



COMPARACIÓN AMBIENTAL DE BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADA CON CEMENTO Y CAL

Rubén Salvador Roux Gutiérrez¹, Luis Guerrero²

¹Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, México
rroux33@hotmail.com

²División de Ciencias y Artes para el Diseño. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, México
E-mail: lfgbaca@correo.xoc.uam.mx

Palabras claves: ACV, bloques de tierra comprimida, costo energético, materiales de construcción, energía incorporada o embebida.

Resumen

Con el fin de encontrar materiales de construcción de bajo coste que no comprometan la calidad de la construcción de las viviendas en México y en especial en el Estado de Tamaulipas, se han realizado estudios enfocados a la mejora de las propiedades físicas y mecánicas de los bloques de tierra comprimida (BTC). En trabajos conjuntos desarrollados entre la UAT en Tampico y la UAM-Xochimilco, se han evaluado diferentes procesos de elaboración y estabilización de bloques, obteniéndose notables mejoras en su resistencia mecánica y ante los efectos de la humedad. Sin embargo, la información con la que se contaba a la fecha no había considerado los requerimientos normativos emergentes en los que la evaluación del impacto ambiental de los materiales constructivos cada vez cobra mayor relevancia. Por tal motivo se planteó una evaluación comparativa del impacto ambiental de dos tipos de BTC, uno estabilizado con cemento y otro con cal apagada, a través del método de Análisis de Ciclo de Vida, cuyos resultados se exponen en el presente texto. El proceso se sustentó en la medición de catorce categorías de impacto y entre los resultados obtenidos destaca el hecho de que para trece de dichas categorías los BTC con cal presentan menor impacto ambiental, que los estabilizados con cemento.

1. INTRODUCCIÓN

La Universidad Autónoma de Tamaulipas en la ciudad de Tampico, ha venido desarrollando durante las últimas dos décadas una serie de estudios para determinar las cualidades y potencial del uso de bloques de tierra comprimida como un material de construcción alternativo a los sistemas que se utilizan de manera convencional en la región Noreste de la República Mexicana. En este proceso de investigación en el año de 2009 se estableció un acuerdo de intercambio académico entre dicha institución y la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, en la ciudad de México, a fin de realizar estudios similares en contextos diferentes, bajo un mismo enfoque metodológico.

Los resultados obtenidos hasta la fecha acerca de la estabilización de suelos con cal y su empleo en la elaboración de BTC han sido muy alentadores y han sido publicados en diferentes medios a nivel nacional e internacional. (Guerrero et al, 2009; 2011; Roux; Guerrero, 2011; 2012). Con el fin de incrementar la resistencia mecánica de los BTC que se generaron y analizaron en ambas universidades, se probó añadirles diferentes porcentajes de cemento, habiéndose obtenido resultados muy adecuados para su implementación constructiva. Sin embargo, se sabe que el cemento Portland es uno de los materiales de construcción que mayores deterioros provoca en el medio ambiente ya que para su elaboración, se requieren grandes cantidades de energía y se desprenden impresionantes cantidades de desechos a la tierra, al agua y a la atmósfera.

Como alternativa, se desarrollaron diversas pruebas de estabilización mediante la incorporación de hidróxido de calcio, material que necesita menos temperatura y tiempo de fabricación. Los BTC estabilizados con cal demostraron poseer características físicas aceptables referidas a las normatividades mexicanas e internacionales con respecto a su permeabilidad, absorción, densidad, características químicas en relación al pH, la reacción

de los minerales de las arcillas con la cal y su resistencia a los ácidos. Además, los bloques que contienen cal no sólo resultan tan resistentes como los que utilizan cemento, sino que son más estables ante la humedad, principal factor de deterioro de la tierra empleada para la fabricación de los BTC.

Sin embargo, la percepción acerca de la diferencia entre el impacto ambiental del cemento y de la cal resultaba ser relativamente subjetiva debido a la falta de información precisa acerca de la medición de las posibles afectaciones de dichos materiales al medio natural y a los usuarios. En este sentido es necesario destacar que la importancia de cuantificar el impacto ambiental de los productos y servicios está creciendo en la sociedad. Los consumidores y los gobiernos cada vez exigen más información acerca de la sustentabilidad de los productos y sobre la comparación de las posibles soluciones basadas en datos científicos que los avalen.

Por otro lado, en los últimos años, la sustentabilidad en el sector de la construcción se está legislando desde el punto de vista energético. Esto es así porque durante el uso de las viviendas es cuando se producen los mayores impactos ambientales asociados al consumo energético. No obstante, los materiales que se usan en las viviendas pueden contribuir o no al uso limpio y eficiente de los recursos naturales. De hecho, en la mayoría de los casos, depende de las cualidades de los componentes de la edificación el uso eficiente de energía durante su vida útil. La extracción de las materias primas, su procesamiento y fabricación, instalación, mantenimiento e incluso la gestión del residuo de los materiales de construcción pueden suponer hasta el 50% de los impactos totales de una vivienda.

De ahí la importancia de considerar el enfoque integral del ciclo de vida en las viviendas tomando en cuenta además del consumo energético cotidiano, el procesamiento de los materiales empleados para su edificación. Este tipo de procesos de medición y evaluación resultan muy útiles debido a que manejan datos claramente cuantificables y comparables desde una perspectiva objetiva cuyos parámetros se manejan en diferentes países del mundo.

Mediante el análisis de ciclo de vida, se evalúan y cuantifican los aspectos e impactos ambientales potenciales incluyendo el costo energético, a lo largo de toda la aplicación del producto, desde la extracción de las materias primas pasando por la producción, uso y hasta la disposición final de sus residuos.

En el presente estudio se reportan los principales resultados del análisis de ciclo de vida (ACV) de bloques de tierra comprimida (BTC) que se ha llevado a cabo a fin de caracterizarlos como materiales utilizables en viviendas de interés social, ambiental y residencial en diferentes zonas del estado de Tamaulipas, al noreste de la República Mexicana.

Para la realización de este trabajo se toman como referencia las normas ISO que regulan la metodología de análisis de ciclo de vida:

- ISO 14040:2006. *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.*
- ISO 14044:2006. *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.*

Y a nivel nacional, la norma análoga:

- NMX-SAA-14040-IMNC-2008. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

2. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE

2.1. Objetivo

El objetivo del análisis de ciclo de vida (ACV) que se detalla en este texto consiste en identificar y evaluar los impactos ambientales y la energía embebida asociados a la producción, manejo, implementación, uso y desecho de BTC, con el fin de generar datos que se puedan incorporar al código del costo energético que se está desarrollando para las viviendas de Tamaulipas. Con ello, se busca mostrar las cualidades de los BTC frente otros materiales convencionales de construcción.

2.2. Alcance

2.2.1. Descripción del producto

El BTC es un material de construcción fabricado con una mezcla de tierra y un material estabilizante, como cal, cemento, asfalto o yeso, que es moldeada y comprimida utilizando una prensa mecánica ó manual. Es un sustituto del ladrillo en actividades de construcción; se utiliza en la construcción de muros apilándolo manualmente y utilizando una mezcla de los mismos materiales como mortero de asiento.

En este estudio se llevó a cabo un ACV sobre dos tipos de bloques: BTC-1 y BTC-2, habiendo sido estabilizados los primeros con cemento y los segundos con cal. Sus principales características se muestran a continuación. Para ambos tipos de bloques se considera una vida útil de 30 años.

Ambos bloques miden 29 cm x 14 cm x 10 cm. La masa unitaria del BTC-1 es de 7,65 kg y la del BTC-2 de 6,8 kg. Los datos promedio que se han registrado para resistencia a la compresión de las piezas son de 76,32 kgf/cm² en los BTC-1 y 79,69 kgf/cm² en los BTC-2.

2.2.2. Función y unidad funcional

La Unidad Funcional (UF) es la unidad del producto utilizado como referencia en el estudio. La unidad funcional de los sistemas de producto a estudiar será la de un metro cuadrado de muro de carga, estructura, cerramiento y acabado superficial.

Para ambos casos se requieren 44 bloques por metro cuadrado para conformar la unidad funcional. La masa total del murete de los BTC-1 es de 336,77 kg mientras que la de los BTC-2 es de 299,27 kg.

No obstante, para la evaluación de la fase de uso no se incluye la energía operacional como pared de un edificio completo, sino solamente se considera su mantenimiento para que se cumplan las funciones de estructura, muros y acabado superficial a las que estaría destinada. Tampoco se incluye en el estudio los impactos de los bienes de capital e infraestructura.

2.2.3. Metodología de evaluación y tipos de impactos

La metodología de evaluación establece los factores de caracterización mediante los que se cuantifican los impactos ambientales.

Para la mayoría de impactos descritos en la Tabla 1, la caracterización se llevará a cabo mediante el método TRACI 2 (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impact*) V4.00 2012 desarrollada por la Agencia de Protección de Estados Unidos.

No obstante, existen algunos impactos que el método TRACI 2 no tiene implementados en su sistema y que también se evaluarán. Este es el caso del *Uso del suelo* y del *Agotamiento de los recursos minerales*, para los cuales se utilizará el método ReCiPe Midpoint (I) V1.06 / World ReCiPe I, uno de los métodos más actualizados y armonizados hasta el momento y que ha sido desarrollado por Pré Consultants. Los recursos energéticos se evaluarán mediante el método CED (*Cumulative Energy Demand* V1.8).

Las categorías de impacto seleccionadas se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los impactos seleccionados

Categoría de impacto	Descripción
Destrucción de la capa de ozono	La capa de ozono es un filtro de radiación ultravioleta hacia la tierra. Los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs) destruyen esta capa.
Cambio climático	Aumento de la temperatura de la tierra como consecuencia de la emisión de gases de efecto invernadero tales como CO ₂ , CH ₄ , NO _x , O ₃ , etc (quema de combustible, emisiones industriales, etc.).
Oxidación fotoquímica (smog)	Es un oxidante fotoquímico que junto a los COV y NO _x (quema de combustible, emisiones industriales, etc.) forman el smog fotoquímico.
Acidificación	Disminución del pH del suelo y del agua como consecuencia de emisiones de NO _x , SO ₂ , NO ₂ , NH ₃ , HCl, HF, etc.
Eutrofización	Aumento de los nutrientes inorgánicos SO ₄ ⁻² y NO ₃ ⁻ en el agua (excrementos, fertilizantes, etc.).
Compuestos carcinogénicos	Compuestos químicos que generan cáncer al ser humano.
Contaminantes no carcinogénicos	Compuestos químicos que generan enfermedades diferentes al cáncer.
Efectos respiratorios	Contaminantes que causan enfermedades respiratorias.
Ecotoxicidad	Contaminantes que causan toxicidad a los ecosistemas (plantas y animales)
Uso del suelo agrícola o urbano.	El uso del suelo genera impactos ambientales. Área de suelo agrícola o urbano utilizado y/o ocupada derivada de una actividad industrial.
Agotamiento de los recursos minerales	Por ejemplo: minerales como la bauxita, la caliza, hierro, etc.
Agotamiento de los recursos fósiles	Por ejemplo: petróleo, gas natural, carbón, etc.
Energía embebida	Energía requerida a lo largo del ciclo de vida de un producto. Incluye energía no renovable de origen fósil, nuclear, de biomasa y renovable de origen solar, geotérmica, eólica e hídrica.

2.2.4. Otras consideraciones

Las limitaciones del presente estudio como sucede con todos los ACV, se derivan fundamentalmente de la accesibilidad, disponibilidad y calidad de datos de base, los cuales pueden afectar a la precisión de los cálculos. Asimismo, el hecho de combinar información local con la que proviene de bases de datos generadas en sitios ajenos al caso de estudio, introduce cierta incertidumbre en los resultados. Por ejemplo, las condiciones medias de Estados Unidos y Canadá (US LCI) y sobre todo las de Europa (Ecoinvent), generalmente no representan las circunstancias asociadas a los procesos de producción de México.

Además, hay que tener en cuenta que categorías tales como el impacto de uso del suelo agrícola o urbano, agotamiento de recursos hídricos, agotamiento de los recursos minerales, agotamiento de los recursos fósiles y la energía embebida están calculadas por los métodos ReCiPe y CED, desarrollados para Europa y sólo representan parcialmente las condiciones mexicanas. No obstante a falta de métodos específicos para Norteamérica, es necesario considerar al menos estos datos y métodos sin perder de vista la relatividad de los resultados. Esto significa que aunque la información no sea totalmente precisa para el entorno local, al utilizarse como referente para los dos casos estudiados, la comparación de resultados sí puede considerarse fiable.

3. ANÁLISIS DE INVENTARIO

Los datos sobre las entradas y salidas de los procesos unitarios de fabricación de los BTC, fueron desarrollados a partir de la práctica productiva realizada en la Universidad Autónoma de Tamaulipas especialmente en el año 2011, acotada a la región de Tamaulipas, en el noreste de la República Mexicana. La técnica de recopilación de estos datos se ha realizado a partir de la propia experiencia académica.

Lo mismo se puede decir acerca del tipo y cantidad de materias primas, así como las distancias de transporte desde su área de suministro.

No obstante, los datos cualitativos de la etapa de suministro de materias primas, que incluye la extracción y procesamiento de los materiales, como por ejemplo el cemento, o el tipo de transporte, se han tomado de la base de datos US LCI, la cual muestra datos medios de Estados Unidos a partir de una mezcla de tecnologías. Cuando no ha sido posible obtener información, se ha utilizado la base de datos Ecoinvent.

El modelo de ciclo de vida diseñado en el software SimaPro se ha realizado utilizando los procesos que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Procesos seleccionados en el modelo

Proceso	Proceso en la base de datos	Base de datos
Cemento Portland	Portland cement, at plant/US	US LCI
Transporte en camión	Transport, single unit truck, diesel powered/US	
Maquinaria de demolición	Loader operation, large, INW/RNA	
Gasolina revolvedora	Gasoline, combusted in equipment/US	
Arcilla	Clay, at mine/CH U	Ecoinvent
Arena	Sand, at mine/CH U	
Cal hidráulica	Lime, hydraulic, at plant/CH U	
Embalaje de la cal hidráulica	Kraft paper, unbleached, at plant/RER U	
Agua	Tap water, at user/RER U	
Pegamento	Vinyl acetate, at plant/RER U	
Sal de mesa	Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, diaphragm cell, at plant/RER U	
Vertedero BTC	Disposal, limestone residue, 5% water, to inert material landfill/CH U	

A continuación, se describen los datos recopilados que conforman el inventario de este estudio ACV, a partir de la información local y la obtenida de las bases extranjeras.

3.1. Etapa de materias primas y fabricación

Esta etapa incluye la extracción y procesamiento de las materias primas, su transporte hasta la obra y los recursos naturales empleados para la fabricación de los BTC.

Se considera la extracción minera y el procesamiento de la arcilla y la arena así como todos los procesos de la fabricación del cemento Portland y la cal hidráulica.

El transporte de las materias primas se hace mediante camiones que utilizan diesel como combustible y las distancias son las que se indican en la Tabla 3. Todas las materias primas se transportan a granel excepto la cal hidráulica que se proporciona en sacos de 25 kg de papel, suponiendo que un saco pesa 100 g y está fabricado con papel kraft. Se estima que los sacos de papel se eliminan en un vertedero local.

Tabla 3. Datos de inventario de la fabricación de los BTC

Tipo de BTC	Materia prima	Tipo de materia prima	% en massa	Procedencia hasta lugar de fabricación del BTC (km)	Consumo de agua (L/kg BTC)
BTC-1	Cemento	Procesada	8	105	0,42
	Arcilla	Sin procesar	43,85	10	
	Arena limosa	Sin procesar	48,15	35	
BTC-2	Cal hidráulica	Procesada	7	400	0,42
	Arcilla	Sin procesar	44,38	10	
	Arena limosa	Sin procesar	48,62	35	

Los BTC se fabrican en el mismo lugar de la obra. La mezcla de los componentes de los BTC se realiza mediante una revolvedora que consume 0,0183 l/kg de gasolina. La mezcla de las materias primas se introduce en un molde que cuenta con una prensa hidráulica que se acciona manualmente de manera que se le da forma a los BTC.

Los bloques formados deben dejarse secar entre 5 y 10 días antes de ser colocados en la obra para conformar el muro. El agua que se utiliza proviene de la red de municipal.

3.2. Etapa de obra y de mantenimiento

Esta fase consiste en la colocación de los BTC conformando un tramo de muro, e incluye el consumo del mortero para unir los bloques, el revoque y la pintura que proporciona el acabado superficial. Para la unión de los bloques y el revoque se utilizan 0,006 m³ de mortero. Un metro cúbico de mortero se prepara con 389 kg de cal, 1520 kg de arena y 200 l de agua. Como acabado superficial se utiliza una pintura a la cal. Se emplean 0,143 litros por metro cuadrado de pared. Para fabricar 10 litros de pintura se consideran 4 kg de cal, 0,5 kg de sal de mesa y 0,25 ml de acetato de polivinilo (pegamento RESISTOL 850).

El único mantenimiento que requiere el muro consiste en pintarlo cada dos años con la misma pintura a la cal que se usó al construir el muro. Cada vez que se pinta el muro se consumen 0,0715 l/m². Como se ha comentado anteriormente, la vida útil de los muros de BTC es de 30 años, por lo que se realiza el cálculo correspondiente a la cantidad de pintura requerida en concepto de mantenimiento.

3.3. Etapa de fin de vida

Pasados los 30 años, cuando el muro ha llegado a su fin de vida, se considera su demolición, la cual se llevaría a cabo con una retroexcavadora de tipo Backhoe Loaders. Se estima un tiempo de trabajo por parte de esta máquina de 0,144 h/m³ (Doka, 2009). El residuo de BTC derruido se transporta una distancia de 30 km ya sea hasta el vertedero o bien, hasta el punto donde será reciclado. Se considera que el reciclado tiene un impacto nulo respecto a la disposición en vertedero.

Debido a la alta reciclabilidad de los BTC, se establece un escenario que consiste en que el 90% de los residuos de BTC se reciclan y el restante 10% va a un vertedero de materiales inertes. Los límites del sistema del reciclado terminan una vez los residuos han sido trasladados al punto donde se reciclará el material. No se incluye en este estudio ni la preparación del material, es decir su triturado, ni el nuevo uso que se le dé a este material secundario. Estos últimos impactos, así como la cantidad de material que se evita por el hecho de utilizar material secundario (antes residuo) podrían incluirse en el caso en el que el BTC sea fabricado con residuos de antiguos bloques.

4. EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL E INTERPRETACIÓN

Como se ha comentado, para la obtención de los resultados del ACV se ha utilizado el software SimaPro 7.3.3. Se manejaron 3 métodos de evaluación para diferentes categorías de impacto:

- TRACI 2 V.4: *Destrucción de la capa de ozono, Cambio climático, Oxidantes fotoquímicos (smog), Acidificación, Eutrofización, Carcinogénicos, No carcinogénicos sobre la salud humana, Efectos respiratorios sobre la salud humana y Ecotoxicidad.*
- ReCiPe Midpoint (I) V1.06 / World ReCiPe I: *Uso de suelo agrícola y urbano, Agotamiento de recursos hídricos, Agotamiento de recursos minerales y Agotamiento de recursos fósiles.*
- CED (Cumulative Energy Demand): *Energía embebida.*

Los resultados del ACV del muro de los BTC-1 se muestran en la Tabla 4 por Unidad Funcional, es decir 1m² de muro.

Tabla 4. Resultados globales del ACV del muro de BTC-1

Categoría de impacto	MP y fabricación	Obra y mantenimiento	Fin de vida	Total
Destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	3,99E-07	1,04E-07	1,48E-08	5,18E-07
Cambio climático (kg CO ₂ eq)	55,23	2,04	3,64	60,91
Oxidantes fotoquímicos - smog (kg O ₃ eq)	8,46	0,07	1,05	9,59
Acidificación (mol H ⁺ eq)	21,12	0,18	1,95	23,24
Eutrofización (kg N eq)	1,63E-02	2,47E-04	2,06E-03	1,86E-02
Salud Humana: carcinogénicos (CTUh)	4,01E-07	1,41E-09	5,04E-08	4,53E-07
SH: no carcinogénicos (CTUh)	5,99E-06	7,37E-08	4,85E-07	6,55E-06
SH: efectos respiratorios (kg MP10 eq)	4,75E-02	6,62E-04	2,68E-03	5,08E-02
Ecotoxicidad (CTUe)	54,94	0,04	9,30	64,29
Uso de suelo agrícola y urbano (m ² a)	7,47	4,85	2,48	14,8
Agotamiento de recursos hídricos (m ³)	4,08E-01	1,43	8,11E-05	1,84
Agotamiento de recursos minerales (kg Fe eq)	7,31E-03	3,07E-03	5,26E-06	1,04E-02
Agotamiento de recursos fósiles (kg Petróleo eq)	10,36	0,23	1,22	11,81
Energía embebida (MJ)	446,77	16,59	53,77	517,13

*CTUh : Unidad de Toxicidad Humana (Casos de toxicidad/kg_{emisión})

*CTUe: Unidad de Toxicidad en los Ecosistemas (PAF m³ día /kg_{emitido}). PAF: Fracción Potencialmente Afectada de especies.

Como se puede observar, las materias primas y fabricación es la etapa que presenta mayor impacto ambiental, con más del 70% del impacto sobre todas las categorías excepto la del *agotamiento de los recursos hídricos*.

El consumo de agua durante la construcción del muro, es el que más contribuye al *agotamiento de los recursos hídricos*. Además, esta etapa de obra repercute de manera importante sobre la *destrucción de la capa de ozono*, *agotamiento de los recursos hídricos* y el *agotamiento de los recursos minerales*. El fin de vida contribuye entre un 3% y 23% sobre el total.

El mezclado mediante la revolvedora es el causante de más del 50% del impacto sobre el *smog*, *acidificación*, *eutrofización*, *carcinogénicos*, *ecotoxicidad*, *agotamiento de los recursos fósiles* y en la *energía embebida*, a consecuencia de la producción y combustión de la gasolina que consume.

El cemento y más concretamente su clinker, es el responsable de más de la mitad del impacto sobre la *destrucción de la capa de ozono*, *cambio climático*, *no carcinogénicos* y *efectos respiratorios*.

La arena incide con más 55% del impacto total sobre el *uso del suelo agrícola y urbano*, *agotamiento de los recursos hídricos* y *agotamiento de los recursos minerales*. El transporte de las materias primas incide hasta un 10% dependiendo de la categoría de impacto.

Finalmente, la producción y combustión de la gasolina es el proceso con más *energía embebida*, toda ella procedente de recursos fósiles. En segundo lugar en consumo energético sería el cemento Portland.

Los resultados del ACV del muro de los BTC-2 se muestran en la Tabla 5 por Unidad Funcional, es decir 1 m² de muro.

Como se puede observar, las materias primas y fabricación presentan el mayor impacto ambiental con valores entre un 22% - 92% del total del impacto para cada categoría.

La etapa de construcción del muro contribuye de manera importante en las categorías de *agotamiento de los recursos hídricos* y en menor medida sobre la *destrucción de la capa de ozono* y el *agotamiento de los recursos minerales*.

El fin de vida es otra etapa con impacto relevante sobre la mayoría de las categorías. Por último, el mantenimiento no influye sobre el total. El proceso de mezclado mediante la revolvedora es el causante de más del 50% del impacto sobre el *smog*, *cambio acidificación*, *eutrofización*, *carcinogénicos*, *no carcinogénicos*, *ecotoxicidad*, *agotamiento de los recursos*

fósiles y en la *energía embebida*, debido a la producción y combustión de la gasolina que consume.

Tabla 5. Resultados globales del ACV del muro de BTC-2

Categoría de impacto	MP y fabricación	Obra y mantenimiento	Fin de vida	TOTAL
Destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	1,08E-06	1,04E-07	1,32E-08	1,20E-06
Cambio climático (kg CO ₂ eq)	35,74	2,04	3,40	41,18
Oxidantes fotoquímicos - smog (kg O ₃ eq)	6,34	0,07	1,01	7,42
Acidificación (mol H ⁺ eq)	12,24	0,18	1,86	14,28
Eutrofización (kg N eq)	1,50E-02	2,47E-04	1,97E-03	1,72E-02
Salud Humana: carcinogénicos (CTUh)	2,88E-07	1,41E-09	4,73E-08	3,37E-07
SH: no carcinogénicos (CTUh)	3,49E-06	7,37E-08	4,56E-07	4,02E-06
SH: efectos respiratorios (kg MP10 eq)	1,83E-02	6,62E-04	2,57E-03	2,15E-02
Ecotoxicidad (CTUe)	50,89	0,04	8,73	59,66
Uso de suelo agrícola y urbano (m ² a)	11,21	0,00	0,02	11,24
Agotamiento de recursos hídricos (m ³)	0,41	1,43	0,00	1,84
Agotamiento de recursos minerales (kg Fe eq)	3,51E-02	3,07E-03	4,70E-06	3,82E-02
Agotamiento de recursos fósiles (kg Petróleo eq)	8,85	0,23	1,14	10,22
Energía embebida (MJ)	451,14	11,85	48,11	511,10

*CTUh : Unidad de Toxicidad Humana (Casos de toxicidad/kg_{emisión})

*CTUe: Unidad de Toxicidad en los Ecosistemas (PAF m³ día /kg_{emitido}). PAF: Fracción Potencialmente Afectada de especies.

La cal es la responsable de entre 1% y el 80% del impacto dependiendo de la categoría debido al diesel que utiliza la maquinaria para su extracción.

El embalaje de la cal presenta su mayor impacto en el *uso del suelo* ya que se requieren plantaciones madereras para la fabricación del papel aunque también incide sobre el resto de categorías.

La arena incide con un 50% del impacto total sobre el *agotamiento de los recursos hídricos* y con un 20% sobre el *agotamiento de los recursos minerales*.

El transporte de las materias primas incide hasta un 15% dependiendo de la categoría de impacto. En este caso también es la producción y combustión de la gasolina el proceso con más *energía embebida*, toda ella procedente de recursos fósiles. En segundo lugar el consumo energético sería el la cal hidráulica.

La Tabla 6 muestra un resumen de los resultados del ACV de los BTC. Se evidencia el impacto por bloque, hasta que se construye el muro y de todo el ciclo de vida de ambos tipos de bloques.

Tabla 6. Resumen de resultados del ACV de los BTC

Categoría de impacto	BTC-1	BTC-2
Destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	5,18E-07	1,20E-06
Cambio climático (kg CO ₂ eq)	60,91	41,18
Oxidantes fotoquímicos - smog (kg O ₃ eq)	9,59	7,42
Acidificación (mol H ⁺ eq)	23,24	14,28
Eutrofización (kg N eq)	1,86E-02	1,72E-02
Salud Humana: carcinogénicos (CTUh)	4,53E-07	3,37E-07
SH: no carcinogénicos (CTUh)	6,55E-06	4,02E-06
SH: efectos respiratorios (kg MP10 eq)	5,08E-02	2,15E-02
Ecotoxicidad (CTUe)	64,29	59,66
Uso de suelo agrícola y urbano (m ² a)	14,8	11,24
Agotamiento de recursos hídricos (m ³)	1,84	1,84
Agotamiento de recursos minerales (kg Fe eq)	1,04E-02	3,82E-02
Agotamiento de recursos fósiles (kg Petróleo eq)	11,81	10,22
Energía embebida (MJ)	517,13	511,10

5. CONCLUSIONES

Como se puede observar, la mayor parte de los conceptos evaluados para el caso de los bloques de tierra comprimida estabilizados con cemento (BTC-1) presenta valores superiores a los BTC-2, en los que el estabilizante es la cal.

Este hecho obedece a que, a pesar de que la baja cantidad de estabilizante empleado, el impacto que conlleva la fabricación del cemento es mucho más elevado que el de la cal.

Este valor resulta especialmente significativo para conceptos tales como la *destrucción de la capa de ozono* en el que los bloques con cemento cuadruplican la afectación de los que llevan cal. Consecuentemente el dato sobre los efectos en el cambio climático son casi cincuenta por ciento superiores en los BTC-1.

Es evidente que la elevada temperatura a la que se produce el cemento en comparación con la cal así como la duración de su proceso, provocan un fuerte efecto en la generación de gases de efecto invernadero. Mientras que el cemento requiere temperaturas de calcinación del carbonato de calcio y del clinker cercanas a los 1500°C, la cal se produce a 900°C.

En los efectos sobre la salud también resulta notablemente más perjudicial el uso del cemento. Este fenómeno se deriva de la emisión de sustancias contaminantes que se generan durante la producción del cemento en el que además de los desechos generados por la combustión, la materia prima desprende gases al calcinarse.

Destaca el impacto del embalaje de la cal sobre el uso del suelo debido a los árboles requeridos para la fabricación del papel. En ambos casos la etapa de construcción del muro, contribuye de manera importante sobre el agotamiento de los recursos hídricos y sobre el agotamiento de los recursos naturales. El final del proceso influye hasta en un 23% sobre el ciclo de vida de los BTC-1 y mientras que el 15% sobre los BTC-2. El mantenimiento apenas influye sobre el total.

Un dato que llama la atención es el de la energía embebida que resultó ser superior en el caso de los bloques que utilizan cemento. Lo cual es lógico ya que la energía embebida del bloque con cemento es superior a la de la cal.

Finalmente, hay que reconocer que cualquier proceso industrial tendrá un efecto negativo sobre el medio ambiente que debe ser evaluado con miras a identificar las fases de su transformación que resultan más nocivas. Pero, en el caso que se analiza en este texto, se ha podido constatar que ante la posibilidad de optar por un estabilizante para la realización de bloques de tierra comprimida (BTC) el uso de la cal tendrá menor impacto que el cemento sobre el entorno natural y sobre la salud.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Doka, G. (2009). Ecoinvent, 2009. Life cycle inventory of waste treatment service. En *Ecoinvent report No. 13*. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

Guerrero, L.; Alonso, E. M.; Bedolla, J. A. (2009). La cal como componente de la arquitectura de tierra. En: *Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas*. México: Plaza y Valdés, pp. 43-68.

Guerrero, L.; Roux, R.; Soria, F.J. (2011). Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México. En: *Palapa* Vol. V, No. I (10), Colima: Universidad de Colima, pp. 45-58.

International Standad (2006). ISO 14040:2006. *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework*. Switzerland: ISO.

International Standad (2006). ISO 14044:2006. *Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines*. Switzerland: ISO.

Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, AC. (2008). NMX-SAA-14040-IMNC-2008. *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. México: IMNC.

Roux, R.; Guerrero, L. (2011). Resistencia a la humedad de bloques de tierra comprimida estabilizados con cemento y con cal. En: *Earth USA 2011 Proceedings*, Albuquerque: EARTH USA, pp. 200-209.

Roux R.; Guerrero L. (2012). Estudio comparativo de bloques de tierra comprimida estabilizados con cal y con cemento. En: *Construcción con Tierra*, No. 5, Buenos Aires: UBA, pp. 83-92.

Curriculos

Rubén Salvador Roux Gutiérrez. Arquitecto en la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Doctor en ETSA de la Universidad de Sevilla. Actualmente es Jefe de Investigación de la FADU de la UAT-Tampico. Líder del Cuerpo Académico UAT-CA-075. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel I) y de la Red Iberoamericana PROTERRA.

Luis Guerrero. Arquitecto, Maestro en Restauración Arquitectónica y Doctor en Diseño con especialidad en Conservación Patrimonial. Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. Miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA. Coordinador del Comité Científico de Patrimonio Construido con Tierra del ICOMOS Mexicano.