



CONSTRUCCIONES CON TIERRA Y CAMBIO CLIMÁTICO: REVISIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS EDIFICIOS

Andrea Favaro

Habitat International Coalition – America Latina, andrea.favaro86@gmail.com

Palabras clave: ACV, adobe, material de construcción, impactos ambientales, gasto energético

Resumen

Actualmente, el principal material de construcción es el cemento. Sin embargo, está demostrada su insostenibilidad ambiental: es una de las principales causas de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. Por otro lado, el uso de la tierra como material de construcción es cada vez más aceptado y usado, debido a sus numerosos beneficios. La metodología del análisis del ciclo de vida de los edificios ofrece datos veraces sobre los impactos de las construcciones con tierra y con cemento, ofreciendo la posibilidad de una comparación, además de ser un instrumento para apoyar las decisiones sociopolíticas. En este artículo se quiere perseguir dos objetivos. El primero es revisar la literatura existente en el tema de las construcciones con tierra según los estudios cuantitativos sobre emisiones y consumo de energía que han utilizados el análisis del ciclo de vida de los edificios como metodología. El segundo es exponer y observar la producción de nuevas líneas y áreas de investigación, ofreciendo puntos de reflexión, nuevos conocimientos y generando avances internacionales en el campo. Este artículo se subdivide en: metodología y objetivos; revisión de la literatura; los diferentes resultados de los impactos y beneficios de la tierra como material de construcción; un análisis de las implicaciones de los edificios en tierra a macro escala; una nueva línea de investigación del material con un enfoque socioeconómico; y finalmente las conclusiones, evidenciando los vacíos y posibilidades de acción futuras. La metodología del análisis del ciclo de vida de los edificios es un instrumento eficaz para la evaluación de los gastos energéticos y de CO₂. La revisión de estudios que ha utilizado esta metodología confirma los beneficios de la tierra como material de construcción y su menor emisión de CO₂ en comparación con el cemento.

1. INTRODUCCIÓN: LAS IMPLICACIONES DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

Con las preocupaciones internacionales sobre los efectos del cambio climático (CC) se están cuestionando los aspectos relativos a todo el sector de la construcción con materiales convencionales. De hecho, los edificios aportan directa e indirectamente el 19% de los gases de efecto invernadero (GEI) (Lucon et al., 2014) y sólo la industria del cemento aporta 8% de las emisiones de CO₂ a nivel global (Andrew, 2018). Además, todo el sector de la construcción (edificios e industria del cemento) utiliza el 36% de la energía final a nivel global (International Energy Agency; United Nations Environment Programme, 2018). Se prevé que las emisiones de CO₂ del sector de la construcción podrían aumentar de 8.600 millones de toneladas en el año 2004 a 15.600 millones en el año 2030 (Pachauri; Reisinger, 2007). Se ve la necesidad de cuantificar y medir los impactos ambientales de los diferentes materiales de construcción en un sentido intrínseco y sobre sus implicaciones en las construcciones. De acuerdo con Fay, Treloar e Iyer-Raniga (2000), las obligaciones del objetivo de Kyoto requieren de la cuantificación de las emisiones de GEI a nivel nacional, motivación que hace crecer el interés sobre el análisis del ciclo de vida de los edificios (ACV) (Sinha; Lennartsson; Frostell, 2016). De acuerdo con Du Plessis (2002, p. 6):

la construcción sostenible significa que los principios de desarrollo sostenible se aplican al ciclo de construcción integral desde la extracción y el beneficio de las materias primas, a través de la planificación, diseño y construcción de edificios e infraestructura, hasta su deconstrucción final y gestión de los residuos resultantes.

Promover nuevos materiales de construcción, tipología y técnicas constructivas para reducir la energía utilizada y los GEI se vuelve fundamental. A nivel internacional se está

relanzando el uso y la recuperación de los materiales locales, temas que han entrado a formar parte de los discursos sociopolíticos internacionales de los objetivos de desarrollo sustentable (ODS) y la Nueva Agenda Urbana (NUA)¹. De hecho, la arquitectura vernácula representa la mejor forma de construcción de un edificio en el contexto bioclimático de referencia (Agarwal, 1981; Guerrero Baca, 2007; Minke, 2005; Ordóñez, 2018). Por lo tanto, la sostenibilidad es mucho más que la simple construcción de un edificio de baja energía: “es un proceso holístico que busca restaurar y mantener la armonía entre los entornos naturales y construidos, al tiempo que crea asentamientos que afirman la dignidad humana y fomentan la equidad económica” (Du Plessis, 2002, p. 6). Sin embargo, existen numerosos intereses que llevan a fuertes resistencias en la promoción al cambio del modelo de construcción (Adegun; Adedeji, 2017; Baiche et al., 2008; Giesekam; Barrett; Taylor, 2016; Hadjri et al. 2007, Watson et al., 2012, Zami; Lee 2010a, 2011). En ese sentido, es necesario resaltar las contradicciones de estos discursos y generar una alternativa más coherente con los problemas sociales, económicos y ambientales. Una manera de mostrar estas contradicciones es el uso del ACV que ofrece la posibilidad de analizar integralmente los impactos de un edificio y de los materiales de construcción en sí mismos.

Este artículo se focaliza en el uso de la tierra como material de construcción. Se provee una revisión de la literatura actual de los impactos ambientales de este material y los resultados que emergen sobre los beneficios de su uso.

2. METODOLOGÍA Y OBJETIVOS

Un primer objetivo de este artículo es generar datos sobre el uso de la tierra como material de construcción. Para ello se hace una revisión de la literatura dentro del tema de la tierra como material de construcción. Un segundo objetivo de este artículo aborda la producción de nuevas líneas y áreas de investigación, ofreciendo puntos de reflexión, nuevos conocimientos y avances internacionales enfocados en la tierra como material de construcción y en las viviendas vernáculas. El último apartado no trata la tierra como material de construcción en lo específico, sino que simplemente se ofrece aspectos teóricos generales. Ya que este artículo pretende ser útil para la promoción del uso de la tierra como material de construcción, se ofrece un análisis a macro escala en el penúltimo apartado.

La selección de la literatura existente ha sido enfocada en estudios cuantitativos que han utilizado la metodología del ACV. La búsqueda se realizó utilizando el motor de búsqueda Google Scholar. Las palabras clave utilizadas para la búsqueda, utilizadas en forma única o agregada, en inglés y español, son: adobe; tierra, tierra compactada; construcción con tierra; construcción en tierra; ACV; CO₂; energía operacional; energía incorporada; gastos térmicos; impactos ambientales; demolición; beneficios y sostenibilidad. Posteriormente, la búsqueda de la literatura se extendió a la bibliografía utilizada en los artículos encontrados anteriormente.

El artículo está subdividido en los siguientes apartados: metodología y objetivos; revisión de la literatura; los resultados de los impactos de la tierra como material de construcción; un análisis de las implicaciones de los edificios en tierra a macro escala; una nueva línea de investigación del material con un enfoque socioeconómico; y vacíos y conclusiones.

Literatura crítica de diferentes materiales

La mayoría de los estudios de ACV se han realizado en países desarrollados y en regiones frías (Bastos; Batterman; Freire, 2014; Buyle; Braet; Audenaert, 2013; Ramesh; Prakash; Shukla, 2010) y, en menor medida, en países subdesarrollados como Sri Lanka (Udawattha; Halwatura, 2017), India (Shukla; Tiwari; Sodha, 2009), Camerún (Abanda et al., 2014) y Colombia (Ortiz-Rodríguez; Castells; Sonnemann, 2010). Lamentablemente en América Latina hay una ausencia general de este tipo de estudios (Ortiz-Rodríguez; Castells; Sonnemann, 2010). Varios estudios críticos analizan los edificios bajo el pensamiento de la

¹ Véanse respectivamente el ODS 11.C y la NUA en los párrafos 70 y 76

ACV (Khasreen; Banfill; Menzies, 2009). Principalmente, los enfoques del ACV miran hacia la energía incorporada, la energía operativa, las emisiones de CO₂ y el coste (tabla 1). Cabe señalar que hay escasez de estudios sobre el ciclo de vida focalizado a otros temas, como el agua (Allacker, 2010).

Tabla 1: Elenco de los estudios críticos que muestran diferentes enfoques del ACV

Referencias	Enfoque del ACV
Bastos; Batterman; Freire, 2014	emisión de GEI y energía primaria
Ramesh; Prakash; Shukla, 2010	energía operativa y energía incorporada
Buyle; Braet; Audenaert, 2013	métodos de análisis de impactos ambientales
Sartori; Hestnes, 2007	según la tipología de edificios (convencionales y de bajo gasto energético) y los diferentes enfoques de los ACV utilizados
Emmanuel, 2004	coste del ciclo de vida de los edificios
Udawattha; Halwatura 2017	coste del ciclo de vida de los edificios y de los materiales de construcción

Varios estudios utilizan el ACV para la comparación de diferentes materiales (tabla 2). La comparación de diferentes ACV, según las diferentes tipologías de edificios y de materiales utilizados, permite no sólo cuantificar los impactos, sino identificar cuáles tienen las mayores ventajas comparativas. Udawattha y Halwatura (2017) realizan una clasificación de los materiales analizados de acuerdo con diferentes criterios de análisis: costo inicial, costo del ciclo de vida, costo de energía de operación, energía incorporada, sostenibilidad ambiental y huella de carbono. Emmanuel (2004) realiza una clasificación según: costo del ciclo de vida, energía incorporada, sostenibilidad ambiental y posibilidad de reutilización. Otros estudios analizan los impactos en función de la sustitución de los materiales utilizados en el mismo edificio (Papayianni; Anastasious; Papadopoulou, 2015). Otros lo hacen en función de la geografía y los diferentes climas (Marceau; VanGeem. 2006; Nemry et al., 2010).

Tabla 2: Elenco de los estudios que confrontan diferentes materiales mediante el ACV.

Referencias	Materiales utilizados en el ACV
Emmanuel, 2004	Ladrillo, mampostería de cemento, cabook, escombros y bahareque
Papayianni; Anastasious; Papadopoulou, 2015	Bloque de hormigón y adobe
Reddy; Jagadish, 2003	Tabique, bloque de hormigón hueco, bloque de suelo cemento, bloque de barro curado al vapor
Udawattha; Halwatura, 2017	Ladrillo, bloque de cemento hueco, cabook y bloque de suelo-cemento
Zami; Lee, 2010a	Bloque de hormigón y adobe

3. LA TIERRA: UN MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN SIEMPRE ACTUAL

3.1 La popularidad de la tierra como material de construcción

En los últimos años, el uso de la tierra se ha vuelto cada vez más popular por su bajo costo, su poco impacto al medio ambiente (Christoforou et al. 2016, Dayaratne 2010, El Fgaier et al. 2015, Papayianni; Anastasious; Papadopoulou, 2015) y por ser cada vez más usado en la arquitectura contemporánea sostenible (Christoforou et al., 2016; Fathy, 1973, Ferreiro, 2010, Minke, 2005, Minke, 2012, Rotondaro, 2007). Son numerosas las ventajas en el uso de este material (tabla 3), pero también tiene debilidades, tales como: baja capacidad de

carga, vulnerabilidad a las vibraciones sísmicas y una baja resistencia a la humedad. Sin embargo, estos defectos se han logrado mitigar en gran medida con nuevas técnicas constructivas (Blondet et al., 2011; Hastings; Huerta García, 2015; Zegarra; Quiun; San Bartolomé, 2003) y tecnologías de construcción moderna (Calderón Peñafiel, 2013; Revuelta-Acosta et al. 2010; Sharma; Marwaha; Vinayak, 2016). Para la reducción y difusión de estos problemas se han sido publicados numerosos manuales que permiten guiar la construcción de viviendas con tierra (Blondet et al., 2010, Carazas Aedo, 2002, Cooperación Comunitaria A.C., 2014; Ministerio de Vivienda, 2010; Morales et al., 1993).

Tabla 3: Ventajas de la tierra como material de construcción.

Ventajas	Referencias
Eficiencia energética y costo	Christoforou et al., 2016, Pacheco-Torgal; Jalali, 2012, Papayianni; Anastasious; Papadopoulou, 2015, Revuelta-Acosta et al., 2010, Shukla; Tiwari; Sodha, 2009
Alta masa térmica	Christoforou et al., 2016
Aislamiento acústico	Binici et al. 2009
Resistencia al fuego	Papayianni; Anastasious; Papadopoulou, 2015
Mejor calidad del aire al interior del edificio	El Fgaier et al., 2015
Biodegradabilidad y reúso sin generar residuos peligrosos	Pacheco-Torgal; Jalali, 2012
Se produce localmente	Hadjri et al. 2007, Zami; Lee, 2010a, Zami; Lee, 2010b
Necesita mano de obra intensiva y semi-calificada	Adam; Agib, 2001, Zami; Lee, 2010a, Zami; Lee, 2010b
El transporte del material es limitado	Zami; Lee, 2010a, Zami; Lee, 2010b
Es acorde con el contexto sociocultural, el contexto bioclimático y los recursos disponibles	Rodríguez, 2001, Berge, 2009, Hadjri et al. 2007, Zami; Lee, 2010a, Zami; Lee, 2010b

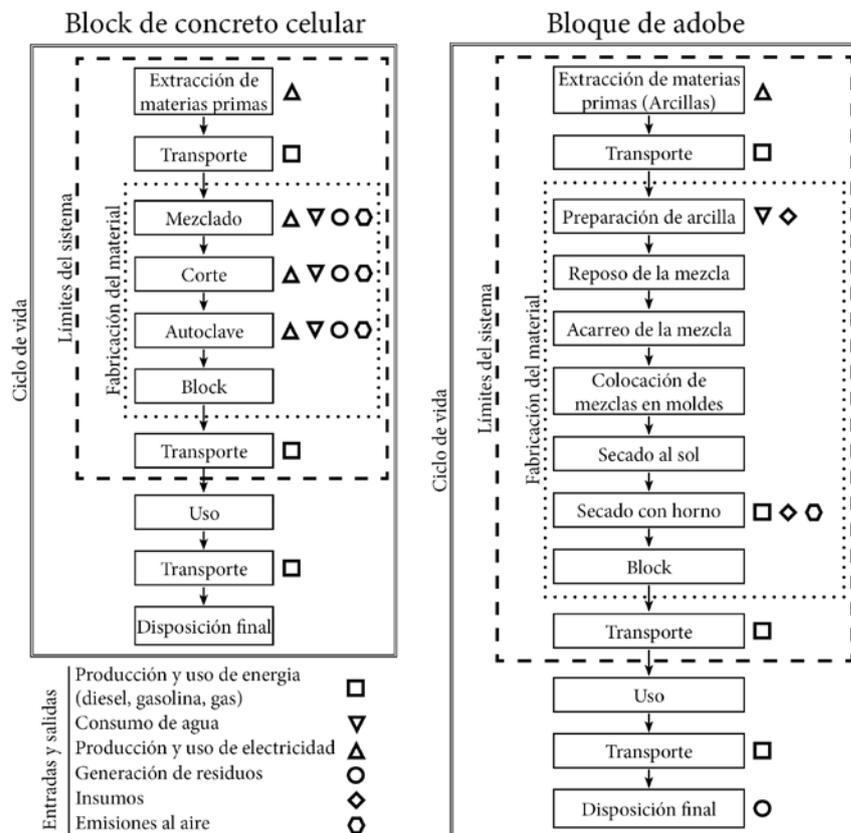
3.2 Menos energía menos emisiones de CO₂

En los últimos años, los estudios de ACV sobre la tierra como material de construcción han aumentado. Se han evidenciado los beneficios ambientales, energéticos y de reducción en la emisión de CO₂ (Pacheco-Torgal; Jalali, 2012; Papayianni; Anastasious; Papadopoulou, 2015). En la imagen 1 se muestran las diferencias del ACV entre un bloque de concreto celular y el adobe con las respectivas entradas de recursos y salidas de desechos y emisiones, donde se puede observar cómo los procesos de producción del adobe tienen menos impacto. En la tabla 4 es posible observar estudios que confirman la sostenibilidad ambiental de la tierra en comparación con los materiales convencionales en todo el ciclo de vida del edificio. Shukla, Tiwari y Sodha (2009) sostienen que las casas construidas con adobe utiliza aproximadamente 34% menos de energía incorporada en relación con una construida con material convencional, y que puede reducir en 370 GJ el ahorro de energía operativa y de 101 t CO₂eq/año, con un tiempo de retorno energético de 1,54 años². Chel y Tiwari (2009) muestran resultados similares: 38% menos para la energía incorporada y 18% de ahorro de energía para calefacción y refrigeración anual. Además, se muestra un ahorro en emisiones de 5,2 t CO₂eq/año, que se cuantifica en 52 €/año considerando el crédito de

² El tiempo de retorno energético corresponde al número de años de vida útil de un edificio para ahorrar la misma cantidad de energía utilizada en la fabricación del edificio mismo

carbono³. Morel et al. (2001) encuentra que las casas construidas con mampostería de piedra tienen un ahorro de energía del 59% en comparación con una casa de concreto y de 71% para las casas construidas con tierra apisonada. Reddy y Jagadish (2003) muestran que la casa construida con suelo-cemento tiene una energía incorporada de 45% menos contra una de concreto. Abanda et al. (2014) encuentra un 31% menos de energía incorporada de la casa de barro contra la de cemento y un 43% menos de emisión de CO₂. Ramesh, Prakash y Shukla (2010) realizan un análisis de la energía del ciclo de vida de 46 estudios de caso de edificios residenciales construidos con diferentes materiales, el de adobe es el cuarto mejor.

Imagen 1: Diferencias en el ACV entre un bloque de concreto celular y el adobe con las respectivas entradas de recursos y salida de desechos y emisiones (elaborado a partir de Güereca Hernández et al., 2016)



Udawattha y Halwatura (2017) realizan un ACV de: ladrillo, bloque de hormigón, cabook y bloque de suelo-cemento. El estudio concluyó que el bloque de suelo-cemento tiene la mejor ventaja comparada total. Papayianni, Anastasious y Papadopoulou (2015) muestra una reducción del 48,8% en las emisiones de CO₂ entre un modelo de vivienda convencional y un modelo de vivienda alternativa (bloques de madera y tierra comprimida) durante todo el ciclo de vida (100 años). Christoforou et al. (2016) señala que, considerando el uso y la disponibilidad de materiales a nivel local, la energía incorporada del adobe por kg es 36,37 veces menor que los ladrillos cerámicos y 27,3 que los bloque de concreto. Incluso considerando la elaboración de adobe en una fábrica y un transporte de 100 km, sigue siendo favorable en comparación con los ladrillos cerámicos y los bloques de concreto: 7,06 y 5,29 veces mayor respectivamente.

³ El crédito de carbono está considerado a 10€ por tonelada de CO₂eq

Tabla 4: La energía incorporada en una construcción según diferentes materiales de construcción mediante la metodología de ACV

Referencia	Lugar	Material de construcción	Energía incorporada
Shukla; Tiwari; Sodha, 2009	India	a) adobe b) tabique, cemento y concreto	a) 475 GJ/100 m ² b) 720 GJ/100 m ²
Chel; Tiwari, 2009	India	a) adobe b) cemento armado	a) 2.299 MJ/m ² b) 3.702 MJ/m ²
Morel et al., 2001	India	a) tierra apisonada b) mampostería de piedra c) concreto	a) 70 GJ/por casa b) 97 GJ/por casa c) 239 GJ/por casa
Reddy; Jagadish, 2003	India	a) estructura de hormigón armado con muros de mampostería de ladrillo de arcilla cocida rellena b) ladrillo de carga, techo/piso de losa maciza de hormigón armado, acabado de piso de mosaico c) techo/piso de losa de relleno de bloques de suelo-cemento, baldosas de terracota, acabado flor	a) 421 GJ/100m ² b) 292 GJ/100m ² c) 161 GJ/100m ²
Abanda et al., 2014	Cameroon	a) adobe b) cemento	a) 2.008 MJ/m ² b) 3.065 MJ/m ²
Reddy, 2009	India	a) construcción convencional: ladrillos de carga, piso y techo de losa maciza RC, pisos de baldosas de concreto b) construcción con tecnologías alternativas: mampostería de tierra estabilizada, piso y techo de losa de relleno SMB, piso de baldosas de terracota	a) 2.950 MJ/m ² b) 1.530 MJ/m ²

$$1 \text{ GJ}/100 \text{ m}^2 = 10 \text{ MJ}/\text{m}^2$$

3.3 Los beneficios térmicos de la tierra

El adobe es un material que ha sido muy usado por sus cualidades térmicas. Si bien el adobe tiene una alta conductividad térmica (Parra-Saldivar; Batty, 2006), el espesor de estos ladrillos puede aislar eficazmente y mantener una temperatura interna confortable (Martín; Mazarrón; Cañas, 2010), asegurando una reducción de las fluctuaciones de la temperatura exterior y una limitación del riesgo de sobrecalentamiento del edificio (El Fgaier et al., 2015). Diversos estudios muestran las mejores cualidades térmicas del adobe en relación con los materiales convencionales porque reducen las fluctuaciones de la temperatura interna durante el verano y el invierno (Revuelta-Acosta et al., 2010) aportando ahorros significativos en el consumo energético (Christoforou et al. 2016). Porta-Gándara, Rubio y Fernández, (2002) concluyeron que en La Paz, Baja California Sur, México, las construcciones vernáculas de adobe generan importantes ahorros de energía en comparación con las viviendas de concreto. Es importante subrayar que las paredes de adobe tienen aproximadamente 5.1 veces más masa que las paredes de bloques de concreto y esta cifra es muy similar a la proporción inversa de los requisitos de energía y, por lo tanto, en el ahorro económico. El estudio muestra que para mantener la temperatura a 26°C son necesarios \$USD 10.376 para una casa de adobe y \$USD 57.083 para una casa de concreto (en un periodo de 15 años). Por lo tanto, es de vital importancia elegir entre costos operativos altos y costos de material y de construcción bajos o viceversa.

Gracias a su elevada masa térmica, el adobe tiene la capacidad de absorber el calor durante el día y soltarlo en la noche, manteniendo una temperatura confortable de día y de noche (Obafemi; Kurt, 2016, Parra-Saldivar; Batty, 2006). Martín, Mazarrón y Cañas (2010) realizaron un experimento de campo para conocer el comportamiento térmico de las viviendas existentes en España. Se compararon casas modernas de piedra, de adobe y de madera. Los resultados demuestran mejores condiciones interiores en las casas

tradicionales. En verano, el confort térmico se logró sin suministro de energía dentro de las casas tradicionales, pero no dentro de las modernas. En invierno, el ambiente interior era más estable dentro de las casas tradicionales. Sin embargo, ninguna casa fue capaz de proporcionar confort térmico. Además, no solo las características del adobe en sí mismas, sino que con la adición de fibras de refuerzo, se pueden mejorar las propiedades térmicas, además de las mecánicas. Demir (2008) demostró que el aserrín, los residuos de tabaco y el pasto se pueden usar para mejorar las propiedades térmicas y mecánicas del adobe. La humedad es otro aspecto para considerar. El adobe permite equilibrar la humedad interna, contribuyendo tanto al mejor confort térmico como a la calidad del aire, ya que evita la formación de moho (El Fgaier et al., 2015).

3.4 Los impactos del transporte: la importancia de lo local

El transporte es otro elemento fundamental en la evaluación de las emisiones y el consumo energético en un ACV. Su incidencia en particular se focaliza en la fase de construcción y demolición de un edificio, y aproximadamente es el 1% de la energía total requerida (Ramesh; Prakash; Shukla, 2010). Christoforou et al. (2016) analiza diferentes escenarios según si el material ha sido producido localmente o en fábrica y según la distancia del transporte de los materiales o productos finales. Observa que entre 1 kg de adobe producido localmente y uno producido en fábrica y transportado en el sitio de construcción hay una energía incorporada que aumenta 5,5 veces (de 0,033 a 0,170 MJ/kg) y las emisiones de CO₂ que aumentan de 7,3 veces (de 0,00176 a 0,0129 kg CO₂eq/kg). Por lo tanto se subraya la importancia de la producción de adobe en el lugar de construcción. Hastings y Huerta García (2015) realizaron un análisis comparativo de emisiones de CO₂ con enfoque en el transporte de materiales entre las viviendas producidas por las constructoras (2.652 kg CO₂eq) y las auto-construidas por los habitantes con el uso de tierra (1.687 kg CO₂eq). Observa que la vivienda auto-construida con tierra ahorró 64% en emisiones de CO₂. Lawson y Rudder (1996) sustentan que, si se produce localmente, la tierra apisonada y el adobe se estima con una energía incorporada de 0,7 MJ/kg, 3,57 veces menos que la energía incorporada de los ladrillos cerámicos (2,5 MJ/kg) y 5,14 veces menos que la energía incorporada de bloques de hormigón (3,6 MJ/kg). Los materiales en tierra producidos localmente tienen otras ventajas comparativas frente a los materiales convencionales al tener la posibilidad de ser reciclados en grandes cantidades y de forma local. Esto puede ser un factor decisivo en la incidencia del transporte (Berge, 2009, p. 22):

los costos de energía del transporte cambian rápidamente la imagen de ganancias a pérdidas. Una vez más, este es un argumento importante a favor de los materiales simples: muchos materiales industriales avanzados tienen que ser transportados a largas distancias a unidades especiales para el reciclaje.

La incidencia del transporte, por lo tanto, es un factor muy importante y no sólo según el material y la distancia de transporte, sino en gran medida también por el método de transporte (Berge, 2009) y por el tamaño del vehículo de transporte y su eficiencia energética (Nielsen, 2008). Por lo tanto, como expone Espí (2001, p.41):

mientras que la energía incorporada permanezca cercana a los valores de los materiales más habituales para cada función, la energía del transporte es marginal si el tamaño del territorio económico es local. Tanto si el territorio económico se agranda, como si la intensidad energética disminuye (vuelta a los materiales tradicionales, por ejemplo), la energía del transporte será proporcionalmente más importante: cualquier escenario futuro para una construcción sostenible debe contemplar el uso de materiales disponibles localmente.

3.5 Demolición: desechos, reutilización y reciclaje

La última fase del ACV, aunque con una incidencia más baja de las primeras dos fases, es importante de analizar. Cada material tiene una huella en el uso de recursos y una huella de contaminación. Nielsen (2008) estima que el proceso de demolición produce una emisión de 0,004 a 0,01 kg CO₂eq/kg de material de hormigón, según el refuerzo, el tipo de estructura y las condiciones de trabajo en general en el sitio de demolición. Gran parte de esto puede

evitarse reciclando productos en lugar de fabricarlos a partir de nuevas materias primas. Un producto que puede ser fácilmente reciclado normalmente será preferible a un producto que inicialmente es bastante "verde" (por ejemplo, por su alta eficiencia energética) pero que, debido a su complejidad, no puede ser reutilizado ni reciclado. En la industria de la construcción, muchos productos y materiales actuales tienen poca durabilidad y un bajo potencial de reciclaje. Hay otros que pueden ser reciclados varias veces, pero en muchos de los casos esto raramente se hace (Berge, 2009). De hecho, en general las demoliciones de edificios generan grandes cantidades de materiales y éstos se podrían reutilizar o reciclar en grandes cantidad (Mastrucci et al., 2017). Thormark (2000) muestra dos casos en el que fueron construidos dos edificios: el primero se construyó con una gran proporción de materiales y componentes reutilizados; el segundo se construyó con todos los materiales y componentes nuevos. Los resultados mostraron que aproximadamente el 55% de la energía se podría ahorrar con materiales y componentes reutilizados. Otros estudios muestran los beneficios del reciclaje en la producción del adobe. Santhosh et al. (2016) muestra el uso potencial de los residuos de construcción y demolición para producir adobe estabilizado. Rojas-Valencia et al. (2017) observa que la reconstrucción de adobes brinda resultados mecánicos óptimos que respetan la legislación actual. Esta literatura muestra los beneficios del reciclaje y de la reutilización del material de demolición en la última fase del ACV. Sin embargo, en general, hay poca literatura que trata estos temas, por lo que es necesario profundizar.

4 POTENCIAL AHORRO DE EMISIONES DE CO₂ A MACRO ESCALA

Hasta ahora se ha mostrado la importancia del ACV para tener datos veraces sobre los impactos ambientales de un edificio según los diferentes materiales de construcción. Tener datos sobre los impactos permite hacer análisis a una escala más amplia al relacionarlos con los datos de los censos de diferentes países, obteniendo el potencial ahorro de CO₂ gracias a los edificios de tierra.

En México, entre 1990 y 2010, se han perdido 1.388.503 edificios en tierra, en comparación los 3.119.917 edificios en tierra antes del 1990, es decir, el 44,5% (INEGI). Calculando las diferencias entre los datos disponibles del censo, es decir entre el 1990/2000, 2000/2005 y 2005/2010, se puede afirmar que se han perdido cada año 27.531,6, 78.185,6 y 144.451,8 edificios en tierra, respectivamente. Tomando como referencia el estudio de Chel y Tiwari (2009), la mitigación total de las emisiones de CO₂ debido al potencial de ahorro de energía de calefacción y refrigeración por un edificio de adobe es de 5,2 tCO₂eq cada año. Multiplicando las pérdidas de edificios en tierra y el potencial ahorro de emisiones de CO₂, y considerando que la pérdida de edificios es acumulativo en los años, se obtiene un total de 49.720.314,8 tCO₂eq de pérdida del potencial ahorro de emisiones de CO₂ en los 20 años.

Ahora bien, en los mismos 20 años se han construido 13.400.115 edificios con materiales convencionales (INEGI). Si el 5% de estos nuevos edificios fueran en tierra se obtendría 670.005,75 nuevos edificios en tierra, y multiplicando el 5% por las diferencias entre los datos del censo (1990/2000, 2000/2005 y 2005/2010), se hubiera podido construir respectivamente 28.591,81, 28.311,81 y 48.505,72 nuevos edificios en tierra. Utilizando la misma metodología del cálculo anterior se obtiene un total de 32.717.301,5 tCO₂eq de pérdida del potencial ahorro de emisiones de CO₂ en los 20 años.

Por lo tanto, el total entre las pérdidas de edificios en tierra y la no construcción de nuevos edificios en tierra produjo 82.437.616,3 tCO₂eq de pérdida del potencial ahorro de emisiones de CO₂ en los 20 años (figura 2). Suma de la demolición de viviendas en tierra y si el 5% del total de las nuevas construcciones con materiales convencionales fueran en tierra.

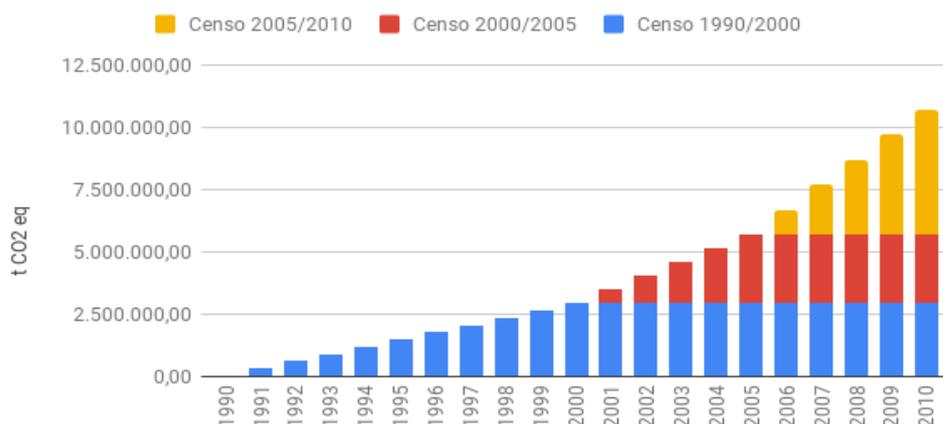


Figura 2: Potencial ahorro de emisiones de CO₂ perdido en México en 20 años (elaborado a partir del censo INEGI)

Para comprender y cuantificar a cuánto corresponde efectivamente la unidad de medida de tCO₂eq, es conveniente convertir las emisiones de CO₂ en superficie de bosque, debido a la capacidad de absorción de la CO₂ por partes de los árboles. Padgett et al. (2008) evidencia diferentes cálculos de conversión de los datos de las emisiones de CO₂. En este artículo se utilizan los datos otorgados por el Environmental Protection Agency (EPA)⁴. Según ellos, en México, la pérdida del potencial ahorro de emisiones de CO₂ en los últimos 20 años, debido a las pérdidas de edificios en tierra y a no haber construido nuevos edificios en tierra, corresponde a un año de un bosque con una superficie de 3,926,367 Km², aproximadamente el tamaño de la India.

5 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS.

La tierra como material de construcción no solo brinda beneficios ambientales y de confort, sino que también socioeconómicos (Sanya, 2007). Sin embargo, todavía hay poca literatura que muestre estos beneficios y, en particular, en comparación con materiales convencionales (Adam; Agib, 2001; Zami; Lee, 2010b). Considerar y analizar todos los aspectos socioeconómicos (directos e indirectos) es muy complejo y requiere una metodología igualmente compleja. Benoît y Mazijn (2009) desarrolla una metodología llamada análisis del ciclo de vida de los aspectos socioeconómico (S-ACV por su sigla en inglés), donde se aplica el ACV para analizar los aspectos socio-económicos de un producto en su ciclo de vida.

Una S-ACV es una técnica de evaluación de impacto social (y del impacto potencial) que tiene como objetivo evaluar los aspectos socio-económicos de los productos y sus posibles impactos positivos y negativos a lo largo de su ciclo de vida (cadena de suministro, incluida la fase de uso y eliminación). Los aspectos socioeconómicos evaluados en S-ACV son aquellos que pueden afectar directamente a las partes interesadas de manera positiva o negativa durante el ciclo de vida. Pueden estar vinculados a los comportamientos de las empresas, a los procesos socioeconómicos o a los impactos en el capital social. Dependiendo del alcance del estudio, los impactos indirectos en las partes interesadas también pueden ser considerados.

Los impactos sociales son consecuencia de presiones positivas o negativas en los aspectos sociales. Los impactos sociales se entienden, en relación con estos criterios, como consecuencias de las relaciones sociales (interacciones) ocurridas en el contexto de una actividad (producción, consumo o eliminación) y/o engendradas por ella y/o por acciones preventivas o de refuerzo tomadas por los interesados (por ejemplo, imponer medidas de

⁴ Ver la web de EPA para el cálculo de la conversión: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>

seguridad en una instalación). Cuando se hace referencia a las causas de los impactos sociales, esto generalmente implica tres dimensiones:

- Comportamientos: los impactos sociales son aquellos causados por un comportamiento específico.
- Procesos socioeconómicos: los impactos sociales son el efecto posterior de las decisiones socioeconómicas.
- Capitales (humanos, sociales, culturales): los impactos sociales se relacionan con el contexto original. Pueden ser positivos o negativos.

En la tabla 5 es posible observar las categorías de actores y las subcategorías de impactos que se analizan en un S-ACV.

En este párrafo, se ofrece un punto de partida para la reflexión e investigación sobre una posible metodología que pueda ser aplicada al análisis de los impactos sociales en los edificios y en los materiales de construcción. Aunque la literatura sobre el desarrollo de esta metodología está aumentando (Dreyer; Hauschild; Schierbeck, 2006; Hosseinijou; Mansour; Shirazi, 2014; Jørgensen et al., 2008; 2010; Norris, 2006), casi no existe literatura relacionada con edificios y materiales de construcción convencionales y ausentes para materiales no-convencionales. Por lo tanto, la investigación en este campo debe ampliarse.

Tabla 5: Categorías de actores y sub-categorías de impactos que se analizan en un S-ACV (Benoît; Mazijn, 2009)

Grupo de interés "categorías"	Sub-categorías de impactos	
Grupo de interés "trabajador"	Libertad de asociación y negociación colectiva Trabajo infantil Salario justo Horas laborales	Trabajo forzado Igualdad de oportunidades/discriminación Salud y seguridad Beneficios sociales/seguridad social
Grupo de interés "consumidor"	Salud y Seguridad Mecanismo de retroalimentación Privacidad del consumidor	Transparencia Responsabilidad de fin de vida
Grupo de interés "comunidad local"	Acceso a recursos materiales Acceso a recursos inmateriales Deslocalización y migración Patrimonio cultural Condiciones de vida seguras y saludables	Respeto de los derechos indígenas Participación de la comunidad Empleo local Condiciones de vida seguras
Grupo de interés "sociedad"	Compromisos públicos con temas de sostenibilidad Prevención y mitigación de conflictos armados	Contribución al desarrollo económico Desarrollo tecnológico Corrupción
Actores de la cadena de valor * sin incluir a los consumidores	Competición justa Promover la responsabilidad social	Relaciones con proveedores Respeto de los derechos de propiedad intelectual

6 CONCLUSIONES, VACÍOS Y POSIBILIDADES FUTURAS

Este artículo presenta un panorama actual de la literatura existente sobre las construcciones con tierra y sobre el material en sí mismo, con un enfoque en estudios cuantitativos y que utilicen la metodología del ACV. Sin embargo, todavía hay muy pocos estudios que analicen los impactos de las construcciones con tierra y que utilicen esta metodología. De este estudio emergen las oportunidades para futuros desarrollos y estrategias. Los análisis de

impactos ambientales y de impactos socioeconómicos a lo largo del ciclo de vida tanto del material como de los edificios ofrece posibles líneas de investigación a las universidades, que podrían desarrollar y centrarse en estos temas y capacitar a técnicos capaces de analizar estos aspectos, además de las ONG y los profesionales del área, que podrían utilizar este análisis en sus proyectos combinando así aspectos arquitectónicos, constructivos y de derechos humanos con las implicaciones ambientales. Los beneficios de la tierra como material de construcción emergen tanto en términos absolutos como en términos comparativos y puede ser una de las medidas de mitigación al CC. Dado el creciente interés internacional en analizar la tierra como una posible respuesta al CC, se hace necesaria la creación de un discurso con una visión holística - que actualmente está enfocada en la arquitectura, las técnicas constructivas y a las características estructurales del material - que permita desarrollar estudios enfocados a las implicaciones a nivel medioambiental, socioeconómico y otras escalas de análisis pertinentes. Esto podría ser una palanca para un cambio, es decir, hacia una aceptación social, económica y política de la tierra como material de construcción del futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanda, H.; Elambo, N. G.; Tah, J. H. M.; Fabrice, O. E.; Blanche Manjia, M. (2014). Embodied energy and CO₂ analyses of mud-brick and cement-block houses. *AIMS's Energy* 2: 18-40. [10.3934/energy.2014.1.18](https://doi.org/10.3934/energy.2014.1.18).
- Adam, E. A.; Agib, A. R. A. (2001). *Compressed stabilised earth block manufacture in Sudan*. Paris, France: UNESCO.
- Adegun, O. B.; Adedeji, Y. M. D. (2017). Review of economic and environmental benefits of earthen materials for housing in Africa. *Frontiers of Architectural Research*. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.08.003>.
- Agarwal, A. (1981). *Mud, mud: the potential of earth-based materials for third world housing*. London, United Kingdom: Earthscan London, 0905347188.
- Allacker, K. (2010). *Sustainable building. The development of an evaluation method. Caso estudio experimental*, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.
- Andrew, R. M. (2018). Global Co2 Emissions from Cement Production. *Earth System Science Data* 10, no.1: 195. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>.
- Baiche, B.; Osmani, M.; Hadjri, K; Chifunda, C. (2008). Attitude towards earth construction in the developing world: a case study from Zambia. *CIB W107 Construction in Developing World Countries International Symposium. 'Construction in Developing countries: Procurement, Ethics and Technology*, 16-18. Trinidad & Tobago.
- Bastos, J.; Batterman, S. A.; Freire, F. (2014). Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon. *Energy and buildings* 69: 344-53. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.010>.
- Benoît, C.; Mazijn, B. (2009). *Guidelines for social life cycle assessment of products: a social and socio-economic LCA code of practice complementing environmental LCA and Life Cycle Costing, contributing to the full assessment of goods and services within the context of sustainable development*. Paris: United Nations Environmental Programme.
- Berge, B. (2009). *The ecology of building materials*. Burlington, USA: Routledge
- Binici, H.; Orhan, A.; Derya, B.; Hasan, K.; Bilge, I. (2009). Sound insulation of fibre reinforced mud brick walls. *Construction and building materials* 23: 1035-41. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.008>
- Blondet, M.; Vargas, J.; Tarque, N.; Iwaki, C. (2011). Construcción sismoresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción* 63: 41-50. <https://doi.org/10.3989/ic.10.017>
- Blondet, M.; Vargas, J.; Torrealva, D.; Rubiño, A. (2010). *Manual de construcción con adobe reforzado con geomallas*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.

- Buyle, M.; Braet, J.; Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and sustainable energy reviews* 26: 379-88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>.
- Calderón Peñafiel, J. C. (2013). *Tecnologías para la fabricación de bloques de tierra de gran resistencia. Análisis técnica experimental*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya
- Carazas Aedo, Wilfredo. (2002). *Adobe: guía de construcción parasísmica*. Villefontaine Cedex, Francia: CRATerre.
- Chel, A.; Tiwari, G. N. (2009). Thermal performance and embodied energy analysis of a passive house—case study of vault roof mud-house in India. *Applied Energy* 86: 1956-69. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.033>.
- Christoforou, E.; Kylili, A.; Fokaides, P.; Ioannou, I. (2016). Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production* 112: 443-52. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.016>.
- Cooperación Comunitaria A.C. (2014). *Manual de autoconstrucción con adobe*. Comunidad el Obispo, Malinaltepec, Guerrero. México: Cooperación Comunitaria A.C.
- Dayaratne, R. (2010). Reinventing traditional technologies for sustainability: contemporary earth architecture of Sri Lanka. *Journal of Green building* 5: 23-33.
- Demir, I. (2008). Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste management* 28: 622-27. [10.1016/j.wasman.2007.03.019](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.019).
- Dreyer, L.; Hauschild, M.; Schierbeck, J. (2006). A framework for social life cycle impact assessment. *The international journal of life cycle assessment* 11: 88-97. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2005.08.223>.
- Du Plessis, C. (2002). *Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries*. WSSD edition ed. Pretoria, Sur Africa: CIB & UNEP-IETC, 0-7988-5540-1.
- El Fgaier, F.; Lafhaj, Z.; Brachelet, F.; Antczak, E.; Chapiseau, C. (2015). Thermal performance of unfired clay bricks used in construction in the north of France: Case study. *Case Studies in Construction Materials* 3: 102-11. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.09.001>.
- Emmanuel, R. (2004). Estimating the environmental suitability of wall materials: preliminary results from Sri Lanka. *Building and Environment* 39: 1253-61. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.02.012>.
- EPA Environmental Protection Agency. Url: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator> (Consultado el 28 Junio 2019)
- Espí, M. V. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la Construcción* 52: 29-43.
- Fathy, H. (1973). *Architecture for the poor*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Fay, R.; Treloar, G.; Iyer-Raniga, U. (2000). Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. *Building Research & Information* 28: 31-41. <https://doi.org/10.1080/096132100369073>.
- Ferreiro, A. (2010). *Arquitectura con tierra en Uruguay*. Teruel, España: Ecohabitar
- Giesekam, J.; Barrett, J. R.; Taylor, P. (2016). Construction sector views on low carbon building materials. *Building Research & Information* 44: 423-44. <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1086872>.
- 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. Ciudad de México, México: UNAM, Instituto de ingeniería.
- Guerrero Baca, L. F. (2007). Earthen architecture: Towards the recovery of a constructional culture. *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural-Journal of Cultural Heritage Studies* 20: 182-201.
- Hadjri, K.; Osmani, M.; Baiche, B.; Chifunda, C. (2007). Attitudes towards earth building for Zambian housing provision. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability* 160. <https://doi.org/10.1680/ensu.2007.160.3.141>.
- Hastings, I.; Huerta García, G. (2015). *Reconstrucción y mejoramiento de la vivienda de adobe en la Montaña de Guerrero, México*. 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. Cuenca, Ecuador: Proyecto vIirCPM-Universidad de Cuenca/PROTERRA

Hosseinijou, S. A.; Mansour, S.; Shirazi, M. A. (2014). Social life cycle assessment for material selection: a case study of building materials. *The international journal of life cycle assessment* 19: 620-45. [10.1007/s11367-013-0658-1](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0658-1).

INEGI Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Url: <https://www.inegi.org.mx>

Jørgensen, A.; Agathe Le Bocq, Liudmila N.; Hauschild, M. (2008). Methodologies for social life cycle assessment. *The international journal of life cycle assessment* 13: 96. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2007.11.367>.

Jørgensen, A.; Finkbeiner, M.; Jørgensen, M. S.; Hauschild, M. Z. (2010). Defining the baseline in social life cycle assessment. *The international journal of life cycle assessment* 15: 376-84. [10.1007/s11367-010-0176-3](https://doi.org/10.1007/s11367-010-0176-3).

Khasreen, M.; Banfill, P. F.; Menzies, G. (2009). Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: a review. *Sustainability* 1: 674-701. <https://doi.org/10.3390/su1030674>.

International Energy Agency; United Nations Environment Programme. (2018). 2018 Global Status Report: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.

Lawson, B.; Rudder, D. (1996). *Building materials, energy and the environment: Towards ecologically sustainable development*. Australia: Royal Australian Institute of Architects

Lucon, O.; Ürge-Vorsatz, D.; Zain Ahmed, A.; Akbari, H.; Bertoldi, P.; Cabeza, L.F.; Eyre, N.; Gadgil, A.; Harvey, L.D.D.; Jiang, Y.; Liphoto, E.; Mirasgedis, S.; Murakami, S.; Parikh, J.; Pyke, C.; Vilariño, M.V. (2014). Buildings. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por Edenhofer, O.; Pichs-Madruga, R.; Sokona, Y.; Farahani, E.; Kadner, S.; Seyboth, K.; Adler, A.; Baum, I.; Brunner, S.; Eickemeier, P.; Kriemann, B.; Savolainen, J.; Schlömer, S.; von Stechow, C.; Zwickel, T.; Minx, J.C. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Marceau, M. L.; VanGeem, M. G. (2006). Comparison of the life cycle assessments of an insulating concrete form house and a wood frame house. *Journal of ASTM International* 3: 1-11

Martín, S.; Mazarrón, F. R.; Cañas, I. (2010). Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia. *Construction and building materials* 24: 666-76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.002>.

Mastrucci, A.; Marvuglia, A.; Popovici, E.; Leopold, U.; Benetto, E. (2017). Geospatial characterization of building material stocks for the life cycle assessment of end-of-life scenarios at the urban scale. *Resources, Conservation and Recycling* 123: 54-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.003>.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2010). *Manual de construcción. Edificaciones antisísmicas de adobe*. Perú: Dirección Nacional de Construcción. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Minke, G. (2005). *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Montevideo: Fin de Siglo.

Minke, G. (2012). *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*.

Morales, R.; Torres, R.; Rengifo, L.; Irala, C. (1993). *Manual para la construcción de viviendas de adobe*. Lima, Perú.

Morel, J. C.; Mesbah, A.; Oggero, M.; Walker, P.. (2001). Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment* 36: 1119-26. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00054-8).

Nemry, F.; Uihlein, A.; Colodel, C. M.; Wetzler, C.; Braune, A.; Wittstock, B.; Hasan, I.; Kreißig, J.; Gallon, N.; Niemeier, S. (2010). Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs. *Energy and buildings* 42: 976-84. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.009>.

Nielsen, C. V. (2008). *Carbon footprint of concrete buildings seen in the life cycle perspective*. Concrete Technology Forum. Denver: NRMCA

Norris, G. A. (2006). Social impacts in product life cycles-Towards life cycle attribute assessment. *The international journal of life cycle assessment* 11: 97-104. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.04.017>.

- Obafemi, A. P. O.; Kurt, S.. (2016). Environmental impacts of adobe as a building material: the north cyprus traditional building case. *Case Studies in Construction Materials* 4: 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.12.001>.
- Ordóñez, L. (2018). La tierra, un material de construcción sustentable. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*: 41-48.
- Ortiz-Rodríguez, O.; Castells, F.; Sonnemann, G. (2010). Life cycle assessment of two dwellings: one in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *Science of the total environment* 408: 2435-43. [10.1016/j.scitotenv.2010.02.021](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.021).
- Pachauri, R. K.; Reisinger A. (2007). IPCC fourth assessment report. Geneva, Suiza.
- Pacheco-Torgal, F, Jalali, S. (2012). Earth construction: lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and building materials* 29: 512-19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>.
- Padgett, J. P.; Steinemann, A. C.; Clarke, J. H.; Vandenbergh, M. P. (2008). A comparison of carbon calculators. *Environmental impact assessment review* 28: 106-15. [10.1016/j.eiar.2007.08.001](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2007.08.001).
- Papayianni, I.; Anastasious, E.; Papadopoulou, K.. (2015). Comparative Life Cycle Assessment of earth-block and conventional concrete-based houses. *International Journal of Sustainable Development and Planning*: 309-17. [10.2495/SDP150261](https://doi.org/10.2495/SDP150261).
- Parra-Saldivar, M. L.; Batty, W. (2006). Thermal behaviour of adobe constructions. *Building and Environment* 41: 1892-1904
- Porta-Gándara, M. A., Rubio, E.; Fernández, J. L. (2002). Economic feasibility of passive ambient comfort in Baja California dwellings. *Building and Environment* 37: 993-1001. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00085-3).
- Ramesh, T.; Prakash, R.; Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and buildings* 42: 1592-600.
- Reddy, B. V. V.; Jagadish, K. S. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and buildings* 35: 129-37. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00141-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00141-4).
- Reddy, B. V. V. (2009). Sustainable Materials for Low Carbon Buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 4, 3: 175-81. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctp025>
- Revuelta-Acosta, J. D.; Garcia-Diaz, A.; Soto-Zarazua, G.M.; Rico-Garcia, E. (2010). Adobe as a sustainable material: A thermal performance. *Journal of Applied Sciences(Faisalabad)* 10: 2211-16.
- Rodríguez, V. M. (2001). Introducción a la arquitectura bioclimática. México, DF: Editorial Limusa SA, Universidad Autonoma Metropolitana Azcapotzalco.
- Rojas-Valencia, M. N.; Penagos, A. A.; Fernández Rojas, D.; López A. L. Morillón Gálves, D. (2017). Manufacture of reconstruction-bricks in Mexico. *AIP Conference Proceedings*, 020002. U.S.: AIP Publishing.
- Rotondaro, R. (2007). Arquitectura de tierra contemporánea: tendencias y desafíos. *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural-Journal of Cultural Heritage Studies* 20: 342-53.
- Santhosh, R.; Divyashree, V. P.; Manjunath, S.; Aadesh, D. (2016). Mud concrete block using construction and demolirion waste. *Conference: recent development in civil engineering*. Chikbalapur, India.
- Sanya, T. (2007). Living in earth - the sustainability of earth architecture in Uganda. *Caso estudio comparative*. Oslo, Sweden: The Oslo School of Architecture and Design,.
- Sartori, I.; Hestnes, A.G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and buildings* 39: 249-57
- Sharma, V.; Marwaha, B. M.; Vinayak, H. K. (2016). Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing. *International Journal of Sustainable Built Environment* 5: 141-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.004>.
- Shukla, A.; Tiwari, G. N.; Sodha, M.S. (2009). Embodied energy analysis of adobe house. *Renewable Energy* 34: 755-61.

Sinha, R.; Lennartsson, M.; Frostell, B. (2016). Environmental footprint assessment of building structures: A comparative study. *Building and Environment* 104: 162-71. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.012>.

Thormark, Catarina. (2000). Environmental analysis of a building with reused building materials. *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings* 1. <http://hdl.handle.net/2043/9844>

Udawattha, C.; Halwatura, R. (2017). Life cycle cost of different Walling material used for affordable housing in tropics. *Case Studies in Construction Materials* 7: 15-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2017.04.005>

Watson, N.; Walker, P.; Wylie, A.; Way, C. (2012). Evaluating the barriers to entry for non-conventional building materials. IABSE Symposium Report, 9-16: International Association for Bridge and Structural Engineering.

Zami, M. S.; Lee, A. (2010a). Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing—state-of-the-art review. *Journal of Building Appraisal* 5: 259-71.

Zami, M. S.; Lee, A. (2010b). Stabilised or un-stabilised earth construction for contemporary urban housing. 5th International conference on responsive manufacturing Green Manufacturing, 11-13. Ningbo, China: Ningbo Higher Education Park, the University of Nottingham

Zami, M. S.; Lee, A. (2011). Inhibitors of adopting stabilized earth construction to address urban low cost housing crisis: An understanding by construction professionals. *Journal of Building Appraisal* 6: 227-40. [10.1057/jba.2010.25](https://doi.org/10.1057/jba.2010.25).

Zegarra, L.; Quiun, D.; San Bartolomé, A. (2003). Técnicas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Iquitos, Perú.

AUTORES

Andrea Favaro colaborador externo en Habitat International Coalition - América Latina (HIC-AL); investigador en HIC-AL en temas de materiales de construcción locales; investigador independiente en ámbito de resiliencia urbana y cambio climático; asistente de planificación urbana en Carollo Ingeniería; licenciado en urbanística y planificación del territorio en la Universidad IUAV de Venecia.