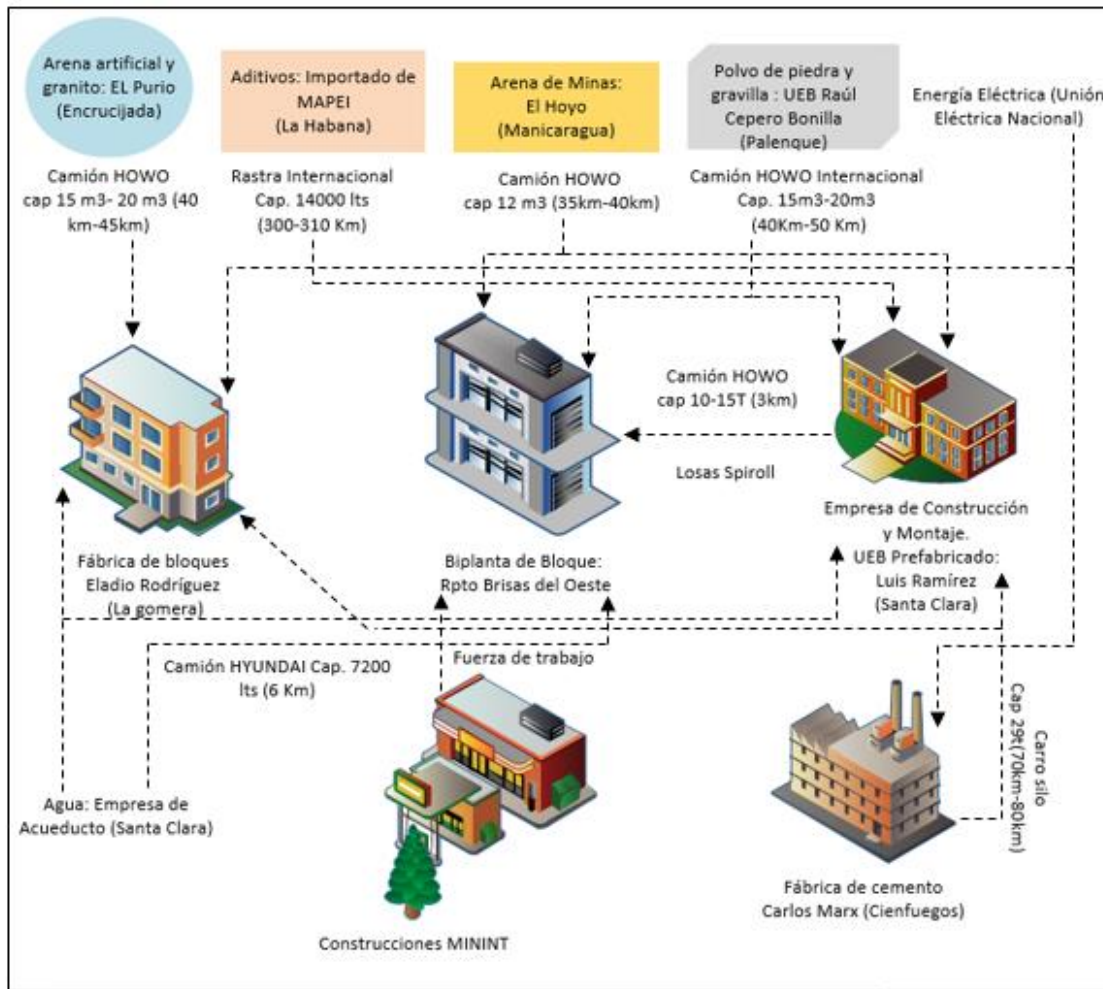


Figura 3.2. Diagrama de la cadena productiva del biplanta de bloques tradicionales
Fuente: Elaboración propia

La obra constructiva basada en tecnología de bloques tradicionales utiliza fundamentalmente bloques de hormigón (en un 70% a nivel de toda la edificación), los cuales son producidos por la industria de materiales de construcción, específicamente en la Fábrica de bloques Eladio Rodríguez, situada en La Gomera. Su componente de prefabricado proviene de la UEB Prefabricados Manuelita. El aditivo que se emplea en los hormigones de ambas edificaciones se obtiene de la firma MAPEI, por su representación en La Habana.

3.3. Aplicación de la Fase 3: Creación del inventario de datos asociado a la unidad funcional

En este epígrafe se determina el levantamiento de datos provenientes de los objetos de obra analizados, los cuales constituyen objetos de estudio práctico de la investigación. Dicha información es utilizada como entrada para la determinación del impacto económico y ambiental de los sistemas constructivos alternativos. Dicha información fue obtenida de varias fuentes: memoria descriptiva de los proyectos constructivos, memoria cuantitativa de las obras, certificaciones de obras, entre otros.

En la tabla 3.1 se consolidan los materiales de construcción fundamentales utilizados en las edificaciones bajo estudio. Fueron excluidos de la evaluación aquellos materiales que no intervienen en la producción de hormigón, como los componentes eléctricos, carpintería de aluminio, entre otros.

Tabla 3.1. Inventario de datos: materiales de construcción (biplanta de bloques)

<i>Material de construcción</i>	<i>UM</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Norma de consumo de cemento</i>		<i>Cantidad (t)</i>
Hormigón de premezclado	m ³	40,6	480	kg de cem/m3 HM	19,49
Hormigón de prefabricado	m3	18,46	385	kg de cem/m3 HM	7,11
Bloques 15 cm	u	4460	1,72	kg de cem/bloque	7,67
Mortero	m3	59,33	286	kg de cem/m3 mortero	16,97
Volumen total de cemento utilizado en toda la cadena productiva					51,23

Fuente: Elaboración propia basado en material factológico de la empresa constructora

Tabla 3.2. Inventario de datos: materiales de construcción (biplanta de Gran Panel)

<i>Material de construcción</i>	<i>UM</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Norma de consumo de cemento</i>		<i>Cantidad (t)</i>
Hormigón de premezclado	m3	24,9	480	kg de cem/m3 HM	11,95
Hormigón de prefabricado	m3	52	385	kg de cem/m3 HM	20,02
Bloques 15 cm	u	770	1,72	kg de cem/bloque	1,32
Mortero	m3	20,97	286	kg de cem/m3 mortero	6,00
Volumen total de cemento utilizado en toda la cadena productiva					39,29

Fuente: Elaboración propia basado en material factológico de la empresa constructora

A partir de los materiales de construcción intermedios que han sido declarados en las tablas 3.1 y 3.2, se determinan los consumos de energía durante todos los procesos de fabricación que tienen lugar en la cadena productiva (para ambas tipologías constructivas), lo cual presupone utilizar las fichas técnicas de dichos materiales de

construcción, las cuales contienen información sobre los consumos unitarios de materias primas, materiales y energía. Este es un paso importante de esta fase del inventario de datos, puesto que la energía es una fuente fundamental generadora de emisiones ambientales, lo cual será utilizado más adelante en la fase de evaluación ambiental.

Tabla 3.3. Energía consumida en la producción de materiales de construcción intermedios⁶ (kWh)

<i>Material</i>	<i>Gran Panel</i>	<i>Bloques</i>
Hormigón de premezclado	174,3	284,2
Hormigón de prefabricado	364	129,22
Bloques 15 cm	29,26	169,48
Mortero	146,79	415,31
Total	540,05	714,01

Fuente: Elaboración propia

Otro proceso de gran importancia en la industria constructiva lo constituye la transportación de materiales, pues durante esta actividad se consume combustible, el cual a su vez genera emisiones contaminantes. Aunque la mayor parte de las emisiones ambientales derivadas de las obras constructivas proceden de la fase de fabricación de los propios materiales, la transportación no debe ser excluida del análisis. En el caso de las edificaciones objeto de estudio de esta investigación, se puede afirmar que la distancia de la obra a las fuentes de algunos materiales intermedios es suficientemente corta (1 km para el hormigón), sin embargo, no siempre ocurre que los edificios se construyen tan próximos a los materiales de construcción. Podría decirse que este caso es casi la excepción. Por lo anteriormente explicado es posible considerar que el protocolo de análisis y de cálculo de emisiones resulta válido para generalizarlo a otras obras constructivas, de ahí su valor metodológico.

Las tablas 3.4 y 3.5 reflejan el proceso deductivo de los consumos de combustible generados por la actividad de transportación para las edificaciones objeto de estudio. El procedimiento seguido para calcular el consumo de combustible es el siguiente:

- Determinar el número de viajes requeridos para transportar cierta cantidad de material a partir de la capacidad de carga del medio de transporte.
- Determinar las distancias entre las fuentes de los materiales (origen) y la obra constructiva (destino). Para ello se hace uso del mapeo de la cadena productiva.

⁶ Excluye el cemento, puesto que el impacto ambiental del cemento se considera como un dato de entrada tomado de referencias a trabajos anteriores sobre el cemento LC3 y su eco-eficiencia.

- Calcular el consumo de combustible mediante la fórmula: Número de viajes x Distancia x 2 x índice de consumo de combustible del vehículo.

Tabla 3.4. Combustible consumido en la actividad de transportación de materiales (Biplanta de Gran Panel)

Material	Cant.	UM	Medio de Transporte	Capac.	Dist	Nro.viajes	Índice Consumo	Cant.Comb. (L)
Cemento	39,30	t	Silo cemento	20 t	82	2,00	0,43	141,04
Arena	24,79	m3	Camión volteo	15 m3	40	2,00	0,43	68,8
Gravilla	6,54	m3	Camión volteo	15 m3	50	1,00	0,43	43
Polvo de piedra	3,85	m3	Camión volteo	15 m3	50	1,00	0,43	43
Hormigón prefabricado	52	m3	Rastra Panelera	20 t	1	7,00	0,43	6,02
Hormigón premezclado	24,9	m3	Camión hormigonera	19 t	1	4,00	0,43	3,44
Mortero	20,97	m3	Camión hormigonera	19 t	1	3,00	0,43	2,58
Bloques	770	u	Camión plataforma	10 t	5	1	0,43	4,3
Total								312,18

Fuente: Elaboración propia basado en información factual de la empresa constructora

Tabla 3.5. Combustible consumido en la actividad de transportación de materiales (Biplanta de Bloques)

Material	Cant	UM	Medio de Transporte	Capac.	Dist	No.viajes	Índice Consumo	Cant.Comb.(L)
Cemento	51,23	t	Silo cemento	20 t	82	3,00	0,43	211,56
Arena	25,89	m3	Camión volteo	15 m3	40	2,00	0,43	68,8
Gravilla	15,2	m3	Camión volteo	15 m3	50	2,00	0,43	86
Polvo de piedra	7,7	m3	Camión volteo	15 m3	50	1,00	0,43	43
Hormigón prefabricado	18,46	m3	Rastra Panelera	20 t	1	1,00	0,43	0,86
Hormigón premezclado	40,6	m3	Camión hormigonera	19 t	1	2,00	0,43	1,72
Mortero	59,33	m3	Camión hormigonera	19 t	1	8,00	0,43	6,88
Bloques	4460	u	Camión plataforma	10 t	5	2	0,43	8,6
Total								427,42

Fuente: Elaboración propia basado en información factual de la empresa constructora

3.4. Aplicación de la Fase 4: Evaluación medioambiental

En esta fase se utilizan todos los datos de entrada que fueron declarados en el inventario de datos de la fase anterior, con el fin de determinar los impactos ambientales generados por los procesos productivos que dieron lugar a dichos materiales de construcción.

Puesto que el interés marcado de este trabajo se centra en revelar las ventajas del cemento de bajo carbono (LC3) frente a los cementos tradicionales, y además este material es la principal fuente de emisiones contaminantes dentro de la amplia gama de materiales de construcción, en esta tesis se utiliza información sobre el factor de impacto de los diferentes tipos de cemento (P-35, PP-25 y LC3), resultados obtenidos en estudios precedentes desarrollados por (Sánchez et al., 2016a), (Sánchez et al., 2016b), (Cancio et al., 2016b). En estos trabajos se utiliza la metodología Análisis de Ciclo de Vida para determinar el impacto ambiental de 1 ton de cemento (diversos tipos de cemento) basados en el enfoque “cradle-to-gate”, que significa determinar las emisiones producidas por los procesos que comprenden desde la extracción de las materias primas hasta que el producto terminado sale de la fábrica (en este caso, la planta de cemento).

De acuerdo a los estudios antes referidos, 1 tonelada de cemento P-35, PP-25 y LC3 generan 890.63, 764.92 y 564.39 kg de CO₂ equivalente, respectivamente. La categoría de impacto ambiental que fue considerada es el Potencial de Calentamiento Global (PCG), la cual constituye la categoría de impacto preponderante en la industria constructiva.

Para el impacto ambiental de la energía eléctrica se empleó el factor de impacto proporcionado por la Unión Eléctrica Nacional, que considera 0.00744 kg de CO₂ por kWh. Para la transportación, se emplea la secuencia de derivar el impacto ambiental basado en la multiplicación del combustible (en litros) por la densidad del mismo (0.8379 kg/l) y por el factor de emisión que reporta CUPET (3.21 kg de CO₂ por kg de diesel).

La tabla 3.6 muestra un resumen del proceso de cálculo de las emisiones para ambas edificaciones, separando las emisiones en dos componentes fundamentales: la producción del cemento y la fabricación del resto de los materiales intermedios (hormigón, bloques, mortero). En este segundo componente la fuente principal de emisiones es el consumo de energía para la obtención de dichos materiales. El proceso de producción del cemento genera el 85% de las emisiones de este sistema, seguido por el 13% derivado del resto de los procesos de fabricación, más un 2% derivado de la transportación de los materiales.

Tabla 3.6. Resumen del proceso de determinación del impacto ambiental (t-CO₂-eq.)

Biplanta de Gran Panel					
<i>Material de construcción</i>	<i>Fabricación de los cementos tradicionales</i>	<i>Fabricación del cemento LC3</i>	<i>Fabricación intermedia</i>	<i>Emisiones totales (P-35+PP-25)</i>	<i>Emisiones totales LC3</i>
Hormigón de premezclado	10,64	6,75	1,30	11,94	8,04
Hormigón de prefabricado	17,83	11,30	2,71	20,54	14,01
Bloques 15 cm	1,18	0,75	0,22	1,40	0,97
Mortero	4,59	3,39	1,09	5,68	4,48
Total	34,24	22,18	5,31	39,56	27,49
Biplanta de Bloques					
<i>Material de construcción</i>	<i>Fabricación de los cementos tradicionales</i>	<i>Fabricación del cemento LC3</i>	<i>Fabricación intermedia</i>	<i>Emisiones totales (P-35+PP-25)</i>	<i>Emisiones totales LC3</i>
Hormigón de premezclado	17,36	11,00	2,11	19,47	13,11
Hormigón de prefabricado	6,33	4,01	0,96	7,29	4,97
Bloques 15 cm	6,83	4,33	1,26	8,09	5,59
Mortero	12,98	9,58	3,09	16,07	12,67
Total	43,50	28,92	7,43	50,92	36,34

Fuente: Elaboración propia

En esta tesis se compara la eco-eficiencia de dos edificaciones basadas en métodos constructivos diferentes, por lo que tanto las medidas de desempeño ambiental como las de desempeño económico se deben normalizar a fines de interpretación práctica. En este caso se normaliza usando la unidad funcional definida en la fase 1 del procedimiento, es decir, metro cuadrado de superficie útil. Este procedimiento garantiza la comparabilidad necesaria en este estudio de caso. La tabla 3.7 ofrece esta transformación de las emisiones de dióxido de carbono total a nivel del biplanta en emisiones por m².

Tabla 3.7. Normalización de las emisiones por superficie útil

	Gran Panel	Bloques
Emisiones_ P35+PP25	39,56	50,92
Emisiones_ LC3	27,49	36,34
Superficie útil (m ²)	168,74	161,42
Emisiones/m ² _ P35+PP25	0,23	0,32
Emisiones/m ² _ LC3	0,16	0,23

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 3.1 consolida dicha información en forma de diagrama de barras. Puede notarse que la vivienda de Gran Panel contribuye a mitigar el impacto ambiental con respecto a la tecnología de bloques tradicionales en aproximadamente un 22%, lo cual se debe fundamentalmente al significativo mayor volumen de materiales de construcción que genera la vivienda de bloques con respecto a Gran Panel. Si la industria del cemento decidiera implementar en el país la producción de LC3, se produciría una disminución de las emisiones de CO₂ derivadas de la producción cementera-y de los materiales de construcción de él derivados-en aproximadamente un 30% para las tecnologías de Gran Panel y en un 28% para las tecnologías de bloques tradicionales.

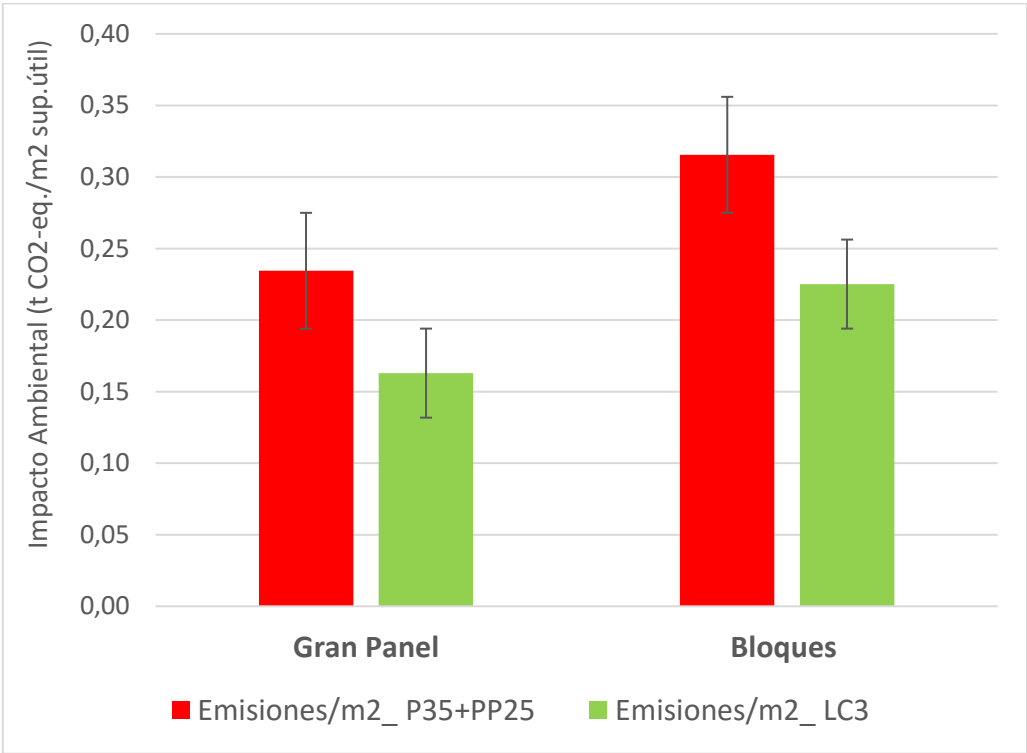


Gráfico 3.1. Impacto Ambiental normalizado por superficie útil
Fuente: Elaboración propia

El gráfico 3.2 descompone las emisiones de acuerdo a los materiales fundamentales que son utilizados en las obras constructivas. En el caso del biplanta de Gran Panel las emisiones fundamentales se derivan de la producción de elementos de prefabricado, mientras que en el sistema de bloques las emisiones están más asociadas a la producción de morteros y los propios bloques de hormigón. Este último método constructivo utiliza intensivamente el mortero de

hormigón puesto que este se emplea en el levantamiento de los muros de bloques, así como en las actividades de repello, resano y terminación.

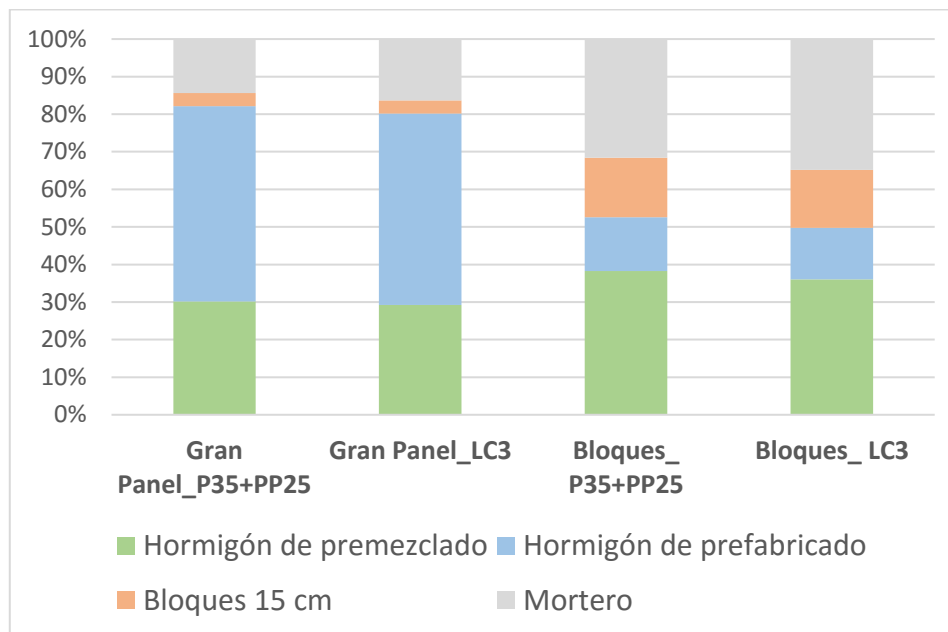


Gráfico 3.2. Estructura del impacto ambiental por la naturaleza de los materiales involucrados

Fuente: Elaboración propia

3.5. Aplicación de la Fase 5: Evaluación económica

Tomando en consideración que el objetivo central del trabajo investigativo es revelar la eficiencia económica y ecológica que se produce con el uso potencial del cemento LC3 en construcciones típicas del país, en esta fase de la evaluación económica se realiza la abstracción *ceteris paribus* del resto de los materiales para poner de relieve el verdadero impacto económico que tiene lugar.

Se utilizan como entradas del análisis los costos de producción del cemento LC3 y los cementos tradicionales (P35 y PP25) que han sido obtenidos en estudios previos por (Sánchez et al., 2016a), (Sánchez et al., 2016b), los cuales se resumen como sigue: costo del cemento P35: \$187.70; PP25: \$174.55; LC3: \$160.86. En estas investigaciones se determinan los costos del cemento LC3 utilizando la misma base analítica y los mismos procedimientos empleados por la industria del cemento en Cuba para las fichas de costo de los cementos tradicionales.

La tabla 3.8 muestra el proceso de derivación del costo por unidad funcional, es decir, por metro cuadrado de superficie útil, de manera que pueda resultar útil la comparación

entre diferentes tipologías constructivas, cuyas edificaciones poseen además diferentes superficies útiles.

Cabe mencionar que, en investigaciones precedentes sobre eco-eficiencia, la medida de desempeño económico utilizada ha sido, en lo fundamental, el valor agregado. Debido a la baja calidad de la información económico-contable relativa al costo de capital y la consiguiente depreciación de los equipos fundamentales que intervienen en los procesos productivos, a lo cual se le suma la falta de homogeneidad en dicha información entre todas las unidades productivas intervinientes en la cadena productiva, se decide por la autora de esta tesis utilizar el costo de producción. El análisis de costos proporciona una herramienta más coherente y utilitaria en el sector constructivo, dado que los costos de los materiales y las certificaciones de obras generalmente se encuentran basadas en el mismo patrón de precios que establece el MICONS.

Tabla 3.8. Costo económico asociado a las tecnologías objeto de estudio

	Gran Panel P35+PP25	Gran Panel LC3	Bloques P35+PP25	Bloques LC3
Hormigón de premezclado	2243,39	1922,60	3657,90	3134,84
Hormigón de prefabricado	3757,75	3220,42	1334,00	1143,25
Bloques 15 cm	248,59	213,04	1439,88	1233,99
Mortero	1047,30	965,16	2961,83	2729,53
Costo total	7297,03	6321,22	9393,62	8241,61
Superficie útil	168,74	168,74	161,42	161,42
Costo por superficie útil	43,24	37,46	58,19	51,06

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 3.3. refleja la comparación entre las alternativas constructivas y las alternativas cementeras. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se puede apreciar que el costo de producción de la tecnología de bloques tradicionales es un 25% superior al costo del sistema constructivo Gran Panel. Este resultado parece estar correlacionado con los obtenidos en la evaluación ambiental. Se refuerza el criterio de que la tecnología de bloques tradicionales es intensiva en el consumo de materias primas, lo cual encarece la obra constructiva, a lo cual habría que agregarle el alto costo de mano de obra que se moviliza con relación al sistema de Gran Panel.

Si la industria del cemento en Cuba decidiera producir cemento LC3 y las empresas constructoras utilizarlo en dichas edificaciones, se podrían obtener ahorros en costo del

13% para el caso de la vivienda de Gran Panel y del 12% en el caso de la vivienda de bloques.

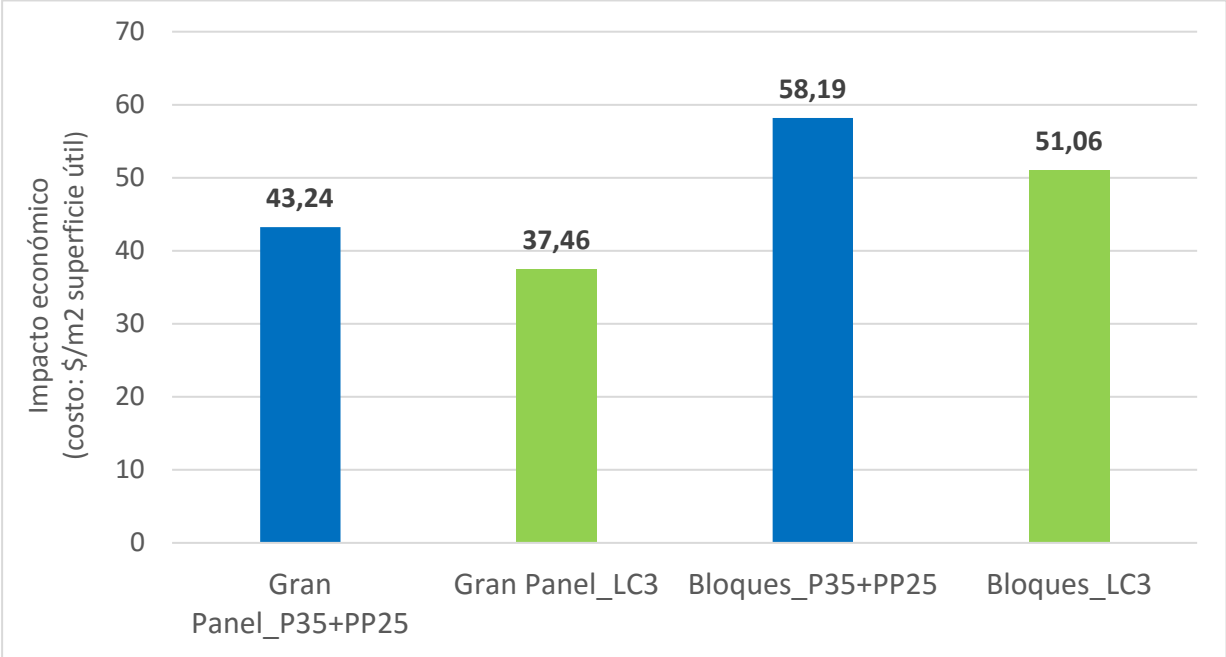


Gráfico 3.3. Comparación del costo por superficie útil para los dos biplanta objeto de estudio
Fuente: Elaboración propia

3.6. Aplicación de la Fase 6: Cuantificación de la eco-eficiencia

En el gráfico 3.4 se ha construido un portafolio de eco-eficiencia, para analizar comparativamente las alternativas en cuestión, desde las perspectivas económica y ambiental.

Gráfico 3.4. Portafolio de eco-eficiencia
Fuente: Elaboración propia

Las alternativas más eco-eficientes se ubican cerca del origen de coordenadas, pues representan aquellas tecnologías con menor costo de producción y menor impacto ambiental. En este caso, el biplanta de Gran Panel con cemento LC3 es el más eco-eficiente y el biplanta de bloques con cementos tradicionales el menos eco-eficiente.

El hecho de que la tecnología de bloques con cemento de bajo carbono no logre rebasar la eficiencia asignativa⁷ alcanzada por el método de Gran Panel con cementos tradicionales (ver gráfico 3.4), remarca la conclusión sobre la superioridad económica de Gran Panel con respecto a bloques.

En la tabla 3.9 se resume un conjunto de características de los métodos constructivos analizados, a fin de proporcionar criterios adicionales que puedan servir de base para la toma de decisiones.

Tabla 3.9. Ventajas y desventajas de los sistemas constructivos objeto de estudio

<i>Parámetro</i>	<i>Bloques tradicionales</i>	<i>Gran Panel</i>
Volumen de materiales	Mayor volumen	Menor volumen
Mano de obra	Intensiva en fuerza de trabajo.	Pequeño número de obreros.
Ejecución de la obra	Muy lento proceso constructivo.	Alta rapidez en la puesta en obra de los elementos.
Calidad total de la obra	Alta calidad, como promedio.	En muchos casos se presentan problemas de filtraciones y se requiere reajuste en las juntas de unión de los paneles.
Durabilidad	50 años, teóricamente ⁸	40 años, teóricamente

Fuente: Elaboración propia basado en criterio de especialistas pertenecientes a las empresas constructoras involucradas en el estudio.

⁷ Dígase de la eficiencia en costos, es decir, cuando se involucran los costos de los factores productivos. En los casos en que se involucre el precio de venta del producto final en contraposición a los costos, se puede entender como eficiencia económica.

⁸ Teóricamente significa que el diseño general de la edificación fue realizado para una vida útil de esa magnitud, sin embargo, se conoce que en el país existen edificaciones muy antiguas que aún resisten los embates de huracanes y otros eventos meteorológicos, lo cual no niega el hecho de que las obras se construyen para un período limitado de vida de servicio.

El análisis a realizar para determinar si un tipo de tecnología es más apropiado que otro, es multifactorial y siempre debe ser contextualizados. Algunos criterios pueden ser beneficiosos o perjudiciales dependiendo del prisma con que se le mire. Por ejemplo, el factor fuerza de trabajo, que en la tecnología de bloques tradicionales es mayor, también podría ser interpretado como una contribución al empleo en el sector constructivo, por ende, favorable al estado general de empleo en la economía nacional.

CONCLUSIONES

1. La eco-eficiencia es una categoría económica que emerge de la necesidad teórico-práctica de la ciencia de operacionalizar las dimensiones del desarrollo sostenible.
2. La eco-eficiencia posee en su contenido la noción central de maximizar la eficiencia económica de productos y procesos, así como la productividad medioambiental en el uso de los recursos naturales.
3. Aunque no existe consenso sobre cuál método de medición de eco-eficiencia resulta más conveniente y consistente conceptualmente, se pueden destacar entre los más difundidos, los siguientes: (i) construcción de ratios, (ii) portafolio de eco-eficiencia y (iii) Análisis Envoltante de Datos.
4. Las herramientas metodológicas construidas por la ciencia pueden integrarse constructivamente para evaluar la eco-eficiencia de productos y procesos, como lo son el Análisis de Ciclo de Vida y el análisis del costo económico. El procedimiento aplicado en esta investigación constituye la síntesis de técnicas ya consolidadas por la comunidad científica.
5. De acuerdo con los estudios de caso evaluados, el método constructivo de Gran Panel contribuye a mitigar el impacto ambiental con respecto a la tecnología de bloques tradicionales en aproximadamente un 22%.
6. Si la industria del cemento decidiera implementar en el país la producción de LC3, se produciría una disminución de las emisiones de CO₂ derivadas de la producción cementera-y de los materiales de construcción de él derivados-en aproximadamente un 30% para las tecnologías de Gran Panel y en un 28% para las tecnologías de bloques tradicionales.
7. El costo de producción de la tecnología de bloques tradicionales es un 25% superior al costo del sistema constructivo Gran Panel. Si la industria del cemento en Cuba decidiera producir cemento LC3 y las empresas constructoras utilizarlo en dichas edificaciones, se podrían obtener ahorros en costo del 13% para el caso de la vivienda de Gran Panel y del 12% en el caso de la vivienda de bloques.
8. En correspondencia con lo anterior, el biplanta de Gran Panel con cemento LC3 es la opción más eco-eficiente y el biplanta de bloques con cementos tradicionales el menos eco-eficiente.

RECOMENDACIONES

1. Contrastar los resultados de eco-eficiencia obtenidos en la investigación, con otros estudios de caso en la provincia de Villa Clara, particularmente en el caso de bloques tradicionales, cuyos estudios son más reducidos que los desarrollados en Gran Panel y FORSA.
2. Realizar estudios futuros en torno a las intervenciones a lo largo de la vida útil de los edificios (mantenimiento, reparación, reemplazo) para poder analizar el costo del ciclo de vida (CCV) como herramienta analítica de gran valor instrumental.

BIBLIOGRAFÍA

- Aïtcin, P.-C., 2000. Cement of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cem. Concr. Res.* 30, 1349–1359.
- Alujas, A., Almenares, R., Betancourt, S., Leyva, C., 2015a. Pozzolanic Reactivity of Low Grade Kaolinitic Clays: Influence of Mineralogical Composition, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, pp. 339–345.
- Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K.L., Martirena, F., 2015b. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Appl. Clay Sci.* 108, 94–101.
- Bohne, R.A., Brattebø, H., Bergsdal, H., 2008. Dynamic Eco-Efficiency Projections for Construction and Demolition Waste Recycling Strategies at the City Level. *J. Ind. Ecol.* 12, 52–68.
- Cancio, Y., Jiménez, N., Cordero, J., 2014. Evaluación de eco-eficiencia en la cadena productiva de una vivienda construida con cemento cubano de bajo carbono, en la ciudad de Santa Clara.
- Cancio, Y., Jiménez, N., Sánchez, I.R., 2016a. Evaluación de la eco-eficiencia del hormigón producido en la UEB-Prefabricados de Remedios a partir de la utilización del cemento de bajo carbono, in: *X Conferencia Internacional de Ciencias Empresariales*.
- Cancio, Y., Sánchez, S., Martirena, F., Sánchez, I.R., Scrivener, K., Habert, G., 2016b. Economic and ecological assessment of Cuban housing solutions using alternative cement, in: *Schlueter, A., Habert, G. (Eds.), Sustainable Built Environment Regional Conference ETH Zurich*. Zurich, pp. 292–297.
- CEMBUREAU, 2015. *The role of cement in the 2050 low carbon economy*.
- CEMBUREAU, 2011. *Activity Report 2010*.
- Cha, K., Lim, S., Hur, T., 2008. Eco-efficiency approach for global warming in the context of Kyoto Mechanism. *Ecol. Econ.* 67, 274–280.
- DeSimone, L.D., Popoff, F., 2000. *Eco-efficiency: the business link to sustainable development*. MIT press.
- Díaz, E., Martirena, F., Alujas, A., Torrent, R., 2015. Low Carbon Cement: Durability Performance Assessment with Laboratory and Site Tests, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, pp. 277–282.

- Escrig, C., 2005. Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón.
- Fenollosa, L., Clemente, G., Ribal, J., Sanjuán, N., 2009. Medición de la eco-eficiencia en la producción de chufa.
- Freeman, A.M., Haveman, R.H., Kneese, A. V, 1973. Economics of environmental policy.
- Habert, G., Billard, C., Rossi, P., 2010. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cem. Concr. Res.* 40, 820–826.
- Huppes, G., Ishikawa, M., 2005a. Eco-efficiency and Its Terminology. *J. Ind. Ecol.* 9, 43–46.
- Huppes, G., Ishikawa, M., 2005b. A framework for quantified eco-efficiency analysis. *J. Ind. Ecol.* 9, 25–41.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014. Mitigation of climate change.
- Jollands, N., Lermitt, J., Patterson, M., 2004. Aggregate eco-efficiency indices for New Zealand—a principal components analysis. *J. Environ. Manage.* 73, 293–305.
- Kicherer, A., Schaltegger, S., Tschochohei, H., Pozo, B.F., 2007. Eco-efficiency. *Int. J. Life Cycle Assess.* 12, 537.
- Kuosmanen, T., Kortelainen, M., 2005. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. *J. Ind. Ecol.* 9, 59–72.
- Leal, J., 2005. Ecoeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias. CEPAL.
- Machado, L., 2016. Evaluación de la eco-eficiencia en la cadena productiva de la producción de hormigón prefabricado UEB Remedios. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Martirena, F., 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.
- McIntyre, R., Thornton, J., 1978. On the environmental efficiency of economic systems. *Eur. Stud.* 30, 173–192.
- McIntyre, R.J., Thornton, J.R., 1974. Environmental divergence: air pollution in the USSR. *J. Environ. Econ. Manage.* 1, 109–120.
- Mickwitz, P., Melanen, M., Rosenström, U., Seppälä, J., 2006. Regional eco-efficiency indicators--a participatory approach. *J. Clean. Prod.* 14, 1603–1611.
- Montes, J., 2008. Ecoeficiencia: una propuesta de responsabilidad ambiental empresarial para el sector financiero colombiano (Tesis de Maestría. Facultad de Minas). Tesis de Grado para optar al título de Maestría en Medio Ambiente y

- Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Perez, A., Favier, A., Martirena, F., Scrivener, K., 2015. Influence of the Manufacturing Process on the Performance of Low Clinker, Calcined Clay-Limestone Portland Cement, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, pp. 283–289.
- Saling, P., Kicherer, A., Dittrich-Krämer, B., Wittlinger, R., Zombik, W., Schmidt, I., Schrott, W., Schmidt, S., 2002. Eco-efficiency analysis by BASF: the method. *Int. J. Life Cycle Assess.* 7, 203–218.
- Sánchez, S., Cancio, Y., Martirena, F., Habert, G., 2015. Assessment of Sustainability of Low Carbon Cement in Cuba. Cement Pilot Production and Prospective Case, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, pp. 189–194.
- Sánchez, S., Cancio, Y., Martirena, F., Sánchez, I.R., Scrivener, K., Habert, G., 2016a. Low carbon cement: a sustainable way to meet growing demand in Cuba, in: Schluter, A., Habert, G. (Eds.), *Sustainable Built Environment Regional Conference ETH Zurich*. Zurich, pp. 420–424.
- Sánchez, S., Favier, A., Rosa, E., 2016b. Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. *J. Clean. Prod.* 124, 361–369.
- Schaltegger, S., 1998. Accounting for eco-efficiency. *Environ. Manag. Pract.* 1, 272–287.
- Schaltegger, S., Burritt, R., others, 2000. *Contemporary environmental accounting: issues, concepts and practice*.
- Schaltegger, S., Sturm, A., 1990. *Ökologische Rationalität: Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von ökologieorientierten Managementinstrumenten*. die Unternehmung 273–290.
- Segura, I., Moragues Terrades, A., Velayos, A., Javier, J., 2008. Caracterización microestructural de materiales base cemento mediante ensayos destructivos (Parte II). *Cem. y Hormigón* 4–28.
- Soubbotina, T.P., Sheram, K., 2000. *Beyond economic growth: Meeting the challenges of global development*. World Bank Publications.
- Sturm, A., Müller, K., Upasena, S., 2004. *A Manual for the Preparers and Users of Ecoefficiency Indicators, Version 1.1*. United Nations Conference on Trade and Development.
- UNCTAD, A., 2003. *Manual for the Preparers and Users of Eco-efficiency Indicators*.
- Verfaillie, H., Bidwell, R., 2000. *Measuring eco-efficiency: a way to report company performance*.

- Vizcaíno, L., Antoni, M., Alujas, A., Martirena, F., Scrivener, K., 2015a. Industrial Manufacture of a Low-Clinker Blended Cement Using Low-Grade Calcined Clays and Limestone as SCM: The Cuban Experience, in: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. Springer, pp. 347–358.
- Vizcaíno, L., Sánchez, S., Martirena, F., Scrivener, K., 2015b. Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. *Mater. Construcción* 65.
- WBCSD, 2000. *La eco-eficiencia: creando más valor con menos impacto*.
- WCED, 1987. *Report of the World Commission on the Environment and Development: Our Common Future*.
- Zhang, B., Bi, J., Fan, Z., Yuan, Z., Ge, J., 2008. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach. *Ecol. Econ.* 68, 306–316.