

Revisión de las Variables que afectan la Planificación de Tiempos y Costos de las Actividades de
Construcción de Estructuras de Concreto Reforzado, Basados Alternativamente en la Lógica
Difusa

Juan Roberto Poveda Babativa, Nicolas Bustamante Lizcano

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Homer Armado Buelvas Moya

Msc. en Evaluación y Gerencia de Proyectos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Agradecimiento

Agradecemos inmensamente al profesor Homer Buelvas por su dedicación y apoyo, no solo durante su cargo como nuestro director de proyecto, sino como orientador en el transcurso de nuestra carrera de pregrado.

Agradecemos Dios y a nuestras familias, Poveda Babativa y Bustamante Lizcano por el amor, apoyo y crianza brindado, valores que también cimentaron nuestro triunfo académico.

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Marco Referencial.....	12
1.1 Antecedentes.....	12
1.2 Marco Teórico.....	13
1.2.1 Gestión de Proyectos.....	13
1.2.2 Gestión de Proyectos Enfocado en Costos.....	14
1.2.3 Gestión de Proyectos Enfocado en Tiempos de Producción	14
1.2.4. Lógica Difusa.....	15
1.3 Proceso Analítico de Jerarquización (AHP) y Proceso Analítico de Jerarquización Difuso (FAHP).....	19
1.4 Operadores Difusos entre Valores de Pertenencia.....	21
2. Metodología	25
2.1 Revisión Bibliográfica	25
2.1.1 Revisión Lógica Difusa.....	25
2.1.2 Revisión Proyecto Lógica Difusa en Rendimientos	25
2.1.3 Revisión AHP Y AHP Difuso.....	29
2.1.4 Revisión Rendimientos de Obra y Costos	29

REVISIÓN DE LAS VARIABLES DE LOGICA DIFUSA	4
2.2 Explicación Detalle Tiempo Unitario y Precio Unitario.....	31
2.2.1 Desarrollo Diccionario y Análisis Unitarios.....	31
3. Aplicación del Proceso Analítico de Jerarquización Difuso (FAHP) para la Estimación de Costos.....	33
3.1 Proceso de Aplicación de FAHP.....	33
3.2 Revisión de Consistencia de FAHP	40
4. Resultados	44
4.1 Variación de Duraciones y Costos con Máxima y Mínima Importancia Asignada.....	49
4.2 Variación de Duraciones y Costos entre Actividades con Distintas Asignaciones de Variables de Importancia	50
5. Conclusiones	55
6. Recomendaciones	56
Referencias Bibliografías.....	57

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Representación gráfica de la función de pertenencia del ejemplo anterior aplicando Lógica Clásica</i>	18
Figura 2. <i>Representación gráfica de la función de pertenencia del ejemplo anterior aplicando Lógica Difusa</i>	18
Figura 3. <i>Análisis Jerárquico de ejemplo anterior</i>	19
Figura 4. <i>Conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$</i>	23
Figura 5. <i>Unión Conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$</i>	24
Figura 6. <i>Función de Pertenencia para Caracterización de Cuadrillas</i>	28
Figura 7. <i>Caracterización de Cuadrillas</i>	29
Figura 8. <i>Amplitud de las funciones trapezoidales de costos – Variable con Mayor Importancia</i>	45
Figura 9. <i>Amplitud de las funciones trapezoidales de costos – Variable con Menor Importancia</i>	45
Figura 10. <i>Caracterización de Cuadrillas</i>	46
Figura 11. <i>Percepción Motivacional</i>	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación de Intensidad de Precipitación</i>	17
Tabla 2. <i>Números y funciones difusas de comparación del Proceso Analítico de Jerarquización Difuso (FAHP)</i>	21
Tabla 3. <i>Ejemplos de Operaciones dentro de la Lógica Clásica</i>	22
Tabla 4. <i>Desarrollo Diccionario y Análisis Unitarios</i>	32
Tabla 5. <i>Duraciones Base</i>	33
Tabla 6. <i>Proceso de Aplicación de FAHP</i>	34
Tabla 7. <i>Matriz de Comparación Pareada (X)</i>	35
Tabla 8. <i>Números Difusos</i>	35
Tabla 9. <i>Números Difusos entre las 8 Variables Comparadas solamente con la Caracterización de Cuadrillas</i>	36
Tabla 10. <i>Fuzzy Geometric Mean</i>	37
Tabla 11. <i>Fuzzy Weight</i>	38
Tabla 12. <i>Peso Promedio Difuso</i>	39
Tabla 13. <i>Peso Normalizado</i>	40
Tabla 14. <i>Matriz Comparación Pareada Normalizada (X_{ij} Normalizada)</i>	41
Tabla 15. <i>Pesos Promedios de Matriz FAHP Tradicional Normalizada</i>	42

Tabla 16. <i>Vector A x P</i>	42
Tabla 17. <i>Índice Aleatorio de Consistencia (RI)</i>	44
Tabla 18. <i>Diferencia Costos</i>	48
Tabla 19. <i>Diferencia Duraciones</i>	48
Tabla 20. <i>Diferencia Total de Duraciones</i>	49
Tabla 21. <i>Diferencia Total Costos</i>	50
Tabla 22. <i>Importancia Global</i>	51
Tabla 23. <i>Costos [Miles de Pesos]</i>	52
Tabla 24. <i>Duraciones [hc]</i>	52
Tabla 25. <i>Diferencia Costos Máximas y Mínimas</i>	53
Tabla 26. <i>Diferencia Duraciones Máximas y Mínimas</i>	54

Resumen

Título: Revisión de las Variables que afectan la Planificación de Tiempos y Costos de las Actividades de Construcción de Estructuras de Concreto Reforzado, Basados Alternativamente en la Lógica Difusa*

Autores: Juan Roberto Poveda Babativa, Nicolas Bustamante Lizcano**

Palabras Clave: Lógica Difusa, Control De Gestión En Obra, Análisis De Riesgos, Sistemático, Proyecto De Construcción, Proceso Analítico Jerárquico.

Descripción

Este estudio presenta la aplicación de un Proceso Analítico Jerárquico Difuso con respecto a las duraciones y costos de algunas variables que afectan las actividades iniciales de construcción en edificaciones. Se realizó un trabajo de investigación para la consulta de duraciones y costos con distintas bases de datos para definir su alcance mediante la propuesta de diccionarios de la EDT puntualizando así las actividades y poder elaborar los análisis de precios unitarios. Se aplicó el método FAHP para la estimación de posibles variaciones dentro de un rango determinado de duraciones y costos útiles para el control de gestión en obra o análisis de riesgos. Se establece las bases para la aplicación sistemático en un proyecto de construcción donde con asesoría de un experto o en revisión de las posibles condiciones del sector del proyecto, se puede modelar alternativamente el costo final de algunos paquetes de trabajo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Homer Armando Buelvas, Msc. en Ingeniería Estructural

Abstract

Title: Review of the Variables that Affect the Planning of Times and Costs of the Construction Activities of Reinforced Concrete Structures, Based Alternately on Fuzzy Logic*

Authors: Juan Roberto Poveda Babativa, Nicolas Bustamante Lizcano**

Keywords: Fuzzy Logic, Construction Management Control, Risk Analysis, Systematic, Construction Project, Analytic Hierarchy Process

Description

This study presents the application of a Fuzzy Analytic Hierarchy Process related to the durations and costs of some variables that affect the initial construction activities in buildings. A research work was carried out for the consultation of durations and costs with different databases to define its scope through the proposal of WBS dictionaries, thus specifying the activities and allowing to elaborate the unit price analyses. The FAHP method was applied to estimate possible variations within a given range of useful durations and costs for an on-site management. The bases were established for a systematic application of construction project where, with the assistance of an expert or review of the possible additional conditions of a project can make an alternative approach of the final cost of the unit duration of one activity.

* Degree work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Homer Armado Buelvas Moya. Msc. Structural Engineering

Introducción

La industria de la construcción en la actualidad se ha visto criticada por su lenta aceptación y poco uso de la gestión alternativa, métodos para planificar y ejecutar proyectos basados en análisis de cualidades y no cantidades. El uso de técnicas alternativas de gestión promueve una reducción en los tiempos de los proyectos en general que puede desempeñar un papel importante para el cumplimiento de un proyecto (Modern management systems a construction industry cost effectiveness project report, 1982)

Cuando se buscan alternativas de gestión para promover el uso de juicio de expertos o mediciones cualitativas de tiempos y costos, encontramos varias opciones como lo es la aplicación de la lógica difusa, ya que esta ha dado lugar a poderosos métodos que dan un tratamiento matemático permeado de subjetividad, que permite encontrar resultados más rigurosos. La incorporación de estas técnicas para llegar a la toma de decisiones eleva la calidad del proyecto y se convierte en una alternativa para la gestión de proyectos. (Boggiano et al., 2018)

El método Análisis Jerárquico Difuso o Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) presenta una alternativa para relacionar datos mediante la toma de decisiones multicriterio que permite estimar el comportamiento de datos relativos, facilitando la filtración de las mejores opciones a tomar. Esta es una alternativa factible para la evaluación de actividades de construcción debido a la incertidumbre que hay a la hora de darle cierta importancia o pesos de las variables o tareas que los conforman, conocido como el componente difuso. Por su parte, con el análisis jerárquico vendría se implementa una técnica final aplicada por el ingeniero o gerente de obra para la determinación final de un juicio según su criterio y experiencia. (Yajure, 2015)

A partir de información obtenida mediante una revisión bibliográfica y búsqueda en bases de datos especializados de gestión de la construcción, se propone una herramienta alternativa difusa que pueda ser aplicada en la etapa de planificación de un proyecto mediante el uso de variables como caracterización de cuadrillas, complejidad del proyecto, condiciones ambientales, disposición de materiales, experiencia del trabajador, herramientas y equipos, monitoreo y control, percepción motivacional de gestión que ingresando unos datos de entrada nos pueda servir para determinar cualitativamente duraciones y costos en un proyecto de construcción de obra vertical.

1. Marco de Referencia

1.1 Antecedentes

Las herramientas disponibles para la gestión de proyectos en la actualidad ha sido una evolución constante a partir del aprendizaje que ha dejado los bajos o incluso nulos estándares de calidad en las obras civiles décadas atrás, a tal punto que existe normas e institutos dedicados exclusivamente a la gestión de proyectos y son indispensables en cualquier obra, la pregunta es, a pesar de tantos programas de software como la tecnología de Modelado de la Información para la Construcción “BIM”, ¿qué tan viable sería el uso de una nueva herramienta como lo es la lógica difusa en la gestión de proyectos? (Wallace, 2014)

La Lógica Difusa es casi indispensable en sistemas de control automático, poniendo como ejemplo los usados en aeronaves para la planificación de su mantenimiento (Atli & Kahraman, 2012), los usados en las industrias de ensamblaje de bicicletas (Rodas et al., n.d.) o incluso el campo de la medicina, específicamente los sistemas neuro-difusos desarrollados por los laboratorios de bioingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata (Carlos et al., 2006).

El campo de la ingeniería civil no se queda atrás, tan solo en Colombia se ha utilizado un modelo difuso para pronosticar los niveles medios diarios del río Magdalena en Puerto Salgar (Segura & Obregón, 2005). El número de trabajos realizados dentro de nuestro campo de interés, la Gestión de Proyectos, resulta mucho mayor a la esperada. En 1981 se propuso una posible transformación de la Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (*PERT*) bautizado como *Método Difuso PERT* o *Fuzzy PERT* en inglés representado por las siglas (*FPERT*).

En dicho método análogo al método de ruta crítica o “PERT” se propuso el objetivo de utilizar variables difusas con el fin de determinar el tiempo de finalización de un proyecto difuso (Atli & Kahraman, 2012). En el XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos en Badajoz se expuso la propuesta de la utilización de la Lógica Difusa en la estimación de riesgos en 6 proyectos ejecutados por una empresa española, demostrando la utilidad que tiene dicho modelo aplicándolo con la ayuda de tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC). (Rodríguez, 2009)

Este proyecto se enfocó en poder aplicar un método de gestión diferente como alternativa basándose en el artículo de Daniel Lamus en donde se plantearon algunos factores de mayor afectación en los proyectos de construcción de edificaciones en conjunto con la lógica difusa en los cuales propuso las entradas y se quería proponer las salidas enfocado en tiempos y costos para la toma de decisiones en una etapa de planificación. (Lamus, 2021)

1.2 Marco Teórico

1.2.1 Gestión de Proyectos

La gestión de proyectos se constituye de la planificación, implementación y culminación de proyectos dentro de ciertos límites. Estas limitaciones suelen estar relacionadas con el tiempo, el costo, rendimiento y en la última década se incluyó con más rigor la seguridad y gestión de riesgo. (Wallace, 2014)

1.2.2 Gestión de Proyectos Enfocado en Costos

La gestión de costos del proyecto se ocupa principalmente de los recursos necesarios para completar las actividades del proyecto. Se debe considerar el impacto de las decisiones del gestor del proyecto en los costos recurrentes subsiguientes de usar, mantener y respaldar productos, servicios o resultados del proyecto. Un ejemplo de ello podría ser limitar el número de modificaciones del diseño para disminuir los costos del proyecto, pero también podría generar un aumento de costos operativos. (Project Management Institute, 2017)

1.2.3 Gestión de Proyectos Enfocado en Tiempos de Producción

La gestión del tiempo es una de las principales funciones del gestor donde es indispensable la creación de un cronograma con la que se pueda cumplir las fechas estipuladas, así mismo poderse dar opciones de fechas alternativas para dar los plazos necesarios antes del inicio del proyecto. (Díez et al., 2011)

El cronograma de un proyecto ofrece un itinerario detallado sobre cómo y cuándo el proyecto entregará los productos, servicios y resultados definidos en el alcance del proyecto así mismo sirve como una herramienta de comunicación, lista de expectativas de las partes interesadas y es soporte para notificar sobre el desempeño.

El equipo de gestión del proyecto elige un método de planificación, ya sea en modo de una ruta crítica o un método ágil. Luego definen los datos específicos del proyecto (como actividades, fechas planificadas, duración, recursos, dependencias y restricciones) en la herramienta de planificación para crear un modelo de programación para luego obtener el cronograma del proyecto. (Project Management Institute, 2017)

1.2.4. Lógica Difusa

El primer artículo científico publicado sobre la lógica difusa fue hecho en 1965, por el mismo que concibió la teoría, el iraní Lofti Zadeh, ingeniero eléctrico y profesor de la Universidad de California. La lógica difusa hace alusión en la forma en que los seres humanos tomamos decisiones. Se considera muchos factores y se toma decisiones basadas en ellas, así mismo como las experiencia o juicio de expertos. No existe los extremismos, un verdadero o falso como en la lógica clásica, sino que hay intermedios. (Hurtado, 2014)

La lógica difusa consiste en una disciplina matemática donde su aplicación radica principalmente en objetos poco predecibles o donde su cálculo sea impreciso. El termino borroso aclara que existe cierta vaguedad en el pronóstico del comportamiento del elemento en estudio. (Ramírez et al., 2005)

Esta disciplina se diferencia de la lógica clásica Bivalente o proposicional, debido a que la segunda contempla solamente 2 valores de verdad, verdadero o falso, en sistema binario sería 1 o 0, en pocas palabras es o no es. La lógica difusa contempla que dicho valor de verdad es cualquier valor entre ese rango de 0 a 1, implicando que la pertenencia de un objeto en estudio dentro de un conjunto nunca será completamente exclusiva sino parcial. Esta ambigüedad que existe a la hora de querer clasificar la pertenencia de un objeto dentro de un conjunto es lo que caracteriza la lógica difusa, lo relativo que puede ser el juicio de quien lo estudia. (Almache Cabrera, 2013)

Conjuntos Difusos

Se puede definir como la generalización de la teoría propuesta por Zadeh, pero en su representación matemática.

Se tiene una serie de componentes para un conjunto difuso que comenzaría con las variables lingüísticas que son la concepción inicial de Zadeh para clasificar, un ejemplo sería la clasificación según nuestro punto de vista de la temperatura o humedad.

De dichas **variables lingüísticas**, se clasifican con unos valores lingüísticos, que serían caliente, frío, seco, húmedo o mojado.

Luego de tener los **valores lingüísticos**, se designa un rango donde se calificaría numéricamente, como sería los valores de [0° - 100° Celsius] o % de humedad.

Un conjunto difuso es el campo donde se encuentra los valores lingüísticos representados fundamentalmente por (Universidad de Málaga, 2017) :

$$A = \{x, \mu_A(x)/x \in X\}$$

Donde:

A= Conjunto Difuso

x= Variable Lingüística

$\mu_A(x) = \text{Funcion de pertenencia}$

X= Universo Discurso (Rango de Valores que puede tener los elementos o Variables Lingüísticas)

La ecuación anterior corresponde a la definición matemática de un Conjunto Difuso (A) compuesto por una variable lingüística (x) definida por una función de pertenencia $\mu_A(x)$ dentro de un universo discurso o rangos numéricos (X)

Ejemplo de Lógica Difusa: Para hacer la distinción grafica que hay entre la lógica clásica y difusa, se dispondrá de un ejemplo que consiste en la clasificación de la intensidad de precipitaciones:

Clasificaremos como una lluvia fuerte lo que consideramos como una “cantidad abundante de agua”, donde implica hacer uso de sombrilla o esperar a que escampe. Una lluvia débil puede asociarse con lloviznas, precipitaciones tan bajas que se puede salir sin sombrilla y no empaparse o también con la poca presencia de nubes negras o grises. Pero aun así en la hidrología hay valores intermedios para la clasificación de intensidades como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 1.

Clasificación de Intensidad de Precipitación

Calificación de Intensidad	Intensidad
Débil	Inferiores a 2 [mm/h]
Moderado	Entre 2 y 15 [mm/h]
Fuerte	Entre 15 y 30 [mm/h]
Muy Fuerte	Entre 30 y 60 [mm/h]

Nota: Tomada de Núñez, S. (n.d.). *Tipos de Precipitaciones*. Retrieved February 15, 2022, from <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-precipitaciones-3086.html>

El conjunto en estudio será la de que tan fuerte sería cada tipo de intensidad de lluvia, mejor representado en las siguientes figuras:

Figura 1.

Representación gráfica de la función de pertenencia del ejemplo anterior aplicando Lógica Clásica

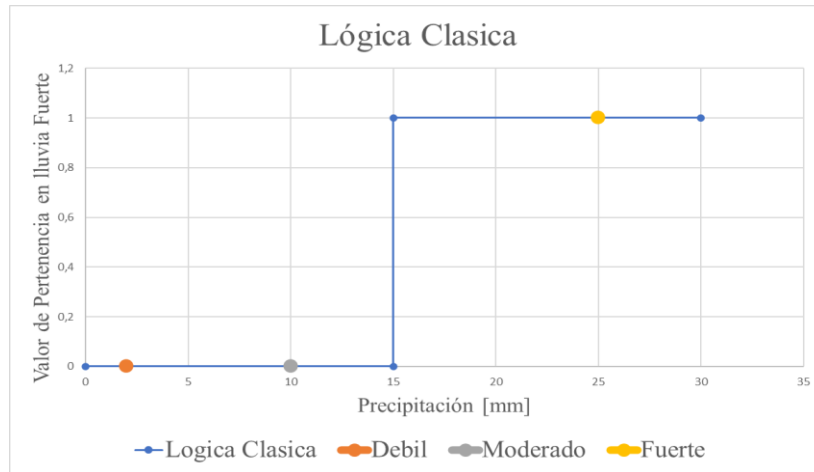
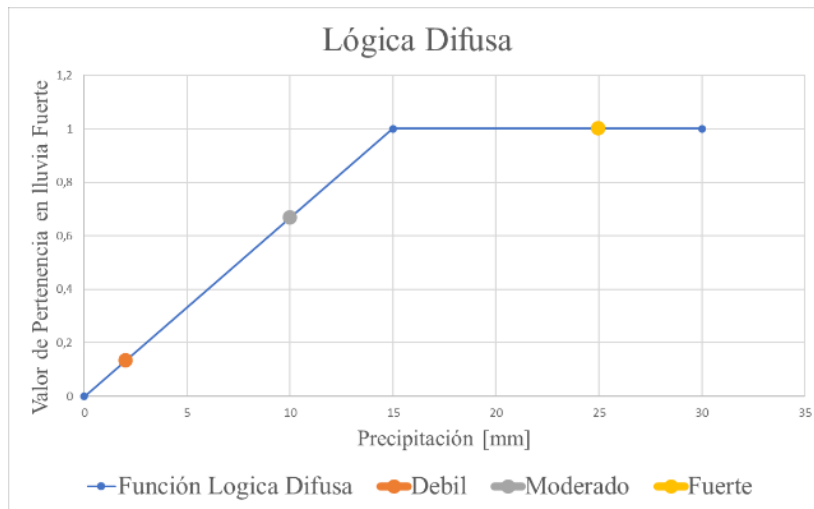


Figura 2.

Representación gráfica de la función de pertenencia del ejemplo anterior aplicando Lógica Difusa



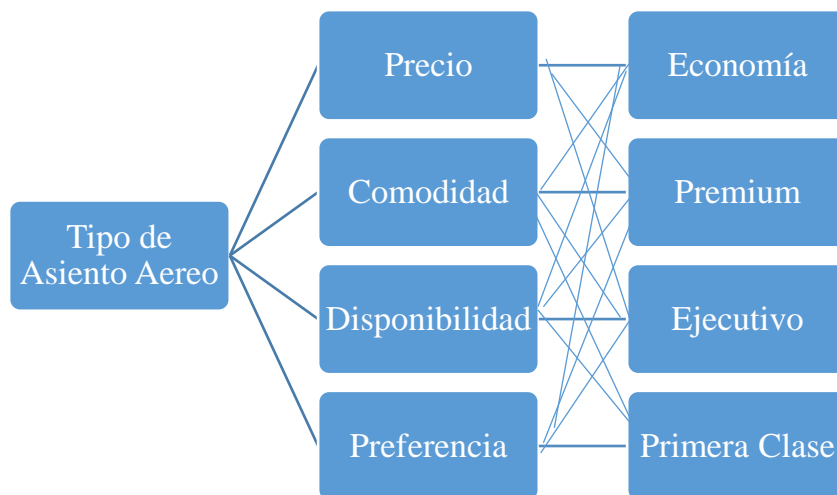
Se puede ver las exclusiones que hay a la hora de considerar las precipitaciones débiles y moderadas en las funciones de pertenencia clásica, mientras que en la Lógica Difusa se contemplan por más insignificante que sea, siempre se tendrá en cuenta así sea de forma parcial.

1.3 Proceso Analítico de Jerarquización (AHP) y Proceso Analítico de Jerarquización Difuso (FAHP)

El Proceso analítico de jerarquización consiste en una de las técnicas aplicadas para la toma de decisiones donde existe múltiples criterios a analizar. La idea de esta teoría formulada por Saaty en 1980 consiste en la posibilidad de formular matricialmente la valoración de los componentes de un producto u objetivo principal. Esto se hace con el fin de poder analizar las mejores opciones posibles ante los criterios de importancia que les asigne el evaluador a dichos componentes (Yajure, 2015). Un ejemplo propuesto podría ser la toma de decisión a la hora de adquirir el tipo de asiento en un vuelo:

Figura 3.

Análisis Jerárquico de ejemplo anterior



El ejemplo anterior consiste en la descomposición jerárquica para la toma de decisión sobre el tipo de asiento a adquirir, los coeficientes de importancia que se le asigne a los criterios del segundo nivel definirán unos pesos para cada tipo de asiento. Si el precio no tuviera importancia alguna, sino se trata de buscar un asiento con la mayor comodidad posible, los asientos de primera clase tendrán el mayor peso, mientras que viceversa se tendría la categoría de Economía como la que mayor peso incide.

Los pasos propuestos por Saaty para la descomposición del problema en estudio consisten en los siguientes (Yajure, 2015):

- 1) Definir el problema y determinar el tipo de conocimiento que se genera.
- 2) Estructurar la jerarquía de decisión desde la parte superior con la meta que se busca alcanzar, luego los objetivos desde una perspectiva amplia, para seguir con los niveles intermedios, hasta los niveles más bajos, los cuales usualmente son el conjunto de alternativas.
- 3) Construir un conjunto de matrices de comparaciones pareadas. Cada elemento en un nivel superior se usa para comparar los elementos en el nivel inmediatamente inferior con respecto a él.
- 4) Utilizar las prioridades obtenidas de las comparaciones para pesar las prioridades en el nivel inmediatamente inferior.

Para la *fuzzificación* de un proceso analítico jerárquico, se aplica las mismas bases teóricas y matemáticas solamente que se contemplaran estudios dentro de conjuntos difusos. Suponiendo que ya se realizó la jerarquización, se procede a la definición dentro de una escala lingüística para luego su asignación con un número difuso. Cada número difuso comprendido en números enteros entre 1 y 9 tienen una asignación a una función de membresía que describe difusamente la

pertenencia dentro del conjunto de estudio. El siguiente ejemplo son los valores de importancia con funciones de membresía triangulares tal como se aplicaron en el proyecto base.

Tabla 2.

Números y funciones difusas de comparación del Proceso Analítico de Jerarquización Difuso (FAHP)

Escala lingüística para la importancia	Número Difuso	Función de Membresía	Dominio	Escala difusa triangular (l, m, n)
Exactamente Igual	$\tilde{1}$			(1,1,1)
Igual Importancia		$\mu_M(x) = (3 - x)/(3 - 1)$	$1 \leq x \leq 3$	(1,1,3)
Moderadamente importante	$\tilde{3}$	$\mu_M(x) = (x - 1)/(3 - 1)$	$1 \leq x \leq 3$	(1,3,5)
		$\mu_M(x) = (5 - x)/(5 - 3)$	$3 \leq x \leq 5$	
Fuerte Importancia	$\tilde{5}$	$\mu_M(x) = (x - 3)/(5 - 3)$	$3 \leq x \leq 5$	(3,5,7)
		$\mu_M(x) = (7 - x)/(7 - 5)$	$5 \leq x \leq 7$	
Muy fuerte importancia	$\tilde{7}$	$\mu_M(x) = (x - 5)/(7 - 5)$	$5 \leq x \leq 7$	(5,7,9)
		$\mu_M(x) = (9 - x)/(9 - 7)$	$7 \leq x \leq 9$	
Extremadamente preferido	$\tilde{9}$	$\mu_M(x) = (x - 7)/(9 - 7)$	$7 \leq x \leq 9$	(7,9,9)
Si la actividad i tiene uno de los números diferente de cero ya nombrados, cuando se compara con la actividad j, entonces la actividad j tiene el valor recíproco cuando se compara con la actividad i.			Valores Recíprocos $\tilde{M}_1^{-1} = (1/n_1, 1/m_1, 1/l_1)$	

Nota: Tomado de (Yajure, 2015)

1.4 Operadores Difusos entre Valores de Pertenencia




El propósito de la realización de operaciones ya sea en la lógica clásica o difusa, se hace con el fin de obtener resultados, mostrando valores mínimos, máximos u otros según el tipo de operador que se le aplique a un conjunto, ya sea un conjunto con elementos numéricos o en nuestro caso, su aplicación en conjuntos difusos.

Un conjunto difuso no es más que una generalización de la lógica clásica, donde los elementos no quedan completamente excluidos, sino que contemplan una pertenencia relativa o parcial dentro de dicho grupo o conjunto. (Ramírez et al., 2005)

Unos ejemplos de operaciones dentro de la lógica clásica son las siguientes:

Tabla 3.

Ejemplos de Operaciones dentro de la Lógica Clásica

Simbolo Lógico																																							
Ecuación Lógica	$Q = A \cdot B = AB$	$Q = A + B$	$Q = \bar{A}$																																				
Tabla de Verdad	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <thead> <tr><th>A</th><th>B</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	A	B	Q	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <thead> <tr><th>A</th><th>B</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	A	B	Q	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <thead> <tr><th>A</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	A	Q	0	1	1	0
A	B	Q																																					
0	0	0																																					
0	1	0																																					
1	0	0																																					
1	1	1																																					
A	B	Q																																					
0	0	0																																					
0	1	1																																					
1	0	1																																					
1	1	1																																					
A	Q																																						
0	1																																						
1	0																																						

Nota: Tomado de (Operaciones Lógicas (Puertas Lógicas) – Sistemas y Operativos, n.d.)

Se observa como con la introducción de dos valores de entrada (A & B) y al aplicarle un operador lógico Booleano de Intersección (AND), se obtiene solamente un resultado de verdadero cuando ambos valores de entrada son verdaderos. Este operador podría ser útil en la búsqueda de información, donde reduciría las combinaciones posibles en caso de tener un mayor número de valores de entrada.

En la lógica difusa también existe ciertos operadores lógicos donde los principales son los siguientes:

- Complemento o Inverso representado por: $\mu_A(x) = 1 - \mu_A(x)$
- Unión, “OR de Zadeh” representado por: $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$
- Intersección, “AND de Zadeh” representado por: $\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$

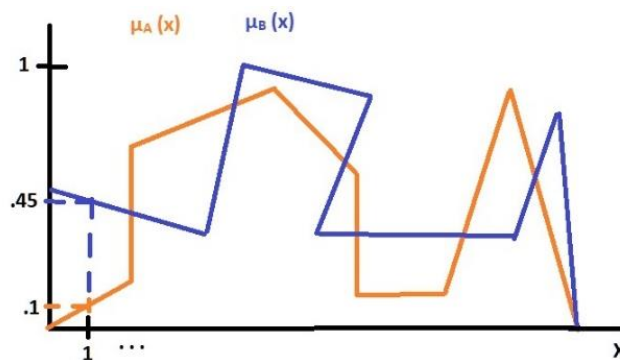
Debido a que en la lógica difusa no existe la exclusión sino la pertenencia parcial dentro de un conjunto, los principios de Contradicción y Exclusión no aplican dentro de estos métodos.

La idea de la aplicación de la lógica difusa con nuestros dos principales valores de salida (duraciones y Costos) se hace con el fin de emplear dichos operadores difusos para un mejor análisis de datos. Ejemplo, en caso de tener 3 funciones de costos, la idea de este modelo difuso en el campo de la ingeniería sería la de seleccionar las alternativas más baratas, por ende, para nuestro caso convendría aplicar el operador AND.

Un ejemplo de operaciones difusas son las siguientes donde se ve la representación gráfica de dos conjuntos A & B:

Figura 4.

Conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$

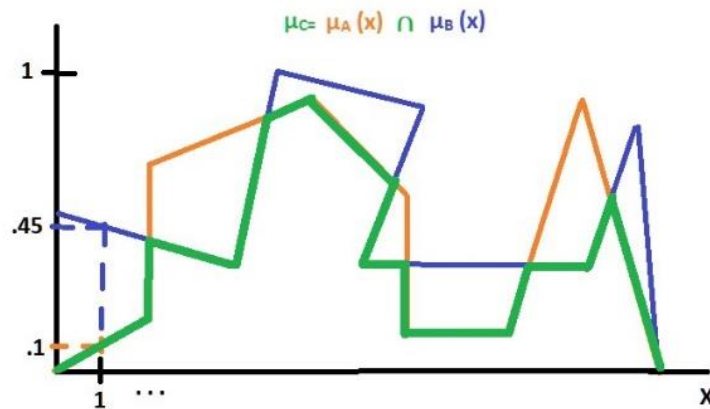


Nota: Tomado de (Operaciones Entre Conjuntos Difusos – Acervo Para El Mejoramiento Del Aprendizaje de Alumnos de Ingeniería, En Inteligencia Artificial, n.d.)

Luego de la aplicación de un operador OR se obtiene la siguiente representación gráfica de la función resultante en color verde:

Figura 5.

Unión Conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$



Nota: Tomado de (Operaciones Entre Conjuntos Difusos – Acervo Para El Mejoramiento Del Aprendizaje de Alumnos de Ingeniería, En Inteligencia Artificial, n.d.)

Se puede observar que solo se toma en cuenta los valores mínimos entre los conjuntos representados por las líneas de color Verde.

2. Metodología

2.1 Revisión Bibliográfica

2.1.1 Revisión Lógica Difusa

Las primeras fases para el desarrollo del proyecto consistían en realizar una búsqueda de información sobre los distintos temas a tratar usando las bases de datos que disponibles y que ofrece la Universidad Industrial de Santander. El proceso de investigación y revisión bibliográfica inició con la definición de un protocolo de búsqueda basado principalmente en artículos de bases teóricas y aplicaciones de lógica difusa, para luego realizar la selección o filtro con los artículos que mejor se acomoden a nuestros contenidos del proyecto.

2.1.2 Revisión Proyecto Lógica Difusa en Rendimientos

La base de investigación se centra en el artículo *“Revisión de las variables cualitativas que afectan los rendimientos de obra en función de las reglas basadas en un modelo alternativo de lógica difusa”* formulada por el ingeniero civil Daniel Felipe Lamus, donde en su proyecto de grado analizó algunas variables de mayor afectación en los rendimientos de obras de construcción verticales aplicando lógica difusa. Se propone recomendaciones que permiten aplicar su modelo una es el plantear las salidas para un sistema difuso que involucre la metodología o las funciones de pertenencia de las variables utilizadas. Después de haber realizado la búsqueda y la revisión en la literatura de la lógica difusa, en donde se leyeron a detalle cada una de las definiciones de esta se propone con las entradas que propone Daniel Lamus (Lamus, 2021), con el objetivo de poder

plantear las salidas del modelo enfocado en las duraciones y costos como complemento de su planteamiento inicial.

Luego de la revisión del proyecto base, se procede a analizar las variables de entrada ya planteadas para utilizarlas en nuestro proyecto. Las variables que afecta principalmente el rendimiento de obra utilizados fueron los planteados por Lamus (Lamus, 2021) y son los siguientes:

- Caracterización de cuadrillas (V1)
- Complejidad del proyecto (V2)
- Condiciones ambientales (V3)
- Disposición de materiales (V4)
- Experiencia del trabajador (V5)
- Herramientas y equipos (V6)
- Monitoreo y control (V7)
- Percepción Motivacional (V8)

Estas variables fueron utilizadas luego de que Lamus (2021) realizara una búsqueda en la literatura y planteara los factores relacionados con la ejecución de un proyecto que fue verificada en la presente investigación.

Luego de la revisión de los factores que afectan el rendimiento de obra, se procede a definir las actividades claves a utilizar en el análisis de este proyecto. Según (Lamus, 2021) se proponen algunas actividades después de revisar la literatura y encontrar en un estudio de la Universidad de los andes (Barba, 2018) que determino que en los proyectos de construcción las actividades claves están relacionadas con las columnas, excavación y la placa de cimentación, datos que fueron

tomados a partir de la duración de un proyecto tipo. Estas actividades se seleccionaron arbitrariamente para relacionar las variables de incidencia en rendimientos de obra de proyectos de edificaciones y que nos será útil para plantear las salidas del modelo difuso enfocado en tiempos y costos.

Las actividades son las siguientes:

- Construcción de columnas en concreto (A1)
- Construcción de vigas (A2)
- Construcción de placas en concreto (A3)
- Excavación de material propio del sector a máquina, incluido transporte de material (A4)
- Armado del acero (A5)

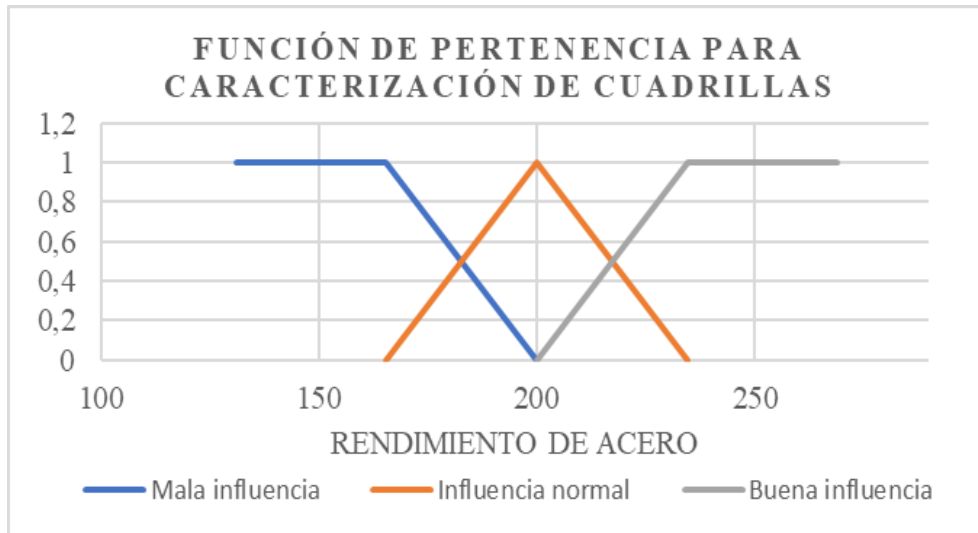
Cabe resaltar que estas presentan mayor trabajo y dificultad que otras tareas, además, su productividad es baja y es necesario encontrar mejoras en los esfuerzos para determinar con mejor precisión los productos finales (Barba, 2018; Lamus, 2021). En nuestro caso tomaremos estos datos de entrada para poder indicar mediante la lógica difusa AHP una alternativa que nos determine como pueden variar las duraciones y los costos de estas actividades con las distintas valoraciones y pesos asignados.

La siguiente figura es una de las funciones propuestas por Lamus para la representación difusa de los rendimientos en una de las actividades de interés (Caracterización de Cuadrillas) donde se observa en forma de función triangular y semi trapezoidal los distintos valores de

pertenencia que tiene un determinado rendimiento en el análisis de una buena, mala o normal influencia:

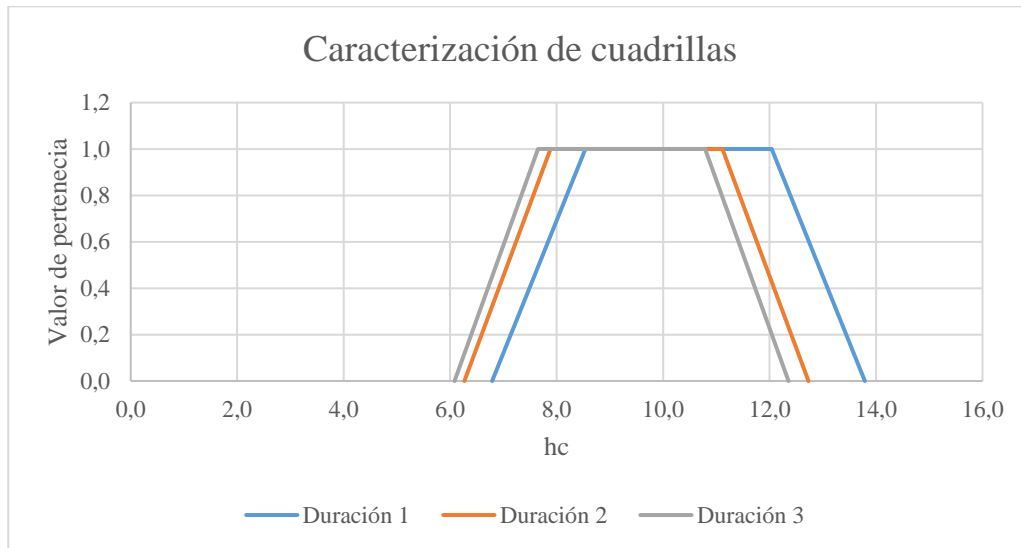
Figura 6.

Función de Pertenencia para Caracterización de Cuadrillas



Nota: Tomado de (Lamus, 2021)

Alternativamente se propone el uso de funciones trapezoidales en nuestro trabajo debido a que sus números difusos han sido propuestos a ser usados en la medición de duraciones en proyectos, donde con algoritmos se podría encontrar una ruta crítica difusa. (Atli & Kahraman, 2012)

Figura 7.*Caracterización de Cuadrillas*

2.1.3 Revisión AHP Y AHP Difuso

Para comenzar con el planteamiento de la red difusa, se investiga el método de análisis jerárquico AHP, se encuentra que el método FAHP es un método que selecciona alternativas en función de una serie de criterios o variables normalmente jerarquizadas, por lo cual se deben revisar las variables que los métodos tradicionales presentan en la etapa de planificación relacionadas con duraciones y costos.

2.1.4 Revisión Rendimientos de Obra y Costos

El rendimiento en obra se refiere a la cantidad de recurso humano expresado en horas-hombre o máquina, que se emplea por una cuadrilla de uno o varios obreros de diferente especialidad, para así ejecutar completamente una cantidad de trabajo asociada a una determinada actividad de construcción (Hernández, 2007)

Para realizar la búsqueda de rendimientos y costos se define el uso de las actividades planteadas por (Lamus, 2021) de las cuales se realiza un diccionario de la Estructura de Descomposición del Trabajo (EDT) para definir el alcance de la actividad y poder así realizar un análisis completo sin que la actividad se salga de los rangos esperados. El diccionario de la EDT es un componente de la definición del alcance del proyecto detallado que se usa para verificar que los productos entregables que se están produciendo y aceptando estén comprendidos dentro del alcance del proyecto aprobado (Americana, n.d.), en este caso para definir el alcance de las actividades propuestas y así poder realizar el análisis de precios unitarios de manera satisfactoria y también los rendimientos acordes a cada actividad. [Ver Apéndice C]

Teniendo claro el alcance de cada una de las actividades se realiza una búsqueda de rendimientos en el portal especializado Construdata y en las demás bases de datos que ofrece la biblioteca de la UIS, allí se encontraron varios datos de referencia publicados de estudios o proyectos pasados. [Ver Apéndice A]. Es de anotar que se medirán duraciones unitarias asociadas a la ejecución de 1 unidad de cantidad específica.

Con la variabilidad de los rendimientos se verán cambios significativos en los costos de cada uno de los precios unitarios, que se analizarán en las figuras. Los datos de los costos tomados para los materiales se encuentran en las bases de datos especializadas ya mencionadas anteriormente.

Después de realizar la búsqueda de rendimientos, se realiza un listado de cada una de las actividades con los respectivos rendimientos que fueron encontrados y los costos de las cotizaciones de cada una de las actividades propuestas para posterior anexar estos datos en el desarrollo de los análisis de precios unitarios y diccionario de la EDT.

2.2 Explicación Detalle Tiempo Unitario y Precio Unitario

Los tiempos y precios unitarios se refiere a la determinación del precio o tiempo por unidad de una actividad o partida (estructura de costos) a ejecutar en una obra, en las cual se debe determinar las unidades de medida (Villegas, n.d.).

Después de realizar una búsqueda significativa de rendimientos y costos para así poder realizar más adelante los análisis de precios unitarios para cada una de las actividades analizadas, en las cuales primordialmente se varían los rendimientos que generan costos diferentes para el análisis de los resultados.

En cada uno de los análisis de precios unitarios se define la cantidad a usar en cada una de las actividades, esto con el fin de tener un tiempo y precios unitarios para el uso en algún proyecto tipo.

2.2.1 Desarrollo Diccionario y Análisis Unitarios

Los rendimientos que fueron utilizados se trabajaron por trabajar en horas-cuadrilla por unidad de medida y el alcance de cada una de las actividades que incluyen estos rendimientos se encuentra en el diccionario de la EDT que fue desarrollado como se encuentra en el Apéndice C

De cada actividad propuesta se realizaron 3 análisis de precios unitarios que fueron hechos con la información recolectada anteriormente y teniendo en cuenta el alcance propuesto por el diccionario de la EDT. El resumen de los costos totales se pueden observar en la tabla 4. Estos costos consideran las condiciones del mercado actual de concreto premezclado (costos 1 y 2) y mezclado en sitio (costo 3), permitiendo evaluar mediante lógica difusa la decisión final del costo asociado.

Tabla 4.*Desarrollo Diccionario y Análisis Unitarios*

Costos Finales	Costo 1 [COP]	Costo 2 [COP]	Costo 3 [COP]
Columnas [m3]	579.370,84 \$	553.239,14 \$	543.977,27 \$
Vigas [m3]	610.872,61 \$	522.554,09 \$	568.201,87 \$
Placa Aligerada [m3]	332.203,76 \$	338.819,38 \$	315.664,71 \$
Excavación Mecánica [m3]	19.526,25 \$	13.017,50 \$	15.621,00 \$
Armado Acero [Kg]	6.302,56 \$	6.065,53 \$	7.013,66 \$

Nota: Tabla resumen de cotos totales para la fundida de elemento en concreto reforzado, excavación mecánica y armado en acero por unidad

Estos rendimientos generan una base para generar los datos de entrada del modelo difuso, sin embargo, debido a que este modelo carece de cantidades de obra, nos podemos remitir al cálculo de duraciones con los datos mencionados.

$$Duración = \frac{Cantidad}{Rendimiento}$$

Como la cantidad es 1, podremos asumir que el rendimiento en unidades sobre tiempo nos define la duración unitaria de la actividad. Siendo así las cosas la duración termina siendo:

$$Duración = \frac{1}{Rendimiento}$$

En la tabla 5 se denotan los tres tipos de tiempo evaluados para tres tipos de rendimientos diferentes.

Tabla 5.

Duraciones Base

Ítem	Actividad	Duraciones		
		Fuente 1 [hc]	Fuente 2 [hc]	Fuente 3 [hc]
C1	Armado del acero [Kg]	0,05	0,04	0,08
C2	Construcción de columnas en concreto [m3]	10,29	9,5	9,22
C3	Construcción de vigas en concreto [m3]	11	8,33	9,71
C4	Construcción de placas en concreto [m3]	3	3,2	2,5
E1	Excavación de material propio a máquina incluido transporte [m3]	0,15	0,100	0,120

3. Aplicación del Proceso Analítico de Jerarquización Difuso (FAHP) para la Estimación de Costos

3.1 Proceso de Aplicación de FAHP

Para el cálculo tipo, se mostrará el trabajo con las asignaciones de importancia global establecidos para todas las actividades según lo muestra la tabla 6, según la revisión bibliográfica e información disponible.

Tabla 6.*Proceso de Aplicación de FAHP*

VARIABLES	Importancia global
Caracterización de cuadrillas (V1)	9
Complejidad del proyecto (V2)	7
Condiciones ambientales (V3)	5
Disposición de materiales (V4)	5
Experiencia del trabajador (V5)	7
Herramientas y equipos (V6)	5
Monitoreo y control (V7)	6
Percepción Motivacional (V8)	4

Se planteó la matriz de comparación pareada (X), que muestra mejor la importancia relativa que tiene unas variables sobre otras. Esta matriz de Comparación pareada se realiza de la misma manera que las del FAHP tradicional. Aquí se expresa la comparación pareada que tiene las variables de las filas con respecto a las que se encuentran en las columnas.

Como se puede observar en la tabla 7, se muestra la relación de 3 variables entre sí, la matriz en el Apéndice A muestra completa todas las relaciones entre las 8 variables: Se puede ver como las variables comparadas entre sí mismas tienen un valor de comparación igual a 1(verde), mientras que las relaciones entre variables de menor a mayor importancia respectivamente están de color azul con un número difuso menor a 1.

Tabla 7.

Matriz de Comparación Pareada (X)

X	Caracterización de cuadrillas	Complejidad del proyecto	Condiciones ambientales
Caracterización de cuadrillas	1,00	3,00	5,00
Complejidad del proyecto	0,33	1,00	3,00
Condiciones ambientales	0,20	0,33	1,00

Para la realización de las funciones difusas, se propuso una forma trapezoidal, la cual se adopta por recomendaciones de (Zheng et al., 2012), el cual, establece que permite mejores estimaciones comparada a las triangulares. Los números difusos son los descritos en la tabla 8.

Tabla 8.

Números Difusos

Scale of relative importance used in the pair-wise comparison of AHP.

Scale of relative importance (crisp number)	Trapezoidal fuzzy number	Linguistic variable
1	(1, 1, 1, 1)	Equally important
3	(2, $\frac{5}{2}$, $\frac{7}{2}$, 4)	Weakly important
5	(4, $\frac{9}{2}$, $\frac{11}{2}$, 6)	Essentially important
7	(6, $\frac{13}{2}$, $\frac{15}{2}$, 8)	Very strongly important
9	(8, $\frac{17}{2}$, 9, 9)	Absolutely important
$x = 2, 4, 6, 8$ are intermediate scales	$(x - 1, x - \frac{1}{2}, x + \frac{1}{2}, x + 1)$	

Nota: Tomado de (Zheng et al., 2012)

Cabe recalcar que la asignación de los números difusos para comparaciones pareadas menores a 1, es la asignación inversa (1/x) como se describe en la ecuación 1.

$$\frac{1}{x + 1, x + \frac{1}{2}, x - \frac{1}{2}, x - 1} \text{ [Ecuación 1]}$$

El trabajo realizado para la asignación de números difusos entre las 8 variables comparadas solamente con la caracterización de cuadrillas (tabla 9), se puede observar que la igual que la matriz de comparación pareada (Apéndice A), los números difusos de ninguno de las 8 variables aparte de la misma caracterización es mayor a 1 debido a que ninguna se le asigna un valor de importancia mayor a la Variable 1.

Tabla 9.

Números Difusos entre las 8 Variables Comparadas solamente con la Caracterización de Cuadrillas

\tilde{x}	V1			
	a	b	c	d
V1	1,00	1,00	1,00	1,00
V2	0,25	0,29	0,40	0,50
V3	0,17	0,18	0,22	0,25
V4	0,17	0,18	0,22	0,25
V5	0,25	0,29	0,40	0,50
V6	0,17	0,18	0,22	0,25
V7	0,20	0,22	0,29	0,33
V8	0,14	0,15	0,18	0,20

Como lo propuesto por Buckley en 1985, se calculará los pesos difusos para cada número difuso asignado, esto se realiza con la multiplicación de cada número difuso de las filas de la matriz de la matriz de comparación pareada difuso (\tilde{X}), este método se le denomina Geometric Mean Method (Ecuación 2).

Cada variable ubicada en las filas de la matriz (\tilde{X}) se multiplicará con cada variable de las variables ubicadas en las columnas, este trabajo se realiza para cada parte de su número difuso trapezoidal correspondiente.

Fuzzy Geometric Mean

$$\tilde{w}_i = [(\tilde{a}_i, \tilde{b}_i, \tilde{c}_i, \tilde{d}_i) * (\tilde{a}_{i+1}, \tilde{b}_{i+1}, \tilde{c}_{i+1}, \tilde{d}_{i+1})]^{\frac{1}{n}}$$

[Ecuación 2]

donde n es el número de variables (8) y (a,b,c,d) corresponden a los números difusos trapezoidales asignados en la matriz \tilde{X}

En la tabla 10 se observa la matriz del significado geométrico difuso calculado para variable.

Tabla 10.

Fuzzy Geometric Mean

\tilde{w}_i	Fuzzy Geometric Mean			
	a	b	c	d
V1	3	3	4	4

\widetilde{w}_i	Fuzzy Geometric Mean			
V2	1	1	2	2
V3	0	1	1	1
V4	0	1	1	1
V5	1	1	2	2
V6	0	1	1	1
V7	1	1	1	2
V8	0	0	0	1

Para el cálculo del peso difuso (Ecuación 3) se realiza a partir de la multiplicación entre los significados geométricos calculados anteriormente y el inverso de la suma total de cada significado correspondiente.

Peso Difuso:

$$\widetilde{W}_i = w_i * \left(\frac{1}{\sum \widetilde{w}_j} \right) \text{ [Ecuación 3]}$$

En la tabla 11 se presentará los pesos difusos

Tabla 11.

Fuzzy Weight

\widetilde{W}_i	Fuzzy Weight			
	a	b	c	d
V1	0,21	0,27	0,44	0,56
V2	0,09	0,13	0,21	0,28

\bar{W}_i	Fuzzy Weight			
V3	0,04	0,05	0,08	0,10
V4	0,04	0,05	0,08	0,10
V5	0,09	0,13	0,21	0,28
V6	0,04	0,05	0,08	0,10
V7	0,05	0,07	0,14	0,20
V8	0,02	0,03	0,05	0,07

A partir de los pesos difusos calculados en forma trapezoidal, calculó el peso promedio que tendría cada variable como se observa en la tabla 12.

Tabla 12.

Peso Promedio Difuso

Peso Promedio Difuso	
V1	0,37
V2	0,18
V3	0,07
V4	0,07
V5	0,18
V6	0,07
V7	0,12
V8	0,04

El valor del peso normalizado (Ecuación 4) que será el número que definirá los rangos máximos y mínimos donde variará nuestros costos consultados, se calculará como el peso promedio difuso de cada variable entre la suma total de los pesos promedios difusos, como se observa en la tabla 13.

Peso Normalizado

$$= \frac{\text{Peso Promedio Difuso}}{\sum \text{Pesos promedios Difusos Totales}} \text{ [Ecuación 4]}$$

Tabla 13.

Peso Normalizado

	Peso Normalizado
V1	0,34
V2	0,16
V3	0,06
V4	0,06
V5	0,16
V6	0,06
V7	0,11
V8	0,04

3.2 Revisión de Consistencia de FAHP

Antes de realizar cualquier cálculo de se deberá revisar la consistencia de la matriz pareada. A partir de la matriz de comparación pareada se multiplica cada valor por la suma total de los

valores de su respectiva columna (Ecuación 5) para obtener la matriz de comparación normalizada como se observa en la tabla 14.

$$(X_{ij} \text{ Normalizada}) = (X_{ij}) * \left(\frac{1}{\sum X_j} \right)$$

[Ecuación 5]

Tabla 14.

Matriz Comparación Pareada Normalizada (X_{ij} Normalizada)

Matriz Comparación Pareada Normalizada (X _{ij} Normalizada)							
0,37	0,44	0,30	0,30	0,44	0,30	0,37	0,25
0,12	0,15	0,18	0,18	0,15	0,18	0,18	0,17
0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,08
0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,08
0,12	0,15	0,18	0,18	0,15	0,18	0,18	0,17
0,07	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,08
0,09	0,07	0,12	0,12	0,07	0,12	0,09	0,13
0,06	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04

Se calculó los pesos promedios para cada variable de las filas como se observa en la tabla 15.

Tabla 15.*Pesos Promedios de Matriz FAHP Tradicional Normalizada*

Pesos Promedios de Matriz FAHP Tradicional Normalizada	
V1	0,35
V2	0,16
V3	0,06
V4	0,06
V5	0,16
V6	0,06
V7	0,10
V8	0,04

Se Calculó el Vector A x P definido como la multiplicación entre la Matriz de Comparación Pareada Tradicional y los Pesos Promedios FAHP Normalizada como se observa en la tabla 16.

Tabla 16.*Vector A x P*

Vector A x P	
V1	2,88
V2	1,35
V3	0,49
V4	0,49
V5	1,35
V6	0,49
V7	0,83
V8	0,30

Se calculó el mayor valor propio de la matriz definido como λ_{\max} (Zheng et al., 2012)

$$\lambda_i = \frac{\text{Peso } prom_i}{\text{Vector } A \times P_i} \text{ [Ecuación 6]}$$

$$\lambda_{\max} = \sum \lambda_i$$

Para que la matriz de comparación pareada sea consistente, el valor de Proporción de Consistencia (CR) no debe ser mayor a 0.1 donde:

$$CR = \frac{CI}{RI} \text{ [Ecuación 8]}$$

El índice de consistencia (CI) se revisará como lo define (Zheng et al., 2012):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \text{ [Ecuación 9]}$$

donde n = Número total de variables

El índice aleatorio de consistencia (RI) se establece según el tamaño o número total de variables (n) como lo define (Zheng et al., 2012):

Tabla 17.*Índice Aleatorio de Consistencia (RI)*

The random consistency index (RI).

Size (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Nota: Tomado de (Zheng et al., 2012)

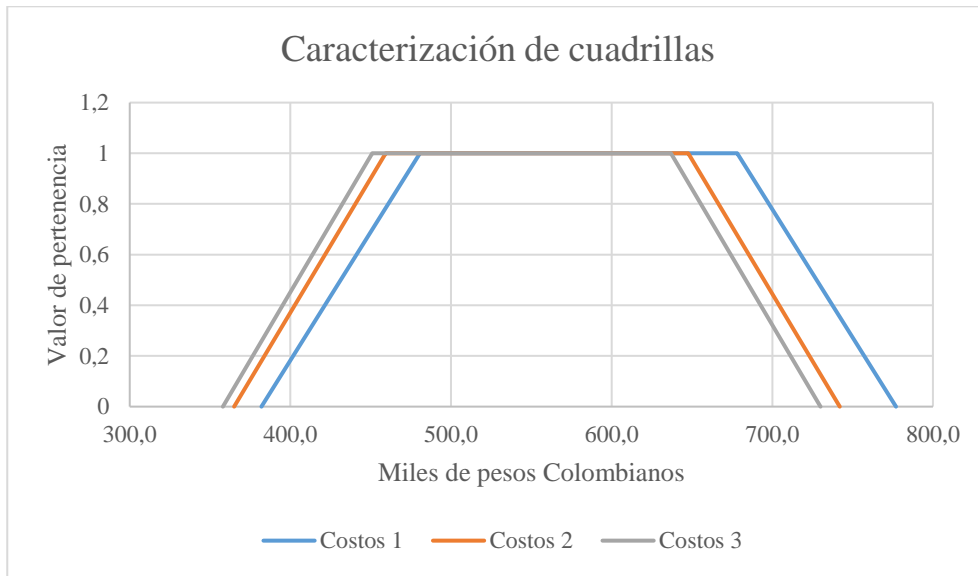
En nuestro caso con un número total de 8 variables, asignado con un RI=1.41 y CI=0.017, se obtuvo un Proporción de Consistencia (CR) de 0.012, menor al valor límite de 0.1. Esto establece que la consistencia de nuestra matriz FAHP tradicional es consistente, por lo que también lo será nuestra matriz de comparación pareada trapezoidal (Zheng et al., 2012).

4. Resultados

Como etapa final del proyecto de investigación, se plantea un ejemplo claro es la amplitud de las funciones trapezoidales de costos observados en la figura 8 y 9, donde una es considerada la variable con mayor importancia y la otra con la menor, respectivamente. Se puede observar que según se aumente el nivel de importancia de alguna variable, así mismo aumentará la posibilidad de reducción de costos con un buen manejo de cuadrillas, o un riesgo de sobre costo con un mal manejo según se haga en obra.

Figura 8.

Amplitud de las funciones trapezoidales de costos – Variable con Mayor Importancia

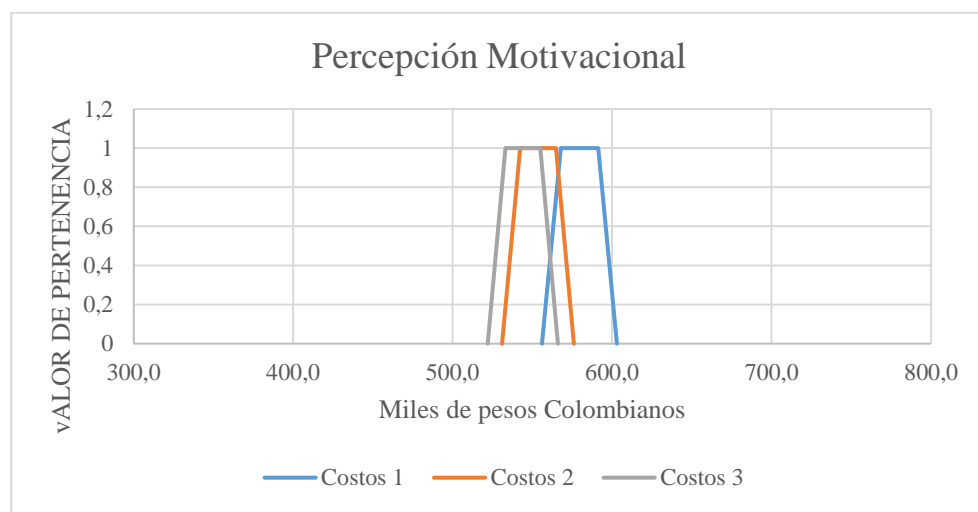


Nota: Costo para columnas según análisis de Variable con mayor importancia asignada según

Apéndice A.

Figura 9.

Amplitud de las funciones trapezoidales de costos – Variable con Menor Importancia

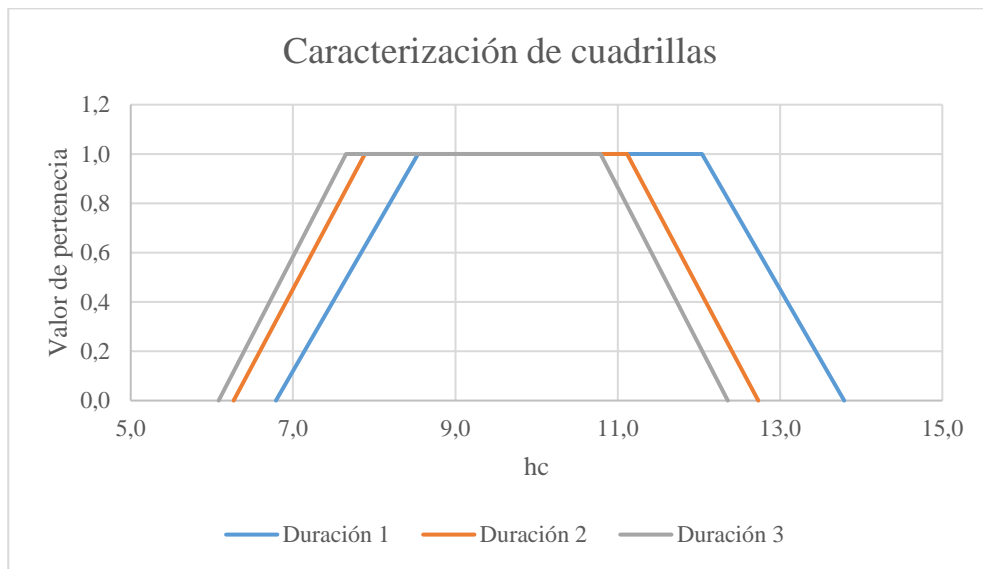


Nota: Costo para columnas según análisis de Variable con Menor importancia según Apéndice A.

El mismo comportamiento aplica para las duraciones, observados en las figuras 11 y 12. La posibilidad de una reducción o aumento en duraciones varía según la importancia asignada a cada actividad de construcción. Entre más ancho son las funciones trapezoidales, mas es la posibilidad de variación.

Figura 10.

Caracterización de Cuadrillas

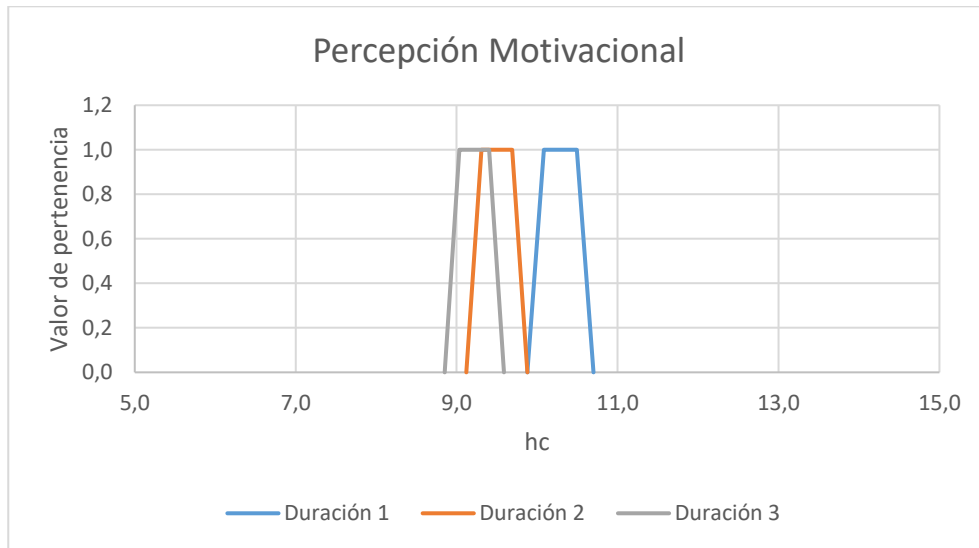


Nota: Duración para columna según análisis de Variable con mayor importancia asignada según

Apéndice A.

Figura 11.

Percepción Motivacional



Nota: Duración para columnas según análisis de Variable con Menor importancia según Apéndice A.

Numéricamente se puede ver mejor los posibles cambios de costos en la tabla 18 y de duraciones en la tabla 19.

En la Tabla 18 se observa hasta una posible reducción de 475.000 COP, aunque por tener un valor de pertenencia casi nunca, es muy improbable, pero así mismo aplica para su riesgo de sobre costo, en caso de que se realice una pésima caracterización de cuadrilla. La mínima variación encontrada fue en la variable de menor importancia (Percepción motivacional) que corresponde a solamente un valor de 3.000 COP.

Tabla 18.*Diferencia Costos*

	Diferencia Costos [COP]				
	A1	A2	A3	A4	A5
V1	419.000 \$	475.000 \$	247.000 \$	19.000 \$	6.000 \$
V2	221.000 \$	276.000 \$	132.000 \$	13.000 \$	4.000 \$
V3	105.000 \$	159.000 \$	64.000 \$	9.000 \$	3.000 \$
V4	105.000 \$	159.000 \$	64.000 \$	9.000 \$	3.000 \$
V5	221.000 \$	276.000 \$	132.000 \$	13.000 \$	4.000 \$
V6	105.000 \$	159.000 \$	64.000 \$	9.000 \$	3.000 \$
V7	157.000 \$	211.00 \$	95.000 \$	11.000 \$	3.000 \$
V8	81.000 \$	135.000 \$	50.000 \$	9.000 \$	3.000 \$

Nota: Variación máxima de costos para columnas según importancia asignada en el Apéndice A.

En la Tabla 19 se analiza una reducción o aumento de hasta 9.246 un/día para construcción de vigas y reducción o aumento mínimo de 0.045 un/día para armado de acero. Esto al igual que en la tabla 18, estos valores son muy poco probable por su valor de pertenencia casi nula. Recordar que la lógica difusa no excluye los valores extremos, sino que les asigna valores de pertenencia pequeños.

Tabla 19.*Diferencia Duraciones*

	Diferencia Duraciones [hc]				
	A1	A2	A3	A4	A5
V1	7,707	9,246	2,639	0,135	0,081

	Diferencia Duraciones [hc]				
	A1	A2	A3	A4	A5
V2	4,272	5,843	1,636	0,091	0,060
V3	2,267	3,856	1,050	0,065	0,047
V4	2,267	3,856	1,050	0,065	0,047
V5	4,272	5,843	1,636	0,091	0,060
V6	2,267	3,856	1,050	0,065	0,047
V7	3,167	4,747	1,313	0,077	0,053
V8	1,849	3,442	0,928	0,060	0,045

Nota: Variación máxima de duraciones para columnas según importancia asignada en el Apéndice A.

4.1 Variación de Duraciones y Costos con Máxima y Mínima Importancia Asignada.

Entre los resultados encontrados, fueron los posibles aumentos o reducciones de costos y duraciones según las importancias que se le dieran a las variables que conforman las actividades, tal como se ve en la tabla 20 y 21.

Tabla 20.

Diferencia Total de Duraciones

	Diferencia Duraciones	
	Max	MIN
V1	0,015	0,076
V2	1,570	0,019
V3	0,982	0,035
V4	2,059	0,001
V5	1,570	0,033
V6	2,059	0,035

Diferencia Duraciones		
	Max	MIN
V7	0,756	0,005
V8	0,197	0,001

Tabla 21.*Diferencia Total Costos*

Diferencia Costos		
	Max	MIN
V1	1.000,00 \$	1.000,0 \$
V2	55.000 \$	0,0 \$
V3	058.000 \$	0,0 \$
V4	121.000 \$	0,0 \$
V5	55.000 \$	1.000,00 \$
V6	121.000 \$	0,0 \$
V7	44.000 \$	0,005 \$
V8	12.000 \$	0,001 \$

4.2 Variación de Duraciones y Costos entre Actividades con Distintas Asignaciones de Variables de Importancia

La aplicación de nuestro modelo se realizó con distintos valores de importancia para las variables en estudio, en la tabla 4 se mostró como se establecieron los valores de importancia para todas las 5 actividades con el fin de ver las variaciones de costos y duraciones con los mismos pesos normalizados difusos. Sabiendo que en actividades relacionados con el concreto armado, movimientos de tierra y demás no se les puede dar la misma importancia a todas las variables ya que estudios revelan que unos influyen más que otras, por ellos se empleó en el Apéndice B, los

valores de importancia asignados por Daniel Lamus (Lamus, 2021) los cuales se encuentran en la tabla 22.

Tabla 22.

Importancia Global

	Importancia Global				
	Columnas	Vigas	Placa	Excavación	Armado Acero
V1	9	8	8	3	9
V2	7	4	4	5	7
V3	5	5	6	7	3
V4	5	6	5	4	7
V5	7	3	6	8	6
V6	5	6	7	7	5
V7	6	4	5	5	5
V8	4	2	3	3	3

Nota: Tomado de Lamus, D. F. (2021). Revisión de las variables cualitativas que afectan los rendimientos de obra en función de las reglas basadas en un modelo alternativo de lógica difusa.

Universidad Industrial de Santander

Se puede observar en la tabla 23 y 24 la variación de costos y duraciones respectivamente según los valores de importancia asignados en la tabla 22.

Tabla 23.

Costos [Miles de Pesos]

	Costos [COP]				
	A1	A2	A3	A4	A5
V1	419.000 \$	476.000 \$	219.000 \$	9.000 \$	7.000 \$
V2	221.000 \$	167.000 \$	57.000 \$	11.000 \$	4.000 \$
V3	105.000 \$	217.000 \$	108.000 \$	14.000 \$	3.000 \$
V4	105.000 \$	280.000 \$	76.000 \$	9.000 \$	4.000 \$
V5	221.000 \$	140.000 \$	108.000 \$	17.000 \$	3.000 \$
V6	105.000 \$	280.000 \$	159.000 \$	14.000 \$	3.000 \$
V7	157.000 \$	167.000 \$	76.000 \$	11.000 \$	3.000 \$
V8	81.000 \$	123.000 \$	45.000 \$	9.000 \$	3.000 \$

Nota: Variación máxima de costos según importancia asignada en el Apéndice B.

Tabla 24.

Duraciones [hc]

	Duraciones [hc]				
	A1	A2	A3	A4	A5
V1	7,707	9,261	2,393	0,059	0,081
V2	4,272	3,991	0,984	0,072	0,060
V3	2,267	4,838	1,432	0,100	0,044
V4	2,267	5,915	1,148	0,064	0,060
V5	4,272	3,533	1,432	0,124	0,054
V6	2,267	5,915	1,876	0,100	0,048
V7	3,167	3,991	1,148	0,072	0,048
V8	1,849	3,245	0,886	0,059	0,044

Nota: **Variación máxima** de duraciones según importancia asignada en el Apéndice B.

En la tabla 25 se observa la máxima y mínima diferencia posible de costos analizada con la ejecución de un modelo difuso FAHP con asignaciones iguales de importancia en todas las actividades [Apéndice A] y asignaciones de importancia distintas correspondientes a como lo indica la literatura [Apéndice B]. Se puede analizar que la asignación de importancia debe hacerse rigurosamente, ya que no todas las variables tienen la misma importancia, sino que varían según la actividad de construcción a realizar.

Tabla 25.

Diferencia Costos Máximas y Mínimas

	Diferencia Costos [COP]	
	Max	MIN
V1	1000 \$	1000 \$
V2	55000 \$	0 \$
V3	58000 \$	0 \$
V4	121000 \$	1000 \$
V5	55000 \$	1000 \$
V6	121000 \$	0 \$
V7	44000 \$	0 \$
V8	12000 \$	0 \$

Nota: Variación máxima y mínima de costos entre el análisis del Apéndice A y B.

Tabla 26.

Diferencia Duraciones Máximas y Mínimas

Diferencia Duraciones [hc]		
	Max	MIN
V1	1,00	1,00
V2	55,00	0,00
V3	58,00	0,00
V4	121,00	1,00
V5	55,00	1,00
V6	121,00	0,00
V7	44,00	0,00
V8	12,00	0,00

Nota: **Variación máxima y mínima** de duraciones entre el análisis del Apéndice A y B.

5. Conclusiones

Se revisó entre la literatura disponible que las 7 variables (“Caracterización de Cuadrillas, Complejidad del Proyecto, Condiciones Ambientales, Experiencia del Trabajador, Herramientas y Equipos, Monitoreo y Control y Percepción Motivacional”) afectan la definición de duraciones y costos de las actividades de construcción seleccionadas.

Se propuso funciones difusas como técnica alternativa para la definición o control de tiempos y costos de ciertas actividades de construcción.

Se identificó las variables que afectan principalmente las actividades de construcción de estructuras verticales para su aplicación en un modelo difuso.

La asignación de importancia que tiene cada variable depende del gestor y actividad en estudio, pero se logró determinar que las variables de cuadrillas es la que mayor afecta las actividades y por ende debería de aplicarse el mayor control, así mismo las variables tienden a afectar de forma similar generalmente en las actividades de construcción de columnas, vigas y placas de concreto.

6. Recomendaciones

En el caso que se quiera aplicar la lógica difusa en un modelo de la vida real, asegurar de implementar los valores de importancia correspondientes con el juicio de algún experto.

No aplicar este modelo en un proyecto completo como el valor definitivo en que cambiaran los cronogramas y presupuestos, al igual que las demás teóricas para la gestión de control, son una herramienta para que el gestor aplique según su criterio.

Con la implementación de nuevas tecnologías, incluso las 7 dimensiones BIM, proyectar a la realización de un modelo sistematizado de una obra de construcción para la estimación de costos y duraciones con ayuda de inteligencia artificial.

Referencias Bibliográficas

- Almache Cabrera, J. (2013). Lógica clásica y lógica difusa: Facetas que las caracterizan. *Estoa*, 2, 91–101. <http://www.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/estoa/article/view/306>
- Americana, N.N. (n.d.). *Fundamentos de la Dirección de Proyectos Tercera Edición (Guía del PMBOK®)*.
- Atli, O., & Kahraman, C. (2012). Aircraft Maintenance Planning Using Fuzzy Critical Path Analysis. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 5(3), 553–567. <https://doi.org/10.1080/18756891.2012.696920>
- Barba, D.A. (2018). *Caracterización técnica de actividades en obras de construcción*.
- Boggiano, V.A.E., Cortés, L.A., & Enríquez, D.D.E.D. (2018). Aplicación de la lógica difusa en proyectos. *EPISTEMUS*, 12(25), 7–14. <https://doi.org/10.36790/EPISTEMUS.V12I25.78>
- Carlos, A., D'negri, E., de Vito, E.L., & Zadeh, L.A. (2006). Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. In *Revista Argentina de Medicina Respiratoria Año (Vol. 6)*.
- Díez, H., Pérez, M., Gimena, F., & Montes, M. (2011). Indicadores de rendimiento en procesos de gestión de proyectos. Caso de estudio en el sector público de Colombia. *XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 1–20.
- Hernández, T. C. (2007). *Análisis por precios unitarios Triny Carolina Hernández Celis Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniera Civil*.
- Hurtado, J. P. (2014). Lógica difusa: Perspectiva y aplicaciones. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.

Lamus, D. F. (2021). Revisión de las variables cualitativas que afectan los rendimientos de obra en función de las reglas basadas en un modelo alternativo de lógica difusa. *Universidad Industrial de Santander*.

Modern Management Systems A Construction Industry Cost Effectiveness Project Report. (1982).

Núñez, S. (n.d.). *Tipos de Precipitaciones*. Retrieved February 15, 2022, from <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-precipitaciones-3086.html>

Operaciones entre conjuntos difusos – acervo para el mejoramiento del aprendizaje de alumnos de ingeniería, en Inteligencia Artificial. (n.d.). Retrieved January 26, 2022, from http://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/?page_id=1026

Operaciones lógicas (puertas lógicas) – Sistemas y Operativos. (n.d.). Retrieved January 26, 2022, from <https://sistemasyoperativos.com/2018/11/19/operaciones-logicas-puertas-logicas/>

Project Management Institute. (2017). Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK) / Project Management Institute. In *Herramientas Y Técnicas Para La Gestión De Proyectos De Desarrollo Pm4R* (Vol. 1).

Ramirez, Andres., Barriga, Angel., Baturone, Iluminada., & Sanchez Solano, Santiago. (2005). Capítulo 2: Logica difusa Conceptos Fundamentales. *Libro Electrónico Sobre Lógica Difusa*, 35–59.

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/ramirez_r_o/capitulo3.pdf

Rodas, P., Guamán, R., Colina Morles, E., Peña, M., & Siguenza-Guzman, L. (n.d.). *Modelo matemático basado en programación lineal y lógica difusa para predicción de tiempos en industrias de ensamble de bicicletas*. <https://doi.org/10.17013/risti.n.pi-pf>

- Rodríguez, A. (2009). Utilización de la lógica difusa en la estimación del riesgo en proyectos. *XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 1–12.
http://www.aepro.com/files/congresos/2009badajoz/ciip09_2091_2102.2640.pdf
- Segura, J. A., & Obregón, N. (2005). Un modelo de lógica difusa y conjuntos difusos para el pronóstico de los niveles medios diarios del río Magdalena, en la estación limnigráfica de Puerto Salgar, Colombia. *Revista de Ingeniería*, 22, 112–117.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200013&lng=en&nrm=iso&tlng=pt
- Universidad de Málaga. (2017). Apartado 7.3: Teoría de conjuntos difusos y lógica difusa 1 Introducción. *Teoría de Conjuntos Difusos y Lógica Difusa*, 20.
<http://www.lcc.uma.es/~eva/aic/apuntes/fuzzy.pdf>
- Villegas, L. (n.d.). *Análisis de precios unitarios*.
- Wallace, W. (2014). Gestión de Proyectos - Definición de Proyectos. *Edinburgh Business School*, 2014(1106), 68. <https://ebs.online.hw.ac.uk/documents/course-tasters/spanish/pdf/pr-bk-taster.pdf>
- Yajure, C. (2015). Comparison of multicriteria methods AHP and Fuzzy AHP in selecting the best technology for the production of electricity from coal. *Scientia et Technica Año XX*, 20(3), 255–260.
- Zheng, G., Zhu, N., Tian, Z., Chen, Y., & Sun, B. (2012). Application of a trapezoidal fuzzy AHP method for work safety evaluation and early warning rating of hot and humid environments. *Safety Science*, 50(2), 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.08.042>