

# Análisis de la sustentabilidad del concreto hidráulico usando energía

L.M. Reynosa Morales<sup>1</sup>, H.A. Guillén Trujillo<sup>1</sup>,  
F.A. Alonso Farrera<sup>1</sup>, J.F. Grajales Marín<sup>1</sup>,  
J.E. Castellanos Castellanos<sup>1</sup>, F.J. Olgún Coca<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ingeniería, Boulevard Belisario Domínguez, kilómetro 1081, Sin Número, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. | <sup>2</sup> Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería – Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

## RESUMEN

En este trabajo, se aplicó el análisis eMergético para realizar una valoración ambiental incorporando consideraciones técnicas en la producción de concreto hidráulico con el fin de evaluar su dependencia de los recursos naturales no renovables, influenciado por las entradas externas (importaciones). Se eligieron tres técnicas de control de calidad en el mezclado: industrializada, semi-industrializada y con medios manuales. Esto se realizó para medir la cantidad de uso de los recursos del medio ambiente en términos de energía solar equivalente (seI). El Índice de Sustentabilidad Ambiental (ESI, por sus siglas en inglés) y sus transformidades se evaluaron y se presentaron como un indicador sintético de sustentabilidad. Los resultados obtenidos muestran una alta dependencia en la producción de concreto sobre las fuentes de recursos externos, resultando el concreto semi-industrializado el más sustentable. Se destaca la insustentabilidad de las técnicas estudiadas debido a la dependencia de insumos externos procedentes de sistemas económicos; esto es, además, confirmado por el hecho de que la mayor proporción de los insumos para el proceso no son renovables. El análisis eMergético demostró ser una.

**Palabras Clave:** eMergía, contabilidad ambiental, sustentabilidad, transformidad, concreto hidráulico.

## ABSTRACT

In the present work, energy analysis was applied to the mixing process of hydraulic concrete with the purpose of evaluating its dependency on non-renewable natural resources. Three concrete mixing techniques were examined: industrialized, semi-industrialized and manual mixing. Natural resource use was measured in equivalent solar energy (seI). The Environmental Sustainability Index (ESI) and transformities were evaluated and presented as synthetic sustainability indicators. Results show that concrete mixing is highly dependent on external resources. Semi-industrialized concrete is the most sustainable. The techniques studied are deemed unsustainable because of their dependence on external inflows from economic systems. Also, most of the inflows are non-renewable. EMergy analysis was shown to be an effective tool for evaluating the sustainability of concrete mixing processes.

**Key words:** eMergy, environmental accounting, sustainability, transformity, concrete.

## INTRODUCCIÓN

En particular, este estudio se refiere al uso intensivo de los recursos minerales no renovables y los combustibles fósiles en la extracción de los agregados inertes (arena y grava triturada), la utilización de agua, la fabricación de cemento para la producción del concreto y, en particular, como objetivo evaluar la cantidad de entradas de recursos ambientales en el proceso de producción. En comparación con los datos obtenidos y el cálculo de los valores calculados anteriormente (Björklund *et al.*, 2001; Buranakarn, 1998; Brown y Buranakarn, 2003; Brown y McClanahan, 1992; Pulselli *et al.*, 2008) se pone de

manifiesto que el carácter del análisis eMergético es particularmente sensible a los límites de contexto y sistemas.

En este trabajo se aplicó un método de valoración ambiental en la producción de concreto con el fin de evaluar su dependencia de los recursos naturales no renovables, influenciado por las entradas externas (importaciones). Se eligieron tres técnicas de fabricación: industrializada, semi-industrializada y con medios manuales, y se evaluaron mediante el análisis eMergético. Las transformidades resultantes se compararon con evaluaciones anteriores de eMergía hechas por otros autores con el fin de poner de manifiesto que el análisis de eMergía es sensible al contexto local y los límites del sistema de referencia. El

Índice de Sustentabilidad Ambiental (ESI) se evaluó y se presenta como un indicador sintético de sustentabilidad. Los resultados obtenidos muestran una alta dependencia en la producción de concreto sobre las fuentes de recursos externos, resultando el concreto semi-industrializado el más sustentable. Destacando la insustentabilidad de las técnicas estudiadas debido a la dependencia de insumos externos procedentes de sistemas económicos; esto es, además, confirmado por el hecho de que la mayor proporción de los insumos para el proceso no son renovables.

## METODOLOGÍA

El procedimiento de análisis eMergético está diseñado para evaluar los flujos de energía y materiales de los sistemas en unidades comunes (emjoules solares, abreviado como seJ) que permitan al analista comparar aspectos ambientales y financieros de los sistemas. Sobre la base de esta unidad, eMergía se define como la cantidad de energía solar utilizada, directamente o indirectamente para producir un producto o servicio (Odum, 1971, 1983, 1988, 1996) (Brown *et al.*, 2004). En otras palabras, eMergía es la "memoria energética", que se ha utilizado a lo largo de una secuencia de diferentes procesos para obtener un producto o servicio.

Este procedimiento permite la comparación e incorporación de los beneficios y costos ambientales con variables tradicionales de beneficio-costos financiero para proveer una perspectiva más amplia en la toma de decisiones (Guillén, 1998). La metodología general para el análisis eMergético es un acercamiento de sistemas de "arriba hacia abajo". El primer paso es construir diagramas de los sistemas para organizar la manera de pensar y conocer las relaciones entre los componentes y los flujos de recursos. El segundo paso consiste en la construcción de las tablas de análisis de eMergía basada en los diagramas descritos anteriormente. Como tercer paso, se calculan los diferentes índices de eMergía que relacionan los flujos de eMergía de la economía con aquellos del medio ambiente, y finalmente, la interpretación de los índices que permiten diagnosticar la viabilidad económica y capacidad de carga de los sistemas en estudio. La información fue presentada en tablas de análisis eMergéticos por alternativas y en su conjunto.

Los objetivos planteados para el estudio fueron:

1. Proveer una metodología que evalúe beneficios y costos en la producción de concreto hidráulico.
2. Comparar diferentes métodos de producción de concreto, usando el indicador eMergético ESI y Transformidades.

De acuerdo a la recopilación de información en la zona de estudio y del estado de conocimiento actual, se identificaron las técnicas empleadas para la elaboración de concreto hidráulico, además la industria de la construcción local refirió al concreto  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  como el más utilizado en el medio.

Para el estudio de las alternativas relacionadas a la producción de concreto, se eligieron tres técnicas: 1) industrializada, 2) semi-industrializado y 3) con medios manuales, y se evaluaron mediante el análisis eMergético. La comparación se hizo por medio de los índices eMergéticos obtenidos en un estudio de caso en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez,

Chiapas, México, para determinar la viabilidad de estas alternativas con respecto al componente ambiental. La unidad de evaluación fue el metro cúbico.

## RESULTADOS

Este estudio permitió realizar comparaciones entre las técnicas de producción de concreto planteados, usando el indicador eMergético ESI. Los atributos eMergéticos de los sistemas fueron cuantificados y usados como indicadores de las características de cada alternativa.

En el diagrama de los flujos de energía que interactúan en el sistema de producción de concreto (Figura 1) se muestran los recursos renovables y no renovables, la energía adquirida en importaciones (materiales, servicios, mano de obra). A partir del diagrama de flujos de energía se realizó el análisis de la eMergía de la producción de concreto de cada alternativa. Para cada caso, la eMergía de la producción de concreto se debió a los siguientes insumos: materias primas, transporte, equipo y maquinaria, combustibles, mano de obra, mantenimiento y seguros.

La eMergía total consumida en cada técnica de producción fue de  $5.98E15 \text{ seJ}$ ,  $5.87E15 \text{ seJ}$  y  $8.32E15 \text{ seJ}$ , con medios manuales, semi-industrializado e industrializado, respectivamente. Para la producción de concreto industrializado el 98.14% se materializa en los ciclos sedimentarios naturales de los materiales de construcción. Maquinaria (0.084%), combustible (1.00%) y la mano de obra (0.24%). El concreto semi-industrializado el 99.44% se materializa en los ciclos sedimentarios naturales de los materiales de construcción. Equipo y herramienta (0.045%), combustibles (0.022%) y la mano de obra (0.076%). Finalmente, el concreto elaborado con medios manuales el 98.02% se materializa en los ciclos sedimentarios naturales de los materiales de construcción. Equipo y herramienta (1.47%), y la mano de obra (0.50%).

En el ESI se indica la contribución del medio natural, es decir, el trabajo energético que realizan los ecosistemas para la generación de procesos sobre la carga ambiental. Según Brown y Ulgiati (2004), valores de ESI inferiores a 1 indican sistemas que consumen recursos y están asociados a economías altamente desarrolladas y orientadas para el consumo. Los valores reportados en este estudio indican que el concreto semi-industrializado (0.000129) es mayor que el fabricado con medios manuales (0.000127) y el industrializado (0.0000984) siendo el sistema de semi-industrializado el que afecta en menor grado el equilibrio del medio ambiente, por lo tanto, es más sustentable ambientalmente que el concreto industrializado y el elaborado con medios manuales. En la Figura 2 puede observarse la comparación gráfica de los resultados obtenidos para cada alternativa referente al ESI.

### CONCLUSIONES

Se puede concluir que la contribución dominante de los recursos minerales subraya la insustentabilidad de la industria de la construcción. Los materiales no renovables y no reciclables, tales como el concreto están experimentando el agotamiento. La transformidad se presenta como una medida de la utilización de los recursos del medio ambiente debido a los materiales de construcción; es un parámetro intensivo que proporciona una clasificación de los materiales de construcción sobre la base de una jerarquía de energía. En general, el análisis de eMergía combina calidad (transformidad) con la cantidad (energía o masa). Por ejemplo, el análisis de eMergía del proceso de construcción dependerá de la elección de los materiales de construcción (calidad en términos de costo ambiental debido al uso de la energía y la materia) y el propio proyecto de construcción (cantidad de materiales necesarios para construir elementos estructurales).

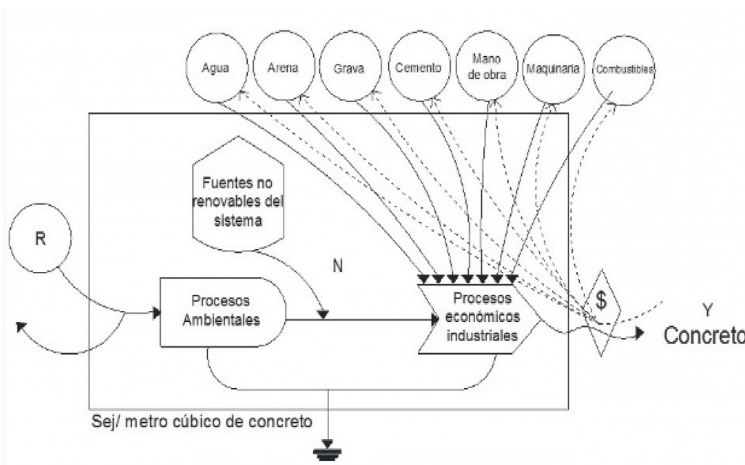


FIGURA 1 Diagrama simplificado de flujos de energía en la producción de concreto.

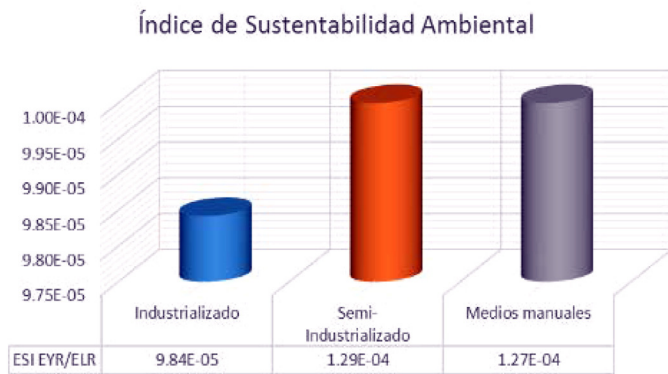


FIGURA 2 Sustentabilidad en la producción de concreto.

## LITERATURA CITADA

- ASCIONE, M., L. CAMPANELLA, F. CHERUBINI & S. ULGIATI, 2009. Environmental driving forces of urban growth and development. An emergy-based assessment of the city of Rome, Italy. *Landscape and Urban Planning*, 93 (3–4): 238–249.
- ABEL, T., 2015. Convergence and divergence in the production of energy transformation hierarchies. *Ecological Modelling*, 315: 4–11.
- AGOSTINHO, F., A. BERTAGLIA, C. ALMEIDA, & B. GIANETT, 2015. Influence of cellulase enzyme production on the energetic–environmental performance of lignocellulosic ethanol. *Ecological Modelling*, 315: 46–56.
- AGUILAR-RIVERA, N., J. ALEJANDRE-ROSAS & R. ESPINOSA-LÓPEZ, 2015. Evaluación emergy Y LCA en la agroindustria azucarera de Veracruz, México. *INCA Cultivos Tropicales*, 36 (4): 144–157.
- BARGIGLI, S., & S. ULGIATI, 2003. *Emergy and Life-Cycle assesment of steel production in Europe*. Gainesville, Florida, E.U.: University of Florida.
- BASTIANONI, S., A. GALLI, R.M. PULSELLI & V. NICCOLUCCI, 2007. *Environmental and economic evaluation of natural capital appropriation through building construction: practical case study in the Italian context*. Ambio.
- BASTIANONI, S., F. MORANDI, T. FLAMINIO, R.M. PULSELLI E.B. & TIEZZI, 2011. Emergy and emergy algebra explained by means of ingenuous set theory. *Ecological Modelling*, 222 (16): 2903–2907.
- BERARDI, U., 2012. Sustainability assessment in the construction sector: rating systems and rated buildings. *Sustainable Development*, 20 (6): 411–424.
- BJÖRKLUND, J., U. GEBER & T. RYDBERG, 2001. Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling*, 31 (4): 293–316.
- BROWN, M.T., & V. BURANAKARN, 2003. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resources, Conservation and Recycling*, 38 (1): 1–22.
- BROWN, M.T., H.T. ODUM & S.E. JORGENSEN, 2004. Energy hierarchy and transformity in the universe. *Ecological Modelling*, 178 (1–2): 17–28.
- BROWN, M., & S. ULGIATI, 2004. Emergy Analysys and Environmental Accounting. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 2: 329–354.
- BROWN, M.T., & T.R. MCCLANAHAN, 1992. *Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals. Final Report to the Cousteau Society*. Gainesville, FL.: Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida.
- BURANAKARN, V., 1998. *Evaluation of recycle and reuse of building materials using the emergy analysis method*. Ph.D. Dissertation. University of Florida, FL.
- BURÓN-MAESTRO, M., 2012. *El hormigón y la sostenibilidad en la normativa. Sostenibilidad: eficiencia energética, evaluación de edificios y estructuras*. Madrid, España: IECA.
- CAMPBELL, E., 2015. Emergy analysis of emerging methods of fossil fuel production. *Ecological Modelling*, 315: 57–68.

- DOHERTY, S.J., F.N. SCATENA & H.T. ODUM, 1994.** *Emergy Evaluation of the Luquillo Experimental Forest and Puerto Rico. Final Report to International Institute of Tropical Forestry.* Rio Piedras, Puerto Rico.
- EMERGY SYNTHESIS, 8., 2015.** Emergy and environmental accounting: Theories, applications, and methodologies. *Ecological Modelling, 315:* 1-3.
- FERREIRA C.Ó.I., S.M.D. HURTADO, E. GARCÍA, C.R. BONILLA-CORREA & M. RAO I., 2010.** Emergía de tres sistemas agroforestales en el sur del municipio. *Acta Agronómica 59 (3):* 327-337.
- GUILLÉN, H.A., 1998.** *Sustainability of Ecotourism and Traditional Agricultural Practices in Chiapas, México.* Gainesville, Florida, E.U., Tesis Doctoral.
- GUTIERREZ, L., 2003.** *El concreto y otros materiales para la construcción. Manizales, Colombia.* Centro de publicaciones de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- HAMZA, N., & M. HORNE, 2007.** Educating the designer: An operational model for visualizing low-energy architecture. *Building and Environment, 42:* 3841-3847.
- JOSA, A., A. AGUADO, A. ARDIM & E. BYARS, 2007.** Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU. *Cement Concrete Research, 37 (5):* 781 - 788.
- JOSA, A., A. AGUADO, A. HEINO, E. BYARS & A. CARDIM, 2004.** Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. *Cement Concrete Research, 34 (8):* 1313 - 1320.
- KJELLEN, K., M. GUIMARAES & A. NILSSON, 2005.** *The CO2 Balance of Concrete in a Life Cycle Perspective.* Danish Technological-DTI.
- LACARRIÈRE, B., DEUTZ, K., JAMALI ZGHAL, N., & LE CORRE, O. 2015.** Emergy assessment of the benefits of closed-loop recycling accounting for material losses. *Ecological Modelling, 315:* 77-87.
- LI, L., H. LU, D. TILLEY & G. QIU, 2014.** Effect of time scale on accounting for renewable emergy in ecosystems located in humid and arid climates. *Ecological Modelling, 287:* 1-8.
- MENDOZA-SÁNCHEZ, J.F., 2014.** Criterios de sustentabilidad para carreteras en México. Sanfandila: *Publicación Técnica No. 392, Instituto Mexicano del Transporte.*
- MORANDI, F., D.E. CAMPBELL, F.M. PULSELLI & S. BASTIANONI, 2015.** Emergy evaluation of hierarchically nested systems: application to EU27 Italy and Tuscany and consequences for the meaning of emergy indicators. *Ecological Modelling, 315:* 12-27.
- MU, H., X. FENG & K.H. CHU, 2012.** Calculation of emergy flows within complex chemical production systems. *Ecological Engineering, 20:* 88-93.
- NISBET, M., & M.G. VAN GEEM, 1997.** Environmental life cycle inventory of Portland cement and concrete. *World Cement, 3:* 3007.
- ODUM, H.T., 1971.** *Environment. Power and Society.* Wiley, New York, NJ.
- ODUM, H.T., 1983.** *Environment. Power and Society.* Wiley, New York, NJ.



- ODUM, H.T., 1988.** Self organization, transformity and information. *Science*, 242 (4882): 1132-1139.
- ODUM, H.T., 1996.** *Environmental Accounting Energy and Environmental Decision Making*. New York, NJ.: John Wiley and Sons, Inc.
- ORTEGA-RODRÍGUEZ, E., C. VALLIM DE MELO & P.P. EL POZO-RODRÍGUEZ, 2014.** El análisis emergético como herramienta para evaluar la sustentabilidad en dos sistemas productivos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23 (4): 59-63.
- PADE, C., & M. GUIMARAES, 2007.** The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement Concrete Research*, 37 (9): 1348-1356.
- PULSELLI, R.M., E. SIMONCINI, E., F.M. PULSELLI & S. BASTIANONI, 2007.** Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy and Buildings*, 39: 620-628.
- PULSELLI, R.M., E. SIMONCINI, R. RIDOLFI & S. BASTIANONI, 2008.** Specific emergy of cement and concrete: An emergy-based appraisal of building materials and their transport. *Ecological Indicators*, 8 (5): 647-656.
- RUIZ DE ARBULO-LOPEZ, P., B. LANDETA MANZANO, P. DÍAZ DE BASURTO-URAGA & G. ARANA-LANDÍN, 2016.** Adopción de Sistemas de Gestión de Ecodiseño en el sector de la construcción. Análisis de la perspectiva de los diferentes agentes involucrados. *Dyna*, 83 (196): 124-133.
- SUCA A, F., A.A. SUCA & J.R. SICHE, 2014.** Análisis emergético del café peruano. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 17 (1): 43-57.
- TENNENBAUM, S.E., 2015.** Emergy and co-emergy. *Ecological Modelling*, 3: 116-134.
- TILLEY, D.R., 2015.** Transformity dynamics related to maximum power for improved emergy yield estimations. *Ecological Modelling*, 315: 96-107.
- VEGA, L., J. ORDOÑEZ & G. PINILLA, 2013.** Towards a systemic assessment of environmental impact (SAEI) regarding alternative hydrosedimentological management practice in the Canal del Dique, Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 33: 41-48.
- VILBISS, C., & M. BROWN, 2015.** New method to compute the emergy of crustal minerals. *Ecological Modelling*, 315: 108-115.
- VOLD, M., & R.A. ONNING, 1995.** *LCA of Cement and Concrete*. Stiftelsen.
- WRIGHT, C., & H. OSTERGARD, 2015.** Scales of renewability exemplified by a case study of three Danish pig production systems. *Ecological Modelling*, 315: 28-36.
- WU, X., F. WU, X. TONG, J. WU, L. SUN & X. PENG, 2015.** Emergy and greenhouse gas assessment of a sustainable, integrated agricultural model (SIAM) for plant, animal and biogas production: Analysis of the ecological recycle of wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 96: 40-50.
- ZARBA, L., & M.T. BROWN, 2015.** Cycling emergy: computing emergy in trophic networks. *Ecological Modelling*, 315: 37-45.