

Análisis multiparamétrico de tres sistemas constructivos considerando indicadores de sustentabilidad: ambientales, económicos y energético-funcionales

Multiparametric analysis of three construction systems considering sustainability indicators: environmental, economic and energy-functional

Carla Bucio-Sistos (*), Luis Bernardo López-Sosa (**), Mario Morales-Máximo (***)

RESUMEN

El presente estudio muestra un análisis multiparamétrico de tres sistemas constructivos elaborados de tabiques y block de cemento. El análisis se realizó considerando como unidad funcional un metro cuadrado de muro de construcción para cada tabique y block, e incluyendo indicadores de sustentabilidad: (a) ambientales, a través del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), evaluando categorías de impacto como calentamiento global, acidificación y eutrofización (b) económicos, estimando el costo de materias primas y costo de construcción para la unidad funcional y (c) energético-funcionales, mediante la resistencia mecánica, la resistividad térmica y resistencia acústica de los materiales de construcción analizados. También se realizó una simulación térmica con los ladrillos estudiados. El análisis resultante es herramienta comparativa que muestra las diferencias entre los materiales estudiados y representa una metodología para la toma de decisiones con base en la importancia de cada uno de los indicadores propuestos.

Palabras clave: ACV; Construcción; Sustentabilidad; Ecológico; Sistema constructivo

ABSTRACT

The present study shows a multiparametric analysis of three construction systems made of partitions and concrete block. The analysis was carried out considering as a functional unit a square meter of construction wall for each partition and block, and including sustainability indicators: (a) environmental, through the Life Cycle Analysis (LCA), evaluating impact categories such as warming global, acidification and eutrophication (b) economic, estimating the cost of raw materials and construction cost for the functional unit and (c) energy-functional, through the mechanical resistance, thermal resistivity and acoustic resistance of the analyzed construction materials. A thermal simulation was also carried out with the bricks studied. The resulting analysis is a comparative tool that shows the differences between the studied materials and represents a methodology for decision-making based on the importance of each of the proposed indicators.

Keywords: ACV; Building; Sustainability; Ecological; Construction system

(*) Licenciada en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia (México).

(**) Doctor en Ciencia de Materiales. Profesor Investigador. Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Pátzcuaro (México).

(***) Maestro en Ciencias en Tecnología de la Madera. Profesor Investigador. Universidad Vasco de Quiroga, Morelia (México).

Persona de contacto/Corresponding author: lbernardo.lopez@uiim.edu.mx (Luis Bernardo López-Sosa)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9898-6773> (Carla Bucio-Sistos) <https://orcid.org/0000-0001-9284-737X> (Luis Bernardo López-Sosa) <https://orcid.org/0000-0002-5036-5097> (Mario Morales-Máximo)

Cómo citar este artículo/Citation: Carla Bucio-Sistos, Luis Bernardo López-Sosa, Mario Morales-Máximo (2022). Análisis multiparamétrico de tres sistemas constructivos considerando indicadores de sustentabilidad: ambientales, económicos y energético-funcionales. *Informes de la Construcción*, 74(567): e461. <https://doi.org/10.3989/ic.87813>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 18/02/2021
Aceptado/Accepted: 15/03/2022
Publicado on-line/Published on-line: 16/09/2022

1. INTRODUCCIÓN.

Actualmente el uso de combustibles fósiles y los esquemas de producción industrial generan continuamente la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI); el crecimiento demográfico produce incrementos en el consumo de recursos naturales no renovables (1–3). Se espera que entre los años 2004 y 2030 el consumo de energía en diversos países aumente de un 46% a 58% (4), por ende también la generación de emisiones. Pese a la problemática ambiental actual, las emisiones de GEI y específicamente de CO₂ a la atmósfera siguen en aumento, muchas de las cuales provienen de la producción de cemento en el mundo. Dicho incremento es una de las consecuencias vinculadas al crecimiento poblacional, específicamente en zonas urbanas, el cual propicia un aumento en la construcción de viviendas de concreto. En este sentido, una perspectiva de sustentabilidad sugiere que la arquitectura convencional, aquella que utiliza materiales de construcción como el cemento, ladrillos rojos, estructuras metálicas y aditivos para viviendas de construcción, está altamente relacionada con el cambio climático, emitiendo grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera y mermando la cantidad de recursos naturales disponibles en el planeta (5,6). Entre los principales materiales de construcción convencionales predominan el tabique de barro cocido o recocido, ladrillo, block, piedra, cantera y mortero para muros. Conociendo que el uso de construcciones convencionales expulsa el 7% de las emisiones totales del país y desechan aproximadamente 16,660 toneladas de residuos diariamente (7), comúnmente depositadas en sitios clandestinos como terrenos baldíos o en áreas verdes (8) a pesar de que éstos últimos se encuentran catalogados como residuos de manejo especial, es imperante generar cambios en las formas de construcción y uso de materiales; adicionalmente es necesaria la incorporación de cierre de ciclos materiales que permitan generar eficiencia en los procesos constructivos por una parte, fomentando que las dimensiones de sustentabilidad ambiental, económica y de confort social imperen y se fomente la realización de sistemas constructivos más asequibles, justos y sustentables (9,10). Además, la secretaría de energía de México estima que la industria de fabricación de cemento y productos a base de este consume una gran cantidad de energía, posicionándose en la segunda mayor consumidora del país, seguida por PEMEX (11). Aunado a lo anterior, una de las desventajas que presenta el cemento es su incapacidad de regresar a su estado natural una vez que entra en contacto con el agua, lo que imposibilita su reutilización y compele a hacer uso de este únicamente cuando es nuevo (12). Otros problemas adicionales al cambio climático son la contaminación paisajística, la acidificación, eutrofización, pérdida de nichos ecológicos, y generación de paisajes constructivos alternativos a los naturales. Por lo anterior, resulta necesario estudiar los sistemas constructivos desde su composición unitaria en materiales del tipo ladrillo para optimizar procesos de la construcción. Materiales como el block de concreto han sido estudiados y se evidenciando las emisiones asociadas de forma representativa dentro de sistemas constructivos complejos (8). Algunas investigaciones también han realizado análisis de ACV (13), para estudiar distintos tipos de ladrillos y determinar impactos ambientales y energéticos. Otros estudios, han reportado el proceso de fabricación de estos materiales vinculados con su impacto ambiental (14); y en algunos se ha utilizado el ACV para toma de decisio-

nes, con aquellos ladrillos de mejores características y menor impacto ambiental (15).

Este estudio muestra el análisis comparativo de tres sistemas constructivos, considerando indicadores de sustentabilidad, evaluando aspectos ambientales, económicos y energético funcionales. La finalidad del estudio es mostrar una metodología inclusiva de análisis de impactos ambientales, beneficios económicos y determinación de efectividad costo beneficio, de acuerdo con las propiedades energéticas y funcionales de los materiales de construcción. De la misma forma evaluar tres diferentes tipos de materiales para construcción (ladrillos): el tabique rojo tradicional, el block de concreto y el tabique rojo industrial de reciente uso en viviendas de interés social.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para este análisis se consideró un metro cuadrado de muro de construcción como unidad funcional (Desde ahora, denominado sistema constructivo); esta definición se utilizó para el análisis de los parámetros ambientales y económicos, mientras que, para los resultados energético-funcionales, se consideraron las propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de un ladrillo de cada sistema constructivo, los límites de cada parámetros están ceñidos a: el ACV para los impactos ambientales, los costos por metro cuadrado para el análisis económico, y un análisis multicriterio para las propiedades energético-funcionales. Se evaluaron tres sistemas constructivos (Figura 1 a): (a) el primero constituye una construcción de 1 m² de muro mayoritariamente hecho de block hueco de concreto (o block de concreto, elaborado de arena y cemento) de 12 x 20 x 39.8 cm juntado con mortero con espesor promedio en junta de 1.2 cm (b) el segundo se compone de una construcción de muro de 1 m² de tabique rojo industrial (tabique industrial, procesado en fábricas de producción intensiva) de 12 x 24 x 12 cm juntado con mortero con espesor promedio en junta de 1 cm (c) el tercer sistema representa 1 m² de muro de tabique rojo tradicional (tabique tradicional, elaborado artesanalmente con arcilla y materiales locales) de 12.5 x 5.5 x 25 cm con juntas de mortero de 1.5 cm de espesor (Figura 1f). Los sistemas constructivos pretenden ser representaciones a través de una simulación de construcción en viviendas (Figura 1b), y para el alcance de este estudio, los análisis se consideran en la disposición de uso final para la ciudad de Morelia, México (19.64,-101.22). De cada parámetro se formularon indicadores que a continuación se describen.

2.1. Indicadores de impacto ambiental

Con referencia a la metodología de ACV, y debido a que no existen co-productos en la construcción de muros tanto convencionales como ecológicos, no existen criterios de asignación que se hayan considerado. Se utilizarán fuentes de datos primarios y secundarios. Los primeros provienen de la recolección directa de información, así como de documentos publicados; estos datos serán correspondientes al cálculo de materiales, así como el transporte de estos a la obra (Disposición final). Así, los datos restantes, representando aquellos secundarios, se originarán de la base de datos NREL. Cabe destacar que se analizarán únicamente aquellos materiales utilizados para la edificación de la estructura arquitectónica, es decir, aquellos requeridos para instalaciones eléctricas, hidráulicas y de drenaje serán excluidos.

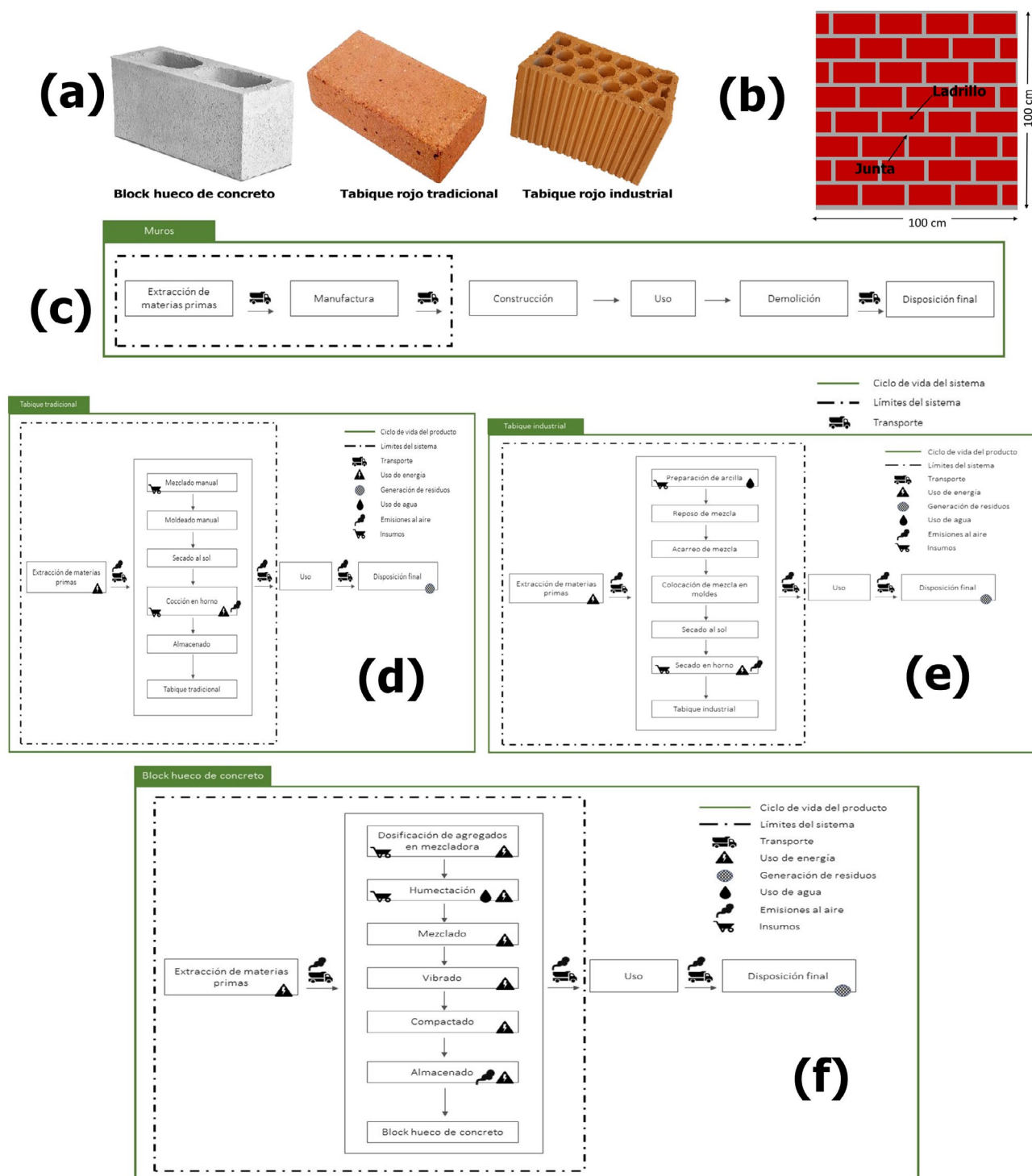


Figura 1. (a) ladrillos de análisis (b) sistema constructivo estudiado. Límites del sistema de: (c) muros (d) tabique tradicional (e) tabique industrial (f) Block de cemento hueco.

Además, no se incluirán los materiales requeridos para la elaboración de dadas, castillos y para la construcción de cimientos y sobrecimientos de los muros, ni aquellos necesarios para la instalación de puertas y ventanas. Puesto que la unidad funcional se ha definido como 1 metro cuadrado de muro constructivo, no se consideran otros materiales estructurales. Para el análisis el ACV se utilizó la metodología descrita en la normas ISO 14040, la definición del alcance se muestra en este apartado, el análisis de inventario y evaluación de impactos se describen en el subtema

siguiente y la interpretación de resultados se muestra en los resultados de esta investigación; se ha seleccionado esta metodología debido a la disposición de datos in situ, así como a las investigaciones análogas para evaluación de impactos ambientales en ladrillos (8,14,15).

De acuerdo con algunas investigaciones sobre los principales impactos derivados de la construcción convencional (7,16–20), los impactos a evaluar estarán relacionados a la emisión de GEI (Kg CO₂-eq), a la acidificación (Kg SO₂-eq)

y a la eutrofización (Kg PO₄-eq), que serán las categorías de impacto y los indicadores ambientales del presente estudio. Además, para el caso de estudio, estos indicadores son posibles de obtener considerando la base de datos que se utilizará y el análisis de datos in situ.

2.1.1. Análisis de Inventario

De las etapas del ciclo de vida de una construcción según el estándar EN 15643-2 del CEN/TC 350, se tomaron en cuenta dentro de los límites de los sistemas (Figura 1) la extracción de materia prima, el transporte a la planta, su procesamiento y el transporte de materiales a la obra para fabricación de los tabiques y block de estudio. El proceso de producción de blocks huecos de concreto, en su mayoría automatizado, llevado a cabo en una empresa mexicana ubicada en Morelia, Michoacán -cuyo nombre no puede mencionarse debido a cuestiones de confidencialidad- se describe a continuación. Primeramente, los agregados son extraídos y transportados desde un banco de agregados ubicado en la carretera Morelia-Salamanca, a la planta, recorriendo aproximadamente 22 km, mientras que el cemento se recoge de un depósito ubicado a 126 km de la planta. Posteriormente, en la planta, se dosifican los tres agregados (arena fina, arena gruesa y grava 3/8") en una mezcladora; la mezcla se humecta y se le agrega cemento para después ser dosificada sobre un molde en donde será expuesta a vibraciones y posteriormente compactada y desmoldada sobre una placa de acero. Las piezas formadas sobre las placas se guardan en racks o estantes, mismos que son trasladados a cuartos de curado para depositar las piezas sobre tarimas de madera. Finalmente, terminado el proceso automatizado, con ayuda de un montacargas a diésel, una persona almacena los productos terminados y listos para su venta. Cabe mencionar que la electricidad es utilizada durante los procesos de dosificación, humectación, mezclado, llenado de moldes, vibrado, compactado y almacenamiento. Por su parte, el montacargas requiere de aproximadamente 350 litros de diésel para el transporte de 500,000 piezas de producción. Dicho lo anterior, el inventario para la producción de blocks huecos de concreto de 12 x 20 x 39.8 cm necesarios para la construcción de 1 m² de muro, cuyos datos fueron proporcionados por la empresa mencionada anteriormente, y se muestran en la Tabla 1 (Fuente: Recolección de datos de fábrica de blocks de concreto en Morelia, Michoacán). Los impactos de extracción, fabricación, moldes, mermas, residuos son considerando a partir de la fabricación de lotes unitarios de producción.

Así, el inventario de insumos para la construcción de 1 m² de muro construido a partir de block hueco de concreto de 12x20x39.8 cm, juntado a 1.5 cm con mortero, se aprecia en la Tabla 2. Se supondrá que el centro de distribución del cemento de albañilería o mortero será el establecimiento llamado Construmundo de Morelia el cual se ubica a 4.5 km del punto de referencia donde se realiza el análisis.

Los elementos principales para la fabricación del tabique industrial, la arcilla honey, arcilla Genérica y la Ahuacatlán, son extraídas de distintos lugares y llevadas a la planta de producción, sumando 124.5 km de transporte aproximadamente. Asimismo, otro elemento importante, el papel, se trae desde una papelería ubicada en ciudad Sahagún, a 80 km de distancia. Posteriormente, se preparan los diferen-

Tabla 1. Insumos para la producción de blocks huecos de concreto necesarios para 1 m² de muro.

Concepto de Transporte a la planta	Distancia (Km)	Toneladas por kilómetro (tkm)	Proveedor
Cemento	126	7.76E-05	Transport freight, lorry diesel GLO Alloc Def, S (tkm) Ecoinvent
Agregados	22	0.00507	Transport freight, lorry diesel GLO Alloc Def, S (tkm) Ecoinvent
Materiales	Cantidad	Unidad	Proveedor
Arena fina	41.328	kg	Sand, gravel, clay, phosphate, other nonmetallic minerals; at mine. USD (2017) NREL
Arena gruesa	36.54	kg	
Sello (grava 3/8")	44.35	kg	
Cemento	10.71	kg	Portland cement, at plant. Kg NREL
Agua	8.82	kg	Drinking water and wastewater treatment; at consumer. USD (2017) NREL
Agua en aspersión	2.268	kg	
Energía	Cantidad	Unidad	Proveedor
Electricidad	2.494	MJ	Electricity, low voltage (MX) market for Alloc Def, S (kwh) Ecoinvent
Diésel	0.317	MJ	Diesel consumption; Diesel fired equipment; Variable power rating MJ NREL
Transporte Distribuidora	Km	Tkm	Proveedor
Blocks a CEDI	4.6	0.6259	Transport freight, lorry diesel GLO Alloc Def, S (tkm) Ecoinvent

Tabla 2. Insumos para la construcción de 1 m² de muro construido a partir de block hueco de concreto. Fuente: <http://www.mexico.generadordeprecios.info/>

Transporte a la obra	Km	tkm	Proveedor
Blocks	20	2.7216	Transport freight, lorry diesel GLO Alloc Def, S (tkm) Ecoinvent
Mortero	4.5	0.1071	
Agua	0	0	
Materiales	Cantidad	Unidad	Proveedor
Blocks	12.6	piezas	Blocks concreto Cement mortar (RoW) market for mortar Alloc Def, S Ecoinvent
Mortero	23.8	kg	
Agua	4	kg	Drinking water and wastewater treatment; at consumer. USD (2017) NREL

tes tipos de arcilla y se mezclan con papel y agua para dejar en reposo. Una vez homogénea, la mezcla se acarrea y se coloca en moldes para exponerlos al sol. Ya secos, los moldes se introducen en hornos que utilizan gas natural para

su funcionamiento. Finalmente, los tabiques son almacenados y están listos para su distribución. Dicho lo anterior, el inventario para la producción de tabiques industriales de 12x12x24 cm necesarios para la construcción de 1 m² de muro se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Insumos para la producción de tabiques industriales necesarios para 1 m² de muro (8,21).

Transporte a la planta	Km	tkm	Proveedor
Papel	80	2.65E-01	Transport freight, lorry diesel GLO
Arcilla total	124.5	1.21E-01	Alloc Def, S (tkm) Ecoinvent
Materiales	Cantidad	Unidad	Proveedor
Arcilla total	41.2393	kg	Sand, gravel, clay, phosphate, other nonmetallic minerals; at mine. USD (2017) NREL
Arena	113.2747	kg	
Papel	3.3153	kg	Paper; at manufacturer. USD (2017) NREL
Agua	8.1778	kg	Drinking water and wastewater treatment; at consumer. USD (2017) NREL
Vapor de agua	6.6307	kg	
Energía	Cantidad	Unidad	Proveedor
Electricidad	16.5767	MJ	Electricity, low voltage (MX) market for Alloc Def, S (kwh) Ecoinvent
Gas natural	193.3959	MJ	Natural gas, at industrial user - MX - CMM (Güereca, 2017)
Transporte a distribuidora	Km	tkm	Proveedor
Tabique a CEDI *	412	43.1026	Transport freight, lorry diesel GLO
CEDI a punto de venta **	5.3	0.5544	Alloc Def, S (tkm) Ecoinvent

Cabe destacar que los tabiques rojos industriales son transportados a un centro de distribución (CEDI) en Morelia desde la planta de Tlaxcala, a 412 km aproximadamente, y posteriormente llevados a 5.3 km a un establecimiento para su venta. Por su parte, al igual que en el caso del sistema de muro de block hueco de concreto, se supondrá que el mortero se obtendrá de Construmundo (empresa local). Así, el inventario de insumos para la construcción de 1 m² de muro construido a partir de tabique industrial de 12x12x24 cm, juntado a 1 cm con mortero, se puede visualizar en la Tabla 4.

En cambio, el tabique rojo tradicional producido en la ciudad de Morelia, Michoacán, resulta de un proceso de producción que se basa en la utilización de un horno de leña. La materia prima se extrae y se transporta a los lugares de producción, a km de distancia. Posteriormente, se realiza un mezclado manual de los insumos para después añadir la mezcla a moldes que formarán los tabiques. Una vez formados los tabiques rojos tradicionales, son expuestos al sol para introducirlos a hornos de cocción, utilizando como combustible leña y aserrín para alcanzar temperaturas que van desde 875 °C hasta más de 1000 °C. Finalmente, los tabiques son almacenados y transportados a puntos de venta, a 1 km de distancia del punto de referencia de análisis. Las Tablas 5 y 6 muestran el inventario para la producción de 1 m² de muro de tabique

Tabla 4. Insumos para la construcción de 1 m² de muro construido a partir de tabique industrial. Fuente: <http://www.mexico.generadordeprecios.info/>

Transporte a la obra	Km	tkm	Proveedor
Tabiques	20.1	2.1027	Transport freight, lorry diesel GLO
Mortero	4.5	0.08606	Alloc Def, S (tkm) Ecoinvent
Agua	0	0	-
Materiales	Cantidad	Unidad	Proveedor
Tabiques	30.77	piezas	Tabiques
Mortero	30.38	kg	Cement mortar (RoW) market for mortar Alloc Def, S Ecoinvent
Agua	5	kg	Drinking water and wastewater treatment; at consumer. USD (2017) NREL

Tabla 5. Insumos para la producción de tabiques rojos tradicionales necesarios para 1 m² de muro: para tabiques.

Transporte a la planta	Km	tkm	Proveedor
Tierra	5	1.0773	Transport freight, lorry diesel GLO
Leña	3	0.0472	Alloc Def, S (tkm) Ecoinvent
Materiales	Cantidad	Unidad	Proveedor
Tierra	215.46	kg	Sand, gravel, clay, phosphate, other nonmetallic minerals; at mine. USD (2017) NREL
Agua	15.75	kg	Drinking water and wastewater treatment; at consumer. USD (2017) NREL
Leña	22.05	kg	Recolección de datos local
Energía	Cantidad	Unidad	Proveedor
Leña	347.13	MJ	Recolección de datos local

Tabla 6. Insumos para la producción de tabiques rojos tradicionales necesarios para 1 m² de muro: tabiques y junta.

Transporte a la obra	Km	tkm	Proveedor
Tabiques	5	0.9135	Transport freight, lorry diesel GLO
Mortero	4.5	0.2025	Alloc Def, S (tkm) Ecoinvent
Agua	0	0	-
Materiales	Cantidad	Unidad	Proveedor
Tabiques	63	piezas	Tabiques
Mortero	45	kg	Cement mortar (RoW) market for mortar Alloc Def, S Ecoinvent
Agua	8	kg	Drinking water and wastewater treatment; at consumer. USD (2017) NREL

tradicional de los materiales requeridos incluido la junta de estos tabiques con cemento (Fuente: recolección de datos en empresa de fabricación local).

2.2. Indicadores Económicos

Con base en recolección de datos in situ y mediante el uso del software online Generador de Precios México (<http://www.mexico.generadordeprecios.info/>), se realizó la estimación de costos y formulación de indicadores: (a) costo de materias primas para construcción de unidad funcional de análisis y (b) costos de mano de obra para la fabricación de unidad funcional. Los costos totales asociados a la materia prima se consideran en pesos mexicanos (MXN), y son los siguientes: block hueco de concreto \$189.14, tabique industrial \$222.92 y tabique tradicional \$370.96.

Para la construcción de 1 m² de muro de tabique rojo industrial se requiere de personas especializadas en trabajos de construcción, específicamente de mampostería. Por lo que, para dicha construcción son necesarios un oficial albañil y un peón albañil, ambos especializados en trabajos de mampostería. El oficial albañil requiere de 0.721 horas/m² con un costo de \$ 82.84 / hora, mientras que el peón de 0.441 horas con un costo de \$41.82 / hora. Así, el costo aproximado de la mano de obra para la construcción de 1 m² de muro de tabique industrial es de \$78.17. En cuanto a la mano de obra para la construcción de 1 m² de muro de block hueco de concreto, se requieren un oficial albañil especializado en trabajos de albañilería, así como un ayudante de las mismas características. El primero de ellos requiere de 0.414 horas/m² de construcción con un costo de \$ 82.84/hora, mientras que el ayudante tiene un rendimiento de 0.260 horas/m² con un costo de \$ 41.82/hora. Así, el costo de la mano de obra para la construcción de 1 m² de muro de block hueco de concreto es de \$ 45.17. Por último, la mano de obra necesaria para muros de mampostería de tabique recocido tradicional requiere de un albañil especializado en trabajos de mampostería, así como un peón con las mismas características. Sumando el total del costo de mano de obra resulta en \$ 85.62 por m² de muro construido.

2.3. Indicadores energético-funcionales y análisis multiparamétrico.

De acuerdo con el Código de Edificación de Vivienda Mexicano (22), los materiales en muros exteriores para edificaciones deben permitir la amortiguación de la temperatura exterior con el fin de lograr el confort térmico dentro de la vivienda. Con referencia a la norma mexicana NMX-C-460-ONNCE-2009, en este estudio se considera como un indicador funcional a la resistencia térmica (m²K/W) de los materiales analizados (23) que establece que los valores mínimos de resistencia térmica en muros envolventes deben ser de mínimo 1 m² K/W para todas las regiones de México, considerado el contexto de mayor aislamiento térmico como indicador de calidad. En otro sentido, con base en la norma española NBE-CA-88 (24) y el código técnico de la edificación en España (CTE) misma que establece las condiciones mínimas de forma integral del nivel acústico aceptable para proteger a los ocupantes de las construcciones de las fuentes internas y externas de ruido que ocasionan molestias tanto físicas como psíquicas (25), otro indicador funcional es el aislamiento acústico (dB). También, las propiedades de resistencia a compresión de

los materiales de construcción resultan de gran relevancia al evaluar las capacidades sísmo-resistentes de estos. Por lo que el tercer indicador funcional corresponde a la resistencia mecánica de los materiales analizados (kg/cm²) (26), este indicador se ha considerado en un contexto de confiabilidad a mayores valores. Todos los parámetros, e indicadores que derivan de ellos, se han integrado mediante el análisis multicriterio para evaluar de forma comparativa los tres casos de estudio. Esta metodología se ha utilizado en evaluación de sistemas, tecnologías y procesos con indicadores de sustentabilidad (27–29). Finalmente, con la intención de reproducir mediante condiciones controladas la operación en campo de cada ladrillo analizado y comparar su funcionamiento y debido a que el análisis térmico al interior de la vivienda es de suma importancia (30–32), se realizó una simulación mediante el software Solidworks® (42), considerando 3 construcciones de las mismas dimensiones, una para cada ladrillo. Se supuso la temperatura ambiente y latitud de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, y se consideró una irradiancia solar estándar de 1000 w/m² durante el intervalo de prueba.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de inventario se ingresaron a la base de datos generada a partir de aquella de NREL y los anteriores se caracterizaron mediante el método de evaluación de impacto ReCiPe midpoint (33), que se traduce en un sistema de evaluación de las emisiones y la extracción de recursos en un número limitado de puntajes de impacto ambiental por medio de los llamados factores de caracterización. Los impactos potenciales se agruparon en las siguientes categorías de impacto (indicadores ambientales): potencial de calentamiento global, potencial de acidificación y potencial de eutrofización. El índice de Potencial de Calentamiento Global mide la cantidad de calor que un gas de efecto invernadero puede retener en la atmósfera por determinado tiempo (en este caso 100 años) y de esta manera se puede contribuir al calentamiento global, medido en kg de CO_{2eq}. Por su parte, el índice de Potencial de acidificación, medido en SO_{2eq}, corresponde a la capacidad que tiene una sustancia de acidificar el suelo o el agua. Así, la eutrofización, incluye las emisiones que contribuyen al aumento excesivo de nutrientes en el agua derivadas de la construcción de la unidad funcional (1 m²). La Figura 2(a), muestra los resultados de estos indicadores ambientales asociados a las materias primas necesarias para la fabricación de la unidad funcional de estudio, con el fin de vislumbrar los impactos ambientales derivados únicamente de la producción de los tabiques rojos y el block, se procedió a excluir en este análisis los materiales que conforman las juntas.

En cambio, la figura 2(b) muestra los kilogramos de CO_{2eq}, PO_{2eq} y SO_{2eq} que derivan de la extracción de materias primas y su procesamiento para la elaboración de 1 m² de muro de tabique industrial, block de concreto y tabique tradicional, incorporando el material necesario para las juntas.

Los resultados muestran una huella de carbono elevada para el m² de muro construido con tabique tradicional (55.61 KgCO_{2eq}) en comparación de los demás muros (27.98 KgCO_{2eq} tabique industrial y 32.95 KgCO_{2eq} block de concreto). Lo anterior se debe principalmente a las emisiones derivadas de la incompleta combustión de leña en los hornos tradicionales. Además, se aprecia un valor alto

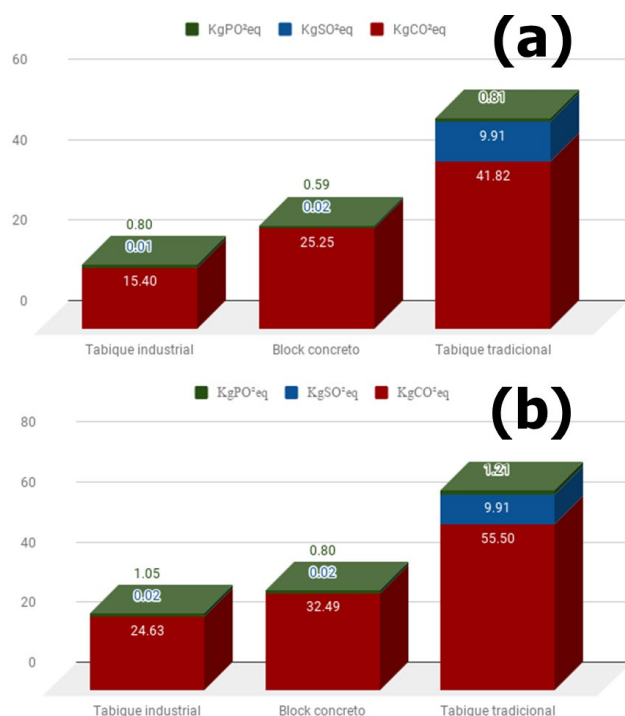


Figura 2. Impactos ambientales asociados a las materias primas para la construcción de la unidad funcional: (a) producción tabiques y block (b) incluyendo juntas.

de potencial de acidificación en el ciclo de vida del mismo muro debido al nitrato (NO₃) emitido durante la combustión en hornos de leña. Los resultados de potencial de eutrofización para el muro de tabique rojo tradicional representan aquellos de mayor impacto por una diferencia mínima entre este y el muro de tabique industrial a pesar de que el segundo utiliza una mayor cantidad de materiales para su fabricación. Por otro lado, las emisiones de CO_{2eq} resultantes de la construcción del muro de block hueco de concreto son consecuencia de la producción de cemento y del uso de mortero, mientras que aquellas de SO_{2eq} provienen principalmente del mortero para la adición de blocks.

Además, el agua utilizada en la producción de blocks aporta la mayor cantidad kilogramos de PO_{2eq} para el mismo muro. Por último, el muro de menor impacto ambiental en el presente estudio, aquel elaborado a partir de tabique industrial, emite Kg de CO_{2eq} debido principalmente al uso de gas natural y mortero. La Figura 2 (a), muestra que la producción de tabiques industriales necesarios para la construcción de 1 m² de muro tiene un impacto ambiental menor comparada con la producción de blocks de concreto y tabiques tradicionales, de 15.40 Kg de CO_{2eq}, 25.25 Kg de CO_{2eq} y 55.50 Kg de CO_{2eq} respectivamente. En lo que respecta al potencial de acidificación, el uso de mortero sigue siendo el principal emisor de gases acidificantes. Para el caso del PO_{2eq} emitido durante el ciclo de vida de 1 m² de muro de tabique industrial se muestra la mayor cantidad de kilogramos al utilizar agua para la producción de tabiques. Lo dicho hasta ahora supone que el ciclo de vida de 1 m² de muro de tabique industrial mantiene una relación más armónica con el ambiente que los demás sistemas, no obstante, hay que tener en cuenta las emisiones derivadas del transporte de materiales desde la manufactura hasta el sitio en donde se realiza la obra, expuestas en la Figura 3.

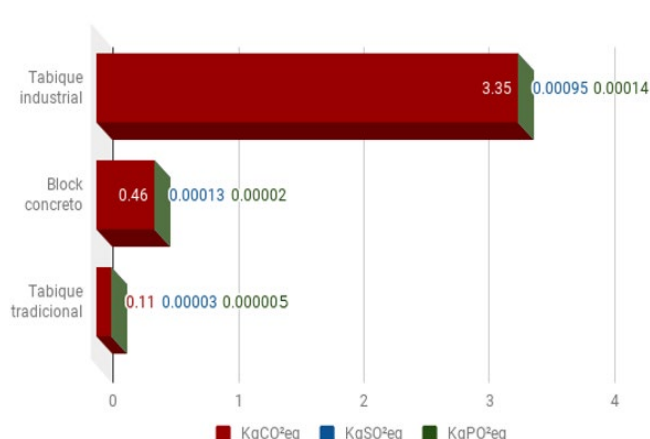


Figura 3. Impactos ambientales asociados al transporte de materias primas de la unidad funcional de análisis.

No obstante, al incorporar los resultados del transporte a los impactos derivados de la producción de materiales para la construcción de 1 m² de muro, aquel con menor impacto hacia el ambiente sigue siendo el muro elaborado a partir de tabique industrial (Figura 4), con 27.98 KgCO_{2eq}, 0.021 KgSO_{2eq} y 1.05 KgPO_{2eq} seguido por el de block de concreto con 32.95 KgCO_{2eq}, 0.020 KgSO_{2eq} y 0.8 KgPO_{2eq}, siendo el muro de tabique tradicional el mayor contaminante.

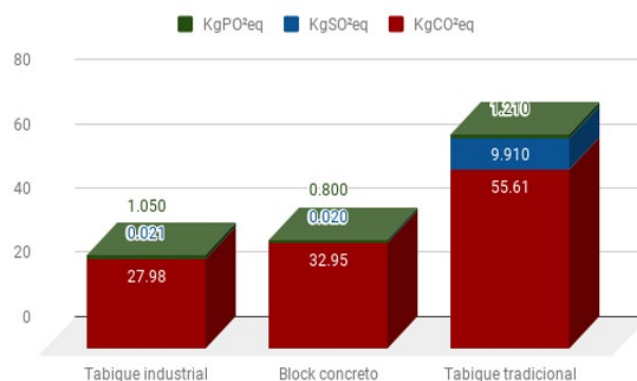


Figura 4. Impactos totales por m² de muro.

Los datos explícitos que sustentan todos los resultados del ACV se muestran en el material suplementario al presente artículo.

3.1. Análisis económico

Los gastos por concepto de la unidad funcional se atribuyen principalmente a los insumos, mientras que la mano de obra sólo representa una parte por debajo de la mitad del costo de los materiales (Figura 5). Se aprecia claramente que el mayor costo por construcción de la unidad funcional se atribuye a aquella realizada con tabique tradicional. Adicionalmente los tiempos de fabricación de cada muro varían en cada caso, dependiendo de diversos factores, pero se estimó mediante un muestreo en industrias locales de construcción el tiempo de fabricación de la unidad funciona, que puede enlistarse en rapidez de construcción como sigue: el block de concreto, el tabique rojo industrial y el tabique rojo tradicional. En los casos donde los valores son extremadamente similares, cabe resaltar que los cam-

bios que podrían suponer las fuentes de datos o los límites del sistema. Sin embargo, existe una tendencia significativa que los diferencia en los indicadores analizados.

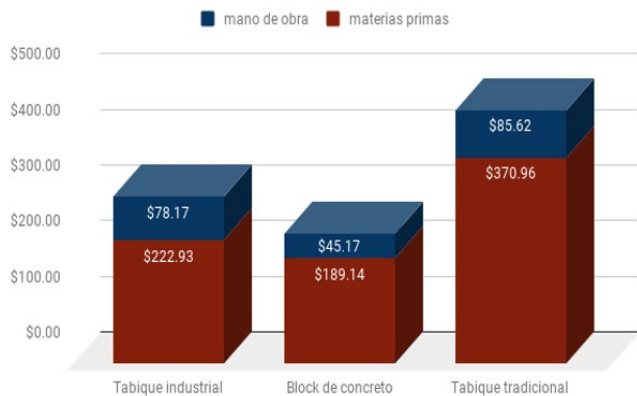


Figura 5. Costos totales por sistemas constructivos.

3.2. Análisis Energético Funcional

La resistencia térmica de la pieza de block hueco de concreto es de 0.36 m²K/W (34). Por otro lado, la resistencia térmica de los muros de tabique industrial adicionados con mortero es equivalente a 1.013 m²k/W (23). Lo anterior nos indica que los muros de tabique industrial no requieren aislantes adicionales debido a que cumplen con los valores mínimos de resistencia térmica especificados en la norma NMX-C-460-ONNC-CE-2009 (35). Por su parte, los valores de resistividad térmica del tabique rojo tradicional corresponde a 0.13 m²k/W (36,37). Análogo al caso de los indicadores económicos, con fines de realizar un análisis comparativo integrado al final de este capítulo, se define un caso ideal de baja conductividad térmica, por lo que cabe destacar que se utilizó como caso ideal la resistencia térmica del material denominado “tablaroca”, cuya resistividad térmica es 1.0557 m²K/W (38).

Por otra parte, de acuerdo al Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (25), la resistencia acústica del tabique industrial corresponde a 46.4 dB, mayor a la que se muestra para el tabique tradicional (40 dB), mientras que para un block de concreto cuyo espesor es de 12 centímetros de concreto preparado es de 48 dB. El caso ideal de mayor ponderación lo tiene el concreto para espesores de 12 cm, cuya resistencia acústica es del orden de 57dB. Este indicador se pondera considerando que a mayores resistencias acústicas mejor será el desempeño.

La resistencia a compresión de la mampostería de tabique industrial corresponde a 60 kg/cm² (23), mientras que la pieza de block hueco de concreto de 12 x 20 x 39.8 cm tiene una resistencia del mismo tipo de 70 Kg/cm (25,37). Por su parte, la resistencia a compresión que presentan las piezas de tabique rojo tradicional, es decir, el tabique tradicional aquí estudiado, es de aproximadamente 52.45 Kg/cm² (39). Así, para realizar el análisis comparativo, las propiedades mecánicas que se definieron para el caso ideal fueron las de un muro de concreto de 12 cm de espesor, con resistencia de 200 kg/cm².

3.3. Análisis integrado

De forma integrada los resultados del análisis multiparamétrico incorporan todos los indicadores definidos en

este trabajo. La metodología utilizada para formar una escala comparativa normalizada se basa en el trabajo de marcos de evaluación (27–29). En este caso, para mostrar los resultados del análisis de los tres sistemas constructivos estudiados, se ha definido una escala máxima y mínima; donde los parámetros ambiental y económico, así como los indicadores de resistencia mecánica y aislamiento acústico, poseen sus valores máximos considerando que la unidad funcional de análisis fuese totalmente de concreto, mientras que el indicador de resistencia térmica se ha considerado para la tablaroca para suponer un valor de resistencia térmica alto. A su vez, los indicadores de calentamiento global y acidificación se refieren al caso del tabique rojo tradicional por sus altos niveles obtenidos en este estudio (Tabla 7).

Tabla 7. Definición de valores máximos y mínimos.

Parámetro	Indicador	Valor máximo	Valor mínimo
Ambiental	Calentamiento global (Kg CO ₂ -eq) [tabique rojo tradicional]	139.67	0
	Acidificación (Kg SO ₂ -eq) [tabique rojo tradicional]	9.91	0
	Eutrofización (Kg PO ₄ -eq) [Cemento]	1.21	0
Económico	Costo de Materia Prima (\$) [Cemento]	\$2,295.23	0
	Costo mano de obra por unidad funcional (\$) [Cemento]	\$478.44	0
Energético-funcional	Resistencia térmica (w/m ² K) [Tabla roca]	1.0557	0
	Resistencia mecánica a compresión (kg/cm ²) [Cemento]	200	0
	Aislamiento acústico (dBl) [Cemento]	57	0

El análisis multiparamétrico integrado de esta propuesta consiste en la construcción de una escala general para todos los indicadores, por lo que cada uno debe ser normalizado a una escala sencilla de integración de resultados que va de 0 a 10, donde 0 es el peor escenario y 10 el mejor. No todos los valores máximos de la Tabla 7 representan la escala de ponderación 10, depende del tipo de indicador que se analice. Por ejemplo, los indicadores económicos para valores máximos indican que el costo de los materiales y mano de obra es bajo, y viceversa, tendrán menor ponderación cuanto mayor sean los costos. Por lo anterior, los valores de ponderación de cada indicador que corresponda determinado caso de estudio, serán de 0 a 10, cuya normalización para este análisis se muestra en la Tabla 8.

Finalmente, los valores obtenidos se integran en una gráfica radial y se puede analizar de acuerdo al criterio del tomador de decisiones, qué indicadores y parámetros tienen más importancia y, en consecuencia, cuál es el material de elección. El sesgo de la decisión poder estar orientado al parámetro ambiental económico y energético funcional. Los resultados se aprecian en la Figura 6.

En términos ambientales, el material que resultó en un mayor impacto en emisiones fue el tabique tradicional, con valores similares a los mostrados en España por (40,41), los cuales calculan 49.5 kg de CO_{2eq} por m². Por su parte, el block de con-

Tabla 8. Ponderación de los indicadores normalizados.

INDICADORES	Block concreto		Tabique industrial		Tabique tradicional	
	Valor real	Valor normalizado	Valor real	Valor normalizado	Valor real	Valor normalizado
Calentamiento global (Kg CO ₂ -eq)	32.95	7.64	27.98	7.99	55.61	6.01
Acidificación (Kg SO ₂ -eq)	0.02	9.98	0.02	9.97	9.91	0
Eutrofización (Kg PO ₄ -eq)	0.8	3.39	1.05	1.32	1.21	0
Costo de Materia Prima (\$)	189.14	9.18	222.92	9.03	370.96	8.38
Costo mano de obra por unidad funcional (\$)	45.17	9.06	78.17	8.36	85.62	8.21
Resistencia térmica (m ² K/W)	0.50	4.77	1.013	9.59	0.371	3.51
Resistencia mecánica compresión (kg/cm ²)	70	3.50	60	3	52.45	2.62
Aislamiento acústico (dBI)	48	8.42	46.4	8.14	40	7.01

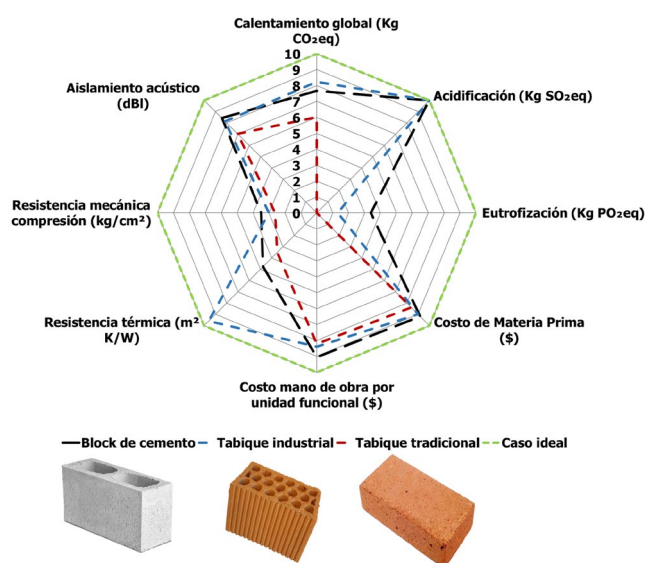


Figura 6. Análisis multiparamétrico de los materiales estudiados

creto muestra valores intermedios (32.95 kg de CO_{2eq}) y menores a los mostrados por (8,21) debido a que el block analizado en el presente estudio utiliza 7.8% de cemento, mientras que el tabique industrial (21) está formado en un 33% por dicho componente; es decir, se ha identificado un block incluso con menor uso de cemento, lo cual se traduce en menores impactos ambientales, y diversifica el potencial de comparación de los ladrillos analizados. El material con valores más favorables en la presente evaluación, fue el tabique industrial, tal como lo muestra el estudio de huella de carbono de Novaceramic en México (8,21), mismo que calcula 29.15 CO_{2eq} por m². Asimismo, Bribián, Capilla & Aranda (40) consideran 25.42 kg de CO_{2eq} para el m² de tabique industrial, valor similar al resultante en el presente ACV (27.98 kg de CO_{2eq}). En cuanto a los indicadores económicos, el block de concreto ha demostrado ser más económico respecto a materias primas y mano de obra para la edificación de la unidad funcional estudiada, en comparación con los otros materiales analizados. Por otra parte, en los indicadores energético-funcionales, el tabique tradicional posee condiciones desfavorables en cuanto a la resistencia térmica y la resistencia mecánica, mientras que el tabique industrial muestra lo opuesto. Para el caso del aislamiento acústico las propiedades no son muy distintas entre los distintos materiales, aunque el block de concreto posee mejores condiciones.

Cabe destacar que el uso de hornos de leña, cemento, mortero y gas natural representa la mayor cantidad de emisiones de GEI

en los sistemas analizados. Por lo que no es extraño conocer, que el impacto en emisiones es mayor para el tabique tradicional, cuyo proceso de horneado se realiza con biomasa forestal y mediante combustión al aire libre. Sin embargo, este indicador, calentamiento global, no es el más relevante, en síntesis, ninguno lo es. Los indicadores no tienen una priorización *per se*. Por el contrario, el análisis multiparamétrico considera un enfoque más inclusivo e integrado, que permita conocer fortalezas y debilidades en distintos parámetros, para este caso: ambientales, económicos y energético-funcionales. Por ejemplo, aunque el ladrillo tradicional sea el de mayor impacto ambiental, en muchos casos, es bastante asequible, y es común que el usuario decante su decisión por elegir un material de construcción dada su practicidad de adquisición. En este sentido, tal como se ha mostrado por (28,29), metodologías como la que sigue el presente análisis, muestran un escenario diversificado, donde la priorización de indicadores depende de los parámetros de interés del usuario final, en algunos casos, resulta más importante economizar recursos, aun cuando se descuiden los indicadores ambientales y aquellos que definen la óptima funcionalidad del material de construcción. De la misma forma, se puede pensar en priorizar aspectos ambientales sin importar qué tan costoso resulte el proceso de construcción mediante el uso del material de menor impacto ambiental.

Por otra parte, la Figura 7 muestra el modelo esquemático de vivienda que se utilizó para la simulación; las figuras 7 (a), (b)

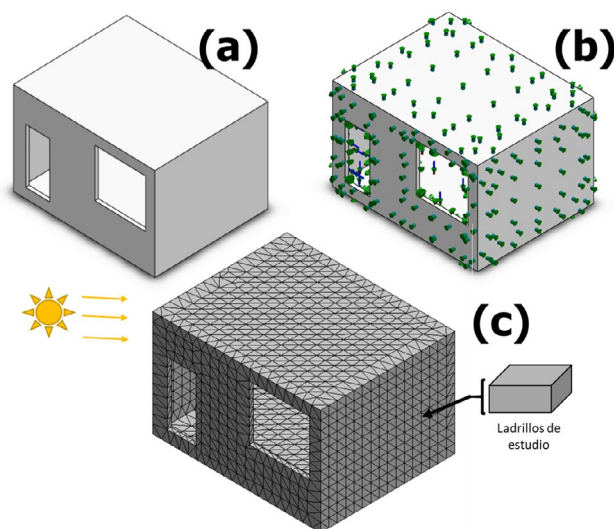


Figura 7. Planificación de la simulación de vivienda: (a) modelo de vivienda (b) análisis instrumental para la simulación (c) esquema de distribución de ladrillos en las viviendas analizadas.

y (c), muestran el espacio físico, los marcadores de simulación térmica y el esquema de integración de ladrillos estudiados, respectivamente. Como puede observarse se diseñó un modelo de vivienda pequeño cuyas dimensiones son de 5x4x3 m lo que corresponde a una medida de una casa-habitación (42) de igual para evaluar de manera comparativa los tipos de ladrillos estudiados en este trabajo. Se consideró irradiancia constante, por lo que las propiedades físico-térmicas, inherentes a cada material estudiado son las que determinaron el comportamiento del incremento de temperatura al interior de la vivienda.

Por otra parte, la proyección de los resultados termográficos de la simulación realizada aparece en la Figura 8 (a), (b y (c), para el tabique industrial, el tabique tradicional y el block de concreto, correspondientemente. Cabe resaltar que la consideración de análisis térmico se ha realizado para el contexto de que cuando mayor aislamiento posean los materiales es mejor su funcionalidad.

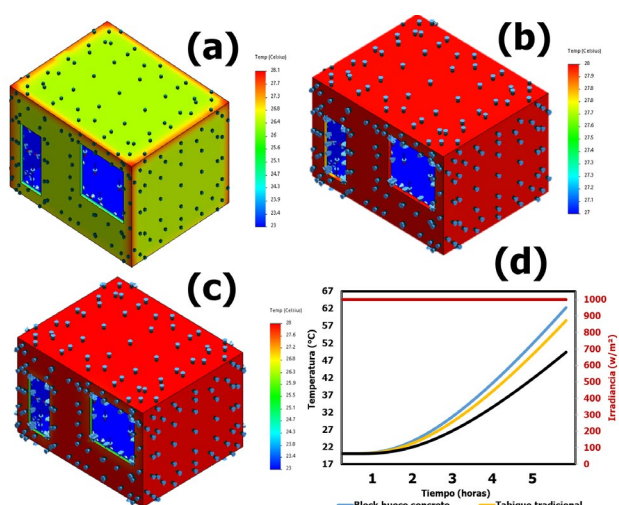


Figura 8. Resultados de la simulación en las viviendas: (a) con tabique industrial (b) block de concreto (c) tabique tradicional (d) incremento de temperatura al interior de la vivienda.

El análisis simulado en SolidWorks muestra la transmitancia térmica por convección hacia la parte interna de la vivienda mostrando así que la temperatura interna por cada material utilizado para la construcción es menor en comparación a la temperatura ambiente del lugar. Debido a que la mayor resistividad térmica se presenta en el ladrillo industrial, la distribución de la temperatura en la vivienda permite que al medio día solar sea menor en comparación con los otros dos casos analizados. Simulando un sistema con nulas pérdidas de transferencia de calor, las viviendas se comportan como acumuladores térmicos, cuya temperatura en el interior para este análisis aparece en la Figura 8 (d); en este escenario, es notable la diferencia de temperatura entre los sistemas estudiados, siendo el tabique industrial el que presenta menores incrementos de temperatura. Como último análisis, se comparó de forma multivariable las emisiones, el costo y la resistencia térmica de los materiales analizados (Figura 9). Los resultados reflejan que el tabique industrial es de bajo impacto ambiental y térmicamente eficiente, mientras que mantiene un costo intermedio, en este análisis comparativo. El Block de concreto es de bajo costo y mantiene propiedades térmicas e impactos ambientales intermedios, en tanto que el tabique tradicional el escenario de mayor costo, emisiones

y menor resistencia térmica. Por lo tanto, el alcance de este trabajo, versa en generar una herramienta metodológica integrada, mediante distintos parámetros e indicadores, que coadyuven a generar foros de diálogo para la determinación de materiales de construcción, que satisfagan las necesidades del usuario final, de acuerdo a su especial interés en los parámetros mencionados.

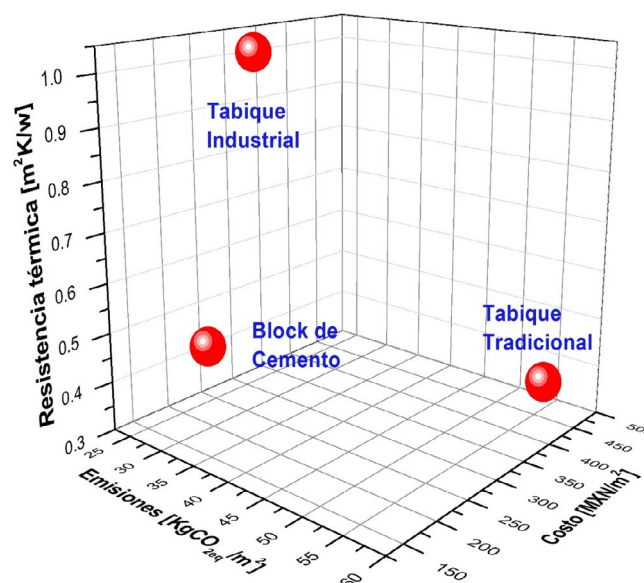


Figura 9. Análisis multivariable de los ladrillos analizados.

Es importante mencionar que la temperatura en la cara interna de algunos subsistemas de muro puede ser inferior a la del aire interior, lo que puede no ser un beneficio, sin embargo este modelo puede suponer todos los casos de variación de temperatura dentro y fuera de la vivienda y con diferentes temperaturas en el muro.

La propuesta no se limita a la dimensión del sector residencial; es decir, sistemas constructivos aislados ni a ejercicios de autoconstrucción de viviendas. También, se podría articular con estrategias para la licitación de obra pública, donde se justifique la selección de materiales en términos de priorizar determinados indicadores; o bien, que se definan normativas para la construcción de diversos inmuebles; en síntesis, esta propuesta sugiere una forma integrada la evaluación diferentes materiales de construcción, y no se limita a un solo material de construcción, aunque para fines de este trabajo sólo se ha hecho la variación de los ladrillos de construcción, lo cierto es que se puede abordar la misma metodología para determinar análisis comparativos para distintos materiales utilizados en pisos, techos y construcciones específicas.

4. CONCLUSIONES

Del presente trabajo se han tienen las siguientes conclusiones. Los resultados de este estudio muestran un comparativo de tres sistemas constructivos elaborados de tabiques y block de cemento:

Ambientalmente. (a) en cuanto a las materias primas, las emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ para el tabique tradicional son 70% superiores al tabique rojo industrial y más del 30% superiores al block hueco de concreto, en cuanto a emisiones de $\text{SO}_{2\text{eq}}$ el tabique rojo tradicional es 900% superior respecto a los

otros, y considerando las juntas el orden jerárquico descendente se mantiene igualdad de magnitud (b) en cuanto al transporte de materias primas, los indicadores ambientales mantienen la tendencia anterior, muestran un mayor impacto en las emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ en más del 40% del tabique rojo tradicional en comparación con el tabique rojo industrial y el block hueco de concreto, siendo éstos últimos similares en sus resultados, referente a la acidificación, el tabique rojo tradicional presenta poco más del 900% de emisiones de $\text{SO}_{2\text{eq}}$ en referencia a los dos sistemas mencionados, mientras que para la eutrofización las emisiones de $\text{KgPO}_{2\text{eq}}$ son bastante similares en todos los sistemas. Por lo que la tendencia infiere que cuanto más eficiente es el proceso de fabricación con condiciones controladas, como son en cuanto al block hueco de concreto y el tabique rojo industrial, los impactos serán menores; aunque debe precisarse que, en las pequeñas diferencias de algunos valores de la comparación final, los cambios que podrían suponer las fuentes de datos, los límites del sistema y las consideraciones durante el análisis, no alteran el comparativo general respecto a aquellos indicadores con órdenes de magnitud superiores. Los cerramientos son determinantes en la evaluación realizada, pero los ladrillos determinan el impacto ambiental al ser en materias primas y transporte los indicadores que más contribuyen al impacto ambiental.

Económicamente. Los costos están estrechamente vinculados al tiempo de fabricación de la unidad funcional, siendo en materias primas y mano de obra el más costoso el tabi-

que tradicional, seguido del tabique rojo industrial y el block hueco de concreto, mismo orden que guardan en cuanto a la demora de fabricación, lo que define una predisposición local para la selección de materiales de construcción.

Energético-funcional. La resistencia mecánica no es un indicador que difiera de forma significativa, siendo el aislamiento acústico diferente y notable con mejores propiedades para el tabique rojo industrial y el block hueco de concreto respecto al tabique rojo tradicional. El indicador de resistencia térmica está diferenciado significativamente para el tabique rojo industrial en contraste con los otros ladrillos, lo cual pudo corroborarse mediante la simulación por computadora analizando viviendas de las mismas dimensiones en igualdad de circunstancias.

Aplicación constructiva. Si bien este análisis no pondera un valor numérico hacia un caso que pueda determinarse como el mejor, sí genera elementos de decisión vinculados a los parámetros regulados por normas, fichas técnicas y entornos locales, generando indicadores que establecen de forma clara una herramienta multicriterio que puede extenderse a casos más inclusivos, complejos, de nuevos materiales y de extrapolación territorial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Autónoma de México, al Dr. Joan Rieradevall y al Maestro Alejandro Tavera, por su valioso apoyo en esta investigación.

REFERENCIAS

- (1) Piña Hernández, E. H. (2017). Prototipo de vivienda vertical social sustentable, enfoque en resistencia al cambio climático. *Revista INVI* 33(92): 213-237, Recuperado de: <https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/62744/66739>
- (2) INEGI (2018): Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares. *ENCEVI* 2018. Presentación de Resultados. 35. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>
- (3) ENERGY-INTERNATIONAL-AGENCY (2019): World Energy Outlook 2019. *TemaNord*. ENERGY-INTERNATIONAL-AGENCY. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- (4) Fao E (2008): *Bosques y Energía Cuestiones Clave*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i0139s/i0139s00.htm>
- (5) Huntzinger, D.N. & Eatmon, T.D (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production* 17(7): 668-675, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>
- (6) Tun, T.Z., Bonnet, S. & Gheewala, S.H. (2020): Life cycle assessment of Portland cement production in Myanmar. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25: 2106–2121, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01818-5>
- (7) Ramos Corella, M. A., García Rodríguez, S., Quintana Pacheco, J., De La Cruz, A. O., & Borbón Almada, A. C. (2016). Evaluación de la gestión de sustentabilidad y seguridad en construcciones de vivienda en México. *Epistemos*, 10(20), 69–73. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v10i20.25>
- (8) Martínez L., Emilio, & Domínguez Lepe, J. A. (2007). Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas. *Ingeniería*, 11(3), 43-54. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/467/46711305.pdf>
- (9) Wadel, G., Avellaneda, J., Cuchí, A. (2010): La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. *Informes de la construcción* 62(517): 37–51, doi: <https://doi.org/10.3989/ic.09.067>
- (10) Valero Delgado, A., & Usón Gil S (2011): *Ecología Industrial: Cerrando El Ciclo de Materiales*, vol. 199 (U. de Zaragoza, editor). Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- (11) Energía S de (2019): Balance Nacional de Energía 2018. *SENER*, vol. 25. Retrieved from <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia-2018>
- (12) Fidel C (2017): *Producción de Vivienda y Desarrollo Urbano Sustentable* (U. N. A. de México, editor). Universidad Nacional Autónoma de México.
- (13) Restrepo-Zapata, G. C., & Cadavid-Restrepo, C. F. (2019). Mejora del desempeño ambiental y energético de la vivienda de interés prioritario en Medellín con el uso de ladrillos cerámicos modificados. *Revista Ingenierías Universidad De Medellín*, 18(35), 33-49. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a3>
- (14) López-Aguilar, H. A., Huerta-Reynoso, E. A., Gómez, J. A., Olivarez-Ramírez, J. M., Duarte-Moller, A., & Pérez-Hernández, A. (2016). Life cycle assessment of regional brick manufacture. *Materiales De Construcción*, 66(322), e085. doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2016.02315>

- (15) López-Aguilar, H. A., Huerta-Reynoso, E. A., Gómez, J. A., Duarte-Moller, J. A., & Pérez-Hernández, A. (2019). Life cycle assessment of a traditional brick manufacture improvement. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(1), 195-206. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.01.14>
- (16) Hasik, V., Escott, E., Bates, R., Carlisle, S., Faircloth, B., Bilec, M.M. (2019): Comparative whole-building life cycle assessment of renovation and new construction. *Building and Environment* 161: 106218. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106218>
- (17) Molina, C.M. (2014): Análisis de Ciclo de Vida: Edificaciones. Retrieved from <https://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2014/01/ACV-edificios-comerciales.pdf>
- (18) Enshassi, Adnan, Kochendoerfer, Bernd, & Rizq, Ehsan. (2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista ingeniería de construcción*, 29(3), 234-254. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300002>
- (19) Colangelo, F., Forcina, A., Farina, I., & Petrillo, A. (2018). Life Cycle Assessment (LCA) of Different Kinds of Concrete Containing Waste for Sustainable Construction. *Buildings*, 8(5), 70. <https://doi.org/10.3390/buildings8050070>
- (20) Vitale, P., Arena, N., Di Gregorio, F., & Arena, U. (2017). Life cycle assessment of the end-of-life phase of a residential building. *Waste Management*, 60, 311–321. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.002>
- (21) Güereca Hernández, L.P., Carius Estrada, C., Padilla Rivera, A.J., Herrera Paz, H.D. (2016): Evaluación de la Huella de Carbono con enfoque de Análisis de Ciclo de Vida para 12 Sistemas Constructivos REPORTE FINAL.
- (22) CONAVI-SEDATU (2017): *Código de edificación de vivienda* (SEDATU, editor). Gobierno de México. Retrieved from <https://www.gob.mx/conavi/documentos/codigo-de-edificacion-de-vivienda-3ra-edicion-2017>
- (23) NOVACERAMIC (2020): *Fecha Técnica Tabimax*. Retrieved from <http://www.novaceramic.com.mx/productos.html>
- (24) NBE-CA-81 (1970): NBE-CA-81-Norma Básica de la Edificación. Retrieved from https://w3.ual.es/Depar/proyectosingenieria/descargas/Normas_Edificacion/NBE-CA-88.pdf-2017
- (25) INIFED (2014): NORMAS Y ESPECIFICACIONES Habitabilidad y Funcionamiento. *Secr Educ Pública México*. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105394/Tomo1_Dise_o_arquitect_nico.pdf
- (26) Pelleg, J. (2013): *Mechanical Properties of Materials* (Springer, editor). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4342-7>
- (27) Lopez-Ridaura, S., Masera, O., Astier, M. (2000): Evaluating the sustainability of integrated peasantry systems the MESMIS framework. *LEISA Mag* 16: 28–30.
- (28) González-Avilés, M., López Sosa, L. B., & Servín Campuzano, H. (2017). Marco de evaluación para cocinas solares de pequeña dimensión. *Acta Universitaria*, 27(5), 69–75. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1214>
- (29) Morales-Máximo, M., Ruiz-García, V. M., López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quñones, J. G. (2020). Exploitation of Wood Waste of Pinus spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Applied Sciences*, 10(8), 2933. <https://doi.org/10.3390/app10082933>
- (30) Samuelson, H., Baniassadi, A., Lin, A., Izaga, P., Brawley, T., Narula, T. (2020). Housing as a critical determinant of heat vulnerability and health. *Science of the Total Environment* 720. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137296>
- (31) EEscandón, R., Ascione, F., Bianco, N., Maria, G., Suárez, R., José, J. (2019): Thermal comfort prediction in a building category: Artificial neural network generation from calibrated models for a social housing stock in southern Europe. *Applied Thermal Engineering* 150: 492–505. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.013>
- (32) Bhikhoo, N., Hashemi, A., & Cruickshank, H. (2017). Improving Thermal Comfort of Low-Income Housing in Thailand through Passive Design Strategies. *Sustainability*, 9(8), 1440. <https://doi.org/10.3390/su9081440>
- (33) Goedkoop MJ (2009): *Recipe 2008 ReCiPe 2008*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Mark-Goe-dkoop/publication/230770853_Recipe_2008/links/09e4150dc068ff22e9000000/Recipe-2008.pdf
- (34) BORBON, Ana C; CABANILLAS, Rafael E y PEREZ, Jesús B (2010). Modeling and Simulation of Heat Transfer in Hollow Concrete Block Walls. *Información tecnológica*, 21(3):.27-38. ISSN 0718-0764. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642010000300004>
- (35) CONAVI-MEXICO (2009): *NORMA MEXICANA NMX-C-460-ONNCCE-2009*. Retrieved from <http://www.diariooficial.gob.mx/normasOficiales.php?codp=3796&view=si>
- (36) Morillón (2007): Habitabilidad Térmica de la Vivienda. in “V Simposio Nacional de Ingeniería Estructural en la Vivienda.” Retrieved from <https://docplayer.es/28336187-Habitabilidad-termica-en-la-vivienda-david-morillon-galvez-1.html>
- (37) NOM-020-ENER-2011 (2011): NORMA Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011&print=true
- (38) Pavel R, Torres R (2014): Equipo para la medición de la conductividad térmica de materiales homogéneos y heterogéneos. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4561.5529/1>
- (39) Gante-González, Contreras-Bonilla D-T& S-V (2002): Obtención de propiedades de mampostería, empleadas en las construcciones de la ciudad de Puebla. In XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural A.C., pp 1261–1267.
- (40) Bribián, I.Z., Capilla, A.V., Usón, A.A. (2011): Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5): 1133-1140, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
- (41) Aranda Z and S (2012): *Manual Explicativo Del Análisis de Ciclo de Vida Aplicado Al Sector de La Edificación*. Retrieved from <https://4.interreg-sudoe.eu/contenido-dinamico/libreria-ficheros/B111DBEF-Co19-2BB8-348B-86B2596FD140.pdf>
- (42) Morales-Máximo, M., De la Torre-Madrigal, M.A., López-Sosa, L.B. (2018): Diseño y análisis de un modelo de vivienda sustentable. *Publicaciones de La Semana Nacional de Energía Solar*, vol. 4 4: 75–80.