

Aplicación de la Inteligencia Artificial en el diseño de mezclas de concreto. Estado del Arte

Artificial Intelligence in Concrete Mixture Design: A State-of-the-Art report

Luis Octavio González-Salcedo
PhD. (Cand.), Profesor asociado
Grupo de Investigación en Materiales y Medio Ambiente,
Departamento de Ingeniería, Facultad de Ingeniería y
Administración, Universidad Nacional de Colombia – Sede
Palmira.
logonzalezsa@unal.edu.co

Aydée Patricia Guerrero-Zúñiga
PhD., Profesora titular
Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería
Eólica y Estructuras Inteligentes, Escuela de Ingeniería Civil y
Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle

Silvio Delvasto-Arjona
PhD., Profesor titular
Grupo de Materiales Compuestos, Escuela de Ingeniería de
Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle

*Recibido: 20 de septiembre 2012
Aprobado: 2 noviembre 2012*

Resumen

En este artículo se presentan los diferentes esfuerzos en la aplicación de la técnicas de la Inteligencia Artificial para predecir algunas propiedades del concreto, tanto en estado fresco como endurecido. El Estado del Arte muestra un uso importante de las Redes Neuronales Artificiales y de los Algoritmos Evolutivos, que son aplicados en la predicción de propiedades, la optimización, la dosificación de la materia prima, el control de calidad y la validación de modelos. Finalmente, se revisan los avances para diseños de mezclas en concretos reforzados con fibras.

Palabras clave: Algoritmos Evolutivos, Concreto reforzado con fibras, Diseño de mezclas de concreto, Inteligencia Artificial, Redes Neuronales Artificiales.

Abstract

This paper shows the manifold efforts in applying Artificial Intelligence techniques for predicting some properties of concrete, both in its fresh and hardened state. The State-of-the-Art shows an important use of Artificial Neural Networks and Evolutionary Algorithms, which are applied on the prediction of properties, optimization, raw material proportioning, quality control, and validations of models. Finally, advances on the fiber-reinforced-concrete mix-design are reviewed.

Keywords: Evolutionary algorithms, fiber-reinforced concrete, concrete mixture design, artificial intelligence, artificial neural networks.

1. Introducción

El concreto es uno de los materiales de ingeniería y construcción más esenciales, el cual se elabora a partir de una apropiada mezcla de agregados gruesos y finos, y cemento con una controlada cantidad de agua. Una de sus propiedades más importantes es su resistencia a la compresión, y normalmente se requiere un largo periodo de curado para medirla en probetas generalmente cilíndricas, con edades de 28 días después de realizada la mezcla (Wang *et al.*, 2003). A pesar de que esto parece un problema sencillo en el que únicamente intervienen pocos parámetros que se pueden elegir, como los contenidos relativos de cada uno de los componentes principales en la mezcla, nunca se ha resuelto analíticamente de forma convincente, y la mayoría de los métodos de dosificación usados a nivel mundial se basan en la generalización de experiencias previas y disponibles en formas de tablas o fórmulas empíricas (Setién *et al.*, 2003).

El problema de la dosificación de las mezclas de concreto (o el diseño de las mezclas) es un problema para ser resuelto en un espacio de decisión de 10, 20 o más dimensiones. Varios métodos experimentales se han desarrollado para predecir la resistencia a la compresión del concreto, los cuales se pueden clasificar en dos categorías (Wang *et al.*, 2003, p. 1) La medición de valores de resistencia a la compresión a edades tempranas, por ejemplo a uno o tres días del mezclado, y encontrar relaciones entre estos valores tempranos y su correspondiente resistencia a los 28 días; esta predicción, aunque es confiable, requiere un periodo de curado y medi-

ción en probetas; 2) los métodos llevados a cabo de la siguiente manera: análisis de la composición del concreto y sus respectivas características, identificación de algunos factores que afectan la resistencia a la compresión del concreto, y la inferencia de ecuaciones y funciones entre estos factores y el valor de la resistencia; aunque estos métodos son simples, algunas veces entregan resultados con baja confiabilidad, en gran parte debido a que muchos parámetros están relacionados con la resistencia a la compresión para ser usados en un análisis por regresión, especialmente por sus características estocásticas y difusas.

En las últimas décadas, la Inteligencia Artificial (IA) se ha desarrollado gradualmente como un importante procesador de información, que ha tenido aplicaciones en diversos problemas de la Ingeniería (Adeli, 2001). En este artículo se presenta una exploración de las diferentes líneas de investigación de la IA aplicada al diseño de mezclas de concreto, así como una revisión organizada de los trabajos realizados. Para tal fin se ha organizado en tres secciones, a saber: primero se hace una breve descripción y revisión de los conceptos teóricos sobre la IA y sus diferentes técnicas, posteriormente se organizan y presentan las temáticas exploradas con las técnicas de IA en la predicción de las propiedades del concreto y otras aplicaciones a partir de la composición de la mezcla del material en mención, y finalmente se presentan las conclusiones respectivas.

2. Marco teórico y trabajos previos

Diversos autores (Wildberger, 1996; Pulgarín, 2001; Barber *et al.*, 2002; Trujillo y Gómez, 2007; Maldonado y Gómez, 2010) coinciden en definir la IA como una ciencia que tiene por objetivo el diseño y la construcción de máquinas capaces de imitar el comportamiento inteligente de los seres humanos. La literatura especializada reporta que el campo de la IA está conformado por diversas técnicas conocidas como paradigmas, cuyas descripciones se encuentran para consultas futuras en las referencias indicadas, y que se mencionan a continuación: Aprendizaje Automático (López de Mantarás, 2002; Gutiérrez 2009), Ingeniería del Conocimiento (Mira y Delgado, 2002), Lógica Difusa (Zadeh, 1965; Torra, 2002; Saridakis y Dentsoras, 2008), Redes Neuronales Artificiales –RNA– (Saridakis y Dentsoras, 2008), Sistemas Multi-Agentes (Sierra, 2002), Razonamiento Basado en Casos (Saridakis y Dentsoras, 2008), Sistemas Expertos (Pignani, 2000), Redes Bayesianas (Charniak, 1991; Gutiérrez, 2009), Vida Artificial (Sipper, 1995; Correa, 2002), Computación Evolutiva o Algoritmos Evolutivos (Fogel, 1994; Wildberger, 1996; Bäck *et al.*, 1997; Pulgarín, 2001; Cisneros *et al.*, 2011), y la Minería de Datos (Vallejos, 2006; Gutiérrez, 2009). Es importante mencionar que los Algoritmos Evolutivos se conforman por Algoritmos Genéticos (AG), Programación Genética (PG) y Estrategias Evolutivas (EE).

A pesar de las diversas técnicas disponibles, los trabajos desarrollados para su aplicación, en temáticas relacionadas con el diseño de mezclas de concreto, se han enfocado principalmente en la utilización de Redes Neuronales Artificiales, Computación Evolutiva y Lógica Difusa, así como en la conformación de aplicaciones híbridas, principalmente de modelos neuronales artificiales y de modelos evolutivos. Estos trabajos se pueden organizar en aplicaciones para predicción de propiedades, optimización de materiales, control de calidad, en la dosificación propia de la materia prima y en la validación de resultados experimentales, como se muestra en la Tabla 1, donde adicionalmente se referencia el reporte existente en la literatura con

el fin de que el lector pueda realizar una consulta futura. En la siguiente sección se hace una presentación de los objetivos para cada una de las aplicaciones desarrolladas.

3. Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en el diseño de mezclas de concreto

3.1. Predicción de propiedades

Una de las mayores aplicaciones de la IA en el diseño de mezclas de concreto es la predicción de propiedades. Se destacan dos grandes campos de la predicción: de las propiedades en estado fresco y de las propiedades en estado endurecido; en el primer campo, las predicciones se centran en las propiedades reológicas, mientras que para el segundo un gran número se han realizado para las propiedades mecánicas, y en una proporción menor, aunque interesante, para las propiedades de durabilidad.

Con respecto a la predicción de las propiedades reológicas, las aplicaciones de IA se han enfocado en determinar los valores de la viscosidad y del esfuerzo de cizallamiento, del flujo de asentamiento, del tiempo de asentamiento, y el asentamiento del cono de Abrams. Se destacan los siguientes desarrollos: 1) La elaboración de sendos modelos híbridos (uno de RNA y programación lineal, y el otro de diseño de experimentos, RNA y programación lineal) para estimar el asentamiento del cono de Abrams y el flujo del asentamiento. 2) La elaboración de una RNA para la estimación del asentamiento del cono de Abrams en concretos de alta resistencia. 3) La elaboración de una RNA para la estimación del tiempo de asentamiento en concretos auto-compactados. 4) La elaboración de un modelo evolutivo basado en AG para estimar el asentamiento del cono de Abrams, el flujo y el tiempo de asentamiento.

Tabla 1. Resumen sobre las aplicaciones de técnicas de la IA en temáticas relacionadas con el diseño de mezclas de concreto.

Objetivo	Temática	Referencia del reporte
Predicción de propiedades	Estimación de propiedades reológicas en estado fresco	Yeh, 1999; Maruyama <i>et al.</i> , 2002; Noguchi <i>et al.</i> , 2003; Yeh, 2009; Agrawal y Sharma, 2010; Suryadi <i>et al.</i> , 2011
	Estimación de propiedades mecánicas en estado endurecido	Yeh, 1999; Kim y Kim, 2002; Garg, 2003; Noguchi <i>et al.</i> , 2003; Gupta <i>et al.</i> , 2004; Yeh, 2006; Özgan y Öztürk , 2007; Tesfamariam y Najjaran, 2007; Karahan <i>et al.</i> , 2008; Alshihri <i>et al.</i> , 2009; Yeh, 2009; Başyigit <i>et al.</i> , 2010; Nezhad <i>et al.</i> , 2010
	Estimación de propiedades de durabilidad en estado endurecido	Peng <i>et al.</i> , 2002; Nezhad <i>et al.</i> , 2010; Noguchi <i>et al.</i> , 2003; Hewayde <i>et al.</i> , 2007; Ukrainczyk <i>et al.</i> , 2007; Bakhary <i>et al.</i> , 2010; Ghassemzadeh <i>et al.</i> , 2010
Optimización	Optimización de la mezcla para una propiedad buscada	Oh <i>et al.</i> , 1997; Yeh, 1999; Maruyama <i>et al.</i> , 2002; Garg, 2003; Noguchi <i>et al.</i> , 2003; Wang <i>et al.</i> , 2003; Yeh, 2006; Özgan y Öztürk , 2007; Jamil <i>et al.</i> , 2009; Lee <i>et al.</i> , 2009; Yeh, 2009; Nezhad <i>et al.</i> , 2010
	Optimización de un componente de la mezcla	Bektas y Demirel, 2008; Chen, 2010
Control de calidad	Durabilidad del concreto	Noguchi <i>et al.</i> , 2003; Li <i>et al.</i> , 2005; Ukrainczyk y Ukrainczyk, 2007 Gopalakrishnan <i>et al.</i> , 2009; Bakhary <i>et al.</i> , 2010
	Pruebas no destructivas	Hola y Schabowicz, 2005; Lizarazo, 2006; Lizarazo y Gómez , 2007
	Comportamiento a edades tempranas	
Dosificación o diseño de la mezcla	Correlación de un diseño de mezcla con una propiedad buscada	Oh <i>et al.</i> , 1997; Yeh, 1999; Garg, 2003; Setién <i>et al.</i> , 2003; Jamil <i>et al.</i> , 2009; Lee <i>et al.</i> , 2009
	Conjunto de diseños de mezclas para una propiedad buscada	Maruyama <i>et al.</i> , 2002; Noguchi <i>et al.</i> , 2003
Validación de resultados de investigación experimental	Validaciones varias	Sridevi, 1999; Cladera, 2002; Yaraser, 2004; Yeh, 2006; Nataraja <i>et al.</i> , 2007

Uno de los campos más fértiles en producción de literatura especializada es la aplicación de la IA para predecir propiedades mecánicas. Un alto número de trabajos se destacan para predecir la resistencia de diseño a la compresión con los siguientes desarrollos:

1. La elaboración de sendos modelos **híbridos** (uno de RNA y programación lineal, y otro de diseño de experimentos, RNA y programación lineal) para estimar la resistencia a la compresión.
2. La elaboración de RNA para estimar la resistencia a la compresión en concretos sin reforzamiento con fibra en la matriz cementicia para resistencia normal, alta resistencia y en concretos de alta y baja densidad (pesados y aligerados, respectivamente).
3. La elaboración de una RNA para estimar la resistencia a la compresión en concretos reforzados con fibras metálicas.
4. La elaboración de modelos evolutivos para estimar la resistencia a la compresión, y que están basados algunos en AG y otros en PG.
5. La elaboración de un modelo basado en Lógica Difusa para estimar la resistencia a la compresión, cuyo desarrollo reporta el resultado en un rango de valores de resistencias (< 30 MPa, 30-60 MPa, 60-90 MPa, y > 90 MPa).
6. La elaboración de modelos híbridos para estimar la resistencia a la compresión, basados en combinaciones de RNA-AG, RNA-PG, RNA-EE, y RNA-Lógica Difusa. Otros reportes muy puntuales muestran la predicción de la resistencia al corte (Cladera, 2002) y a la flexión (Karahán *et al.*, 2008) (para la última propiedad en concretos reforzados con fibras), y usando RNA todas las estimaciones.

La aplicación de la IA se ha extendido también a la predicción de algunas propiedades relacionadas con su durabilidad, como por ejemplo la elaboración de RNA para estimar la profundidad de carbonatación (Lu y Liu, 2009), la permeabilidad (Yaraser, 2004), y la difusión del ion Cloro (Peng

et al., 2002; Nezhad *et al.*, 2010). Otros desarrollos destacados son: 1) La elaboración de una RNA para estimar la categoría del concreto en términos de durabilidad de acuerdo con un diseño de mezcla (Morcoux y Lounis, 2005; Ukrainczyk y Ukrainczyk, 2007); 2) La elaboración de una RNA para la detección de daños estructurales (Bakhary *et al.*, 2010); 3) La elaboración de una RNA para estimar la corrosión en el refuerzo (Ukrainczyk *et al.*, 2007), y 4) La elaboración de una RNA para predecir la degradación del concreto por ataque con sulfatos (Hewayde *et al.*, 2007).

3.2. Optimización

La IA ha sido aplicada en problemas de optimización para diseños de mezclas, fundamentalmente en dos aspectos: el primero en especificar una dosificación de todos sus componentes buscando cumplir las propiedades usualmente consideradas en la práctica ingenieril de la construcción, como es el cumplimiento de la resistencia a la compresión y el asentamiento del cono de Abrams; el segundo aspecto está relacionado con la optimización de un componente en particular, como lo han presentado Bektas y Demirel (2008) y Chen (2010). En todos los casos se han desarrollado modelos basados en RNA.

3.3. Control de calidad

Se distinguen tres campos relevantes: uno está relacionado con la predicción del comportamiento de durabilidad del concreto descrito más arriba en "Predicción de propiedades" (Noguchi *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2005; Ukrainczyk y Ukrainczyk, 2007; Gopalakrishnan *et al.*, 2009; Bakhary *et al.*, 2010); el segundo está relacionado con los resultados en pruebas no destructivas para estimar la resistencia a la compresión (Hola y Schabowicz, 2005; Lizarazo, 2006; Lizarazo y Gómez, 2007), y el tercero tiene que ver con la predicción a edades tempranas de la resistencia a la compresión. Con respecto al segundo campo, se destaca la elaboración de una RNA para estimar la resistencia a la compresión a partir del valor de propagación de la velocidad

ultrasonido y a partir de la resistividad eléctrica, como métodos no destructivos. Las temáticas mencionadas con aplicaciones de IA buscan simular actividades de supervisión técnica o interventoría que son comunes.

3.4. Dosificación en el diseño de la mezcla

Un tema importante de aplicación de la IA es la dosificación de los componentes para un concreto en particular, es decir, realizar el diseño de la mezcla. En esta temática es importante resaltar el uso de dos técnicas cuyos resultados son muy diferentes desde el punto de vista de la solución entregada: el uso de Redes Neuronales Artificiales, en primer lugar, cuyo resultado es único, y con el cual se logra simular en cierta medida un protocolo de diseño de mezclas, y obviamente se obtiene una solución única (Oh *et al.*, 1997; Yeh, 1999; Garg, 2003; Setién *et al.*, 2003; Jamil *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009); la segunda técnica es el uso de Algoritmos Evolutivos, mediante la cual, buscando alcanzar una o varias especificaciones en el concreto, la aplicación que explora en máximos locales permite presentar un conjunto de soluciones de diseños de mezclas (Maruyama *et al.*, 2002; Noguchi *et al.*, 2003). Es importante mencionar que estas aplicaciones se han desarrollado para concretos no reforzados con fibras.

3.5. Validación de resultados en investigaciones experimentales

Un campo promisorio, pero aún poco explorado, es la utilización de técnicas de la IA para validar resultados en investigaciones experimentales. Sridevi (1999) validó la optimización de las características de la zona interfacial de la matriz cemento-fibra usando Algoritmos Genéticos; Cladera (2002), usando la información disponible de valores de resistencia al corte, entrenó una Red Neuronal Artificial para validar su propuesta de diseño a cortante de vigas en concreto de alta resistencia; Yarasir (2004) validó con redes neuronales artificiales la caracterización de la permeabilidad de mezclas

de concreto usadas en aplicaciones de transportes; Yeh (2006), a partir de redes neuronales, validó la estimación de la resistencia a la compresión con diseño de experimentos; Nataraja *et al.* (2007) validaron con redes neuronales artificiales una clasificación inductiva para la categorización de las cenizas volantes.

3.6. Avances en la aplicación de IA en el diseño de mezclas de concreto reforzado con fibras

Los autores de la presente investigación han abordado la temática de la aplicación de la IA en dosificaciones para diseños de mezclas de concreto reforzadas con fibras, y se han enfocado en dos líneas de trabajo: la predicción de propiedades para diseños previos y la presentación de soluciones reflejadas en dosificaciones de sus componentes en mezclas que requieran cumplir con una especificación en particular, y la dinámica propia de la investigación se han reportado resultados exploratorios (González y Will, 2009; González *et al.*, 2009; González y Will, 2012; González *et al.*, 2012a, 2012b; Guerrero *et al.*, 2012). Como es propio también de la misma dinámica, diversas investigaciones a nivel mundial han comenzado etapas exploratorias, de acuerdo con Althun *et al.* (2008) y Karahan *et al.* (2008), sobre la aplicación de la IA en problemas relacionados con diseños de mezclas de concreto reforzado con fibras, en la estimación de la resistencia al corte y de las resistencias a la compresión y a la flexión.

4. Conclusiones y trabajos futuros

El estado del arte permite trazar las siguientes conclusiones:

- El concreto es un material de ingeniería y de construcción por excelencia, elaborado a partir de la adecuada dosificación de su materia prima, conformada hoy en día por el cemento, el agua, los agregados, las adiciones minerales y

los aditivos químicos. El ejercicio de determinar las cantidades de dicha dosificación se conoce como el diseño de la mezcla, y se realiza a partir de protocolos que conducen a la obtención de la resistencia a la compresión, la cual es la propiedad mecánica en el concreto referida como especificación principal en la ingeniería estructural y de la construcción.

- La resistencia a la compresión normalmente se determina mediante ensayos destructivos aplicados a probetas después de 28 días de realizada la mezcla, lo cual lleva a invertir recursos materiales, económicos y de tiempo en la espera de dicho resultado. Esta condición conduce al desarrollo de modelación a partir de modelos de regresión, estimación de la resistencia de diseño a partir de resistencias a menor edad, y al uso de técnicas no destructivas basadas en la resistividad eléctrica y acústica, entre otras. Sin embargo, la dimensión del espacio que involucra las variables de entrada en un modelo, implica tener que considerar no solo las cantidades de cada componente sino también atributos en dichos componentes, razón por la cual dicho espacio normalmente no es pequeño. En adición, los componentes se relacionan entre sí para influir de manera conjunta en sus propiedades, tanto en estado fresco como endurecido, y hacen la modelación difícil de formular convencionalmente.
- La complejidad descrita traslada la modelación al campo de la Inteligencia Artificial, disciplina que brinda diversas técnicas para solucionar también diferentes problemas de la ingeniería. En la temática en cuestión, es decir, la relacionada con el diseño de mezclas de concreto, se han desarrollado diversas aplicaciones, fundamentalmente en la predicción de propiedades mecánicas, propiedades reológicas, y propiedades de durabilidad; en la optimización con base en especificaciones que se deben cumplir, en la determinación de dosificaciones para diseños de mezclas, en el control de calidad y en la validación de investigaciones experimentales. Con respecto a las técnicas de IA usadas, predomina el desarrollo de aplicaciones con Redes Neuro-

nales Artificiales y Algoritmos Evolutivos, así como con modelos híbridos.

- Con respecto a la aplicación en el diseño de mezclas de concreto reforzadas con fibras, es muy puntual el desarrollo realizado, principalmente para condiciones locales y restringidas, lo cual hace que sea un campo de interés por desarrollar. La revisión de la literatura especializada muestra que hay un potencial grande por explorar y desarrollar.

Referencias

- Agrawal, V. & Sharma, A. (2010). Prediction of Slump in concrete using Artificial Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, No. 69, pp. 25-32.
- Ahn, N., Jang, H. & Park, D.K. (2006). Presumption of Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam using Artificial Neural Network Model. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 103, pp. 2351-2358.
- Alshihri, M.M., Azmy, A.M. & El-Bisy, M.S. (2009). Neural networks of predicting compressive strength of structural light weight concrete. *Construction and Building Materials*, No. 23, pp. 2214-2219.
- Altun, F., Kişi, Ö. & Aydin, K. (2008). Predicting the compressive strength of steel fiber added light-weight concrete using neural network. *Computational Materials Science*, Vol. 42, No. 2, pp. 259-265.
- Bäck, T., Hammel, U. & Schwefel, H.P. (1997). Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State. *IEEE Transactions of Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-17.
- Bakhary, N., Hao, H. & Deeks, A.J. (2010). Structure damage detection using Neural Network with multi-stage substructuring. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 95-110.

- Barber, F., Botti, V.J. & Koehler, J. (2002). AI: Past, Present and Future. *UPGRADE*, Vol. 3, No. 5, pp. 2-5.
- Başyigit, C., Akkurt, I., Kilincarslan, S. & Beycioğlu, A. (2010). Prediction of compressive strength of heavy weight concrete by ANN and FL models. *Neural Computing and Applications*, Vol.19, pp. 507-513.
- Bektas E., B. & Demirel, B. (2008). Determination of the effects of grounded pumice on compressive strength of concrete with Artificial Neural Networks. *E-Journal of New World Sciences Academy, Natural and Applied Sciences, Civil Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 20-29.
- Charniak, E. & Mcdermott, D.V. (1985). Introduction to Artificial Intelligence. Massachusetts: Addison-Wesley, Reading.
- Charniak, E. (1991). Bayesian Networks without Tears. *AI Magazine*, 50-63.
- Chen, L. (2010). Grey and Neural Network prediction of concrete compressive strength using physical properties of electric arc furnace oxidizing slag. *J. Environ. Eng. Manage.*, Vol. 20, No. 3, pp. 189-194.
- Cisneros G., M., Hernández, C. y Arjona, M.A. (2011). Algoritmos genéticos: Características, ventajas y aplicaciones. *SEP*, Vol. 1, No. 3, pp. 24-31.
- Cladera B., A. (2002). *Shear design of reinforced high-strength concrete beams*. Doctoral Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Correa, L.C. (2002). Vida artificial y sistemas complejos. *Ventana Informática*, No. 10, pp. 55-60.
- Fogel, D.B. (1994). An introduction to simulated evolutionary optimization. *IEEE Transactions of Neural Networks*, Vol. 5, No. 1, pp. 3-14.
- Garg, R. (2003). *Concrete mix design using Artificial Neural Networks*. Thesis (Master of Engineering: Civil Engineering (Structures)). Thapar Institute of Engineering & Technology (Deemed University), Patiala, India.
- Ghassemzadeh, F., Sajedi, S., Shekarchi, M., Mirghaderi, R. & Khanzadeh, M. (2010). *Accuracy of shrinkage prediction models in high performance concretes containing slag and silica fume*. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona.
- González S., L.O., Delvasto A., S., Guerrero Z., A.P., Will, A.L.E. y Díaz, W. (2009). *Una exploración sobre el uso de redes neuronales artificiales para estimar propiedades en estado endurecido, de concretos reforzados con fibras metálicas*. V Congreso Internacional de Materiales, Santiago de Cali.
- González S., L.O. y Will, A.L.E. (2009). *Diseño de mezclas de concretos reforzados con fibras metálicas, usando Inteligencia Artificial – Pruebas preliminares*. Conferencia en el Seminario de la Maestría en Matemática de la Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán.
- González-Salcedo, L. y Will, A. (2012). *Aplicaciones de redes neuronales a tecnología de materiales*. 1^{er} Encuentro Científico de Investigadores de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología ECIFACET 12 – Espacio FACET Comunica, San Miguel de Tucumán.
- González S., L.O., Guerrero Z., A.P., Delvasto A., S. y Will, A.L.E. (2012). Red Neuronal Artificial para estimar la resistencia a compresión en concretos fibro-reforzados con polipropileno. *Ventana Informática*, No. 26, pp. 10-25.
- González S., L.O., Guerrero Z., A.P., Delvasto A., S. y Will, A.L.E. (2012). Exploración con Redes Neuronales Artificiales para estimar la resistencia a la compresión, en concretos fibro-reforzados con acero. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 22, No. 1, pp. 19-41.
- Gopalakrishnan, K., Ceylan, H. y Guclu, A. (2009). Airfield pavement deterioration assessment using stress-dependent Neural Network models. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 5,

No. 6, pp. 487-496.

Guerrero Z., A.P., Delvasto A, S., Will, A.L.E. y González S., L.O. (2012). Elaboración de una arquitectura prototipo, para estimación de propiedades mecánicas en dosificaciones de concretos reforzados con fibras de acero, usando redes neuronales artificiales. Libro de Resúmenes de la 5.^a Jornada de la Ciencia y la Tecnología, Palmira.

Gupta, R., Kewalramani, M.A. y Goel, A. (2006). Prediction of concrete strength using Neural-Expert System. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 426-466.

Gutiérrez P., P.A. (2009). *Nuevos modelos de redes neuronales evolutivas y regresión logística generalizada utilizando funciones de base*. Aplicaciones. Tesis doctoral (Doctor en Informática). Universidad de Granada, Granada, España.

Hewayde, E., Nehdi, M., Allouche, E. y Nakhla, G. (2007). Neural Network prediction of concrete degradation by sulphuric acid attack. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 17-27.

Hola, J. y Schabowicz, K. (2005). Application of Artificial Neural Networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive test. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 11, No. 1, pp. 23-32.

Jamil, M., Zain, M.F.M. & Basri, H.B. (2009). Neural Network simulator model for optimization in high performance concrete mix design. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 34, No. 1, pp. 61-68.

Karahan, O., Tanyildizi, H. & Atis, C.D. (2008). An Artificial Neural Networks approach for prediction of long-term strength properties of steel fiber reinforced concrete containing fly ash. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Vol. 9, No. 11, pp. 1514-1523.

Kim, J.I. & Kim, D.K. (2002). Application of

Neural Networks for estimation of concrete strength. *KSCF Journal of Civil Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 429-438.

Lee, B.Y., Kim, J.H. & Kim, J.K. (2009). Optimum concrete mixture proportion based on a database considering regional characteristics. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 258-265.

Lee, J.H. & Yoon, Y.S. (2009). Modified harmony search algorithm and Neural Networks for concrete mix proportion design. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 57-61.

Li, Z., Chau, C.K. & Zhou, X. (2005). Accelerate assessment and fuzzy evaluation of concrete durability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 257-263.

Lizarazo M., J.M. (2006). Desarrollo de un modelo de redes neuronales para predecir la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto. Tesis (Magíster en Estructuras). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Lizarazo M., J.M. y Gómez C., J.G. (2007). *Desarrollo de un modelo de redes neuronales artificiales para predecir la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto*. *Revista Ingeniería e Investigación*, Vol. 27, No. 1, pp. 11-18.

López de Mantarás, R. (2002). Trends and Automatic Learning. *UPGRADE*, Vol. 3, No. 5, pp. 6-9.

Maldonado, C.E. y Gómez C., N.A. (2010). Modelamiento y simulación de sistemas complejos. *Documentos de Investigación*. Bogotá: Universidad del Rosario, Facultad de Administración.

Maruyama, I., Kanematsu, M. & Noguchi, T. (2002). Optimization of the concrete mix proportions centered on fresh properties using genetic algorithm. *The Indian Concrete Journal*, pp. 567-573.

Minsky, M. (1960). *Steps toward Artificial Intelli-*

gence. The Institute of Radio Engineers.

Mira M., J. & Delgado G., A.E. (2002). Knowledge-Based Systems. *UPGRADE*, Vol. 3, No. 5, pp. 32-38.

Nataraja, M.C., Jayaram, M.A. & Raykumar, C.N. (2007). Inductive Classifying Artificial Network for fly ash type categorization. *Engineering Letters*, Vol. 14, No. 1, pp. 185-194.

Nezhad, H.B., Nariman-Zadeh, N. & Ranjbar, M.M. (2010). *Multi Objective Optimization of Concrete Mix Design in Persian Gulf with Gmdh-type Neural Networks*. 2nd International Conference on Engineering Optimization, Lisbon, Portugal.

Noguchi, T., Maruyama, I. & Kanematsu, M. (2003). *Performance based design system for concrete mixture with multi-optimizing genetic algorithm*. Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement "Cement's Contribution to the Development in the 21st Century", Durban.

Oh, J.W., Lee, G.W. & Lee, I.W. (1997). *The Proportioning of Concrete Mixture using Artificial Neural Networks*. Seventh International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Seoul.

Özgan, E. & Öztürk, A. (2007). Optimization of the hardened concrete properties with GA and LP. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, No. 24, pp. 3918-3926.

Peng, J., Li, Z. & Ma, B. (2002). Neural Network Analysis of Chloride Diffusion in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 327-333.

Pignani, J.M. (2000). *Sistemas expertos*. Rosario, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario.

Pulgarín P., A.J. (2001). *Aplicación de herramientas de Inteligencia Computacional en la Planificación de Recursos*. Tesis de Maestría (Magister en Aprove-

chamiento de los Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín, Colombia.

Saridakis, K.M. & Dentsoras, A.J. (2008). Soft computing in engineering design – A review. *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 22, pp. 202-221.

Setién, J., Carrascai, I.A., Figueroa, J.F. y Polanco, J.A. (2003). Aplicación de una red neuronal artificial a la dosificación de hormigones premezclados. *Materiales de Construcción*, Vol. 53, No. 270, pp. 5-19.

Sierra, C. (2002). Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. *UPGRADE*, Vol. 3, No. 5, pp. 46-52.

Sipper, M. (1995). An Introduction to Artificial Life. *Explorations in Artificial Life*.

Sridevi, G. (1999). Optimization of Interfacial Zone characteristics of the fiber-cement matrix. Thesis (MSc.). Arizona State University.

Suryadi, A. & Triwulan, Aji, P. (2011). Predicting the initial setting time of self-compacting concrete using artificial neural networks (Anns) with the various of learning rate coefficient. *Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 314-320.

Tesfamariam, S. & Najjaran, H. (2007). Adaptive network-fuzzy inference to estimate concrete strength using mix design. *Journal of Materials in Civil Engineering*, July, Vol. 19, N.º 7, pp. 550-560.

Torra, V. (2002). A review of the construction of hierarchical fuzzy systems. *International Journal of Systems*, Vol. 17, pp. 807-820.

Trujillo H., A.D. y Gómez A., L.E. (2007). Inteligencia Artificial: Emulación de mecanismos. *TecnoINTELECTO*, Vol. 4, No. 2, pp. 116-120.

Ukrainczyk, N., Banjad P., I. & Bolf, N. (2007). Evaluating rebar corrosion damage in RC structures exposed to marine environment using neural

network. *Civil Engineering and Environment Systems*, Vol. 24, No. 1, pp. 15-32.

Ukrainczyk, N. y Ukrainczyk, V. (2007). A Neural Network method for analyzing concrete durability. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 60, No. 7, pp. 475-486.

Vallejos, S.J. (2006). Minería de Datos. Trabajo Final de Curso: Diseño y Administración de Datos (Licenciado en Sistemas de Información). Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina.

Wang, J.Z., Wang, X.J. & Ni, H.G. (2003). An algorithm of Neural Network and application to data processing in concrete engineering. *Informática*, Vol. 14, No. 1, pp. 95-110.

Wildberger, A.M. (1996). *Introduction y Overview of "Artificial Life" – Involving Intelligent Agents for modeling and simulation*. Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference.

Yasarer, H.I. (2010). *Characterizing the permeabi-*

lity of concrete mixes used in transportation applications: a neuronet approach. Thesis (MSc.). Kansas State University, Manhattan, KA, USA.

Yeh, I.C. (1999). Design of high-performance concrete mixture using Neural Networks and Nonlinear Programming. *Journal of Computing in Civil Engineering, January*, Vol. 13, No. 1, pp. 36-42.

Yeh, I.C. (2006, July-August). Analysis of strength of concrete using design of experiments and Neural Networks. *Journal of Materials and Civil Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 597-604.

Yeh, I.C. (2009). Optimization of concrete mix proportioning using a flattened simplex-centroid mixture design and Neural Networks. *Engineering with Computers*, Vol. 25, pp. 179-190.

Zadeh, I.A. (1965). Fuzzy sets. *Information Control*, Vol. 8, pp. 338-353.