

# Modelo para dosificación de mezclas de hormigón utilizando lógica difusa

## A model for concrete mixture design using fuzzy logic



**Santamaria Jorge**  
Ph.D. en Ingeniería  
Docente Universidad Central del Ecuador  
e-mail: jsantamaria@uce.edu.ec



**Pilaluisa José**  
Magíster en Ingeniería Informática Empresarial  
Docente Universidad Central del Ecuador  
e-mail: jpilaluisa@uce.edu.ec



**Morales Luis**  
Magíster en Estructuras y Ciencias de los Materiales  
Docente Universidad Central del Ecuador  
e-mail: lwmorales@uce.edu.ec

### Resumen

El hormigón, mezcla de cemento Portland, agua, y agregados, es comúnmente utilizado en la industria de la construcción con un alto porcentaje de fabricación in-situ. Las proporciones de cada uno de los componentes de la mezcla es de mucha importancia para asegurar la calidad producto (esfuerzo de compresión). Actualmente, varios métodos empíricos para el diseño de mezclas de hormigón son utilizados; sin embargo, éstos son basados en su mayoría en ecuaciones, tablas y/o correlaciones, sin considerarse experiencias pasadas y/o datos experimentales. El presente estudio ilustra la aplicación de la teoría de lógica difusa para desarrollar un modelo que permite estimar las proporciones de los componentes del hormigón al peso, sin utilizar aditivo. Las variables independientes (datos de entrada) seleccionadas fueron las que comúnmente se usan para diseño de mezclas. Datos históricos experimentales y la experiencia del técnico de hormigón fue empleada para la construcción de las funciones de membresía (FMs) y las reglas difusas. El sistema de inferencia lógico (SIL) Mamdani fue escogido para construir el modelo en razón de que éste permite trabajar con varias salidas (relación agua - cemento y agregados). Los resultados indican que el SIL es capaz de estimar las proporciones de una mezcla de hormigón de manera aceptable ( $R^2=95.1\%$ ); sin embargo, el modelo se lo puede mejorar a medida que se disponga de mayor conocimiento del sistema. Además, el modelo puede hacer uso de la información que reposa en archivos y las experiencias personales de los técnicos para la elaboración de modelos particulares para cada proyecto.

**Palabras clave:** hormigón; diseño de mezclas; lógica difusa; sistema de inferencia lógico tipo mamdani

### Abstract

Concrete, a mixture of Portland cement, water and aggregates, is commonly used in the construction industry with high percentage of in-situ fabrication. The proportions of each mixture component is very important to ensure its quality (i.e., compressive strength). Nowadays, several empirical mixture design procedures are utilized; however, the majority of them are based on equations, tables and/or correlations, without considering past experiences and/or experimental data. The present study illustrates the application of fuzzy logic theory for developing a model for estimating concrete mixture proportions by weight, without admixtures. The selected independent variables (input data) were those that are commonly used for concrete mixture design. Historical experimental data and concrete technician's experience were utilized for creating membership functions (FMs) and fuzzy rules. Mamdani fuzzy inference system (SIL) was used for developing the model since this allows to have several outputs (e.g., water - cement ratio and aggregates). The results indicate that the SIL is able to estimate concrete mixture proportions very well ( $R^2=95.1\%$ ); however, the model can be improved as long as new knowledge of the system is available. Furthermore, the model is able to use stored data and technical personal experience in order to develop particular models for each project.

**Keywords:** concrete; mixture design; fuzzy logic; mamdani fuzzy inference system



## Introducción

El hormigón, material resultante de la mezcla de cemento Portland, agua, agregado fino y grueso, es uno de los materiales más utilizados en la construcción de obras civiles no solo en el Ecuador; sino también, a nivel mundial. Neville y Brooks (2010) resaltan que el hormigón es uno de los materiales más populares usados en la industria de la construcción y Ecuador no es la excepción. El incremento del consumo del cemento Portland y del hormigón es evidente durante los últimos años. Datos estadísticos del Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Concreto (INECYC, 2018) corroboran el masivo consumo de cemento Portland para la fabricación de hormigón en el país, siendo de 5'848.238 toneladas métricas en el año 2015.

Además, gran cantidad del hormigón utilizado en un proyecto de obra civil es fabricado manualmente durante su ejecución. Según los resultados de una encuesta realizada en línea a profesionales de la construcción a través de bases de datos de colegios profesionales y academia, más del 70% afirma que más del 10% del hormigón utilizado en un proyecto es fabricado in-situ. Lo cual hace que las proporciones que se utilizan para fabricar hormigón (diseño de mezclas) tengan gran relevancia debido a que éstas garantizarán en gran parte la calidad del producto final, misma que es juzgada a través del esfuerzo de compresión.

En la actualidad existen diversos métodos tanto convencionales como no convencionales para establecer las proporciones de cada uno de los componentes del hormigón; procedimiento conocido como diseño de mezclas. La mayoría de los métodos convencionales son basados en la experiencia personal adquirida y el uso de tablas empíricas. Por ejemplo, el método de diseño de mezclas del American Concrete Institute (ACI) es basado en el uso de tablas desarrolladas empíricamente que permiten establecer la dosificación del hormigón a utilizarse para una determinada resistencia a la compresión requerida; sin embargo, dicho procedimiento no es el más idóneo para ser aplicado en el país considerando que el tipo de cemento y los materiales pétreos utilizados en los Estados Unidos de América y Ecuador difieren unos de otros tanto en características como en calidad.

El método desarrollado y utilizado en el laboratorio de Ensayo de Materiales y Modelos de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador es conocido como el método de la densidad óptima, y es otra técnica utilizada para dosificar hormigón. A pesar de que este método no ha sido patentado, es comúnmente utilizado para diseño de mezclas de hormigón en

dicho laboratorio. Este procedimiento es basado en el uso de densidades aparentes de los agregados (sueltas y compactadas), densidad real del cemento y densidad óptima de la mezcla de agregados. A pesar de que este procedimiento arroja muy buenos resultados, también basa en el uso de datos empíricos.

Por otro lado, los métodos no convencionales basados en redes neuronales artificiales y lógica difusa han sido explorados por algunos investigadores para diseño de mezclas. Por ejemplo, Sunil et al. (2013) construyó un SIL, basado en el método del ACI, para estimar las cantidades de materiales por cada metro cúbico de hormigón. En este caso se derivaron las FM's de las tablas establecidos por el ACI.

Es necesario indicar que no existe una receta o valores prestablecidos para fabricar hormigones de una resistencia a la compresión especificada. Todos los métodos de diseño de mezclas requieren que se realicen ensayos estándares de resistencia a la compresión a 28 días para verificarlos previo a su uso en la obra. Solamente de esta se podrá asegurar que las proporciones de agua, cemento, arena y ripio, establecidas por un determinado diseño de mezclas, produzcan un hormigón con resistencias reales acorde a los requerimientos del proyecto. Estos resultados experimentales de los ensayos de compresión reposan en los archivos de los diversos laboratorios donde fueron ensayados y no han sido utilizados para inferir nuevo conocimiento.

El presente estudio utiliza la teoría de lógica difusa para estimar la dosificación de una mezcla de hormigón basada en las propiedades de los agregados, trabajabilidad y resistencia deseada. La experiencia adquirida por el laboratorista a través del tiempo, con la ayuda de resultados históricos de diseño de mezclas de hormigón y pruebas de compresión realizadas en cilindros de hormigón, brindaron el conocimiento base necesario para desarrollar un sistema de inferencia lógico (SIL) del tipo Mamdani, modelo capaz de estimar las referidas las proporciones de la mezcla para condiciones específicas.

## Metodología

La teoría de lógica difusa fue presentada por primera vez por Zadeh (1965) y es una técnica muy eficiente para entender sistemas complejos no lineales donde no se conocen las funciones matemáticas que los gobiernan (Ross 2010). Como regla general se puede aseverar que mientras más complejo es un sistema, se tiene menor conocimiento del mismo y viceversa. Los sistemas de inferencia lógica (SILs) son basados en el uso de reglas y son mecanismos idóneos para tratar de entender sistemas donde existe falta de conocimiento y precisión. Ross (2010) afirma que un SIL puede ser pensado como

una aproximación de una función matemática que es muy útil modelando sistemas descritos a través del uso de variables lingüísticas. La teoría de lógica difusa no se la debería utilizar cuando se dispone de una función matemática (ecuación) que describa el funcionamiento de un sistema. La teoría de lógica difusa es recomendable cuando se trabaja con sistemas complejos no lineales.

### Sistema de inferencia lógico

En un SIL (Fig. 1) se distinguen varios componentes, siendo el Conocimiento Base y el Mecanismo de Inferencia o de Razonamiento los principales. La Fusificación consiste en asignar un valor conocido como grado de membresía a todos los datos de entrada, mismo que es calculado de la denominada Función de Membresía (FM). El Conocimiento Base está compuesto por los datos de entrada y salida y las reglas difusas de la forma if-then. Dicha información es utilizada por el mecanismo de inferencia para predecir la salida del sistema. La etapa de Defusificación es la etapa final del sistema que consiste en obtener un valor preciso (no difuso) como resultante del sistema.



Figura 1. Estructura del Sistema de inferencia lógico (SIL)

### Función de membresía (fm)

Una Función de Membresía (MF) de un conjunto difuso es utilizada para asignar a cada elemento de un universo de elementos un valor o grado de membresía comprendido entre 0 y 1. El valor de 0 indica que un elemento no pertenece (no tiene membresía) en un conjunto, mientras que el valor de 1 indica un 100% de membresía. Se pueden considerar diversas formas para las FMs (Fig. 2) como, por ejemplo: triangulares, trapezoidales, y Gaussiana entre las más comunes.

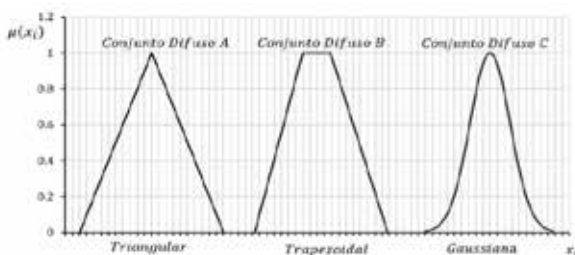


Figura 2. Formas de las Funciones de Membresía (FMs)

La forma triangular (Fig. 3) fue escogida para ser utilizadas en el sistema de inferencia lógico de este estudio en razón de su facilidad de manejo, ya la forma y precisión de una FM no es muy relevante; siempre y cuando una FM represente cada variable de entrada. Las pendientes de los lados del triángulo son utilizadas para calcular el grado de membresía de cada entrada en su respectiva FM.

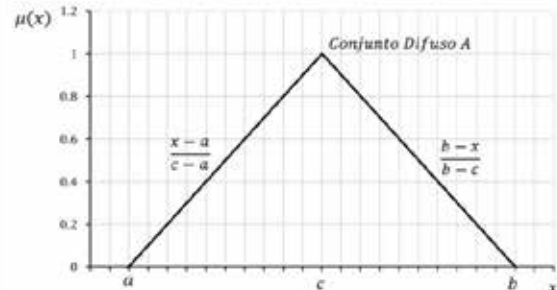


Figura 3. Función de membresía (FM) triangular

La característica principal de una FM es que su altura es igual a 1. Además, una propiedad importante de las FMs es que estas se traslapan unas con otras (Fig. 4), lo que hace posible que cada elemento del universo de discurso pueda tener diferentes grados de membresía en diferentes FMs. Cada curva es una FM correspondiente a diferentes variables.

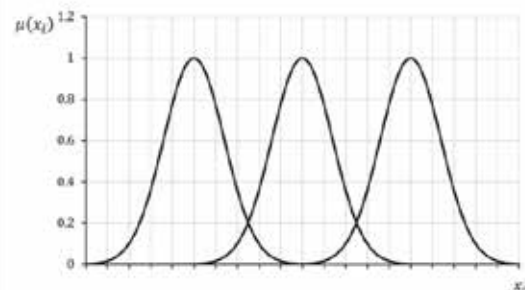


Figura 4. Traslape de las Funciones de Membresía (FMs)

Ross (2010) menciona que existen una variedad de procedimientos para construir o desarrollar una FM entre los que se pueden mencionar los siguientes: intuición, inferencia, ranking, redes neuronales, algoritmos genéticos, razonamiento inductivo y los llamados métodos automáticos. El uso de cualquier método depende del tipo de datos disponibles.

Para este estudio utilizaremos el método Intuitivo donde una FM es construida basada principalmente en el conocimiento del sistema que tiene el analista ganado a través del tiempo. En este caso, el analista es responsable de generar las FMs dentro del contexto y del rango que considere sean representativas. Lo importante es generar un número de FMs (particiones) que representen términos lingüísticos utilizados comúnmente para describir una variable;



por ejemplo, la arena puede ser fina, mediana o gruesa.

### Mecanismos de inferencia

Existen tres métodos deductivos que son utilizados frecuentemente para los mecanismos de inferencia por un SIL, basados en reglas de la forma if-then (si-entonces) y estos son: Mamdani (Mamdani y Assilian, 1975; Mamdani, 1977), Sugeno, también conocido como Takagi, Sugeno y Kang (TSK) (Takagi y Sugeno, 1985) y los modelos Tsukamoto (Tsukamoto, 1979). Mamdani es el método de inferencia más utilizado en la práctica, y difiere de los otros dos en que el valor de la salida de cada regla difusa es un conjunto difuso y no un solo valor escalar.

En el presente estudio se utilizó Mamdani como mecanismo de inferencia en razón de que éste permite trabajar con múltiples entradas (antecedentes) y salidas (consecuentes) para diferentes datos de entrada. Para explicar el funcionamiento del mecanismo de inferencia Mamdani usaremos dos variables escalares de entrada  $X_1$  y  $X_2$  y (antecedentes) y el método de inferencia máximo – mínimo (max-min) y una salida  $Y_1$  (consecuente) (Ross, 2010). Este sistema esta descrito por un conjunto de reglas difusas de una colección, de la forma if-then, según la ecuación 1, donde  $A_{1k}$  y  $A_{2k}$  son los conjuntos difusos para el par de antecedentes  $k^{th}$  y  $B_k$  es el conjunto difuso que representa el consecuente  $k^{th}$ . El método de defusificación utilizado para calcular la respuesta escalar es el método del centroide, conocido como centro de área o centro de gravedad, mismo que consiste en calcular el resultado escalar  $y^*$  a través del centro de gravedad del área resultante (ver Fig. 5).

$$\text{IF } x_1 \text{ es en } A_{1k} \text{ y } x_2 \text{ es en } A_{2k} \text{ THEN } y_k \text{ es en } B_k \\ k = 1, 2, 3, \dots, r \quad \text{Ec. (1)}$$

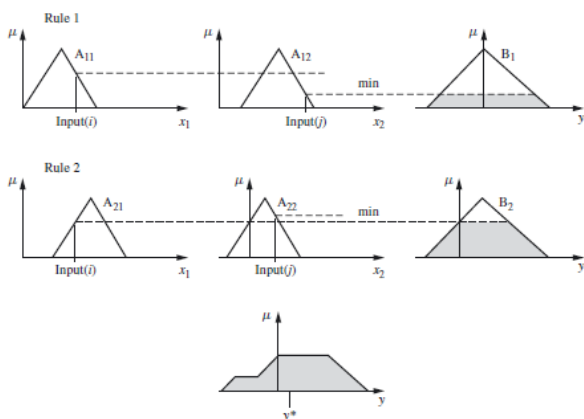


Figura 5. Mecanismo de Inferencia Mamdani (mamin) con salida escalar. Fuente: Ross (2010)

## Resultados

### Antecedentes

Las variables (antecedentes) consideradas para este estudio fueron aquellas que comúnmente son utilizadas para realizar un diseño de mezclas de hormigón, y estas fueron: el esfuerzo de compresión ( $f'c$ ) en MPa, módulo de finura del agregado fino (MFF), módulo de finura del agregado grueso (MFG), porcentaje de desgaste o abrasión (AB), y el asentamiento deseado o trabajabilidad (A) en cm. Las Fig. 6 – 10 muestran las FMs resultantes que fueron completamente creadas utilizando el conocimiento base adquirido (experiencia del analista) como se mencionó anteriormente.

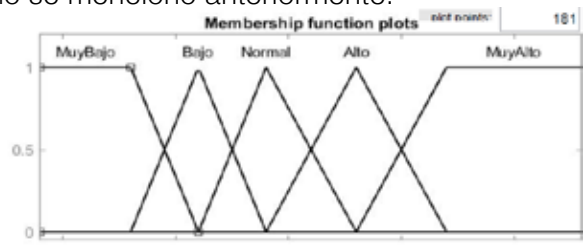


Figura 6. Funciones de membresía para el esfuerzo de compresión:  $f'c$  (MPa)

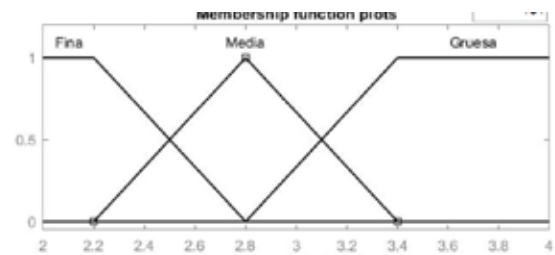


Figura 7. Funciones de membresía para el módulo de finura del agregado fino (MFF)

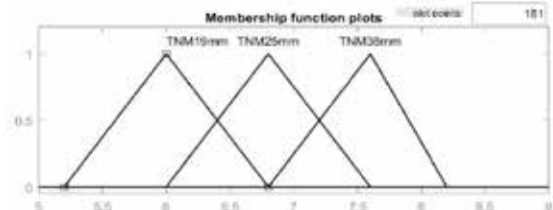


Figura 8. Funciones de membresía para el módulo de finura del agregado grueso (MFG)

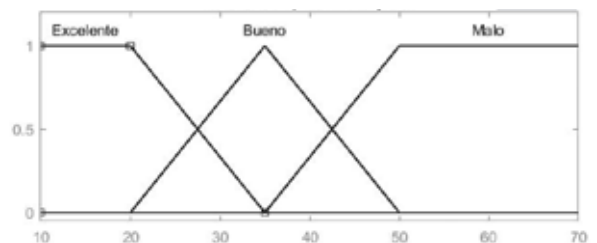


Figura 9. Funciones de membresía para la abrasión: AB (%)

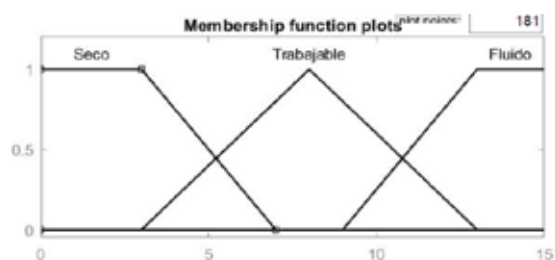


Figura 10. Funciones de membresía para el asentamiento deseado del hormigón: A (cm)

### Consecuentes

Las FMs resultantes para las tres salidas (consecuentes): relación agua – cemento (A-C), agregado fino (Arena) y agregado grueso (Ripio), del SIL tipo Mamdani, fueron desarrolladas basadas principalmente en resultados históricos de 147 diseños de mezclas de hormigón facilitados por el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Modelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central del Ecuador (Figs. 11-15). Las salidas o consecuentes mencionados corresponden a los valores de dosificación al peso de hormigón fabricado a mano.

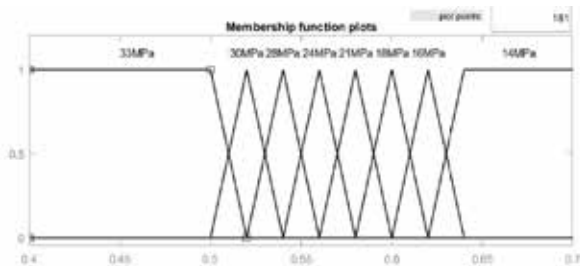


Figura 11. Funciones de membresía para Relación Agua – Cemento (A – C)

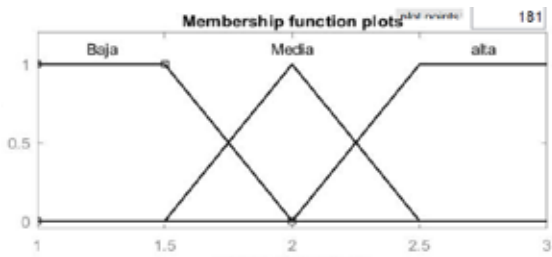


Figura 12. Funciones de membresía para Agregado Fino (Arena)

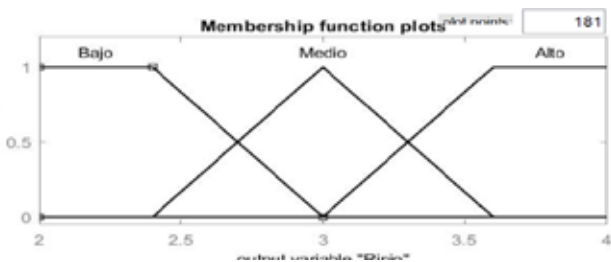


Figura 13. Funciones de membresía para Agregado Grueso (Ripio)

### Reglas difusas

Las siguientes son las reglas difusas del tipo: if – then que fueron utilizadas en el SIL Mamdani, mismas que fueron desarrolladas de manera intuitiva basadas en el conocimiento del sistema y en los coeficientes de correlación Pearson con sus correspondientes valores p (Tabla 1). Dichos parámetros estadísticos fueron obtenidos de un análisis de 147 resultados de diseño de mezclas de hormigón y permitieron brindar una ayuda certera para establecer si existe una correlación significativa entre dos variables. Los valores p representan la probabilidad de rechazar la hipótesis nula ( $H_0 = 0$ ) cuando esta es verdadera. En este caso se asumió  $p \leq 0.05$ . Es-

tos valores representan una guía; sin embargo, el número de reglas difusas no solo dependerá del grado de correlación identificada por el analista o experto entre los antecedentes y consecuentes, sino también de la experiencia del analista como se mencionó anteriormente. Siempre es recomendable trabajar con el menor número de reglas posible.

Tabla 1. Coeficientes de correlación Pearson con sus respectivos valores de p

Variable	f'c	MFF	MFG	AB
MFF	-0.062			
	0.455			
MFG	-0.074	0.114		
	0.376	0.168		
AB	-0.248	-0.075	-0.217	
	0.002	0.365	0.008	
A	-0.086	-0.121	-0.098	0.036
	0.302	0.145	0.239	0.662
A-C	-0.802	0.064	0.102	0.166
	0.000	0.440	0.218	0.044
Arena	-0.407	-0.021	0.168	-0.050
	0.000	0.804	0.042	0.547
Ripio	-0.466	-0.035	0.142	0.066
	0.000	0.670	0.086	0.429

Nota: Cada celda contiene: Correlación Pearson Valor p

En este sentido se construyeron 38 reglas difusas según se indica a continuación:

1. **If** (f'c es Muy Bajo) y (AB es Malo) **then** (A – C es 14MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
2. **If** (f'c es Muy Bajo) y (AB es Bueno) **then** (A-C es 14MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
3. **If** (f'c es Muy Bajo) y (AB es Excelente) **then** (A-C es 14MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
4. **If** (f'c es Muy Bajo) y (AB es Malo) **then** (A – C es 16MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
5. **If** (f'c es Muy Bajo) y (AB es Bueno) **then** (A-C es 16MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
6. **If** (f'c es Muy Bajo) y (AB es Excelente) **then** (A-C es 16MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
7. **If** (f'c es Muy Bajo) y (AB es Malo) **then** (A – C es 18MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
8. **If** (f'c es Muy Bajo) y (AB es Bueno) **then** (A-C es 18MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
9. **If** (f'c es Muy Bajo) y (AB es Excelente) **then** (A-C es 18MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)



10. *If* (f'c is Bajo) y (AB es Malo) *then* (A-C es 21MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
11. *If* (f'c es Bajo) y (AB es Bueno) *then* (A-C es 21MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
12. *If* (f'c es Bajo) and (AB es Excelente) *then* (A-C es 21MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
13. *If* (f'c es Normal) y (AB es Malo) *then* (A-C es 24MPa) (Arena es Baja) (Ripio es Bajo)
14. *If* (f'c es Normal) y (AB es Bueno) *then* (A-C es 24MPa) (Arena es Media) (Ripio es Medio)
15. *If* (f'c es Normal) y (AB es Excelente) *then* (A-C es 24MPa) (Arena es Media) (Ripio es Medio)
16. *If* (f'c es Alto) y (AB es Bueno) *then* (A-C es 28MPa) (Arena es Media) (Ripio es Medio)
17. *If* (f'c es Alto) y (AB es Excelente) *then* (A-C es 28MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
18. *If* (f'c es Muy Alto) y (AB es Bueno) *then* (A-C es 30MPa) (Arena es Baja) (Ripio es Bajo)
19. *If* (f'c es Muy Alto) y (AB es Excelente) *then* (A-C es 30MPa) (Arena es Baja) (Ripio es Bajo)
20. *If* (f'c es Muy Alto) y (AB es Bueno) *then* (A-C es 33MPa) (Arena es Baja) (Ripio es Bajo)
21. *If* (f'c es Muy Alto) y (AB es Excelente) *then* (A-C es 33MPa) (Arena es Media) (Ripio es Medio)
22. *If* (MFG es TNM 19mm) y (AB es Malo) *then* (Arena es Media)
23. *If* (MFG es TNM 19mm) y (AB es Bueno) *then* (Arena es Baja)
24. *If* (MFG es TNM 19mm) y (AB es Bueno) *then* (Arena es Baja)
25. *If* (MFG es TNM 25mm) y (AB es Malo) *then* (Arena es Alta)
26. *If* (MFG es TNM 25mm) y (AB es Bueno) *then* (Arena es Media)
27. *If* (MFG es TNM 25mm) y (AB es Excelente) *then* (Arena es Media)
28. *If* (MFG es TNM 38mm) y (AB es Malo) *then* (Arena es alta)
29. *If* (MFG es TNM 38mm) y (AB es Bueno) *then* (Arena es alta)
30. *If* (MFG es TNM 38mm) y (AB es Excelente) *then* (Arena es alta)
31. *If* (f'c es Muy Bajo) y (MFF es Media) y (MFG es TNM 38mm) y (AB es Bueno) y (A es Trabajable) *then* (A-C es 14 MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
32. *If* (f'c es Muy Bajo) y (MFF is Media) y (MFG es TNM 38mm) y (AB es Bueno) y (A es Trabajable) *then* (A-C es 16 MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
33. *If* (f'c es Muy Bajo) y (MFF is Media) y (MFG es TNM38mm) y (AB es Bueno) y (A es Trabajable) *then* (A-C es 18 MPa) (Arena es alta) (Ripio es Alto)
34. *If* (f'c es Bajo) y (MFF es Media) y (MFG es TNM 38mm) y (AB es Bueno) y (A es Trabajable) *then* (A-C es 21 MPa) (Arena es Media) (Ripio es Medio)
35. *If* (f'c es Normal) y (MFF es Media) y (MFG es TNM 25mm) y (AB es Bueno) y (A es Trabajable) *then* (A-C es 24MPa) (Arena es Media) (Ripio es Medio)
36. *If* (f'c es Alto) y (MFF es Media) y (MFG es TNM 25mm) y (AB es Bueno) y (A es Trabajable) *then* (A-C es 28MPa) (Arena es Baja) (Ripio es Bajo)
37. *If* (f'c es Muy Alto) y (MFF es Media) y (MFG es TNM 19mm) y (AB es Bueno) y (A es Trabajable) *then* (A-C es 30MPa) (Arena es Baja) (Ripio es Bajo)
38. *If* (f'c es Muy Alto) y (MFF es Media) y (MFG es TNM 19mm) y (AB es Bueno) y (A es Trabajable) *then* (A-C es 33 MPa) (Arena es Baja) (Ripio es Bajo)

### SIL tipo mamdani para diseño de mezclas de hormigón

La Fig. 14 ilustra el SIL tipo Mamdani para estimar las proporciones de una mezcla de hormigón una vez que se han obtenido todos los parámetros necesarios para construirlo. Como se mencionó anteriormente, a cada variable de entrada se le asigna un grado de membresía en su correspondiente FM (defusificación), luego se realiza el proceso de inferencia (reglas difusas) para finalmente calcular una salida escalar (defusificación) a través del cálculo del centro de gravedad del área de intersección resultante (método del centroide).

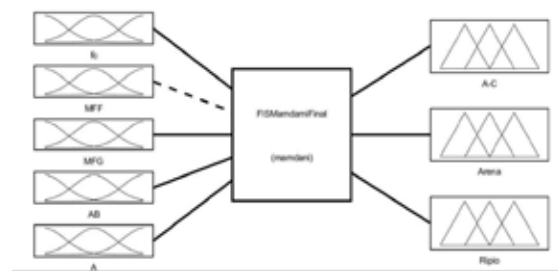


Figura 14. Sistema de inferencia lógico (SIL) para estimar una dosificación de mezclas de hormigón

El modelo resultante para estimar la dosificación de hormigón se encuentra ilustrado en la Fig. 15, mismo que acepta datos de entrada para cada variable y proporciona resultados no difusos (escalares). Las cinco primeras columnas corresponden a los datos de entrada (antecedentes), mientras que las tres columnas finales corresponden a los resultados (consecuentes) de la dosificación al peso de la relación agua – cemento (A-C), del agregado fino (Arena), y del agregado grueso (Ripio). Se debe tener en cuenta que el valor correspondiente al cemento (C) es la unidad.

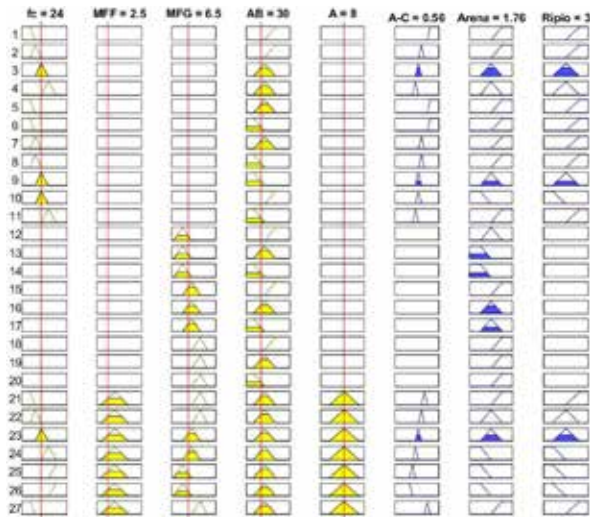


Figura 15. Sistema de inferencia lógico (SIL) para estimar una dosificación de mezclas de hormigón

valor de R2 de 95.1% indica que el modelo es capaz de predecir nuevos datos de una manera aceptable. Sin embargo, se debe considerar que el hormigón es un material con alta variabilidad por lo que se sugiere llevar un estudio histórico de las resistencias a la compresión a fin de determinar la S y construir las respectivas curvas de distribución normal, mismas que ilustraran dicha variabilidad intrínseca del hormigón.

Tabla 2. Comparación de resultados

A-C	Dosificación al Peso			SIL	Ensayo
	C	Arena	Ripio	f <sub>c</sub> (MPa)	
0.65	1.00	2.25	3.62	18.0	17.20
0.58	1.00	2.25	3.62	21.0	22.20
0.56	1.00	1.84	3.00	24.0	25.40
0.54	1.00	2.25	3.48	28.0	27.10
0.48	1.00	2.00	3.00	30.0	31.60

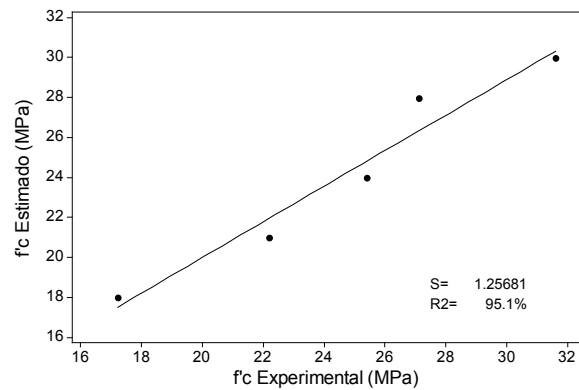


Figura 16. Esfuerzo de compresión calculado con el SIL versus el esfuerzo experimental

### Validación del SIL

Para validar el SIL para estimar dosificaciones de mezclas de hormigón se compararon los resultados experimentales versus los obtenidos a través del modelo Mamdani. Se fabricaron 6 probetas cilíndricas de hormigón de 15cm x 30cm para resistir esfuerzos de compresión (f<sub>c</sub>) de 18, 21, 24, 28, y 30 MPa a los 28 días de edad. Todas las muestras fueron elaboradas con los mismos materiales (MFF = 2.65, MFG = 6.6, AB = 21.4%, y A = 6cm). A los 28 días de edad se las ensayó según lo establecido en la norma ASTM C 39 (ASTM International, 2017). Los resultados de las pruebas (Tabla 2) indican que los valores obtenidos (calculados aplicando el SIL) como los experimentales (promedio de la resistencia a la compresión de 6 muestras cilíndricas) son relativamente similares cuando se los redondea a la unidad. Para probar el desempeño del modelo elaborado se utilizaron parámetros estadísticos como el coeficiente de correlación (R2) y la desviación estándar (S) (Tefamariam y Najjaran, 2007; Tayfur et al., 2014) resultantes al graficar los valores estimados versus los valores experimentales (Fig. 16). El

### Conclusiones

Cuando se trata de diseños de mezclas de hormigón, la teoría de lógica difusa (del inglés “fuzzy logic”), puede ser perfectamente aplicada a través del mecanismo de inferencia tipo Mamdani; en razón de que el coeficiente de correlación (R2= 95.1%) resultante del modelo es alto. Lo cual indica que el modelo es capaz de estimar nuevos valores de una manera aceptable. El número de reglas difusas utilizadas en este estudio puede ser aumentado o disminuido basado en el mayor o menor grado de conocimiento del sistema y del número de datos históricos experimentales disponibles que permitan inferir nuevas reglas. No existe un número de reglas difusas óptimas; sin embargo, se pretende usualmente utilizar el menor número de reglas posibles.

La información de diseños de mezclas de hormigón y resultados de pruebas de laboratorio, que reposa en los diferentes archivos de los laboratorios de hormigones, se la debe utilizar con el fin de ganar co-





nocimiento del sistema respecto a su funcionamiento. Existen cientos de datos referentes a diseños de mezclas de hormigón con las respectivas caracterizaciones de sus componentes (agregado fino y grueso), mismos que al ser clasificados y tabulados aportarían conocimiento en el campo complejo del diseño de mezclas de hormigón, siendo la lógica difusa, por ejemplo, una herramienta útil para tal efecto. En este caso, el sistema de inferencia lógico (SIL) para estimar las proporciones de una mezcla de hormigón el fiel ejemplo del potencial que se debe explotar y explorar para la fabricación manual del hormigón en la obra. Además, la utilización de datos locales permite elaborar modelos (SILs) particulares para proyectos considerando materiales propios de la zona.

El aporte de este estudio radica principalmente en resaltar las bondades de la teoría relativamente nueva llamada "lógica difusa" y presentar un procedimiento metódico y sistemático para realizar diseño de mezclas de hormigón. Esta técnica puede ser replicada y generalizada plenamente en otros escenarios y en otras locaciones geográficas. En este caso se deberán realizar los ajustes respectivos a las funciones de membresía (MFs) para las entradas (antecedentes) y las salidas (consecuentes). La validación de los resultados del SIL se la debe alcanzar a través de pruebas de comprobación mediante ensayos de laboratorio, mismos que servirán para retroalimentar y robustecer el modelo elaborado.

## Referencias bibliográficas

ASTM International. (2017). C39/C39M-17, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/C0039\_C0039M-17

ACI Committee 211. (1991). 211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009). Farmington Hills, MI.

Kute, S.Y. y Kale, R.S. (2013). Five-Layer Fuzzy Inference System to Design a Concrete Mixture, Based on ACI Method. *ACI Materials Journal*, 110(6).

Neville, A. M., y Brooks, J. J. (2010). *Concrete technology* (2nd ed.). Harlow, England: Prentice Hall.

Mamdani, E.H. y Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), pp.1-13. doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2

Mamdani, E.H. (1977). Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 26(12), pp. 1182-1191.

INECYC (2015). Comercialización mensual y anual del cemento gris. Ecuador. Recuperado de: <http://www.inecyc.org.ec/comercializacion-mensual-y-anual-de-cemento-gris/>

Ross, T. J. (2010). *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (3rd edition). Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, Ltd.

Takagi, T., y Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15(1), pp. 116-132.

Tayfur, G., Erdem, T. K., y Kirca, Ö. (2014). Strength Prediction of High-Strength Concrete by Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), p. 04014079, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000985.

Tesfamariam, S., y Najjaran, H. (2007). Adaptive Network-Fuzzy Inferencing to Estimate Concrete Strength Using Mix Design. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(7), pp. 550-560. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:7(550).

Tsukamoto, Y. (1979). An Approach to Fuzzy Reasoning Method, in *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, M. M. Gupta, R. K. Rague, and R. R. Yager, eds., Amsterdam, pp. 137-149: North-Holland Publishing Company.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), pp. 338-353.