

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA QUE
SOPORTA LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS PARA
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN, SOMETIDA A LAS PAUTAS DE
DIRECCIÓN DE PROYECTOS PMI**

ANNY PAULINE MÁSMELA FUENTES



OPALO Research Group

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2015

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA QUE
SOPORTA LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS PARA
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN, SOMETIDA A LAS PAUTAS DE
DIRECCIÓN DE PROYECTOS PMI**

ANNY PAULINE MÁSMELA FUENTES

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera Industrial**

Director

Msc. JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ

Codirector

Msc. EDWIN ALBERTO GARAVITO HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DES ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir y alcanzar mis metas.

A mis padres que han sido el gran apoyo en mi vida.

A mi hijo quien es la inspiración y motivación de mi vida.

A todos los familiares que contribuyeron en el logro de esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Jorge Enrique Meneses, director de esta tesis de grado, por su exigencia y orientación, que contribuyeron a generar un resultado que superó las expectativas esperadas.

Al profesor Edwin Alberto Garavito, co-director de la tesis, que fue la guía principal por parte de la escuela para la realización de este trabajo de grado.

Al Ingeniero Juan Carlos Huertas Castillo, que su orientación y consejos en la práctica empresarial, contribuyeron a que realizara este proyecto con un enfoque práctico para implementarlo en la realidad empresarial e ingenieril.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales y sus profesores por ser mi hogar y los formadores de mi carrera profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	20
1. GENERALIDADES	21
1.1 EL PROBLEMA.....	21
1.2. JUSTIFICACIÓN	22
1.3 ALCANCE	23
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 Objetivo general	24
1.4.2 Objetivo específicos	24
1.3. GUÍAS PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS	25
1.3.1 Prince2	25
1.3.2 APM	27
1.3.3 P2M.....	28
1.3.4 PMI.....	29
1.4 GUÍA EMPLEADA	31
1.4.1 PMI ADAPTADA EN UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL BASADA EN LÓGICA DIFUSA	32
2. MARCO TEÓRICO	42
2.1 EL PMBOK® QUINTA EDICIÓN	42
2.2 CICLO DE VIDA DEL PROYECTO	43
2.3 GESTIÓN DE LOS RIESGOS DEL PROYECTO.....	44
2.4 RIESGOS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	46
2.5 LÓGICA DIFUSA.....	49
2.5.1 Teoría de conjuntos difusos	49
2.5.2 La lógica difusa y sus características	61
2.5.3 Métodos de conjuntos difusos para comparación, priorización y evaluación de impacto de los riesgos en proyectos de construcción.....	69

3. HERRAMIENTA FUNDAMENTADA EN LÓGICA DIFUSA PARA LA PLANIFICACIÓN DE GESTIÓN DE RIESGOS EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN SEGÚN LINEAMIENTOS DEL PMI	74
3.1 ¿QUÉ ES UNA HERRAMIENTA FUNDAMENTADA EN LÓGICA DIFUSA?..	74
3.2 IMPORTANCIA DE LAS HERRAMIENTAS FUNDAMENTADAS EN LÓGICA DIFUSA	74
3.3 DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA Y LINEAMIENTOS DEL PMI PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN	75
3.3.1 Plan de gestión de los riesgos.....	75
3.3.2 Identificación de los riesgos	84
3.3.3 Análisis cualitativo de los riesgos	86
3.3.4 Análisis cuantitativo de los riesgos.....	95
3.4 BENEFICIOS DE LAS HERRAMIENTAS FUNDAMENTADAS EN LÓGICA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN.....	103
4. CASO DE ESTUDIO	104
4.1 PLANTEAMIENTO.....	104
4.2 PUESTA EN MARCHA DE LA HERRAMIENTA	109
4.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	115
5. MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA QUE SOPORTA LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS	116
5.1 ¿QUÉ ES UN MANUAL?.....	116
5.2 OBJETIVOS DEL MANUAL	116
5.3 IMPORTANCIA DEL MANUAL.....	117
5.4 CREACIÓN DEL MANUAL “HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA PARA SOPORTE A LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN, SOMETIDA A LAS PAUTAS DE DIRECCIÓN DE PROYECTOS PMI”	118
5.4.1 Introducción.....	118
5.4.2 ¿Para quién va dirigido este manual?	118
5.4.3 Formato y diseño del manual	119

6. CONCLUSIONES	121
7. RECOMENDACIONES	122
BIBLIOGRAFÍA	123
ANEXOS.....	126

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Procedimientos de gestión del riesgo según Prince2	26
Figura 2. Gestión del riesgo bajo la guía P2M	29
Figura 3. Procesos para desarrollar análisis de riesgos	33
Figura 4. Solución a problemática planteada	34
Figura 5. Elementos de un plan de gestión de riesgos	36
Figura 6. Elementos del análisis cualitativo de los riesgos	37
Figura 7. Formato de evaluación de riesgos-comparación de riesgos.....	38
Figura 8. Elementos del análisis cuantitativo de los riesgos	39
Figura 9. Formato de evaluación de riesgos-condición de los riesgos.....	41
Figura 10. Ciclo de vida del proyecto.....	44
Figura 11. Procesos de la Gestión del Riesgo	45
Figura 12. Conjunto difuso " <i>personas altas</i> "	51
Figura 13. Funciones de pertenencia típicas	53
Figura 14. Operaciones básicas entre conjuntos	56
Figura 15. α -niveles y sus elementos.....	57
Figura 16. Números difusos en intervalos difusos	58
Figura 17. Adición de números difusos empleando α - niveles	60
Figura 18. Ejemplo de conjuntos difusos	61
Figura 19. Etiquetas lingüísticas para priorizar los riesgos	79
Figura 20. Etiquetas lingüísticas para variable de estado probabilidad de riesgo..	80
Figura 21. Etiquetas lingüísticas para variable de estado gravedad del riesgo	81
Figura 22. Etiquetas lingüísticas para variable de estado cons. económica	82
Figura 23. Etiquetas lingüísticas para variable de resultado de los riesgos.....	83
Figura 24. Amenazas a controlar en proyectos de construcción.....	87
Figura 25. Oportunidades por aprovechar en proyectos de construcción.....	88
Figura 26. Estructura de desglose del riesgo para proyectos de construcción	89
Figura 27. Inferencia difusa de variables de estado.....	96
Figura 28. Funciones de pertenencia truncadas	99
Figura 29. Magnitud total del riesgo.....	100
Figura 30. Diagrama de Pareto.....	101
Figura 31. Beneficios de la lógica difusa para evaluación de riesgos.....	103
Figura 32. Estructura de desglose del riesgo para el caso de estudio.....	105
Figura 33. Inferencia difusa para variable de entrada probabilidad de riesgo.....	113
Figura 34. Magnitud del riesgo para caso de estudio	115
Figura 35. Portada del manual.....	119
Figura 36. Formato del manual.....	120

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Entregables proyecto de grado	24
Tabla 2. Riesgos en obras de construcción	48
Tabla 3. Grados de pertenencia al conjunto difuso <i>alto</i>	52
Tabla 4. Etiquetas lingüísticas para priorización de los riesgos	78
Tabla 5. Etiquetas lingüísticas para variable de estado probabilidad de riesgo	80
Tabla 6. Etiquetas lingüísticas para variable de estado gravedad del riesgo	80
Tabla 7. Etiquetas lingüísticas para variable de estado consecuencia económica	81
Tabla 8. Etiquetas lingüísticas para variable de resultado de los riesgos	83
Tabla 9. Riesgos en obras de construcción	84
Tabla 10. Tabla 9. (Continuación)	85
Tabla 11. Tabla 9. (Continuación)	86
Tabla 12. Matriz de comparación de riesgos por parte de los expertos	90
Tabla 13. Promedio de las evaluaciones de los expertos- Matriz P	91
Tabla 14. Matriz P antes de la transformación	92
Tabla 15. Matriz P después de la transformación	92
Tabla 16. Riesgos priorizados	94
Tabla 17. Matriz de asociación fuzzy FAM para evaluación de riesgos	97
Tabla 18. Ejemplo de matriz de administración de riesgos	102
Tabla 19. Riesgos definidos en caso de estudio	106
Tabla 20. Variables lingüísticas para comparación de los riesgos del caso de estudio	107
Tabla 21. Tabla de comparaciones de los expertos para el caso de estudio	107
Tabla 22. Priorización de riesgos obtenida mediante método convencional del caso de estudio	108
Tabla 23. Comparación de variables lingüísticas entre modelos	109
Tabla 24. Evaluación de los expertos empleando las variables del modelo actual	110
Tabla 25. Priorización de riesgos obtenida mediante método actual del caso de estudio	111
Tabla 26. Comparación de variables lingüísticas de probabilidad de ocurrencia	112
Tabla 27. Evaluaciones de los expertos de la probabilidad de ocurrencia	112
Tabla 28. Cálculo de la variable de entrada probabilidad del riesgo	113
Tabla 29. Reglas activadas para caso de estudio modelo actual	114

LISTADO DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Manual de procedimiento “HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA PARA SOPORTE A LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN, SOMETIDA A LAS PAUTAS DE DIRECCIÓN DE PROYECTOS PMI”	126
Anexo B. Artículo académico de la herramienta	159
Anexo C.Herramienta computacional	170

GLOSARIO

ACTIVIDAD: Elemento de trabajo, realizado a lo largo del proyecto.

ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS: Es la aplicación de las llamadas “Buenas Prácticas” en dirección de proyectos.

ADMINISTRACIÓN DEL RIESGO: Es la aplicación que logra reducir la repercusión negativa de los riesgos en proyectos.

AMBIGUO: Varias interpretaciones especialmente en lenguaje que resulta confuso.

AMENAZA: Condición que pone en riesgo una situación que se puede volver negativa para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

BUENAS PRÁCTICAS: Son habilidades, técnicas y herramientas, que mediante su aplicación, aumentan las posibilidades de éxito en un proyecto.

DEFUSIFICACIÓN: Procedimiento de cálculo que consiste en encontrar una salida promedio, de las salidas activadas de las reglas difusas que corresponde a la acción o control a tomar.

DOMINIO: Intervalo sobre la cual una función de pertenencia es mapeada.

EDIFICACIÓN: Construcción de albañilería, de forma y materiales heterogéneos.

ENFOQUE FUZZY LINPRERA: Método de relación de preferencias lingüísticas que permite comparar criterios o riesgos mediante etiquetas lingüísticas para al

final mediante operaciones de conjuntos difusos, generar una priorización de estos.

ENTRADA ABRUPTAS: Diferentes valores discretos de la variable del sistema.

ENTREGABLES: Resultados o productos parciales o finales producidos por el proyecto.

ETIQUETAS LINGÜÍSTICAS: Nombre descriptivo usado para identificar una función de pertenencia.

EVENTOS INCIERTOS: Sucesos que no se conoce con seguridad como será su estado en el futuro.

FUNCIÓN DE PERTENENCIA: Define a un conjunto fuzzy mapeando entrada abruptas de su dominio hasta su grado de pertenencia.

GRADO DE PERTENENCIA: Grado al cual una entrada abrupta es compatible con una función de pertenencia.

INCERTIDUMBRE: Falta de seguridad en la decisión o evento.

INFERENCIA DIFUSA: Etapa en que se calcula el grado de pertenencia que podría tener una entrada abrupta a una o varias funciones de pertenencia de una variable de estado.

JUICIO DE EXPERTOS: Evaluación que emiten los expertos en el área sobre alguna condición.

LÓGICA DIFUSA: Es una técnica de la inteligencia computacional que tiene como entradas información con alto grado de imprecisión y que al final se obtiene una conclusión certera.

MAGNITUD TOTAL DEL RIESGO: Salida del sistema difuso que define la condición de riesgo del proyecto para tomar acciones correctivas o mejorativas.

OBRAS CIVILES: El concepto de obra civil se utiliza para designar a aquellas obras que son el resultado de la ingeniería civil y que son desarrolladas para beneficio de la población de una nación porque algunos de los objetivos de las mismas son la organización territorial y el aprovechamiento al máximo del territorio.

OPORTUNIDAD: Acción o evento que trae ventajas si se trabaja sobre este.

PAQUETE DE TRABAJO: Son aquellos entregables de nivel inferior, los cuales se componen de actividades.

PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO: Es el procedimiento de definir los paquetes de trabajo y sus responsables, antes de su realización en el proyecto.

PMBOK: Texto que expone todos los fundamentos sobre dirección de proyectos, del *Project Management Institute*.

PMI: Siglas que hacen referencia al *Project Management Institute*, sociedad sin ánimo de lucro que promueve las “buenas prácticas” en administración de proyecto.

PRIORIZAR RIESGOS: Es la salida del enfoque fuzzy linprera que permite identificar cuales riesgos son de mayor importancia o urgencia por cubrir.

REGLAS DIFUSAS: Son sentencias que describen la acción a ser tomada en respuesta a varias entradas fuzzy.

RIESGO: Es un evento o condición incierta que, de producirse, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos del proyecto, tales como el alcance, el cronograma, el costo y la calidad.

RISK BREAKDOWN STRUCTURE (RBS): Es una representación jerárquica de los riesgos según sus categorías.

SISTEMA DIFUSO: Sistemas que emplean el conocimiento experto para generar una base de conocimiento que dará al sistema la capacidad de tomar decisiones sobre ciertas acciones que se presentan en funcionamiento.

VARIABLE DE CONTROL: Denominada también variable de salida, es la conclusión a la que llega el sistema difuso después de la combinación de las variables de estado ingresadas, representado la acción a tomar según las condiciones de entrada.

VARIABLES DE ESTADO: Denominadas también variables de entrada, representan las condiciones iniciales del escenario a evaluar.

VARIABLE LINGÜÍSTICA: Es una variable cuyos valores son palabras o sentencias que se enmarcan en un lenguaje predeterminado.

RESUMEN

TÍTULO:

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA QUE SOPORTA LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN, SOMETIDA A LAS PAUTAS DE DIRECCIÓN DE PROYECTOS PMI.*

AUTORA:

ANNY PAULINE MÁSMELA FUENTES**

PALABRAS CLAVES:

Lógica difusa, Riesgos en Proyectos de Construcción, Evaluación de Riesgos, Lineamientos del PMI, Lógica Difusa en Toma de Decisiones, Juicio de Expertos.

DESCRIPCIÓN:

Las compañías constructoras desarrollan sus proyectos bajo condiciones de incertidumbre, pues todas sus actividades y elementos están rodeados de situaciones de riesgo, que generan diferentes escenarios inciertos. Los recientes acontecimientos han puesto en alerta a las constructoras y han iniciado la búsqueda de herramientas que les permite evaluar las condiciones en que están desarrollando sus proyectos para tomar las medidas correctivas necesarias.

Como son problemáticas no perfectamente definidas, no es apropiado buscar soluciones con un modelamiento matemático exacto. Además, como es el ser humano el que evalúa estas condiciones, este es el primero que razona empleando inexactitud. La lógica difusa permite incorporar la lógica ambigua de los humanos. Utilizando modelos lingüísticos en lugar de modelos matemáticos, se logra de manera eficiente trabajar con incertezas, ayuda a la transparencia de la problemática y facilita las potenciales modificaciones.

El desarrollo de una herramienta basada en lógica difusa que soporte la planificación de la gestión de riesgos para proyectos de construcción, sometida a las pautas de dirección de proyectos PMI, permite a la compañía evaluar, categorizar, priorizar y tener varios tipos de registro, con el fin de realizar la gestión adecuada de estos, para disminuir el impacto negativo en la ejecución del proyecto.

* Tesis de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.
Director Msc. Jorge Enrique Meneses Florez, Codirector: Msc. Edwin Alberto Garavito Hernández.

ABSTRACT

TÍTULO:

DEVELOPMENT OF A TOOL BASED ON FUZZY LOGIC THAT SUPPORTS PLAN RISK MANAGEMENT FOR CONSTRUCTION PROJECTS, UNDER THE GUIDELINES OF PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE PMI.*

AUTHOR:

ANNY PAULINE MÁSMELA FUENTES**

KEY WORDS:

Fuzzy Logic, Risk in Construction Projects, Risk Assessment, PMI guidelines, Fuzzy Logic in Decision Making, Expert Judgment.

DESCRIPCIÓN:

Construction companies develop their projects under uncertainty conditions, due to their activities and elements are surrounding by risk situations that generate different uncertain settings. Recent events have put on the alert construction companies and they have begun the search of tools that led to evaluate the conditions that are developing their projects in order to take the necessary corrective measures.

As they are problematics that are not perfectly defined, it is not appropriate to look for solutions with an exact mathematic model. Besides, as the human being is who evaluate these conditions, this is the first one who thinks out using inaccuracy. Fuzzy logic allows incorporating human beings' ambiguous logic. Using linguistic models instead of mathematic models, it achieve in an efficient way to work with uncertainness, it helps to the problematic transparency and to facilitate potential modifications.

The development of a tool based on fuzzy logic that support plan risk management for construction projects, under the guidelines of project management institute, allows to company to evaluate, categorize, prioritize and have various register in order to do the appropriate management of them, so decreasing the negative impact in the project execution.

* Work of Degree

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Industrial and Enterprise Studies. Director Msc. Jorge Enrique Meneses Flórez, Codirector: Msc. Edwin Alberto Garavito Hernández.

CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

OBJETIVO	CUMPLIMIENTO
Hacer revisión bibliográfica acerca de las herramientas basadas en lógica difusa para la evaluación de riesgos en proyectos de construcción.	Capítulo N°2, Sección 5.3
Realizar el plan de gestión y la identificación de riesgos en proyectos de construcción.	Capítulo N°3, Sección 3.1 y 3.2
Categorizar y priorizar los riesgos mediante el juicio de expertos y lógica difusa.	Capítulo N°3, Sección 3.3
Elaborar matriz con la evaluación de los riesgos por parte de los expertos utilizando lógica difusa.	Capítulo N°3, Sección 3.3
Determinar la magnitud total del riesgo, por medio de la evaluación realizada por los expertos y el sistema difuso.	Capítulo N°3, Sección 3.4
Evaluar la magnitud total del riesgo para definir si existe la necesidad de revisar los riesgos que afectan en mayor medida la ejecución del proyecto.	Capítulo N°3, Sección 3.4 y Anexo 1
Desarrollar una herramienta computacional, para el soporte de las operaciones de lógica difusa.	Anexo C
Elaborar un soporte documental que muestre paso a paso el procedimiento, para la correcta ejecución de la herramienta.	Anexo A
Validar los resultados de la herramienta computacional y el soporte documental, con un caso de estudio en la literatura	Capítulo 4
Elaborar un artículo de carácter publicable sobre el método creado	Anexo B

INTRODUCCIÓN

La realización de este trabajo de grado se debe a la necesidad de considerar el análisis de riesgos en los proyectos de construcción pues son estos proyectos los que se desarrollan en más condiciones inciertas y en los que una mala gestión en su ejecución puede afectar seriamente la integridad física de todos los usuarios y/o clientes.

La gestión del riesgo, es un proceso que es poco estudiado y analizado por los administradores de proyectos, y es un factor fundamental puesto que de esta gestión depende que se puedan cumplir los objetivos que se plasmen en la definición del alcance del proyecto. Existen estándares internacionales en dirección de proyectos que poseen libros y capítulos completos, para la correcta administración y gestión de los riesgos en diversos tipos de proyectos. Para este caso, la utilización de las pautas de dirección de proyectos del Instituto de Dirección de Proyectos PMI (Project Management Institute por sus siglas en Inglés) son de gran conveniencia porque orienta a los realizadores del proyecto, a la correcta identificación y análisis del riesgo.

Junto con la lógica difusa, se eliminará la barrera que tienen los expertos en el área de emitir juicios empleando valores numéricos. La lógica difusa permitirá emplear el lenguaje natural de los expertos para evaluar los riesgos y así conseguir tres resultados importantes: conocer los riesgos de mayor relevancia, el impacto total a los objetivos del proyecto por la presencia de los distintos riesgos identificados y la creación de acciones según los resultados generados, para el mejoramiento de estas condiciones de riesgo.

1. GENERALIDADES

1.1 EL PROBLEMA

En la actualidad, se han evidenciado diversos desaciertos en el desarrollo de proyectos de construcción de obras civiles y edificaciones en donde se confirma el requerimiento de efectuar una planificación adecuada de todos los elementos involucrados en la realización de este tipo de proyectos.

La evaluación de riesgos es uno de esos estudios que se pasa por alto en la planificación del proyecto debido a que los gerentes de proyecto no tienen la cultura de identificar y analizar los riesgos. Por ser estos eventos inciertos, su evaluación es más compleja porque se requiere de métodos de evaluación para lidiar con el lenguaje ambiguo e impreciso, que los expertos normalmente no manejen con destreza. Los integrantes de diferentes niveles de la estructura organizativa, realizan su evaluación por medio de su lenguaje natural, que es difícil de cuantificar por ser ambiguo e impreciso.

Para realizar la cuantificación de estos valores lingüísticos existe una herramienta llamada lógica difusa, que permite convertir valores lingüísticos en valores numéricos por medio de una asociación entre estas llamada función de pertenencia que tiene que ver con un grado de ambigüedad en la característica de la variable lingüística que se quiere medir, pero no es una probabilidad puesto que toma un dominio de valores para cada etiqueta.

Este proyecto emplea estas dos herramientas, la lógica difusa y los procesos de análisis del riesgo según el PMBOK, para la correcta identificación, cualificación y cuantificación de los riesgos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Las recientes investigaciones realizadas al sector de la industria de la construcción han reflejado que sus empresarios no efectúan un estudio completo de las condiciones en las que se ejecutarán sus proyectos.

En aras de buscar soluciones efectivas para facilitar la evaluación de los eventos inciertos a los que se encuentran expuestos los proyectos de construcción, se ha decidido crear y dar a conocer una herramienta que permita por medio del lenguaje natural que emplea el ser humano, conseguir resultados numéricos que orienten a los realizadores del proyecto a identificar cuáles son los factores de riesgo que impactan en mayor medida la ejecución del proyecto. Por medio de la lógica difusa que utiliza conceptos de pertenencia parecidos a la manera de pensar humana y la guía PMI, los expertos pueden utilizar su lenguaje natural para emitir evaluaciones y efectuar una debida planificación de gestión de riesgos.

La correcta planificación de la gestión de los riesgos ayuda a mejorar las condiciones de realización del proyecto en toda la cadena de desarrollo desde la iniciación hasta los procesos de control. Estos procedimientos proporcionan seguridad en las actividades y contribuyen a la construcción de edificaciones preparadas ante cualquier daño inesperado durante su ciclo de vida para que no afecten factores físicos, sociales, económicos, ambientales entre otros, del área geográfica vinculada con la obra. Así, las compañías se dirigen a perfeccionar sus procesos para presentar al público productos/servicios con atributos que favorecerán el mejoramiento de su calidad de vida.

1.3 ALCANCE

Con el desarrollo de este proyecto se crea un método para ejecutar los procesos de análisis de riesgo para proyectos del sector construcción. El método está compuesto por cada uno de los entregables del proceso vinculados con la gestión de los riesgos, específicamente los relacionados al análisis del riesgo porque del resultado que estos generen se definen las acciones a tomar para reducir o eliminar el riesgo. Estos procesos son: planificar la gestión de los riesgos, identificar los riesgos, realizar el análisis cualitativo de riesgos y realizar el análisis cuantitativo de riesgos.

Se decide incluir el proceso de planificar la gestión del riesgo, porque en este se definen los procedimientos, los roles y responsabilidades y las categorías en las que se pueden clasificar los riesgos que servirán de apoyo para los procesos de análisis del riesgo.

Adicionalmente, este proyecto trae dos elementos importantes. Uno de estos es un soporte documental en donde se describe paso a paso el procedimiento para que se realice de forma apropiada los procesos para la planificación de la gestión de riesgos. El otro elemento es la creación de una herramienta computacional que facilitará el proceso de análisis cuantitativo del riesgo. Para este proceso se empleará una nueva forma de evaluación de riesgos que emplea la lógica difusa que permite trabajar con todo el grado de incertidumbre que puede traer la presencia de un riesgo en la ejecución del proyecto.

La unión de la lógica difusa y los lineamientos del PMI para la gestión del riesgo en proyectos de construcción, contribuirá a que los directores de proyectos de construcción, consideren el estudio de riesgos como uno de los más importantes en la planeación del proyecto. La tabla 1 permite visualizar los resultados que el desarrollo de este proyecto traerá.

Tabla 1. Entregables proyecto de grado

Descripción Elemento PMBOK®	Entregables
Planificar la Gestión del Riesgo	Plan de Gestión del Riesgo
Identificar los Riesgos	Mapa de Riesgos
	Registro de Riesgos
Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos	Estructura de Desglose de Riesgos
	Matriz de Comparación de Riesgos por parte de los Expertos
	Sistema Difuso para Priorizar los Riesgos
	Listado de Riesgos Priorizados
Realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgos	Sistema Difuso para obtener valor de Magnitud de los Riesgos
	Análisis de Riesgos de Mayor Oportunidad o Amenaza
	Matriz de Administración del Riesgo

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta basada en lógica difusa que soporte la planificación de la gestión de riesgos para proyectos de construcción, sometido a las pautas de dirección de proyectos PMI.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hacer revisión bibliográfica acerca de las herramientas basadas en lógica difusa para la evaluación de riesgos en proyectos de construcción.
- Realizar el plan de gestión y la identificación de riesgos en proyectos de construcción.
- Categorizar y priorizar los riesgos mediante el juicio de expertos y lógica difusa.

- Elaborar la matriz con la evaluación de los riesgos por parte de los expertos utilizando lógica difusa.
- Determinar la magnitud total del riesgo, por medio de la evaluación realizada por los expertos y el sistema difuso.
- Evaluar la magnitud total del riesgo para definir si existe la necesidad de revisar los riesgos que afectan en mayor medida la ejecución del proyecto.
- Desarrollar una herramienta computacional, para el soporte de las operaciones de lógica difusa.
- Elaborar un soporte documental que muestre paso a paso el procedimiento, para la correcta ejecución de la herramienta.
- Validar los resultados de la herramienta computacional y el soporte documental, con un caso de estudio en la literatura.

1.5 GUÍAS PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS

1.5.1 Prince2. Es un estándar creado en el Reino Unido, el cual fue creado para brindar los fundamentos en dirección de proyectos, enfocándose a los proyectos de tecnologías de información. Este estándar define riesgo como un evento incierto o una serie de eventos que si ocurren, tendrán un efecto en el logro de los objetivos. En otras palabras, un riesgo es algo que puede ocurrir o no en el futuro, pero que si ocurre tendrá algún impacto (positivo o negativo) en los objetivos del proyecto. El documento de la estrategia de gestión de riesgo de Prince2 contiene las siguientes secciones¹:

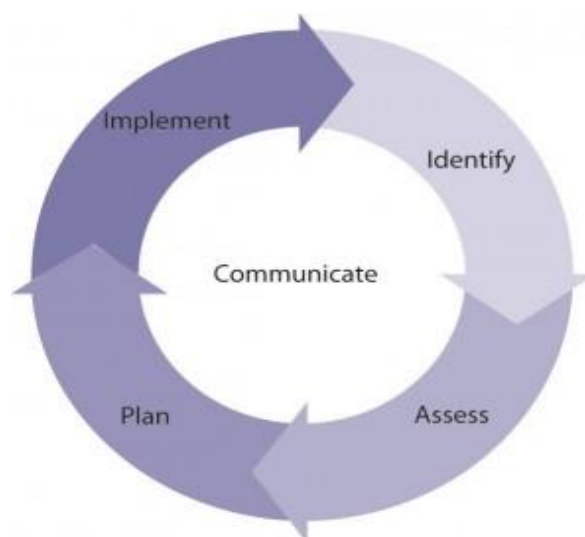
- **Introducción.** Se basa en establecer el propósito, los objetivos, responsabilidades y alcance para la gestión del riesgo dentro de un proyecto en particular.

¹ <http://www.prince2primer.com/risk-management-strategy>

➤ **Procedimiento de gestión de riesgo.** La estrategia de gestión de riesgo trabaja con los siguientes procedimientos en donde cada uno está vinculado directamente con el procedimiento de comunicar:

- **Identificar**
- **Evaluar**
- **Planear**
- **Implementar**

Figura 1. Procedimientos de gestión del riesgo según Prince2



Fuente: <http://www.prince2training-uk.org/>

➤ **Técnicas y herramientas.** Existen diversas técnicas y herramientas empleadas en la estrategia de gestión del riesgo y son ampliamente utilizadas en otros procedimientos. Entre se encuentran la técnica Delphi, Diagramas de Influencia, Diagrama de flujo, Diagrama Ishikawa, Análisis FODA, entre otras.

➤ **Registros.** Describe la forma en que se registrarán los riesgos.

➤ **Reportes.** Se basa en documentar las acciones e indicadores de gestión del riesgo.

- **Calendario de las actividades de gestión de riesgo.** En este punto se definen las actividades y los tiempos en cada uno de las etapas del proyecto para controlar la evolución del riesgo.
- **Roles y responsabilidades.** Se definen los involucrados y sus responsabilidades en la gestión del riesgo.
- **Escalas.** Se especifican las características a evaluar a cada riesgo con sus dimensiones.
- **Proximidad.** Describe que tan pronto puede ocurrir un riesgo. Puede establecer en términos de días, semanas o meses o en una etapa del proyecto en específico.
- **Categorías de los riesgos.** Las categorías de los riesgos difieren del tipo del proyecto. Pero es importante definirlas de tal manera que se puedan identificar de forma rápida los responsables y se generen reportes que tengan distintos elementos en común.
- **Indicadores de alerta temprana.** El establecimiento de indicadores permite medir el impacto de los riesgos y así crear las acciones de mejora para reducir su impacto.
- **Tolerancia al riesgo.** Representa el punto en donde una situación de riesgo debe dejarse avanzar al siguiente nivel. Es decir define los límites en que un riesgo es aceptable y permite la ejecución del proyecto sin inconvenientes.
- **Presupuesto para el riesgo.** Provee los fondos para las acciones de gestión y de respuesta ante la presencia de riesgos en el proyecto.

1.5.2 APM. La *Association of Project Management* (APM) tiene la guía *Project Risk Analysis and Management* (PRAM) en donde divide la gestión del riesgo en dos secciones:

- **Análisis de Riesgo.** Esta sección se compone de dos tipos de análisis que son el cualitativo en donde se identifican los riesgos y se describen para conocer la influencia en los objetivos del proyecto y el análisis cuantitativo que mide la

incertidumbre en costos y tiempos además que se efectúa una combinación probabilística de las incertidumbres individuales.

➤ **Gestión del Riesgo.** El propósito de la gestión del riesgo es identificar medidas preventivas para evitar un riesgo o reducirlo, establecer planes de contingencia, iniciar investigaciones para reducir la incertidumbre a través de mejor información, asignar el riesgo a los responsables, entre otras actividades de gestión.

1.5.3 P2M. Este estándar, a pesar de ser un estándar de gestión de proyectos, va dirigido a las empresas porque describe que los proyectos deben ser orientados a la generación de valor a las empresas y deben estar alineados con el cumplimiento de la misión de la organización, apoyado en un programa mediante la aplicación de estrategias. La gestión del riesgo la divide en tres bloques importantes:

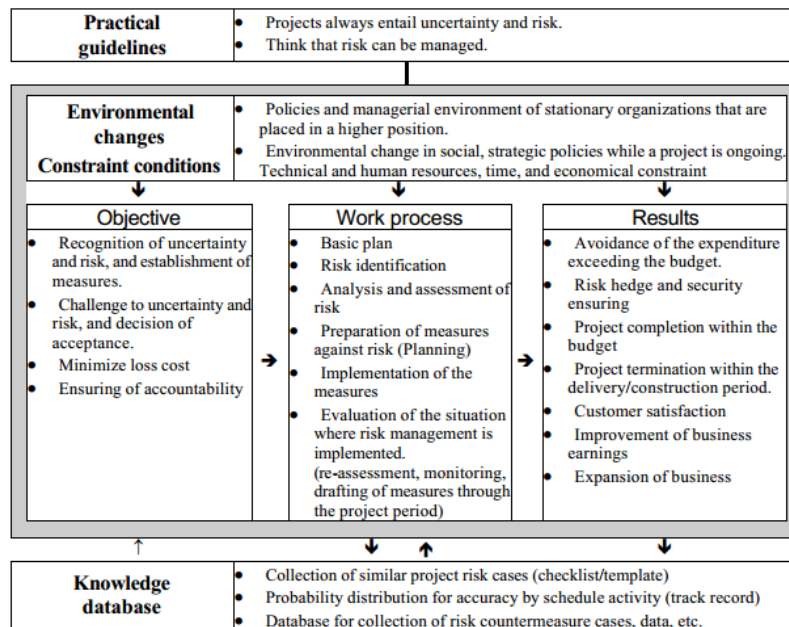
➤ **Objetivos.** Se definen los logros que se alcanzarán al aplicar el debido proceso de gestión del riesgo.

➤ **Proceso de Trabajo.** Identifica y evalúa los riesgos para luego preparar e implementar las medidas contra el riesgo.

➤ **Resultados.** Se consigan las mejoras que le genera a la empresa el aplicar la debida gestión de riesgos.

Al final de estas etapas se documenta el proceso que se llevó a cabo en cada proyecto para así crear una base de conocimiento que servirá de apoyo para proyectos posteriores. En la figura 2 se muestra la gestión del riesgo para P2M.

Figura 2. Gestión del riesgo bajo la guía P2M



Fuente: <http://www.pmaj.or.jp/>

1.5.4 PMI. La guía del PMI es la más utilizada a nivel mundial. El *Project Management Institute* (PMI) es una sociedad sin ánimo de lucro que reúne a los líderes en gestión de proyectos y crea guías para promover la práctica, la ciencia y la formación en gerenciamiento de proyecto. El PMI en su Project Management Body of Knowledge (PMBOK) establece cinco categorías llamadas Grupos de Procesos. Estos son²:

- **Grupo de Procesos de Inicio.** Procesos realizados para definir un nuevo proyecto, mediante la autorización formal para comenzarlo.
- **Grupo de Procesos de Planificación.** Procesos en donde se define la línea de acción requerida para alcanzar los objetivos establecidos y refinados. En este grupo se lleva a cabo el plan para la dirección del proyecto que explora todos

²PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos PMBOK Quinta edición. EE.UU: PMI Publication. 2013. 52 p

los aspectos de alcance, tiempo, costo, calidad, comunicaciones, recursos humanos, riesgos, adquisiciones y participación de los interesados.

- **Grupo de Procesos de Ejecución.** Procesos que llevan a la realización de los trabajos definidos en el plan para la dirección del proyecto. Esto implica coordinar personas y recursos, expectativas de los interesados y efectuar las actividades del proyecto conforme al plan para la dirección del proyecto.
- **Grupo de Procesos de Monitoreo y Control.** Procesos para seguir, analizar y dirigir el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y efectuarlos lo más pronto posible.
- **Grupo de Procesos de Cierre.** Procesos involucrados en la finalización de todas las actividades a través de todos los Grupos de Procesos de la Dirección de Proyectos, para completar el proyecto formalmente.

Además, la dirección de proyectos organiza sus 47 procesos en 10 áreas de conocimiento, una de ellas la Gestión de Riesgos³.

- **Gestión de la Integración del Proyecto:** describe los procesos y actividades que se necesitan para identificar, definir, combinar, unificar y coordinar los diferentes procesos y actividades de dirección del proyecto dentro de los Grupos de Procesos de la Dirección de Proyectos.
- **Gestión del Alcance del Proyecto:** proporciona los procesos para que el trabajo requerido contribuya al éxito del proyecto. Este punto se enfoca principalmente en definir y controlar qué se incluye y qué no se incluye en el proyecto.
- **Gestión del Tiempo del Proyecto:** define los procesos para lograr la terminación del proyecto, mediante la programación de las actividades, no solo en tiempo sino en recursos.
- **Gestión de los Costos del Proyecto:** describe los procesos de alistamiento de los recursos, es decir, planificar, estimar, presupuestar, financiar,

³ Ibíd.. p. 60

conseguir financiación y controlar los costos que requerirán las actividades del proyecto.

➤ **Gestión de la Calidad del Proyecto:** establece los procesos y actividades para que el proyecto satisfaga las necesidades que llevaron a la creación de este. Las actividades, creadas bajo unas políticas de calidad, objetivos y responsabilidades de calidad para que el proyecto cumpla con su propósito.

➤ **Gestión de los Recursos Humanos del Proyecto:** procesos en donde se organizan las personas que estarán involucradas en la ejecución del proyecto. Se asignan responsabilidades, según las habilidades, para que cumplan con mayor precisión el objetivo de cada actividad.

➤ **Gestión de las Comunicaciones del Proyecto:** procesos que aseguran que la información sea recopilada, creada, distribuida, almacenada, gestionada, controlada y entregada al final del proyecto de forma oportuna y adecuada.

➤ **Gestión de los Riesgos del Proyecto:** genera los procesos para efectuar la planificación de la gestión de riesgos, así como identificarlos, analizarlos, planificar la respuesta y controlarlos.

➤ **Gestión de las Adquisiciones del Proyecto:** involucra los procesos para comprar o adquirir productos, servicios o resultados que se necesiten que no se encuentran en el equipo del proyecto. Incluye la gestión del contrato, y control de cambios requeridos para desarrollar y administrar contratos u órdenes de compra emitidos por integrantes del proyecto.

➤ **Gestión de los Interesados del Proyecto:** procesos para analizar las expectativas de las personas, grupos u organizaciones y el impacto de su participación, para así desarrollar estrategias de gestión adecuadas a fin de lograr la contribución exitosa de todas las partes.

1.6 GUÍA EMPLEADA

Como se refleja en el numeral anterior, existen diversas opciones para satisfacer la necesidad de realizar un estándar para la planificación de la gestión del riesgo

para proyectos de construcción. Para este proyecto de grado se optó por utilizar los lineamientos del PMI puesto que el capítulo dedicado a la gestión de riesgos, es práctico de manejar, muestra resultados de forma efectiva y permite aplicarse en diferentes etapas del proyecto. La aceptación de los fundamentos del PMI en el país se debe a los casos de éxito de los proyectos ejecutados con estos lineamientos y por eso es ideal para aplicarlo a la gestión de riesgos en el sector construcción. En este caso se empleará la metodología de gestión de riesgos que se emplea en la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos.

1.6.1 GUÍA PMI ADAPTADA EN UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL BASADA EN LÓGICA DIFUSA. El PMI crea una estándar especial llamado Practice Standard for Project Risk Management, basada en su Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos en donde explica la forma ideal para la Gestión de los Riesgos. Esta guía es práctica de utilizar pues sus procesos están bien definidos y ordenados de tal forma que se efectúe una gestión de riesgos adecuada.

La guía PMI se divide en seis procesos, que cumplen con dos objetivos importantes. Uno de ellos va dirigido al análisis del riesgo y el otro al manejo del riesgo. Este proyecto está enfocado en los procesos de Análisis del Riesgo que se muestran en la figura 3, pues se desarrolla una herramienta computacional que facilita el proceso de evaluación de riesgos para proyectos de construcción. Esta herramienta emplea la lógica difusa que permite representar expresiones lingüísticas que el ser humano emplea para emitir juicios. En la figura 4 se muestra el esquema de la problemática planteada y la solución conseguida con el desarrollo de este proyecto.

El análisis de riesgos compuesto por cada uno de los procesos que buscan y evalúan los riesgos que pueden presentarse en el desarrollo del proyecto tiene como propósito generar un resultado que dimensione y oriente a los directores del

proyecto sobre las condiciones en que su proyecto se encuentre y así tomar las acciones necesarias para reducir estas condiciones de riesgo.

Figura 3. Procesos para desarrollar análisis de riesgos



Fuente: Adaptado de Practice Standard for Project Risk Management

Figura 4. Solución a problemática planteada



➤ **Plan de gestión de los riesgos.** En esta parte se relacionan los elementos que harán parte del tratamiento de los riesgos que se identifiquen. Se definen los expertos que evaluarán las condiciones de riesgo, las categorías de riesgos, los criterios de evaluación y los métodos de evaluación que se le aplicarán a los riesgos. Para el caso de la **definición de los expertos** que evaluarán los riesgos, se deben considerar diversos integrantes en el desarrollo del proyecto de diferentes disciplinas involucradas en la obra, para asegurar juicios completamente objetivos, eliminando al máximo el sesgo por desconocer un área en específico a evaluar.

Las categorías de los riesgos dependen del tipo de obra a desarrollar, pero todas ellas tienen ciertos grupos en común según diversos estudios realizados sobre clasificación de riesgos en proyectos de construcción que son los considerados en este proyecto. **Los criterios de evaluación** son las características que describen las condiciones de los riesgos que se identifiquen y que se emplearán para el análisis cualitativo y cuantitativo de los riesgos. **Los métodos de evaluación** son las técnicas que emplea la herramienta computacional para priorizar y calcular la magnitud total del riesgo que son el enfoque de relaciones de preferencias lingüísticas difusas y una adaptación del sistema difuso tipo mamdani. En este punto solo se hace una introducción a estas técnicas, pues su descripción detallada se encuentra en el análisis cualitativo y cuantitativo del riesgo respectivamente.

Figura 5. Elementos de un plan de gestión de riesgos



Fuente: Adaptado de Practice Standard for Project Risk Management

- **Identificación de los Riesgos.** Es el proceso que busca las condiciones de riesgo a las que está expuesto el proyecto y las documenta con sus características para que se evalúen y establezca su impacto en los objetivos del proyecto. La identificación de riesgos efectuada en este proyecto, es basada en diferentes investigaciones realizadas de clasificación y caracterización de los riesgos que se presentan en la planeación y desarrollo de proyectos de construcción
- **Análisis Cualitativo de los Riesgo.** Es el proceso de organizar los riesgos por categorías, priorizarlos y definir las variables que se le evaluarán para posteriormente conocer el impacto de dichos riesgos. Los riesgos identificados en el proceso anterior son sometidos a una evaluación cualitativa del grado de importancia de un riesgo con respecto al otro. Esto empleando las siguientes


etiquetas lingüísticas: Absolutamente importante (AB), Muy fuertemente importante (VS), Esencialmente importante (ES), Débilmente importante (WK), Igualmente importante (EQ), Débilmente no importante (WN), Esencialmente no importante (EN), Muy fuertemente no importante (VN), Absolutamente no importante (AN). Con estas valoraciones, el experto escoge una de estas y emite su juicio con respecto al riesgo y por medio de un modelo de priorización de elementos difusos llamado enfoque fuzzy Linprera, se logra la priorización de las categorías y de los riesgos y así conocer cuáles son los riesgos que deben ser atendidos con mayor urgencia. Para la recopilación de las evaluaciones de los expertos se emplea el formato ilustrado en la figura 7 que facilitará al encargado de manejar la herramienta computacional denominada “*Módulo de evaluación de riesgos*” la introducción de estos valores en la sección “*Evaluación Riesgos/Categorías*”.

Figura 6. Elementos del análisis cualitativo de los riesgos



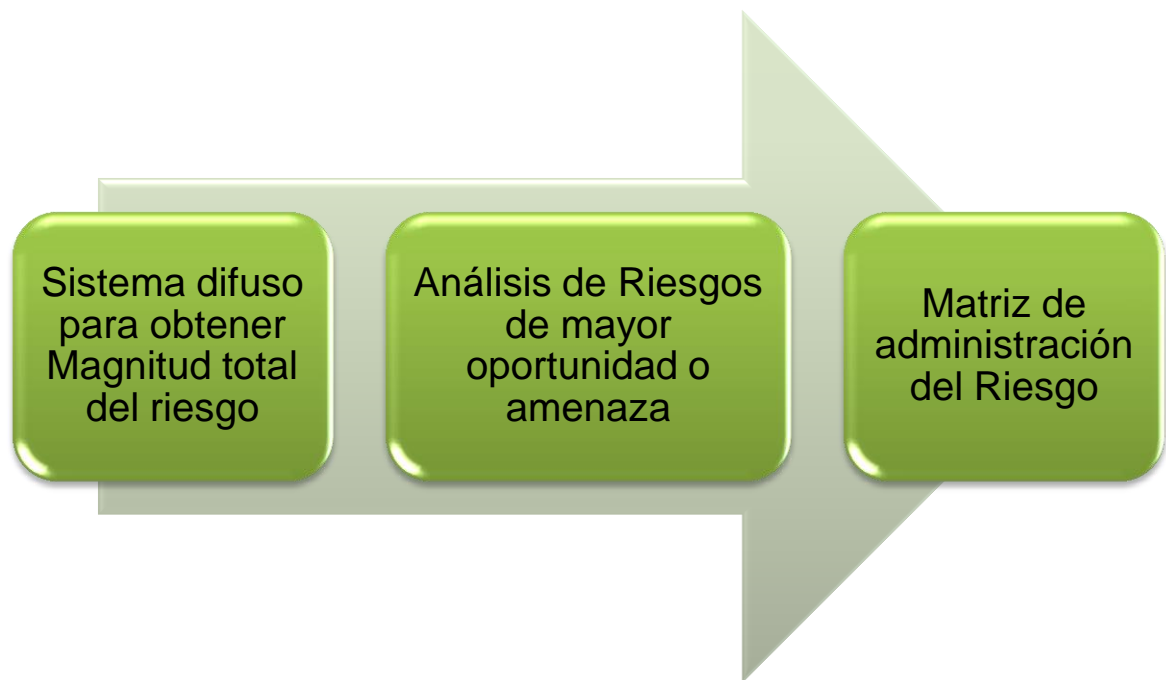
Fuente: Adaptado de Practice Standard for Project Risk Management

Figura 7. Formato de evaluación de riesgos-comparación de riesgos

 CONSTRUCTORA N NOMBRE DEL PROYECTO FORMATO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS 					
COMPARACIÓN DE CATEGORÍAS DE RIESGO					
Evalúe con las siguientes abreviaciones el grado de importancia entre categorías					
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación		
Absolutamente importante	AB	Débilmente no importante	WN		
Muy fuertemente importante	VS	Esencialmente no importante	EN		
Esencialmente importante	ES	Muy fuertemente no importante	VN		
Débilmente importante	WK	Absolutamente no importante	AN		
Igualmente importante	EQ				
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
Evaluación					
	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Categoría 6
COMPARACIÓN DE RIESGOS POR CATEGORÍAS					
Evalúe con las siguientes abreviaciones el grado de importancia entre riesgos por categoría					
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación		
Absolutamente importante	AB	Débilmente no importante	WN		
Muy fuertemente importante	VS	Esencialmente no importante	EN		
Esencialmente importante	ES	Muy fuertemente no importante	VN		
Débilmente importante	WK	Absolutamente no importante	AN		
Igualmente importante	EQ				
Categoría 1					
	Riesgo 11	Riesgo 12	Riesgo 13	Riesgo 14	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 12	Riesgo 13	Riesgo 14	Riesgo 15	
Categoría 2					
	Riesgo 21	Riesgo 22	Riesgo 23	Riesgo 24	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 22	Riesgo 23	Riesgo 24	Riesgo 25	
Categoría 3					
	Riesgo 31	Riesgo 32	Riesgo 33	Riesgo 34	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 32	Riesgo 33	Riesgo 34	Riesgo 35	
Categoría 4					
	Riesgo 41	Riesgo 42	Riesgo 43	Riesgo 44	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 42	Riesgo 43	Riesgo 44	Riesgo 45	
Categoría 5					
	Riesgo 51	Riesgo 52	Riesgo 53	Riesgo 54	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 52	Riesgo 53	Riesgo 54	Riesgo 55	
Categoría 6					
	Riesgo 61	Riesgo 62	Riesgo 63	Riesgo 64	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 62	Riesgo 63	Riesgo 64	Riesgo 65	

➤ **Análisis Cuantitativo de los Riesgos.** Es el proceso de analizar numéricamente el efecto de los riesgos identificados sobre los objetivos del proyecto. El beneficio clave de este proceso es que por medio de un resultado total generado, se definen acciones para reducir la incertidumbre del proyecto. Para hacer este análisis, se emplea un sistema difuso tipo mamdani, que está compuesto por tres variables de entrada que son la probabilidad de riesgo, la gravedad del riesgo y la consecuencia económica que representarán las condiciones de los riesgos identificados, una base de conocimiento que relaciona las tres variables de entrada para generar una salida que representará Magnitud Total del riesgo.

Figura 8. Elementos del análisis cuantitativo de los riesgos





Fuente: Adaptado de Practice Standard for Project Risk Management

Los expertos tienen 5 etiquetas lingüísticas para evaluar estas variables de entrada y son: Para la probabilidad y gravedad del riesgo se denominan Muy bajo (VL), Bajo (L), Medio (M), Alto (H), Muy alto (VH). Para la consecuencia económica se denominan Marginal (VL), Importante (L), Severo (M), Grave (H), Catastrófica (VH). La priorización conseguida en el análisis cualitativo del riesgo se tiene en cuenta para calcular la Magnitud total del riesgo pues a cada evaluación del riesgo se le asocia el impacto que genera en el desarrollo del proyecto utilizando el peso calculado. La Magnitud del riesgo representa el estado del proyecto según los riesgos y sus condiciones. Para consignar las evaluaciones de los expertos con respecto a las tres variables de entrada mencionadas, se emplea el formato ilustrado en la figura 9 y se introducen en el Módulo de evaluación de riesgos en la sección “*Evaluación CE/RL/RS*”.

De esta manera se logra tener dos perspectivas del riesgo; una perspectiva individual para trabajar en aquellos riesgos que son de mayor atención y otra grupal que refleja la condición del proyecto para dirigir los esfuerzos en el mejoramiento del estado del proyecto.

Figura 9. Formato de evaluación de riesgos-condición de los riesgos

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: left;">  </div> <div style="text-align: center;"> CONSTRUCTORA N NOMBRE DEL PROYECTO FORMATO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS </div> <div style="text-align: right;">  </div> </div>				
CONDICIÓN DE LOS RIESGOS				
Evalúe con las siguientes abreviaciones el estado de los riesgos según la característica definida				
PROBABILIDAD DE RIESGO (RL)				
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación	
Muy bajo(Muy poco probable)	VL	Alto(Muy probable que ocurra)	H	
Bajo(Poco probable)	L	Muy alto(Ocurrencia inevitable)	VH	
Medio(Probable que ocurra)	M			
GRAVEDAD DEL RIESGO (RS)				
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación	
Muy bajo(0-5 días de retraso)	VL	Alto(3-5 semanas de retraso)	H	
Bajo(6-12 días de retraso)	L	Muy alto(Más de 5 semanas de retraso)	VH	
Medio(13-21 días de retraso)	M			
CONSECUENCIA ECONÓMICA (EC)				
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación	
Marginal(<US\$10.000)	VL	Grave(US\$1millon-10millon)	H	
Importante(US\$10.000-100.000)	L	Catastrófica(>US\$10millon)	VH	
Severo(US\$100.000-1 millon)	M			
		RL	RS	EC
Categoría 1	Riesgo 1			
	Riesgo 2			
	Riesgo 3			
	Riesgo 4			
	Riesgo 5			
Categoría 2	Riesgo 6			
	Riesgo 7			
	Riesgo 8			
	Riesgo 9			
	Riesgo 10			
Categoría 3	Riesgo 11			
	Riesgo 12			
	Riesgo 13			
	Riesgo 14			
	Riesgo 15			
Categoría 4	Riesgo 16			
	Riesgo 17			
	Riesgo 18			
	Riesgo 19			
	Riesgo 20			
Categoría 5	Riesgo 21			
	Riesgo 22			
	Riesgo 23			
	Riesgo 24			
	Riesgo 25			
Categoría 6	Riesgo 26			
	Riesgo 27			
	Riesgo 28			
	Riesgo 29			
	Riesgo 30			

2. MARCO TEÓRICO

2.1 EL PMBOK® QUINTA EDICIÓN

El Project Management Body of Knowledge (PMBOK) es la guía creada por el Project Management Institute PMI, en donde se encuentran los principios de conocimiento implicados en el ámbito profesional de la administración de proyectos.

El objetivo principal del PMBOK es identificar, converger y transmitir las prácticas idóneas, que por lo común son admitidas en la Dirección de Proyectos. *Por lo común* ha referencia a que los conocimientos y prácticas mencionadas pueden aplicarse a la mayor proporción de los proyectos, en la mayoría de los casos y que se tiene consentimiento de lo útil y valioso que son. *Prácticas más idóneas* quiere decir que mediante el adecuado uso de estas prácticas, herramientas y técnicas se incrementan las probabilidades de triunfar en la realización de un amplio espectro de proyectos⁴.

La versión quinta del PMBOK difiere de la cuarta en los siguientes aspectos⁵:

- El plan de gestión del proyecto se convierte en el plan principal, siendo los demás subsidiarios de él.
- Con pocas excepciones, cada Proceso de Planificación tiene por salida un plan y ocho de las diez áreas del conocimiento terminan con un proceso de cierre.
- Se crea una nueva área de conocimiento y es la de gestión de los interesados.

⁴ RIEBELING, Claudia. En: Investigación Project Management Institute: México: Universidad Autónoma de México. 2009. Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:byZqSGxjw6EJ:rigel.fca.unam.mx/~li406081049/gestion_de_la_informacion/PMBOK.doc+resumen+pmbok+en+espa%C3%B1ol&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=co

⁵ PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos PMBOK Quinta edición. EE.UU: PMI Publication. 2013. 463 p.

- En la gestión del alcance se agrega un proceso de planificación de la gestión del cronograma, previo a definir actividades.
- En la gestión del costo se agrega un proceso de planificación de la gestión de los costos, previo a estimar los costos.

2.2 CICLO DE VIDA DEL PROYECTO⁶

El ciclo de vida de un proyecto es la serie de fases por las que atraviesa un proyecto desde su inicio hasta su cierre. Estas fases son generalmente acotadas en el tiempo, con un inicio y un final o punto de control. Los proyectos varían en tamaño y complejidad pero pueden configurarse dentro de la estructura genérica ilustrada en la figura 10 que se encuentra dividida en 4 etapas:

- **Inicio del proyecto.** En esta etapa se realizan todos los procesos para emitir el Acta de Constitución del proyecto que es el documento en donde se formaliza la existencia de un proyecto. En esta se describe el propósito, los objetivos, los supuestos y restricciones, los roles y responsabilidades, el resumen del presupuesto, entre otra información importante que explique el proyecto.
- **Organización y Preparación.** Las bases para la realización del proyecto son definidas en esta etapa con la creación de los planes para la dirección del proyecto. Es decir, en este punto se desarrollan el plan de gestión del tiempo, de los costos, calidad, recursos humanos, riesgos, entre otros.
- **Ejecución del Trabajo.** En este punto se ponen en marcha las actividades para generar el producto/servicio por el cual el proyecto fue creado. Estas actividades son desarrolladas según lo establecidos en los planes. Esta etapa culmina con la aceptación de los entregables definidos en el acta de constitución del proyecto.

⁶ Ibíd p. 38

- **Cierre del Proyecto.** Los directores del proyecto, documentan el modo en que se llevó a cabo el proyecto, con descripción detallada, para que sea parte de la base de datos de la compañía.

Figura 10. Ciclo de vida del proyecto



Fuente: PMBOK® quinta edición

2.3 GESTIÓN DE LOS RIESGOS DEL PROYECTO⁷

La Gestión de los Riesgos del Proyecto incluye los procesos para llevar a cabo la planificación de la gestión de riesgos, así como la identificación, análisis, planificación de respuesta y control de los riesgos de un proyecto. Los objetivos de la gestión de los riesgos del proyecto consisten en aumentar la probabilidad y el impacto de los eventos positivos, y disminuir la probabilidad y el impacto de los eventos negativos en el proyecto.

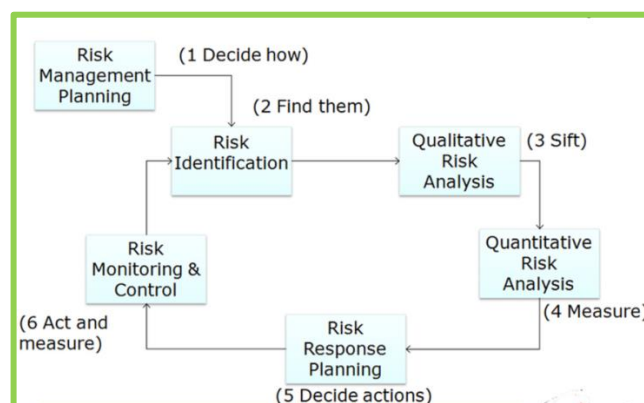
La gestión de los riesgos del proyecto está compuesta por seis procesos según el PMBOK® ilustrados en la figura 11:

⁷ Ibíd., p. 309

Planificar la Gestión de los Riesgos en donde se definen los expertos, las categorías de riesgos, los criterios de evaluación y demás elementos para el análisis de riesgos.

- **Identificar los Riesgos** que es el proceso que ayuda al conocimiento y documentación de los riesgos que pueden afectar el proyecto y sus características.
- **Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos** en donde se considera la probabilidad de ocurrencia e impacto de los riesgos, y se genera la priorización de riesgos para posterior análisis o acción.
- **Realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgos** cuyo objetivo es la realización de un procedimiento numérico de donde se efectúa un análisis del efecto de los riesgos identificados a los objetivos del proyecto.
- **Planificar la Respuesta a los Riesgos** que es el proceso para crear actividades para aprovechar las oportunidades y disminuir las amenazas encontradas en los procesos anteriores.
- **Controlar los Riesgos** que es el proceso de implementar las acciones creadas en la respuesta a los riesgos, dar seguimiento, monitorearlas, identificar nuevos y evaluar qué tan efectivas fueron las acciones creadas, ya sea para seguir aplicándolas o generar nuevas.

Figura 11. Procesos de la Gestión del Riesgo



Fuente: Adaptado de Practice Standard for Project Risk Management

2.4 RIESGOS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

La industria de la construcción, por las características de sus obras, a diario se enfrenta con una gran cantidad de riesgos. Estos se desenvuelven con un grado de incertidumbre considerable debido a que es complicado controlar todas las variables tanto externas como internas que afectan la realización de la obra. Considerando como proyectos de esta industria a las nuevas construcciones, las renovaciones y demoliciones de obras residenciales y no residenciales, proyectos públicos como carreteras, puentes, túneles, presas y canalizaciones subterráneas.

En los proyectos de construcción intervienen distintas partes con intereses específicos⁸:

- **El Promotor:** persona física o jurídica, pública o privada, al que interesa la realización de una obra, aportando los recursos económicos para su realización y que percibirá los beneficios de la misma.
- **El Projectista:** persona física con titulación técnica precisa en Arquitectura o Ingeniería que elabora por cuenta del promotor el documento del proyecto, que contiene las instrucciones y los recursos para la realización de la obra además que con su firma se hace personalmente responsable de la adecuación del proyecto.
- **El Contratista:** persona física que se compromete con el promotor a cambio de un precio y unas condiciones previamente pactadas a ejecutar la obra en su totalidad o la parte designada.
- **La Dirección Facultativa:** persona física con la titulación técnica y la habilitación profesional adecuada para llevar a cabo la supervisión dirección técnica de la obra.

⁸ SEGUROS MAPFRE. Manual sobre riesgos en la construcción, daños a la obra y pérdida a la obra y pérdida de beneficios anticipada (ALOP). Disponible en: <http://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/mapfrere/fichero/es/Manual-Riesgos-Construccion-ALOP.pdf>

➤ **El Responsable en Materia de Seguridad y Salud Ocupacional:** persona física competente designada por el promotor para coordinar, durante la fase del proyecto de la obra, la aplicación de los principios de la acción preventiva, al tomar decisiones constructivas, técnicas y de organización con el fin de planificar los distintos trabajos o fases de trabajo.

➤ **La Administración Pública:** niveles administrativos que pueden estar presentes, directa o indirectamente en el desarrollo de una obra civil de acuerdo con sus respectivos ámbitos de competencia: estatal, autonómico o local.

Estos involucrados, participan en las distintas etapas del proyecto de construcción desde que existe la necesidad por cubrir hasta el cierre. Estas etapas en proyectos de construcción son las siguientes:

➤ **Planificación:** en esta etapa se realizan todos estudios de viabilidad, los objetivos a alcanzar según una necesidad identificada y se documentan las características y especificaciones técnicas de la obra.

➤ **Licitación de las obras:** etapa en la que las empresas presentan sus propuestas en donde se compromete a iniciar y ejecutar las obras según las especificaciones establecidas, en el tiempo y presupuesto determinado.

➤ **Adjudicación del Contrato de Obras:** El promotor evalúa las ofertas y adjudicará el contrato de obras al licitador con mejor oferta considerando como mejor oferta aquella que tenga las garantías técnicas y financieras, estudios medioambientales adecuados, con certificados de calidad actualizados, mayor experiencia y presupuesto ideal.

➤ **Construcción:** etapa en la que se inicia con la preparación del terreno para realizar las actividades de levantamiento de la obra.

➤ **Recepción de la Obra y el Periodo de Mantenimiento:** etapa en donde la dirección del proyecto certifica que la obra está conforme al contrato. También se establece el denominado periodo de mantenimiento, en donde el contratista está obligado a realizar correcciones o reparaciones en este periodo.

En medio de todos estos procesos se encuentran todos los riesgos a los que se encuentran expuestas las obras civiles y edificaciones. A pesar de ser estructuras diferentes la forma de ejecución es muy parecida. Los riesgos identificados como potenciales en obras de construcción se enlistan en la tabla 2.

Tabla 2. Riesgos en obras de construcción

Alcance del proyecto mal definido	Deslizamiento de Tierra	Tasas de cambio de divisas
Demora en otorgamiento de licencias	Contaminación ambiental	Tasas de Interés
Programación del tiempo no realista	No señalización de peligros en la obra	Quiebra suspensión de pagos contratista
Planeación errónea de los costos y el presupuesto	Trabajadores con elementos de seguridad inadecuados	Cambio precios de recursos
Personal de gestión inexperto	Estructuras y equipos de elevación en mal estado	Mala selección de los proveedores
Estrategia de contratación incorrecta	Maquinaria inadecuada	Materiales y materias primas comprados de calidad baja
Diseños de Ingeniería no son realistas	Herramientas de trabajo en estado de deterioro	Disponibilidad baja de Materias Primas y herramientas
Estudios de Cargas mal realizados	Alto nivel de accidentalidad	Subestimación de cantidades
Mala Calidad del Concreto/Asfalto	Protestas	Retrasos en el suministro de materiales y materias primas
Mampostería mal realizada	Vandalismo	Transporte de Carga inadecuado
Estructuras metálicas inestables	Sabotaje	Baja Productividad
Estudios geotécnicos mal realizados	Terrorismo	Personal de la obra inexperto
Tormentas	Robo	Paquetes de trabajo mal definidos
Inundaciones	Corrupción	Mala programación de las actividades de paquetes de trabajo
Terremotos	No Disponibilidad de fondos	Subestimación de horas hombres para las actividades
Filtro de Aguas Subterráneas	Inflación	Baja calidad en los procesos y actividades

2.5 LÓGICA DIFUSA.

2.5.1 TEORÍA DE CONJUNTOS DIFUSOS⁹

La teoría de conjuntos difusos se introduce como un mecanismo para representar la vaguedad e imprecisión de los conceptos empleados en el lenguaje natural. Los conjuntos difusos son definidos como una extensión de los conjuntos clásicos, capaces de modelar la imprecisión propia de los conceptos humanos. Este concepto aparece en los años 60 en el trabajo de L. Zadeh¹⁰ y posteriormente se ha venido ampliando su análisis y rango de aplicaciones.

➤ **CONJUNTOS CLÁSICOS.** En la teoría de conjuntos clásicos, un *conjunto* es cualquier colección de objetos definidos y distintos que son concebidos como un todo. Los objetos que son incluidos en un conjunto son llamados *miembros*. Se requiere definir para cualquier conjunto y cualquier objeto dado, si el objeto es o no miembro del conjunto. Si el objeto x es un miembro del conjunto A , se escribe $x \in A$; de lo contrario, se escribe $x \notin A$.

En cada aplicación particular de la teoría de conjuntos clásicos, todos los objetos relevantes de la aplicación constituyen un conjunto llamado *universo*. Dado un universo U , una forma común de definir un conjunto clásico A que contiene algunos de los objetos de U es asignando el número 1 a cada miembro de U que también es miembro de A y asignando el número 0 a los demás miembros de U . Esta valoración o asignación se llama *función característica* de A . Cuando cada conjunto A es únicamente determinado por su función característica, el mismo símbolo puede ser convencionalmente usado para los dos; para el conjunto y la función característica. Esto es, la función característica especificada para cada $x \in U$ por la asignación

⁹ BONISSONE, Piero. RUSPINI, Enrique. PEDRYCZ, Witold. Handbook of fuzzy computation

¹⁰ L. Zadeh, Fuzzy sets. Information and Control 8, (1965), p. 338-353

$$A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

que define un conjunto A en particular. Es importante describir que el número 1 y 0 son empleados aquí solamente como símbolos convencionales y no tienen significado numérico.

Un conjunto también puede ser definido como una lista de sus miembros (método de lista) o especificando las propiedades que los miembros poseen (método de la regla). Sin embargo, el método de lista solo puede ser usado para conjuntos finitos. El conjunto A cuyos miembros son a_1, a_2, \dots, a_n usualmente es escrito como

$$A = \{a_1, \dots, a_n\},$$

y el conjunto B consiste de objetos (de un universo dado) que posee propiedades P_1, \dots, P_n es usualmente escrito como

$$B = \{b \mid P_1, \dots, P_n\},$$

en donde el símbolo \mid denota la frase “tal que”.

➤ **CONJUNTOS DIFUSOS.** Sea U un conjunto no vacío. Un conjunto dado A (o subconjunto difuso de A) es dado por una función $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$, donde $\mu_A(x)$ representa el grado de pertenencia del elemento x al conjunto difuso A . Los conjuntos difusos difieren de los conjuntos clásicos por rechazar el requerimiento de que cada objeto debe ser un miembro o no del conjunto dado. La pertenencia en un conjunto difuso no es solo una afirmación o negación, es un conjunto clásico, pero con un cierto grado. Un conjunto difuso A de un universo en discurso U es definido por una función que asigna a cada objeto x en U un grado de pertenencia de x en A . Esta función es llamada función de pertenencia A .

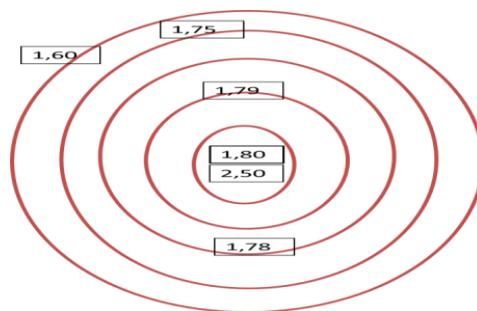
El grado de pertenencia es usualmente expresado por un número en el intervalo de $[0,1]$, y los conjuntos difusos con esta propiedad son llamados conjuntos difusos ordinarios. A diferencia del rol simbólico de los número 1 y 0 en la función

característica de los conjuntos clásicos, los números en $[0,1]$ asignados a los objetos por medio de funciones de pertenencia de conjuntos difusos tienen un significado numérico.

Permitiendo grados de pertenencia en $[0,1]$, los conjuntos difusos son capaces de expresar transiciones graduales de pertenencia a la no pertenencia. Esta capacidad expresiva tiene una gran utilidad. Por ejemplo, permite capturar, significados de expresiones en lenguaje natural, muchos de los cuales son inherentemente imprecisos. Los grados de pertenencia en estos conjuntos difusos expresan compatibilidad de objetos relevantes con las expresiones lingüísticas que los conjuntos intentan capturar.

Por ejemplo suponga que A , según la figura 12, representa el conjunto difuso de personas altas en el universo en discurso U , donde a cada nivel le corresponde diferentes medidas de altura con diversos grados de pertenencia a ese conjunto. Aquí los límites entre los niveles no están claramente definidos, es decir, se diría que son difusos o según su equivalencia en inglés, se diría son fuzzy.

Figura 12. Conjunto difuso "*personas altas*"



El grado de pertenencia al conjunto de *personas altas* (A) es representado por la función $\mu_A(x)$, donde x es la variable de altura en el universo de U ($x \in U$). El rango de μ , es cualquier valor entre 0 a 1, según sea el grado de pertenencia total

o parcial, al conjunto A . De esta manera, mientras una altura de 1,50 metros no tendría ninguna pertenencia al conjunto, una altura de 1,90 metros tendría una pertenencia completa. Alturas entre estos dos valores extremos son miembros del conjunto en cierto grado. La tabla 13 muestra diversos grados de pertenencia del conjunto *alto*.

Tabla 3. Grados de pertenencia al conjunto difuso *alto*

$\mu_A(1,30 \text{ mts}) = 0$	$\mu_A(1,61 \text{ mts}) = 0,1$	$\mu_A(1,78 \text{ mts}) = 0,9$
$\mu_A(1,40 \text{ mts}) = 0$	$\mu_A(1,64 \text{ mts}) = 0,35$	$\mu_A(1,90 \text{ mts}) = 1$
$\mu_A(1,50 \text{ mts}) = 0$	$\mu_A(1,75 \text{ mts}) = 0,65$	$\mu_A(1,91 \text{ mts}) = 1$

➤ **FUNCIONES DE PERTENENCIA.** Sea U un conjunto universal dado, no vacío, y A un subconjunto de U . La función de pertenencia se define como:

$$\mu_A: U \rightarrow [0, 1],$$

donde $\mu_A(x) \in [0, 1]$ es el grado con el que un elemento $x \in U$ (U universo en discurso) pertenece al conjunto difuso A . Cuando $\mu_A(x) = 0$, el elemento no pertenece al conjunto, y cuando $\mu_A(x) = 1$ pertenece totalmente. Un caso particular de una función de pertenencia comprende a la función característica de un subconjunto A de U , la cual es dada por $\chi_A(x) = 0$ si $x \notin A$ y $\chi_A(x) = 1$ si $x \in A$.

✓ Funciones triangulares y trapezoidales. Se definen en función de los vértices de dichas funciones; $\Delta(l,m,u)$ para las triangulares $T(l,m,n,u)$ para las trapezoidales, su función de pertenencia se representa por

$$\mu_A(x) = \begin{cases} (x-l)/(m-l), & \text{para } l \leq x \leq m \\ 1, & \text{para } m \leq x \leq n \\ (u-x)/(u-n), & \text{para } n \leq x \leq u \\ 0, & \text{para } l \geq x \geq u \end{cases}$$

Si $m = n$ se convierte en una función de pertenencia triangular.

✓ Funciones Gaussianas. Definida por su valor medio m y el parámetro $k > 0$. Esta función es la típica campana de Gauss y cuanto mayor es el valor de la k , más estrecha es dicha campana.

$$\mu_A(x) = e^{-k(x-m)^2}$$

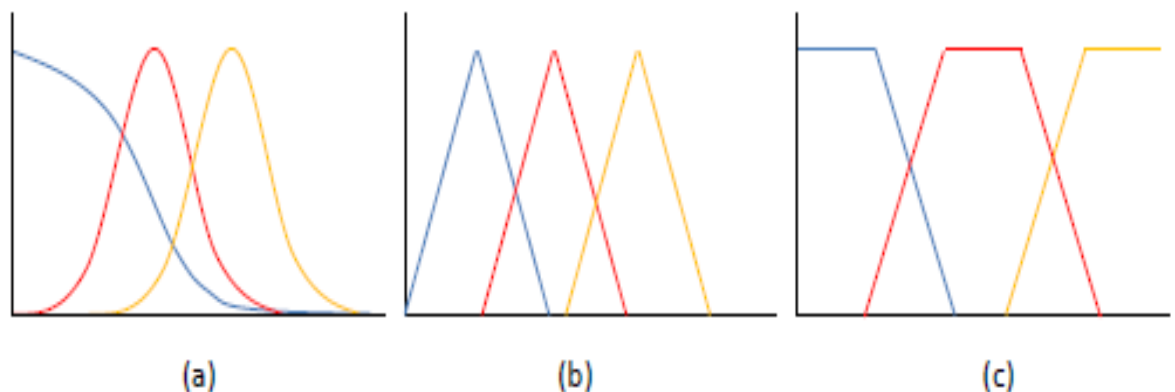
Por ejemplo para los valores de $k = 5$ y $m = 3$

$$\mu_A(x) = e^{-5(x-3)^2}$$

✓ Funciones sigmoideas. Definida por sus límites inferior a , superior b y el valor m o punto de inflexión, tales que $a < m < b$. El crecimiento es más lento cuanto mayor sea la distancia $a - b$. Para el caso concreto de $m = (a + b)/2$, que es lo usual, se obtiene la siguiente función

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x \leq a \\ 2 \left[\frac{x-a}{b-a} \right]^2, & \text{si } a \leq x \leq m \\ 1 - 2 \left[\frac{x-b}{b-a} \right]^2, & \text{si } m < x < b \\ 1, & \text{si } x \geq b \end{cases}$$

Figura 13. Funciones de pertenencia típicas



Fuente: adaptado de KLIR, George Y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. a) Gaussiana y Sigmoideal, b) triangulares, c) trapezoidales.

➤ POSTULADOS DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS.

Los conjuntos difusos como una extensión de los conjuntos clásicos, poseen también una serie de postulados que se describen a continuación:

- ✓ Conjunto vacío: corresponde al conjunto difuso cuya función de pertenencia es la función nula, es decir

$$\mu_{\emptyset}(x) = \mathbf{0}, \forall x \in U$$

- ✓ Igualdad: dos conjuntos difusos A y B definidos sobre un mismo universo de discurso U son iguales si y solo si

$$\mu_A(x) = \mu_B(x), \forall x \in U$$

- ✓ Contención: sean A y B dos conjuntos difusos definidos en U . El conjunto difuso A está contenido en el conjunto difuso B , y se escribe $A \subseteq B$, si y solo si

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x), \forall x \in U$$

- ✓ Normalidad: un conjunto difuso A definido en U se denomina normal si y solo si

$$\max_{x \in U} \mu_A(x) = \mathbf{1}$$

- ✓ Soporte: el soporte de la función de pertenencia de un conjunto difuso es la región del universo que es caracterizada por la pertenencia de no cero en el conjunto difuso como se muestra en la siguiente expresión

$$\mathbf{Supp}(A) = \overline{\{x \mid \mu_A(x) > \mathbf{0}\}}$$

✓ Convexo: un conjunto difuso convexo es el conjunto en el que la función de pertenencia monótonamente incrementa o decrece. Precisamente, la función de pertenencia (i) monótonamente incrementa, o (ii) monótonamente decrece, o (iii) monótonamente incrementa y decrece con valores incrementales de los elementos del universo. Para cada número real, se dice que x_1, x_2 y x_3 , con $x_1 < x_2 < x_3$

$$\mu_A(x_2) \geq \min\{\mu_A(x_1), \mu_A(x_3)\}$$

✓ Partición completa: se dice que los conjuntos difusos A_1, A_2, \dots, A_N son una partición completa de U si $\forall x \in U$ si existe al menos un $A_i (1 \leq i \leq N)$ tal que $A_i(x) > 0$. Por simplicidad, se dice que los conjuntos A_1, A_2, \dots, A_N son completos si forman una partición completa.

✓ Consistencia: los conjuntos difusos A_1, A_2, \dots, A_N son consistentes si se verifica que si $A_i(x_0) = 1$ para algún $x_0 \in U$, entonces $\forall j \neq i A_j(x_0) = 0$.

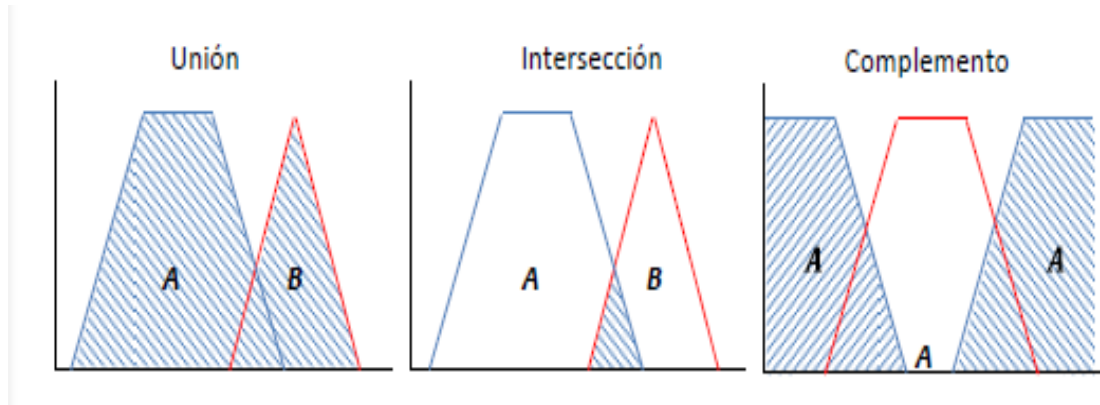
➤ **OPERACIONES CON CONJUNTOS DIFUSOS.** En los conjuntos difusos es de especial relevancia las operaciones estándar de unión, intersección y complemento las cuales son y se representan en la figura 14 como:

✓ Intersección $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$

✓ Unión $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$

✓ Complemento $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$

Figura 14. Operaciones básicas entre conjuntos

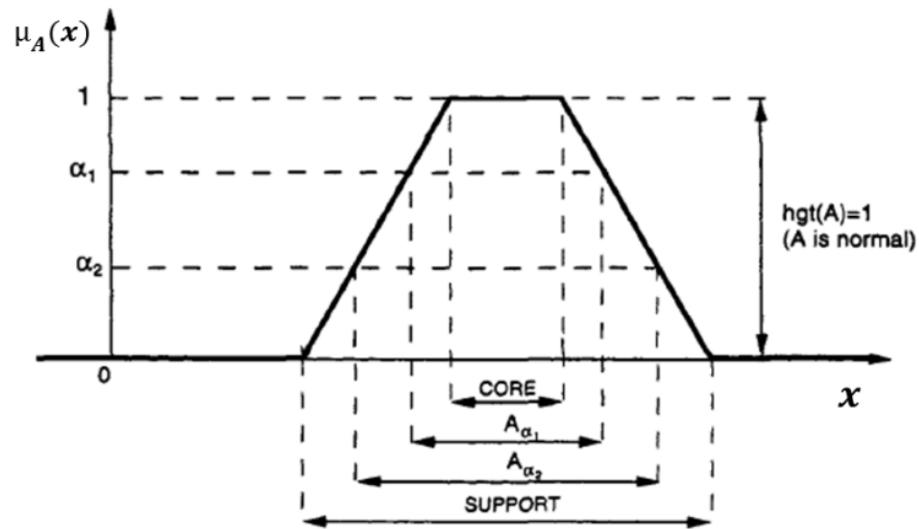


Fuente: adaptado de KLIR, George Y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic.

Al igual que las funciones de pertenencia, las operaciones pueden ser representadas en según el contexto en que se esté estudiando.

➤ **NIVELES DE UN CONJUNTO DIFUSO O α -niveles.** Un importante concepto asociado con conjuntos difusos ordinarios es el concepto de un α -nivel. Dado un conjunto difuso definido en U y cualquier número α en $(0,1]$, el α -nivel de A , denotado como A_α , es el conjunto clásico que consiste de todos los miembros de U cuyos grados de pertenencia en A son mayores o iguales a α , es decir $\alpha \in (0,1]$, $A_\alpha = \{x: x \in U: \mu_A(x) \geq \alpha\}$. Si $\alpha = 0$, se define el soporte de A como siendo el conjunto $A_0 = \overline{\{x \in U: \mu_A(x) > \alpha\}}$, donde la notación \bar{X} representa el conjunto $X \cup \partial x$, siendo ∂x los puntos fronterizos de X . El α -nivel A_1 (para $\alpha = 1$) es llamado *núcleo* (*core*) de A . Si el núcleo no es vacío, A es un conjunto difuso normal; de lo contrario es subnormal. El máximo grado de pertenencia en A para cualquier $x \in U$ es llamada la *altura* de A y se denota por $hgt(A)$. En la figura 15 se muestran los α -niveles y los elementos que definen

Figura 15. α -niveles y sus elementos



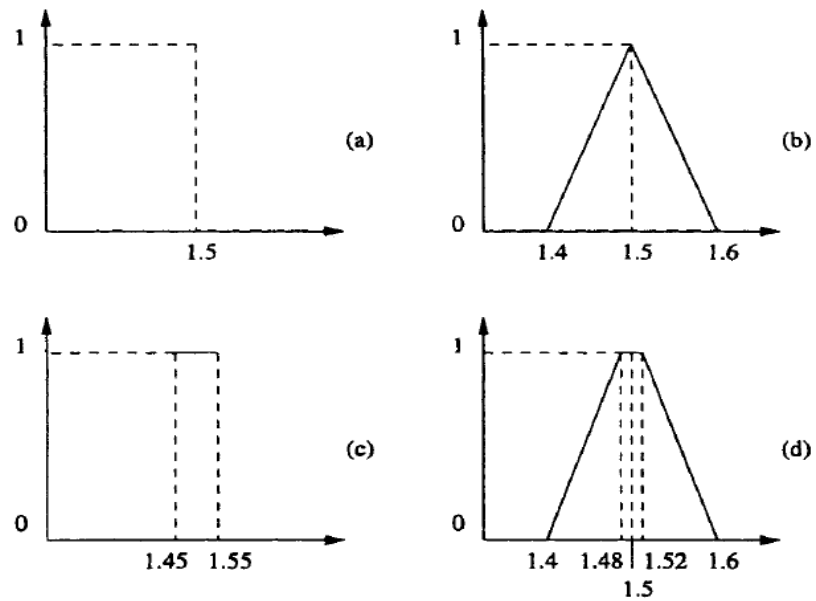
Fuente: adaptado de KLIR, George Y YUAN, Bo. Handbook of fuzzy computation.

➤ **NÚMEROS DIFUSOS E INTERVALOS DIFUSOS.** Un *número difuso* es la representación de un conjunto difuso de la noción de un número que se acerca a un número dado, como en “alrededor de 3,5”. Un *intervalo difuso* similarmente representa la noción de un número que se acerca alrededor de un intervalo dado, como en “muy cerca del rango entre 7 y 10”. Un número difuso es un conjunto difuso A en los números reales \mathbb{R} que satisface las siguientes condiciones

- ✓ A es normal; esto es que existe $x \in \mathbb{R}$ tal que $\mu_A(x) = 1$,
- ✓ Los α -niveles de A , son intervalos cerrados y convexos.
- ✓ El soporte de A , es acotado.

Un número difuso se puede definir también como un conjunto difuso que es tanto normal como convexo. Ejemplos de números difusos e intervalos difusos se muestran en la figura 16

Figura 16. Números difusos en intervalos difusos



Fuente: adaptado de KLIR, George Y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Un número real (a) comparado con un número difuso (b) y un intervalo clásico (c) comparado con un intervalo difuso (d)

Un conjunto difuso A en \mathbb{R} es un número difuso si y solo si es un intervalo cerrado $[a, d] \neq \emptyset$ tal que

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{para } x \in [a, d] \\ l(x) & \text{para } x \in [-\infty, a], \\ r(x) & \text{para } x \in [d, \infty] \end{cases}$$

en donde l es una función desde $(-\infty, a)$ hasta $[0, 1]$ que monótonamente incrementa, de forma continua desde la derecha, y que $l(x) = 0$ para $x \in (-\infty, \omega_1)$ para algún $\omega_1 \leq a$; r es una función desde (d, ∞) hasta $[0, 1]$ que monótonamente decrece, de forma continua desde la izquierda, y que $r(x) = 0$ para $x \in (\omega_2, \infty)$ para algún $\omega_2 \geq d$.

➤ **OPERACIONES ARITMÉTICAS CON NÚMEROS DIFUSOS¹¹**. Según el principio de extensión de Zadeh, las operaciones aritméticas para cualquier número trapezoidal de la forma $A = (a, b, c, d)$, pueden desarrollarse bajo dos conceptos que son:

✓ Sin α -niveles:

- Adición de números difusos:

$$A_1 + A_2 = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2, d_1 + d_2)$$

- Sustracción de números difusos:

$$A_1 - A_2 = (a_1 - d_2, b_1 - c_2, c_1 - b_2, d_1 - a_2)$$

- Multiplicación de números difusos:

$$A_1 \times A_2 \approx (a_1 \times a_2, b_1 \times b_2, c_1 \times c_2, d_1 \times d_2)$$

- División de números difusos:

$$A_1 \div A_2 \approx (a_1/d_2, b_1/c_2, c_1/b_2, d_1/a_2)$$

- Multiplicación por un escalar:

$$k \times A \approx (k \times a, k \times b, k \times c, k \times d) \text{ si } k > 0$$

$$k \times A \approx (k \times d, k \times c, k \times b, k \times a) \text{ si } k < 0$$

✓ Con α -niveles:

- Adición de números difusos:

$$A_a = A_1^\alpha + A_2^\alpha = \min\{(a_1^\alpha + a_2^\alpha), (a_1^\alpha + d_2^\alpha), (d_1^\alpha + a_2^\alpha), (d_1^\alpha + d_2^\alpha)\}$$

$$A_a = (a_1^\alpha + a_2^\alpha)$$

$$A_d = A_1^\alpha + A_2^\alpha = \max\{(a_1^\alpha + a_2^\alpha), (a_1^\alpha + d_2^\alpha), (d_1^\alpha + a_2^\alpha), (d_1^\alpha + d_2^\alpha)\}$$

$$A_d = (d_1^\alpha + d_2^\alpha)$$

- Sustracción de números difusos:

$$A_a = A_1^\alpha - A_2^\alpha = \min\{(a_1^\alpha - a_2^\alpha), (a_1^\alpha - d_2^\alpha), (d_1^\alpha - a_2^\alpha), (d_1^\alpha - d_2^\alpha)\}$$

$$A_a = (a_1^\alpha - a_2^\alpha)$$

$$A_d = A_1^\alpha - A_2^\alpha = \max\{(a_1^\alpha - a_2^\alpha), (a_1^\alpha - d_2^\alpha), (d_1^\alpha - a_2^\alpha), (d_1^\alpha - d_2^\alpha)\}$$

$$A_d = (d_1^\alpha - d_2^\alpha)$$

¹¹ BONISSONE, Piero. RUPINI, Enrique. PEDRYCZ, Witold. Handbook of fuzzy computation

- Multiplicación de números difusos:

$$A_a = A_1^\alpha \times A_2^\alpha = \min\{(a_1^\alpha \times a_2^\alpha), (a_1^\alpha \times d_2^\alpha), (d_1^\alpha \times a_2^\alpha), (d_1^\alpha \times d_2^\alpha)\}$$

$$A_a = (a_1^\alpha \times a_2^\alpha)$$

$$A_d = A_1^\alpha \times A_2^\alpha = \max\{(a_1^\alpha \times a_2^\alpha), (a_1^\alpha \times d_2^\alpha), (d_1^\alpha \times a_2^\alpha), (d_1^\alpha \times d_2^\alpha)\}$$

$$A_d = (d_1^\alpha \times d_2^\alpha)$$

- División de números difusos:

$$A_a = A_1^\alpha / A_2^\alpha = \min\{(a_1^\alpha / a_2^\alpha), (a_1^\alpha / d_2^\alpha), (d_1^\alpha / a_2^\alpha), (d_1^\alpha / d_2^\alpha)\}$$

$$A_a = (a_1^\alpha / d_2^\alpha)$$

$$A_d = A_1^\alpha / A_2^\alpha = \max\{(a_1^\alpha / a_2^\alpha), (a_1^\alpha / d_2^\alpha), (d_1^\alpha / a_2^\alpha), (d_1^\alpha / d_2^\alpha)\}$$

$$A_d = (d_1^\alpha / a_2^\alpha)$$

- Multiplicación por un escalar:

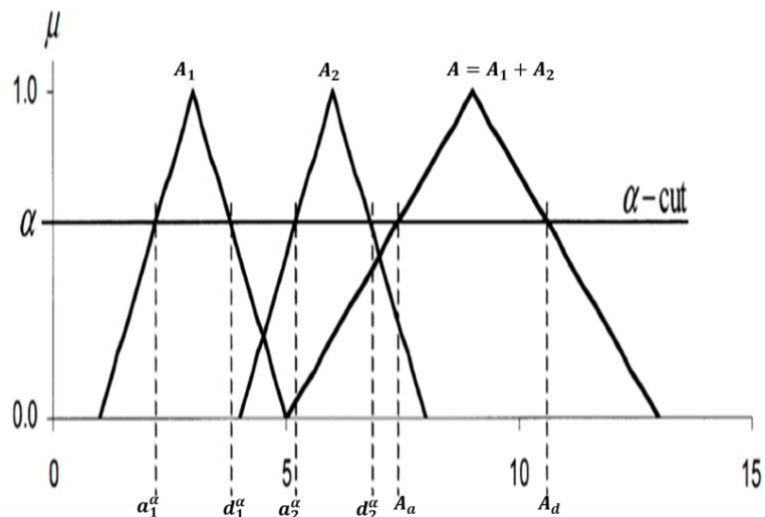
$$A_a = k \times A_2^\alpha = \min\{(k \times a_2^\alpha), (k \times d_2^\alpha), (k \times a_2^\alpha), (k \times d_2^\alpha)\}$$

$$A_a = (k \times a_2^\alpha)$$

$$A_d = k \times A_2^\alpha = \max\{(k \times a_2^\alpha), (k \times d_2^\alpha), (k \times a_2^\alpha), (k \times d_2^\alpha)\}$$

$$A_d = (k \times d_2^\alpha)$$

Figura 17. Adición de números difusos empleando α -niveles



Fuente: adaptado de KLIR, George Y YUAN, Bo. Handbook of fuzzy computation.

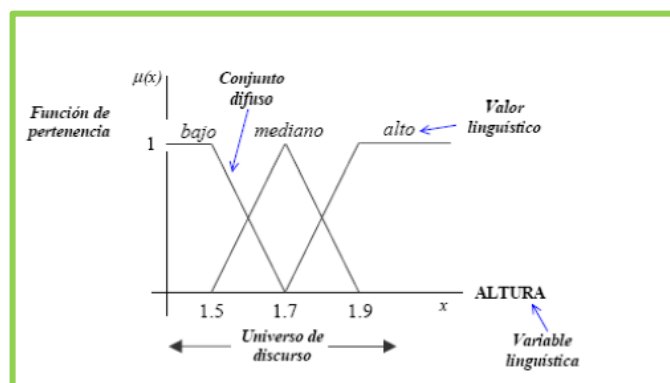
2.5.2 LA LÓGICA DIFUSA Y SUS CARACTERÍSTICAS¹²

La teoría de conjuntos difusos se utiliza para representar la vaguedad de las expresiones lingüísticas.

Una variable lingüística es una variable cuyos valores son palabras o sentencias que se enmarcan en un lenguaje predeterminado. Estas palabras son llamadas etiquetas lingüísticas y se representan mediante un conjunto difuso definido sobre el universo de discurso de la variable. Un ejemplo de etiquetas lingüísticas son aquellas que describen el tipo de altura de una persona. Las tres etiquetas lingüísticas que se emplean son *bajo*, *mediano* y *alto*.

El universo en discurso es el rango de los valores que puede tomar la variable que se desea evaluar. En este caso el universo en discurso va desde 1,4 metros hasta más de 1,9 metros. El conjunto difuso para la etiqueta lingüística *bajo* tienen un dominio de 1,4 a 1,7. El conjunto difuso para la etiqueta *mediano* va desde 1,5 a 1,9 y para la etiqueta *alto* su dominio va desde 1,7 hasta más de 1,9 metros. Según la variable x a evaluar, entre más cerca este la pertenencia a un conjunto determinado al valor de 1, mayor será la pertenencia de la variable x al conjunto como se muestra en la figura 18

Figura 18. Ejemplo de conjuntos difusos



Fuente: adaptado de KLIR, George Y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic.

¹² KLIR, George y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic

➤ SISTEMAS DE LÓGICA DIFUSA

La inferencia difusa aplicada a la automatización de procesos es denotada como sistema de lógica difusa. Actualmente en la literatura se conocen tres clases de sistemas basados en reglas difusas, según las entradas, salidas y la forma de las reglas:

✓ Sistemas puros: en estos sistemas, al no efectuar transformación en las entradas y salidas, tienen solo dos componentes principales: una base de conocimiento y un motor de inferencias.

Se emplean las siguientes reglas lingüísticas

Si X_1 es A_1 y... X_n es A_n ENTONCES Y es B ,

donde X_i e Y son variables lingüísticas, y los A_i y B son etiquetas lingüísticas asociadas a conjuntos difusos.

✓ Sistemas tipo Mamdani: está compuesto por una base de conocimiento, un motor de inferencias e interfaces de fusificación y defusificación. Las reglas se describen de la forma

Si X_1 es A_1 y... X_n es A_n ENTONCES Y es B ,

donde X_i y la salida Y son ahora números (no difusos), en lugar de términos lingüísticos (como en el caso anterior), y por lo tanto, los A_i y B son conjuntos difusos sin interpretación directa, en lugar de etiquetas lingüísticas.

✓ Sistemas tipo Takagi-Sugeno-Kang: la salida de este sistema es una función de las variables de entrada, que se representa por medio de variables lingüísticas. Las reglas de este sistema se representan de la siguiente manera:

Si X_1 es A_1 y ... X_n es A_n ENTONCES $Y=p_1X_1+\dots+p_nX_n$,

en donde X_i son las variables de entrada, Y la variable de salida y p_i parámetros de análisis. La salida de este sistema que usa m reglas o funciones de pertenencia se obtiene como la media ponderada de las salidas individuales proporcionadas por cada regla o función y Y_i , ($i=1, \dots, m$), así:

$$\frac{\sum_{i=1}^m h_i Y_i}{\sum_{i=1}^m h_i},$$

siendo h_i el grado de emparejamiento entre la parte antecedente de la regla i .

➤ COMPONENTES DE UN SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA

- ✓ Interface de difusificación. Convierte los valores de entrada en valores lingüísticos que son los que permiten trabajar con entidades difusas.
- ✓ Base de conocimiento. Recogidas las definiciones de las funciones de pertenencia de las entradas del sistema, las lleva a una base de reglas o de conocimiento, que define las políticas y objetivos del control de un experto por medio de un conjunto de reglas lingüísticas de control.
- ✓ Motor de Inferencias. Es el núcleo del sistema de lógica difusa, reúne toda la lógica de inferencia difusa del sistema, de barrido de reglas, elección refinada de reglas a usar, etc.
- ✓ Interface de desdifusificación. La acción difusa es convertida en esta etapa por un acción concreta que se pueda aplicar sobre el proceso.

➤ LA LÓGICA DIFUSA EN PROBLEMAS DE TOMA DE DECISIONES¹³

Es bastante reconocido que los conjuntos difusos juegan un papel importante en el proceso de toma de decisiones porque los juicios humanos incluyendo las preferencias son frecuentemente imprecisos. Se debe considerar, por ejemplo la situación cuando una serie de opciones viables tienen que ser comparados por parejas. En estos casos, las opiniones de los expertos son usualmente descritas utilizando relaciones de preferencias. El proceso clásico de toma de decisiones multi-criterio sigue dos pasos importantes: *agregación* y *operación*. La fase de agregación define una relación de comparación que indica la preferencia global entre cada pareja ordenada de alternativas, considerando los pesos de los diferentes puntos de vista. La fase de operación transforma la información global acerca de las alternativas en una clasificación global de estas.

En una relación de preferencia, un experto asocia un número real a cada pareja de alternativas que refleja el grado de preferencia, o la proporción de intensidad preferencia, de la primera alternativa sobre la segunda. Cuando se realiza esto, una pregunta natural nace y es ¿qué condiciones tienen que ser verificadas para obtener resultados consistentes?

Hay tres niveles de jerarquía y fundamentos de supuestos racionales cuando se trata de relaciones de preferencia:

- El primer nivel de racionalidad requiere indiferencia entre cualquier alternativa y ella misma.
- El segundo nivel asume la propiedad de reciprocidad en la comparación por parejas entre dos alternativas.

¹³ CHICLANA, Francisco,. HERRERA, Francisco,. HERRERA-VIEDMA, Enrique. Reciprocity and consistency of fuzzy preference relations. En: Principles of Fuzzy Preference Modelling and Decision Making, (2003); p. 123-142

- Finalmente, el tercer nivel está asociado con la transitividad en la comparación por parejas entre tres alternativas.

Una relación de preferencia que verifica el tercer nivel de racionalidad es llamada *relación de preferencia consistente* y cualquier propiedad que garantice la transitividad de las preferencias es llamada una propiedad de consistencia. La falta de consistencia en la toma de decisiones puede terminar en conclusiones inconsistentes. Por otro lado, la consistencia perfecta es difícil de obtener, especialmente cuando las preferencias medidas en un conjunto cuenta con un gran número de alternativas. A continuación se describen las propiedades que describen consistencia en el proceso de toma de decisiones.

- ✓ Recíproca aditiva. Una *relación de preferencia difusa* P en una serie de alternativas X es un conjunto difuso en el conjunto producto $X \times X$, que se caracteriza por una función de pertenencia

$$\mu_P = X \times X \rightarrow [0,1].$$

Cuando la cardinalidad de X es pequeña, la relación de preferencia puede ser representada por una matriz $n \times n$ $P = (p_{ij}) = \mu_P(x_i, x_j)$, $i, j \in \{1, \dots, n\}$. p_{ij} se interpreta como el grado de preferencia de la alternativa x_i sobre x_j : $p_{ij} = 1/2$ indica indiferencia entre x_i y x_j , $p_{ij} = 1$ indica que x_i es absolutamente más preferido que x_j , y $p_{ij} > 1/2$ indica que x_i es más preferido que x_j . En este caso, la matriz de preferencia, P , asume la propiedad recíproca aditiva, es decir.,

$$p_{ij} + p_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n\}.$$

- ✓ Transitividad aditiva. La transitividad es una de las más importantes propiedades referente a las preferencias y representa la idea de que el valor de la preferencia obtenido directamente comparando dos alternativas debe ser igual o mayor que el valor de la preferencia entre esas dos alternativas obtenidas usando

una cadena indirecta de alternativas, es decir $p_{ik} \geq p_{ij} + p_{jk}$. Junto con la propiedad aditiva se cumple:

$$(p_{ij} - 0,5) + (p_{jk} - 0,5) = (p_{ik} - 0,5) \quad \forall i, j, k \text{ o equivalentemente}$$

$$p_{ij} + p_{jk} + p_{ik} = \frac{3}{2} \quad \forall i, j, k$$

Esta transitividad se interpreta de la siguiente manera: suponga que se necesita establecer la clasificación entre tres alternativas x_i, x_j y x_k . Si no se tiene información acerca de estas alternativas es natural comenzar asumiendo que se está en una situación indiferente, que es $x_i \sim x_j \sim x_k$, en donde el símbolo \sim representa que las alternativas x_i, x_j y x_k son similares y por consiguiente esta preferencia se representa $p_{ij} = p_{jk} = p_{ik} = 0,5$. Ahora se supone que se tienen algo de información que dice que la alternativa $x_i < x_j$, que significa que x_i precede a x_j es decir $p_{ij} < 0,5$. Es claro que p_{jk} o p_{ik} tienen que cambiar, de lo contrario habrá una contradicción porque $x_i < x_j \sim x_k \sim x_i$. Si se supone que $p_{jk} = 0,5$ luego la situación: x_j es más preferido que x_i y no hay diferencia en la preferencia de x_j a x_k . Además, como $x_j \sim x_k$ luego $p_{ji} = p_{ki}$ y así $p_{ij} + p_{jk} + p_{ki} = p_{ij} + p_{jk} + p_{ji} = 1 + 0,5$.

Ahora para el caso de $p_{jk} < 0,5$, luego x_k es más preferido que x_j y así para x_i , así que x_k debe ser más preferido que x_i . De lo contrario, el valor de p_{ki} tiene que ser igual o mayor que p_{ji} , siendo igual solo en el caso de $p_{jk} = 0,5$ como se vio. Interpretando el valor de $p_{ji} - 0,5$ como la intensidad de preferencia de la alternativa x_j sobre x_i , luego parece razonable suponer la intensidad de preferencia de x_k sobre x_i es igual a la suma de las intensidades de las preferencias cuando usando una alternativa intermedia x_j , que es $p_{ki} - 0,5 = (p_{kj} - 0,5) + (p_{ji} - 0,5)$.

✓ Consistencia aditiva. Para un relación de preferencia difusa $P = (p_{ij})$, las siguientes expresiones son equivalentes:

$$p_{ij} + p_{jk} + p_{ki} = \frac{3}{2} \quad \forall i, j, k$$

$$p_{ij} + p_{jk} + p_{ki} = \frac{3}{2} \quad \forall i < j < k.$$

Una relación de preferencia difusa $P = (p_{ij})$ es consistente si y solo si

$$p_{ij} + p_{jk} + p_{ik} = \frac{3}{2}, \forall i \leq j \leq k.$$

Para una relación de preferencia difusa recíproca $P = (p_{ij})$, las siguientes expresiones son equivalentes:

$$p_{ij} + p_{jk} + p_{ki} = \frac{3}{2} \quad \forall i < j < k$$

$$p_{i(i+1)} + p_{(i+1)(i+2)} + \dots + p_{(j-1)(j)} + p_{ji} = \frac{j-i+1}{2}, \quad \forall i < j.$$

✓ Método para construir relaciones de preferencias difusa consistentes. En el proceso de completar las relaciones de preferencia, se puede presentar que en la matriz P resulten valores que no están en el intervalo $[0,1]$, pero en el intervalo $[-a, 1 + a]$, siendo $a > 0$. En tal caso, se necesita transformar los valores obtenidos usando una función de transformación que preserve la consistencia y reciprocidad aditiva, que es una función $f: [-1, 1 + a] \rightarrow [0,1]$, verificando que:

1. $f(-a) = 0$.
2. $f(1 + a) = 1$.
3. $f(x) + f(1 - x) = 1 \quad \forall x \in [-a, 1 + a]$.
4. $f(x) + f(y) + f(z) = \frac{3}{2}, \forall x, y, z \in [-a, 1 + a]$ tal que $x + y + z = \frac{3}{2}$.

La solución lineal verificando las expresiones 1 y 2 toman la forma de $f(x) = \varphi \cdot x + \beta$ siendo $\varphi, \beta \in \mathbb{R}$.

$$f(x) = \frac{1}{1+2a} * x + \frac{a}{1+2a} = \frac{x+a}{1+2a},$$

que verifica la ecuación 3

$$f(x) + f(1-x) = \frac{x+a}{1+2a} + \frac{1-x+a}{1+2a} = \frac{x+a+1-x+a}{1+2a} = 1,$$

y cuando $x + y + z = \frac{3}{2}$

$$f(x) + f(y) + f(z) = \frac{x+a}{1+2a} + \frac{y+a}{1+2a} + \frac{z+a}{1+2a} = \frac{x+y+z+3a}{1+2a} = \frac{3/2+3a}{1+2a} = \frac{3}{2}$$

verifica la cuarta expresión.

Resumiendo: el método para construir una relación de preferencia difusa consistente y recíproca P' en $X = \{x_1, \dots, x_n, n \geq 2\}$ para $n-1$ valores de preferencia $\{p_{12}, p_{23}, \dots, p_{n-1n}\}$ presenta los siguientes pasos:

- Computando la serie de valores de preferencias B como

$$B = \{p_{ij}, i < j \wedge p_{ji} \notin \{p_{21}, p_{32}, \dots, p_{nn-1}\}\},$$

$$p_{ji} = \frac{j-i+1}{2} - p_{ii+1} - p_{i+1i+2} \dots - p_{j-1j}.$$

- $P = \{p_{12}, p_{23}, \dots, p_{n-1n}\} \cup B \cup \{1 - p_{12}, 1 - p_{23}, \dots, 1 - p_{n-1n}\} \cup \neg B.$
- $a = |\min\{p_{ij}; p_{ij} \in P\}|.$
- La relación de preferencia consistente P' se obtiene como $P' = f(P)$ tal que

$$f: [-a, 1+a] \rightarrow [1,0],$$

$$f(x) = \frac{x+a}{1+2a}.$$

2.5.3 MÉTODOS DE CONJUNTOS DIFUSOS PARA COMPARACIÓN, PRIORIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE IMPACTO DE LOS RIESGOS EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

El análisis del riesgo en proyectos de construcción ha sido un tema debatido por los investigadores en gerenciamiento de proyectos porque han evidenciado la importancia de efectuar este estudio por la gran variedad de riesgos que se encuentran presentes en la realización de estos proyectos. El principal inconveniente que han tenido, es que los expertos no cuentan una valoración exacta para estos eventos inciertos, es decir, sus juicios son ambiguos y no conocen de herramientas para cuantificar estas evaluaciones. Para dar solución a esta necesidad, se han desarrollado metodologías de evaluación de riesgos en donde se emplea la lógica difusa para considerar el juicio de los expertos en su lenguaje natural.

En la literatura, se encuentran diversos tipos de metodologías que se han estado implantando a los proyectos de construcción para el análisis del riesgo, en donde han incluido el conocimiento de los expertos para cada tipo de proyecto de construcción que se vaya a ejecutar.

Cronológicamente estas metodologías han sido las siguientes:

➤ En 2007, Zeng, An y Smith¹⁴, crean una metodología cuyo resultado es la cuantificación de la magnitud total de los riesgos, por medio de un sistema tradicional de lógica difusa, en donde existe una interface de difusificación, una base de conocimiento formada por reglas difusas, un motor de inferencia y una interface de desdifusificación que genera el valor de la magnitud. La metodología

¹⁴ ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600

empleada inicia con el establecimiento de un grupo de valoración de riesgo en donde cada miembro, posee experticia en alguna actividad relacionada en la ejecución de proyectos de construcción. A estos se les asigna un factor de contribución, dependiendo del impacto de su decisión en el proyecto. Se definen las etiquetas lingüísticas para que los expertos puedan hacer la evaluación a los riesgos identificados y clasificados según los factores involucrados. Llevados a una estructura jerárquica, se procede a calcular los pesos a cada riesgo, que permitirá la priorización de estos.

Esta priorización se efectúa por medio del proceso analítico jerárquico difuso que también permite conocer el índice de factor que es la medida del impacto de los factores involucrados en cada riesgo. Una vez conocido los números difusos del índice de Factor, se pide la evaluación de la probabilidad de riesgo y la gravedad de riesgo del proyecto; estos tres números difusos, conforman las variables de entrada para el sistema difuso, que hacen intersección con las funciones de pertenencia de establecidas para las variables de entrada. Usando la conectividad AND, se toma el menor valor de las reglas de inferencia difusa activadas. La defusificación que permite conocer la magnitud total del riesgo se efectúa mediante el método centro-promedio. Este valor se ubica en la gráfica de funciones de pertenencia de la magnitud del riesgo, para conocer el impacto total de las evaluaciones de los riesgos en la ejecución del proyecto.

➤ En el año 2011, Idrus, Fadhil y Rohman¹⁵, desarrollan un sistema experto basado en lógica difusa como método para evaluar el nivel del riesgo por medio de la estimación del costo de contingencia del proyecto utilizando el juicio subjetivo del contratista. Este costo de contingencia se refiere a la función del nivel de los factores de riesgo identificados denominado como Magnitud del riesgo RM. RM es

¹⁵ IDRUS, Arazi,. FADHIL NURUDDIN, Muhd,. ROHMAN, M.Arif. Development of project cost contingency estimation model using risk analysis and fuzzy expert system. En : Expert System with Applications. Vol 38, (2011); p. 1501-1508

medido basado en dos variables de riesgo, llamados Probabilidad de Riesgo y Gravedad del Riesgo. Otro criterio mencionado es Riesgo Mayor MR que es usado para clasificar RM y se puede representar como la sumatoria de RM. Una vez identificados y clasificados los riesgos, se construyen las funciones de pertenencia que evaluarán los riesgos.

El siguiente paso corresponde a la especificación de las reglas base que componen el proceso racional del sistema difuso. Con los anteriores pasos realizados, se puede llevar a cabo la inferencia difusa en este caso utilizando la inferencia Mandami que emplea la implicación MIN y la agregación MAX. El valor generado por la defusificación corresponde al costo de contingencia. El modelo fue realizado en la herramienta de Matlab para lógica difusa. El modelo es de nuevo ejecutado haciendo cambios en las funciones de pertenencia para así demostrar que el modelo es aceptable.

➤ Debido al elevado costo que implica tomar acciones para reducir las amenazas en los objetivos de proyectos de construcción, Nieto-Morote y Ruz-Vila¹⁶ en año 2011, desarrollaron una herramienta, que soporta el proceso de priorización de riesgos utilizando variables lingüísticas que permiten trabajar con la incertidumbre y con las evaluaciones vagas que puedan dar los expertos. Esta herramienta ayuda al mejoramiento en la ejecución del proyecto, puesto que las acciones se enfocan en los riesgos de mayor prioridad. Para este modelo, el establecimiento de un grupo de valoración de riesgos, es de vital importancia. Cada miembro es experto en un área específica en la ejecución de proyectos de construcción, para que estos puedan participar en cada fase del modelo planteado. A continuación, se lleva a cabo la fase de identificación y construcción de la estructura jerárquica de los riesgos. La estructura jerárquica a aplicar es la

¹⁶ NIETO-MOROTE, A., RUZ-VLA, F. A fuzzy approach to construction Project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol. 29, (2011); p. 220-231

del Proceso Analítico Jerárquico, que permite organizar por medio de grupos con características en común.

La siguiente fase es la evaluación de los riesgos utilizando parámetros que emplean variables lingüísticas que pueden manejar el lenguaje ambiguo de los expertos. Estos parámetros son el impacto del Riesgo, la Probabilidad de Riesgo y la Discriminación del Riesgo. El Impacto del Riesgo investiga los efectos potenciales del riesgo en un objetivo del proyecto tal como programación, costos, calidad, etc. La Probabilidad de Riesgo mide el porcentaje de posibilidad de que el riesgo evaluado ocurra. La Discriminación del Riesgo provee una perspectiva adicional porque mide el impacto del riesgo en toda la estructura del proyecto. Para conocer el número difuso para Discriminación del riesgo se realizan juicios comparativos dentro del mismo nivel de jerarquía y se va haciendo agregación de valores desde los niveles bajos de la jerarquía hasta los más altos. Estos tres parámetros generan un valor fuzzy para cada riesgo, por medio de operaciones difusas que generan un número difuso, que luego es defusificado por el método de Centro de Masa. Así se consigue un valor numérico exacto para cada riesgo y aquellos con los valores más altos, son los que afectan en mayor proporción los objetivos del proyecto.

➤ Khazaeni, Khanzadi y Afshar¹⁷ en el año 2012, desarrollan un método cuyo objetivo principal de es cuantitativamente abordar la asignación balanceada de los riesgos a la parte contractual apropiada en la industria de la construcción. Fundamentado en el método del proceso analítico jerárquico difuso, este artículo intenta introducir un modelo numérico para identificar la más apropiada división para soportar un riesgo con la menor contingencia. Este procedimiento permite transferir la responsabilidad a aquellas partes que pueden manejar de forma más

¹⁷ KHAZAENI, Garshasb., Khanzadi, Mostafa., Afshar, Abas. Fuzzy adaptive decision making model for selection balanced risk allocation. En: International Journal of Project Management. Vol. 30, (2012); p. 511-522

efectiva el riesgo. Criterios lingüísticos, el conocimiento cualitativo de expertos por medio de la técnica Delphi y la teoría de conjuntos difusos que permite la cuantificación del lenguaje natural de los expertos, estos tres serán los componentes esenciales del proceso de asignación de riesgos.

➤ En el año 2013, Kuo y Lu¹⁸ emplean nuevas herramientas como Toma de decisión con múltiple criterios difusos (FMCDM) para evaluar los riesgos, relaciones de preferencia difusa consistentes (CFPR) para medir e investigar el impacto relativo de los riesgos en la ejecución del proyecto y la puntuación directa de diversos atributos difusos (FMADR) para analizar la probabilidad de ocurrencia de múltiples factores de riesgo. Los riesgos son identificados y llevados a una estructura jerárquica para luego aplicar en cada nivel CFPR que permite al proceso de comparación por parte de los expertos, ser consistente.

Seguido a este proceso, para evaluar la probabilidad de ocurrencia se emplea FMADR que está fundamentado en números difusos para este caso triangulares, variables lingüísticas para que los expertos puedan usar su lenguaje natural para evaluar y la defusificación que utiliza el método α (preferencia) y λ (percepción del riesgo). Con estos valores conseguidos, se efectúan operaciones matriciales que llevarán a que cada riesgo posee un valor, que luego se ordenará de mayor a menor, para saber que riesgos son más importantes o afectan en mayor medida a los objetivos del proyecto.

¹⁸ KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614

3. HERRAMIENTA FUNDAMENTADA EN LÓGICA DIFUSA PARA LA PLANIFICACIÓN DE GESTIÓN DE RIESGOS PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN SEGÚN LINEAMIENTOS DEL PMI

3.1 ¿QUÉ ES UNA HERRAMIENTA FUNDAMENTADA EN LÓGICA DIFUSA?

Las herramientas fundamentadas en lógica difusa son técnicas definidas en donde se consigue de manera simple y elegante una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua e imprecisa. Esta es una forma de inteligencia artificial que trabaja con información de alto grado de imprecisión que es la ideal para evaluar escenarios que tienen cierto grado incertidumbre. A diferencia de las herramientas convencionales, en donde las variables deben ser evaluadas con un valor numérico exacto, estas técnicas permiten considerar la forma en que una persona por medio de su lenguaje natural toma decisiones debido a que emplea la lógica multivaluada que permite evaluaciones intermedias más allá de si/no, verdadero/falso, negro/blanco, caliente, frío, etc, y así llegar a un único resultado que definirá las acciones a desarrollar.

3.2 IMPORTANCIA DE LAS HERRAMIENTAS BASADAS EN LÓGICA DIFUSA¹⁹

- Permite usar expresiones con imprecisión que es similar a la forma en que el ser humano toma decisiones.
- Modela sistemas complejos y no lineales.
- No necesita un modelo matemático exacto para generar una respuesta o conclusión.
- Se pueden evaluar varias variables al tiempo con etiquetas lingüísticas distintas.

¹⁹ UNIVERSIDAD DE PIURA. Lógica difusa y sistemas de control. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf

- El juicio de expertos en el área es considerado para la conformación y entradas de la herramienta.
- Optimiza procesos con múltiples escenarios inciertos.
- Suministra resultados que muestran estados futuros para así tomar acciones.
- Promueve eficiencia en la toma de decisiones.

3.3 DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA Y LINEAMIENTOS DEL PMI PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

La herramienta para la planificación de gestión de riesgos en proyectos de construcción se ajusta a los cuatro primeros procesos definidos por el PMI en gestión de riesgos. Esto con el propósito de crear un modelo estándar que se permita replicar y contribuya al correcto análisis de riesgo de los distintos proyectos de construcción existentes.

3.3.1 Plan de gestión de los riesgos. En esta parte se relacionan los elementos que harán parte del tratamiento de los riesgos que se identifiquen. Se definen los involucrados, las categorías de riesgos, los criterios de evaluación y los métodos de evaluación que se le aplicarán a los riesgos.

- **Evaluadores.** Para conseguir juicios objetivos al momento de evaluar los riesgos, se deben definir expertos de diversas disciplinas. Es ideal considerar más de un experto por disciplina para que así se tengan varios puntos de vista. Estos expertos deben tener como requisito mínimo dos años de experiencia en trabajos de obras de construcción, esto para asegurar que sus evaluaciones son realistas. Se pueden incluir expertos sin nivel profesional, pero que certifiquen su experiencia en la ejecución de este tipo de proyectos. Los expertos según sus disciplinas son:

- ✓ **Gerente de Proyecto:** profesional(es) en ingeniería, administración o arquitectura, preferiblemente con PMP con experiencia en gerenciamiento de proyectos de obras de construcción.
 - ✓ **Ingeniero de Obra:** profesional(es) en ingeniería o arquitectura o similares con experiencia en desarrollo y control de obras civiles.
 - ✓ **Ingeniero de suelos:** profesional(es) en ingeniería de suelos, geólogo o carreras afines, con experiencia en estudio de suelos y estructuras.
 - ✓ **Ingeniero ambiental:** profesional(es) en ingeniería ambiental o afines, con experiencia en estudio y control de contaminación ambiental en el desarrollo de las obras.
 - ✓ **Profesional en seguridad y salud ocupacional:** profesional syso con experiencia en prevención de accidentes laborales. Con certificaciones en OHSAS 18.000 y 18.001.
 - ✓ **Profesional en finanzas y economía:** profesional en ingeniería industrial, financiera, administración de empresa, economía y afines con experiencia en manejo de recursos económicos y financieros en proyectos de construcción.
 - ✓ **Profesional en logística:** profesional en ingeniería industrial, logística o afines con experiencia en gestión de la cadena de suministro de obras de construcción.
 - ✓ **Profesional de procesos:** profesional en ingeniería de producción, civil, industrial o afines con experiencia en programación y control de procesos en proyectos de construcción.
- **Categoría de riesgos²⁰.** Proporciona un medio para agrupar las causas potenciales de riesgo. Se pueden emplear distintos enfoques para clasificar los riesgos dependiendo del proyecto. Diversos estudios se han realizado, algunos empleando encuestas, otros evaluando las posibles condiciones de riesgo que un

²⁰ PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Guía de los fundamentos para la dirección de Proyectos PMBOK Quinta edición. EE.UU: PMI Publication. 2013. 317 p

proyecto en específico, otros referentes al impacto en los objetivos del proyecto. Revisando estos estudios y considerando los elementos involucrados en obras de construcción, se llega a las siguientes categorías:

- ✓ **Gestión del proyecto:** categoría que agrupa los riesgos asociados a los procesos de definición de los entregables y planeación de las actividades y recursos que se emplearán en el proyecto.
 - ✓ **Ingeniería:** esta categoría agrupa los riesgos referentes a los diseños y estudios de ingeniería, suelos, estructuras y demás documentos que definen las condiciones de sismoresistencia del terreno y de infraestructura a realizar.
 - ✓ **Peligros Naturales:** se definen los eventos de fuerza mayor que pueden afectar la realización de la obra de construcción.
 - ✓ **Seguridad en la construcción:** por ser proyectos de construcción y adecuación de infraestructura, los trabajadores se encuentran expuestos a diversos riesgos que se encuentran definidos en esta categoría
 - ✓ **Sociales:** por ser proyectos que se realizan en áreas abiertas y en donde participan diferentes interesados, se presentan riesgos generados por los diferentes involucrados.
 - ✓ **Financieros/Económicos:** por ser proyectos que comprenden gran número de componentes, estos se ven afectados por cambios en la economía del país y de los recursos que disponga la compañía constructora.
 - ✓ **Logísticos:** esta categoría hace referencia a los riesgos presentes en toda la cadena de abastecimiento de recursos necesarios para la ejecución de la obra.
 - ✓ **Procesos y actividades:** la preparación y realización de los trabajos conlleva a riesgos referentes a la eficiencia, efectividad y calidad de los procesos.
- **Criterios de evaluación.** Para el correcto análisis de riesgos, se necesita que se establezcan variables que describan el estado de estos para el proyecto a desarrollar. Para hacer este proceso más fácil, se incorporan etiquetas lingüísticas que permitirán a los expertos emitir juicios por medio de evaluaciones más

adecuadas a la forma de interpretación natural del ser humano. Esto mediante el empleo de lógica difusa que relaciona a cada etiqueta una función de pertenencia a un conjunto determinado. Las variables que se considerarán son las siguientes:

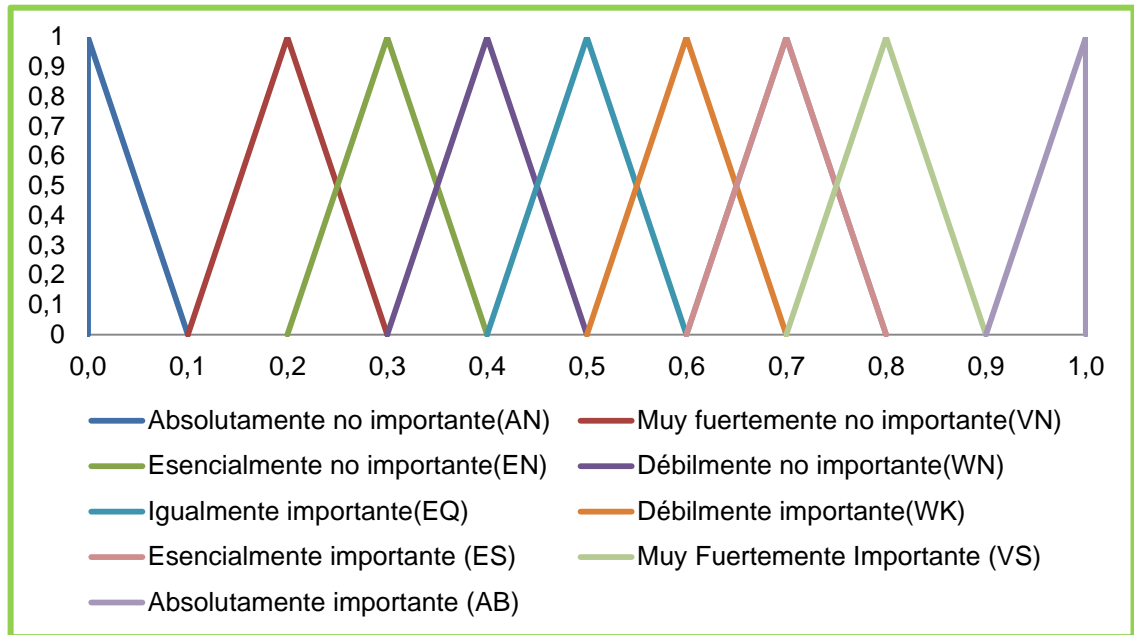
✓ **Etiquetas lingüísticas para Priorización:** Los riesgos no tienen la misma importancia dependiendo del tipo de proyecto a evaluar. Es por eso que es necesario que los expertos evalúen que riesgo es más importante con respecto al otro y así conseguir por medio de un método que emplea lógica difusa, la priorización de los riesgos relacionados. En la tabla 4 y la figura 19 se describen las etiquetas empleadas para este proceso.

Tabla 4. Etiquetas lingüísticas para priorización de los riesgos

Etiqueta lingüística	Número difuso triangular
Absolutamente importante (AB)	(0.90,1.00,1.00)
Muy Fuertemente Importante (VS)	(0.70,0.80,0.90)
Esencialmente importante (ES)	(0.60,0.70,0.80)
Débilmente importante(WK)	(0.50,0.60,0.70)
Igualmente importante(EQ)	(0.40,0.50,0.60)
Débilmente no importante(WN)	(0.30,0.40,0.50)
Esencialmente no importante(EN)	(0.20,0.30,0.40)
Muy fuertemente no importante(VN)	(0.10,0.20,0.30)
Absolutamente no importante(AN)	(0.00,0.00,0.10)

Fuente: adaptado de LUO, Shih-Tong., LIN, Cheng-Wei., DAI, Yuan-Fung., SHIUE, Yih-Chearing. The Evaluation Criteria of Recruiting Local Staffs for Taiwanese Enterprise in China. En: Journal of Testing and Evaluating. Vol. 42, No.1, (2014); p. 1-12.

Figura 19. Etiquetas lingüísticas para priorizar los riesgos



Fuente: adaptado de LUO, Shih-Tong., LIN, Cheng-Wei., DAI, Yuan-Fung., SHIUE, Yih-Chearing. The Evaluation Criteria of Recruiting Local Staffs for Taiwanese Enterprise in China. En: Journal of Testing and Evaluating. Vol. 42, No.1, (2014); p. 1-12.

✓ **Etiquetas lingüísticas para variables de estado de los riesgos:** la evaluación de diversos factores es indispensable para conocer las condiciones reales de los riesgos y por consiguiente es importante definir variables que describan sus estados. Se pueden definir diferentes condiciones, pero según las investigaciones realizadas, las variables más importantes a tener en cuenta son las relacionadas a la probabilidad de ocurrencia, el impacto económico y el retraso que generará la existencia de los riesgos²¹. Estas se describen con sus etiquetas lingüísticas en las tablas 5, 6 y 7 y se representan gráficamente en las figuras 20, 21 y 22 respectivamente.

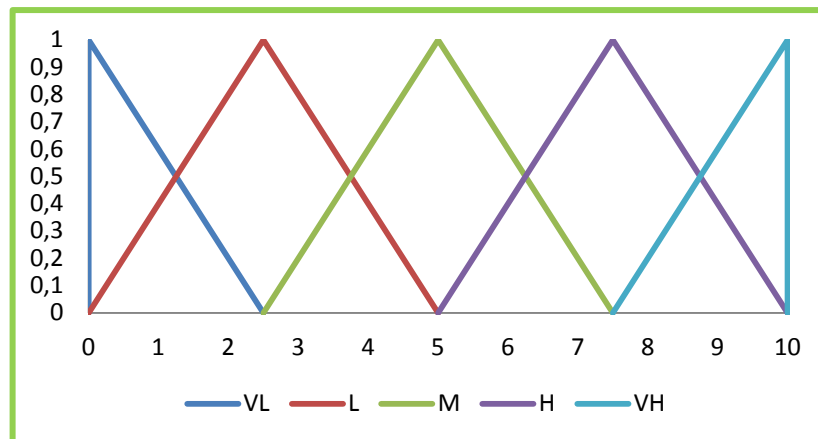
²¹ ZENG, Jiahao., AN, Min., SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: Internation Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600

Tabla 5. Etiquetas lingüísticas para variable de estado probabilidad de riesgo

Probabilidad de Riesgo	Descripción	Número difuso triangular
Muy bajo (VL)	Muy poco probable que suceda (0-10%)	(0,0,2.5)
Bajo(L)	Ocurrencia es poco Probable (11-30%)	(0,2.5,5)
Medio(M)	Probable que ocurra (31-60%)	(2.5,5,7.5)
Alto(H)	Muy probable que ocurra (61-90%)	(5,7.5,10)
Muy alto(VH)	Ocurrencia es casi inevitable (90-100%)	(7.5,10,10)

Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol. 25, (2007); p. 589-600.

Figura 20. Etiquetas lingüísticas para variable de estado probabilidad de riesgo



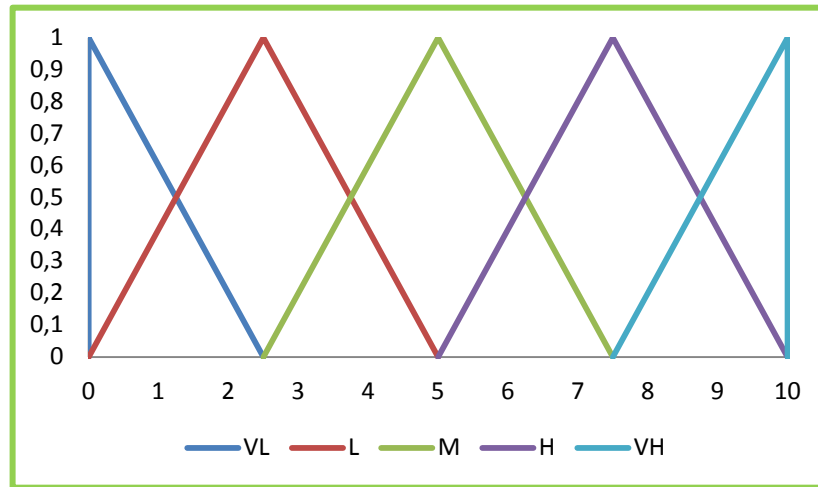
Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

Tabla 6. Etiquetas lingüísticas para variable de estado gravedad del riesgo

Gravedad del Riesgo	Descripción	Número difuso triangular
Muy bajo (VL)	Nada de retrasos o retrasos entre 5 días	(0,0,2.5)
Bajo(L)	Leve retraso entre 6-12 días	(0,2.5,5)
Medio(M)	Retraso moderado entre 13-21días	(2.5,5,7.5)
Alto(H)	Retraso considerable entre 3-5 semanas	(5,7.5,10)
Muy alto(VH)	Retraso serio en más de 5 semanas	(7.5,10,10)

Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol. 25, (2007); p. 589-600.

Figura 21. Etiquetas lingüísticas para variable de estado gravedad del riesgo



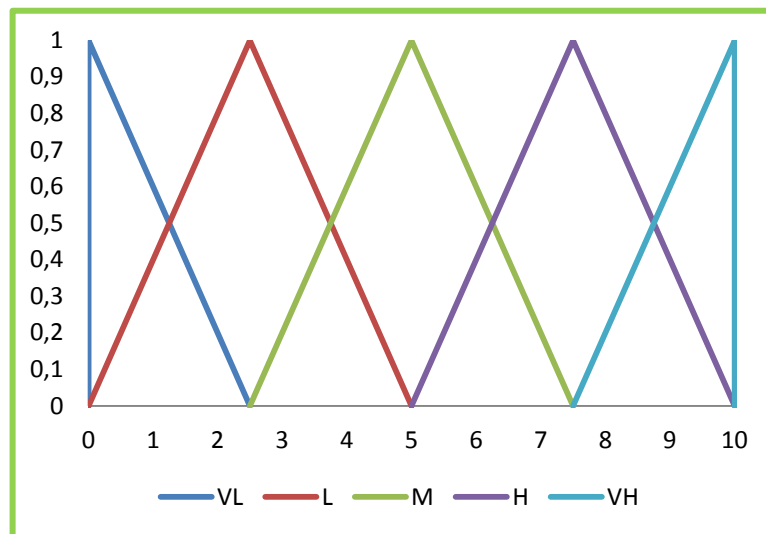
Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

Tabla 7. Etiquetas lingüísticas para variable de estado consecuencia económica

Consecuencia Económica	Descripción	Número difuso triangular
Marginal (VL)	<US10.000(marginal)	(0,0,2.5)
Importante(L)	US10.000-100.000(importante)	(0,2.5,5)
Severo(M)	US100.000-1millon(Severo)	(2.5,5,7.5)
Grave(H)	US1millon-10millon(Grave)	(5,7.5,10)
Catastrófica(VH)	>US10millon(catastrófica)	(7.5,10,10)

Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

Figura 22. Etiquetas lingüísticas para variable de estado cons. económica



Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

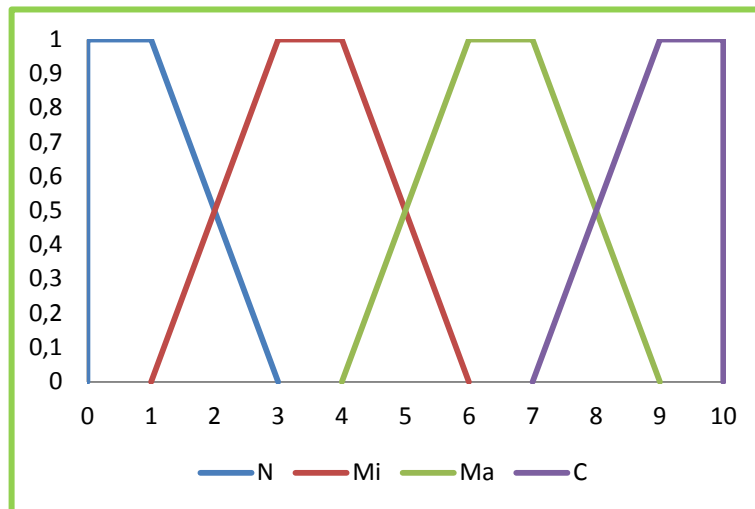
✓ **Etiquetas lingüísticas para variable de resultado de los riesgos:** la unión de los tres factores a evaluar generan un resultado que también tiene representación por medio de conjuntos difusos. Lo importante de esta variable es que oriente hacia el desarrollo de acciones de mejora que ayuden a la disminución del impacto de los riesgos. La variable de salida o control definida se denomina Magnitud del Riesgo que describe el nivel de criticidad de la presencia en determinadas condiciones de los riesgos identificados. En la tabla 8 y la figura 23 se definen las etiquetas lingüísticas que describen la Magnitud del Riesgo.

Tabla 8. Etiquetas lingüísticas para variable de resultado de los riesgos

Magnitud del Riesgo	Descripción	Número difuso
Negligente (N)	Riesgo Aceptable	(0,0,1,3)
Menor (Mi)	El riesgo es tolerable. Control de riesgo debe ser emprendido si es rentable hacerlo.	(1,3,4,6)
Mayor (Ma)	El riesgo debe reducirse si es razonablemente practicable de hacerlo.	(4,6,7,9)
Crítico (C)	El riesgo debe ser reducido, salvo en circunstancias excepcionales.	(7,9,10,10)

Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

Figura 23. Etiquetas lingüísticas para variable de resultado de los riesgos



Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

➤ **Métodos de evaluación.**

- ✓ **Enfoque fuzzy LINPRERA:** metodología que se emplea para priorizar los elementos de una estructura de desglose

✓ **Sistemas difuso tipo mamdani:** modelo difuso en donde las tres características de los riesgos son evaluadas y entran en una base de conocimiento que genera un resultado que representa la Magnitud del Riesgo.

3.3.2 Identificación de los riesgos. En esta sección se relacionan los riesgos que se identificaron como de potencial presencial en obras de construcción. Este reconocimiento se logró por medio de revisión y análisis de la literatura referente a la clasificación de riesgos en proyectos de construcción.

➤ **Registro de Riesgos:** en esta sección se listan los resultados de la investigación realizada para reconocer los riesgos de mayor presencia en la realización de los proyectos de construcción. En la tabla 9 se muestra el registro de riesgos con su respectiva descripción.

Tabla 9. Riesgos en obras de construcción

Código Riesgo	Riesgo	Descripción
A	Gestión del Proyecto	Referente a los procesos para la planificación del proyecto
A1	Alcance del proyecto mal definido	Proyecto no cumple con los requerimientos y necesidades de los usuarios y/o clientes
A2	Demora en otorgamiento de licencias	Los entes gubernamentales no entregan las licencias por incumplimiento en los requisitos
A3	Programación del tiempo no realista	Fecha de inicio y terminación del proyecto no es coherente
A4	Planeación errónea de los costos y el presupuesto	Sobreestimación o Subestimación del valor de las actividades y recursos del proyecto
A5	Personal de gestión inexperto	Administradores del proyecto con nada/poca experiencia en gerenciamiento de proyectos
A6	Estrategia de contratación incorrecta	Adjudicación de Contratos con inadecuado análisis de contratistas
B	Ingeniería	Referente a requisitos mínimos de sismo resistencia
B1	Diseños de Ingeniería no son realistas	Los planos de la obra no son consistentes con lo permitido a construir en el área geográfica definida
B2	Estudios de Cargas mal realizados	Cargas(Fuerzas) identificadas no contribuyen al establecimiento exacto de estructuras y materiales para el soporte de la obra
B3	Mala Calidad del Concreto/Asfalto	El concreto/asfalto estudiado no es el adecuado para la obra a construir
B4	Mampostería mal realizada	Método de mampostería establecido no es el ideal para la obra
B5	Estructuras metálicas inestables	Las estructuras metálicas definidas no soportan toda la infraestructura de la obra

Tabla 10. Tabla 9. (Continuación)

B6	Estudios geotécnicos mal realizados	Estudio de suelos no refleja las condiciones del terreno
C	Peligros Naturales	Referente a Eventos de Fuerza Mayor
C1	Tormentas	Área geográfica de la obra con riesgo de tormentas
C2	Inundaciones	Ubicación del terreno con posibilidad de desbordamiento de aguas o lluvias fuertes
C3	Terremotos	Ubicación del terreno con alto grado de movimiento telúrico
C4	Filtro de Aguas Subterráneas	Terrenos aledaños con alto índice de humedad o agua que pueden moverse al de la obra
C5	Deslizamiento de Tierra	Área geográfica de la obra con elevaciones de tierra inestables
C6	Contaminación ambiental	Generación de residuos sólidos, líquidos o gaseosos en la ejecución de la obra
D	Seguridad en la Construcción	Referente a la seguridad y accidentes en la obra
D1	No señalización de riesgos en la obra	Peligros y riesgos de la obra no son debidamente señalizados
D2	Trabajadores con elementos de seguridad inadecuados	Los elementos de protección personal no son los adecuados o están deteriorados
D3	Estructuras y equipos de elevación en mal estado	Andamios inestables, grúas en malas condiciones.
D4	Maquinaria inadecuada	Maquinaria deteriorada o no es la adecuada para la obra
D5	Herramientas de trabajo en estado de deterioro	Herramientas que emplean los trabajadores no cumplen con su funcionamiento por vencimiento de su vida útil
D6	Alto nivel de accidentalidad	Trabajos ejecutados con probabilidad de accidentes alta.
E	Sociales	Referente a afectaciones sociales
E1	Protestas	Los habitantes del sector presentan inconformismo con la obra
E2	Vandalismo	Daños en la ejecución de la obra o a la obra terminada por causa de vándalos
E3	Sabotaje	Detención en el proyecto por beneficios personales de los interesados internos o externos a la obra
E4	Terrorismo	Área geográfica de la obra con gran influencia de grupos al margen de la ley
E5	Robo	Hurto de materiales, herramientas y equipos por parte de personas propias o ajenas a la obra
E6	Corrupción	Intereses políticos que detienen la correcta ejecución de la obra
F	Financieros/Económicos	Referente a las finanzas y economía del proyecto
F1	No Disponibilidad de fondos	Falta de Recursos económicos para la continuación de las actividades del proyecto
F2	Inflación	Aumento de los precios de bienes y servicios del país
F3	Tasas de cambio de divisas	Desvaloración de la divisa colombiana con respecto a la de otros países
F4	Tasas de Interés Altas	Entes financieras ofrecen altos intereses para préstamos
F5	Quiebra suspensión de pagos contratista	Falta de Recursos para pagar a los contratistas o proveedores
F6	Cambio precios de recursos	Variación constante de los precios de los materiales y demás recursos
G	Logísticos	Referentes a la cadena de suministro para la obra

Tabla 11. Tabla 9. (Continuación)

G1	Mala selección de los proveedores	Los proveedores seleccionados no cumplen con los requisitos de cumplimiento y calidad de sus productos
G2	Materiales y materias primas comprados de calidad baja	Los materiales y materias primas empleados no son los ideales para la obra
G3	Disponibilidad baja de Materias Primas y herramientas	Poca disponibilidad de requerimiento para la obra en el mercado
G4	Subestimación de cantidades	Mala asignación de cantidades a los recursos necesitados para la obra
G5	Retrasos en el suministro de materiales y materias primas	Suministro tardío de requerimientos que atrasan las actividades
G6	Transporte de Carga inadecuado	Los medios de transporte de materiales y herramientas no son adecuados
H	Procesos y actividades	Referente a los trabajos de la obra
H1	Baja Productividad	Alto consumo de recursos con poco avance en la obra
H2	Personal de la obra inexperto	Mano de obra no especializada
H3	Paquetes de trabajo mal definidos	Asignación equivocada de actividades, mano de obra y requerimiento de materiales para los paquetes de trabajo
H4	Mala programación de las actividades de paquetes de trabajo	Incorrecto secuenciamiento de actividades del paquete de trabajo
H5	Subestimación de horas hombres para las actividades	No terminación de actividades por falla en la asignación de horas hombres
H6	Baja calidad en los procesos y actividades	Trabajos de la obra realizados con poca precisión y sin verificación del cumplimiento adecuado al final de su ejecución

➤ **Mapa de Riesgos:** el mapa de riesgos es una representación que sirve para identificar riesgos, definiendo que amenazas se deben controlar y qué oportunidades hay que aprovechar, como se ilustra en las figuras 24 y 25 respectivamente.

3.3.3 Análisis cualitativo de riesgos. En este punto se describen y desarrollan los procesos para priorizar los riesgos con el propósito de conocer los riesgos de prioridad alta. Este análisis se desarrolla por medio del enfoque fuzzy LINPRERA, definido en la sección 3.3.1 y que se describe con más profundidad en esta sección.

➤ **Estructura de desglose de riesgos:** la estructura de desglose del riesgo es una representación jerárquica, en donde se muestra los riesgos en sus respectivas categorías. Para los riesgos identificados en proyectos de construcción, la estructura de desglose del riesgo se muestra en la figura 26

Figura 24. Amenazas a controlar en proyectos de construcción

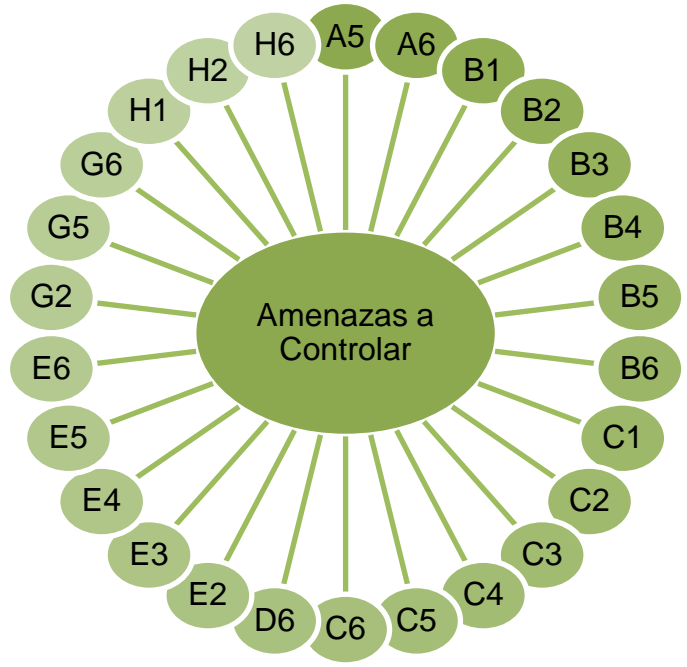


Figura 25. Oportunidades por aprovechar en proyectos de construcción

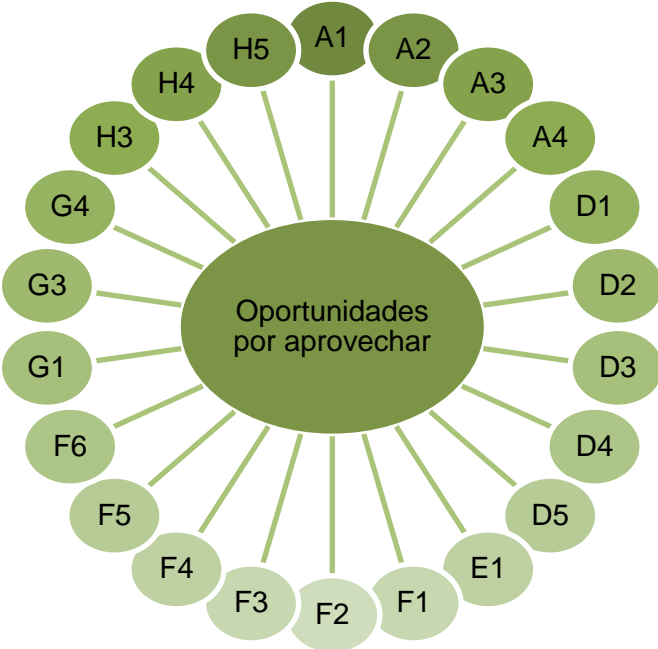


Figura 26. Estructura de desglose del riesgo para proyectos de construcción



➤ **Matriz de comparación de riesgos por parte de los expertos:** esta matriz se crea para que cada uno de los evaluadores efectúe su juicio comparativo de los riesgos entre sí. Basada en la estructura de desglose de riesgo, primero se evalúan las categorías y seguido los riesgos en su respectivo orden por categoría como se muestra en la tabla 12 en donde en las filas se ubican los expertos y en las columnas los riesgos. Las etiquetas a emplear son las descritas en la tabla 4.

Tabla 12. Matriz de comparación de riesgos por parte de los expertos

	1	2	3	11	12	13	14	21	.	.	.	r-1
E1	VS	ES	ES	VS	VS	AB	VS	VS	VS	ES	ES	VS
E2	AN	AB	ES	VS	ES	ES	EN	AB	AB	ES	EN	VS
E3	EQ	EQ	WK	EQ	EQ	EQ	WK	WK	EQ	EQ	WK	WK
E4	AB	EQ	ES	AB	EQ	EQ	EQ	AB	VS	WK	VN	EQ
.	EQ	ES	VS	VS	EN	EN	EQ	VS	VN	VN	WK	EN
.	VS	ES	VN	WK	VN	EQ	ES	WN	ES	EN	EN	ES
.	VS	VS	EQ	VS	VN	ES	EQ	WK	EQ	EQ	EQ	ES
.	ES	ES	WK	WK	WN	WK	WK	ES	WK	WN	WK	EQ
.	VS	VN	VS	VN	VN	VS	VN	VN	AB	VN	WK	VS
.	VS	WK	ES	WK	WN	EQ	ES	EN	ES	EN	WK	ES
.	ES	VN	ES	WN	WN	WK	WN	EN	ES	EN	WK	WN
Es	VS	VS	EQ	VS	EQ	WN	WK	WN	WK	EN	ES	EN
	2	3	4	12	13	14	15	22	r

Fuente: adaptado de LUO, Shih-Tong., LIN, Cheng-Wei., DAI, Yuan-Fung., SHIUE, Yih-Chearing. The Evaluation Criteria of Recruiting Local Staffs for Taiwanese Enterprise in China. En: Journal of Testing and Evaluating. Vol. 42, No.1, (2014). p. 1-12.

➤ **Sistema difuso para priorizar los riesgos²²:** el método para priorizar los riesgos es fuzzy LINPRERA²³ (linguistic preference relations) que está basado en el método relaciones de preferencias difusas consistentes CFPR (consistent fuzzy preference relations) que permite usar variables lingüísticas para una serie de

²² HERRERA-VIDEAMA, F., HERRERA, F., CHICLANA, F., LUQUE, M. Some issues on consistency of fuzzy preference relations. En: European Journal of Operational Research. Vol. 154, (2004); p. 98-109

²³ WANG, Tien-Ching., CHEN, Yueh-Hsiang. Applying fuzzy linguistic preference relations to the improvement of consistency of fuzzy AHP. En: Information Sciences. Vol 178, (2008); p. 3755-3765.

criterios y evita la necesidad de revisar la consistencia del proceso de toma de decisiones. El procedimiento se describe a continuación y se realiza por bloques de categorías y riesgos de las categorías.

✓ Considerando la matriz de comparación de riesgos, se efectúa un promedio de las evaluaciones de los expertos de los riesgos en la parte superior de la matriz creando una matriz como se ilustra en la tabla 13.

$$p_{12} = \frac{VS + AN + \dots + ES + VS}{S},$$

en donde + representa la suma de números difusos.

Tabla 13. Promedio de las evaluaciones de los expertos- Matriz P

	R1	R2	R3	R4
R1	(0.50,0.50,0.50)	p_{12}		
R2		(0.50,0.50,0.50)	p_{23}	
R3			(0.50,0.50,0.50)	p_{34}
R4				(0.50,0.50,0.50)

Fuente: adaptado de LUO, Shih-Tong., LIN, Cheng-Wei., DAI, Yuan-Fung., SHIUE, Yih-Chearing. The Evaluation Criteria of Recruiting Local Staffs for Taiwanese Enterprise in China. En: Journal of Testing and Evaluating. Vol. 42, No.1, (2014). p. 1-12.

✓ Los valores restantes de la matriz se calculan empleando las ecuaciones de consistencia aditiva que son útiles porque mantiene el equilibrio entre las relaciones de conjuntos. Estas se muestran a continuación adaptadas para el manejo de los números difusos

$$p_{ij}^l + p_{ji}^u = p_{ij}^m + p_{ji}^m = p_{ij}^u + p_{ji}^l = 1$$

$$p_{ij}^l + p_{jk}^l + p_{ki}^u = p_{ij}^m + p_{jk}^m + p_{ki}^m = p_{ij}^u + p_{jk}^u + p_{ki}^l = \frac{3}{2} \quad \forall i < j < k$$

$$\begin{cases} p_{i(i+1)}^l + p_{(i+1)(i+2)}^l + \dots + p_{(j-1)j}^l + p_{ji}^u \\ p_{i(i+1)}^m + p_{(i+1)(i+2)}^m + \dots + p_{(j-1)j}^m + p_{ji}^m \\ p_{i(i+1)}^u + p_{(i+1)(i+2)}^u + \dots + p_{(j-1)j}^u + p_{ji}^l \end{cases} = \frac{j-i+1}{2}$$

Tabla 14. Matriz P antes de la transformación

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
R ₁	(0.50,0.50,0.50)	(0.58,0.68,0.77)	(0.59,0.78,0.97)	(0.60,0.90,1.19)
R ₂	(0.23,0.32,0.42)	(0.50,0.50,0.50)	(0.51,0.60,0.70)	(0.52,0.72,0.92)
R ₃	(0.03,0.22,0.42)	(0.30,0.40,0.50)	(0.50,0.50,0.50)	(0.52,0.62,0.72)
R ₄	(-0.19,0.11,0.40)	(0.09,0.28,0.48)	(0.29,0.39,0.49)	(0.50,0.50,0.50)

Fuente: adaptado de LUO, Shih-Tong., LIN, Cheng-Wei., DAI, Yuan-Fung., SHIUE, Yih-Chearing. The Evaluation Criteria of Recruiting Local Staffs for Taiwanese Enterprise in China. En: Journal of Testing and Evaluating. Vol. 42, N^o.1, (2014).

Aplicando la función de transformación para eliminar los valores por fuera del intervalo [0,1] a cada uno de los elementos de la matriz. Esta transformación se muestra en la tabla 15.

$$f: [-a, 1 + a] \rightarrow [1,0],$$

$$f(x) = \frac{x + a}{1 + 2a}.$$

Tabla 15. Matriz P después de la transformación

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
R ₁	(0.50,0.50,0.50)	(0.56,0.63,0.70)	(0.56,0.70,0.84)	(0.57,0.79,1.00)
R ₂	(0.30,0.37,0.44)	(0.50,0.50,0.50)	(0.51,0.61,0.70)	(0.51,0.66,0.80)
R ₃	(0.16,0.30,0.44)	(0.35,0.42,0.50)	(0.50,0.50,0.50)	(0.52,0.62,0.72)
R ₄	(0.00,0.21,0.43)	(0.20,0.34,0.49)	(0.34,0.42,0.49)	(0.50,0.50,0.50)

Fuente: adaptado de LUO, Shih-Tong., LIN, Cheng-Wei., DAI, Yuan-Fung., SHIUE, Yih-Chearing. The Evaluation Criteria of Recruiting Local Staffs for Taiwanese Enterprise in China. En: Journal of Testing and Evaluating. Vol. 42, N^o.1, (2014). p. 1-12.

✓ Realizada esta transformación, los valores consignados en la matriz permiten obtener los pesos de cada riesgo, utilizando el método de promedio vector columna que se describe a continuación:

$$R_{ij}^k = \frac{p'_{ij}}{p'_{1j} + p'_{2j} + \dots + p'_{nj}}, k = l, m, u,$$

cuando se busque el R_{ij} para el valor izquierdo l la suma en el denominador corresponde a la de los derechos u , para el valor del medio m la suma en el

denominador es la de los medios m y para el valor derecho u la suma en el denominador corresponde a los izquierdos l . Por ejemplo el valor de R_{11} tomando los datos de la tabla 15 corresponde a:

$$R_{11}^l = \frac{p_{11}^l}{p_{11}^u + p_{21}^u + p_{31}^u + p_{41}^u} = \frac{0.500}{0.500 + 0.442 + 0.438 + 0.427} = \frac{0.500}{1.807} = 0.277$$

$$R_{11}^m = \frac{p_{11}^m}{p_{11}^m + p_{21}^m + p_{31}^m + p_{41}^m} = \frac{0.500}{0.500 + 0.372 + 0.296 + 0.212} = \frac{0.500}{1.380} = 0.362$$

$$R_{11}^u = \frac{p_{11}^u}{p_{11}^l + p_{21}^l + p_{31}^l + p_{41}^l} = \frac{0.500}{0.500 + 0.303 + 0.157 + 0.000} = \frac{0.500}{0.960} = 0.521$$

$$R_{11} = (0.277, 0.362, 0.521)$$

Al final del ejercicio, solo queda un número difuso representando cada riesgo como lo muestra la siguiente formulación en donde n representa la cantidad de riesgos comparados con el riesgo i .

$$w_i' = \frac{1}{n}(R_{i1} + R_{i2} + \dots + R_{in}) = (w_i^l, w_i^m, w_i^u)$$

✓ Teniendo el número difuso para cada riesgo, se debe realizar la defusificación para conseguir el valor numérico que representa a cada riesgo. Para este caso se utilizará el método de α -corte²⁴. La ventaja de este método es que considera dos tipos de α ; uno que representa la preferencia (α) y otro la percepción del riesgo (λ) por el tomador de decisión. Cuando $\alpha=0$, significa que la incertidumbre es alta; para $\alpha=1$ la decisión es más estable; para $\lambda=0$ el tomador de la decisión es optimista; para $\lambda=1$ el tomador de decisión es pesimista. Cada uno de los $w_i^{k\alpha}$, $k = l, m, u$, obtenidos, representa el peso de cada riesgo en la totalidad del proyecto

$$w_i^{l\alpha} = (w_i^m - w_i^l) \times \alpha + w_i^l, w_i^{u\alpha} = (w_i^u - w_i^m) \times \alpha$$

²⁴MINGA BECERRA, Pedro V. MORA TERÁN, Galo R. Herramienta para la evaluación de perfiles de proyectos de investigación científica utilizando lógica difusa. Quito, 2008, p. 8-9. Tesis (Ingeniería de Sistemas Informáticos y de Computación). Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería de Sistemas.

$$(w_i^\alpha)^\lambda = \lambda \times w_i^{l\alpha} + (1 - \lambda) \times w_i^{u\alpha}, 0 \leq \lambda \leq 1, 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$w_i = \frac{(w_i^\alpha)^\lambda}{\sum_{i=1}^n (w_i^\alpha)^\lambda}$$

donde n representa la cantidad de riesgos o elementos comparados en la matriz P.

➤ **Listado de riesgos priorizados:** con cada uno de los w_i obtenidos por cada riesgo, se procede a crear un listado asignándole a cada riesgo su peso, para reconocer los riesgos con mayor prioridad de gestionar. En la tabla 16 se muestra un ejemplo de riesgos priorizados

Tabla 16. Riesgos priorizados

Descripción	Peso local	Puesto	Peso global	Puesto global
Gestión del Proyecto	0,456737	1		
Tiempo	0,279926	1	0,1278531	1
Costos	0,241434	3	0,1102722	3
Personal	0,198940	4	0,090863	4
Contratación	0,279698	2	0,1277487	2
Peligros Naturales	0,296430	2		
Tormentas	0,285280	1	0,0845658	5
Tifones	0,257479	2	0,0763246	6
Derrumbes	0,214978	4	0,0637261	10
Filtro de Aguas Subterráneas	0,24226	3	0,0718136	7
Logísticos	0,24683	3		
Proveedores	0,266253	2	0,0657199	9
Materias primas	0,207271	4	0,0511612	12
Transporte	0,270513	1	0,0667714	8
Cantidades	0,255960	3	0,0631792	11

Fuente: Módulo de evaluación de riesgos

3.3.4 Análisis cuantitativo de riesgos²⁵. Es el proceso de analizar numéricamente el efecto de los riesgos identificados sobre los objetivos del proyecto. El beneficio clave de este proceso es que por medio de un resultado total generado, se definen acciones para reducir la incertidumbre del proyecto. Para hacer este análisis, se emplea un sistema difuso tipo mamdani, descrito en la Sección 2.5.2 que está compuesto por tres variables de entrada que son la probabilidad de riesgo, la gravedad del riesgo y la consecuencia económica descritas en la Sección 3.3.1 que representarán las condiciones de riesgo, una base de conocimiento en donde están las reglas formadas por la combinación de las variables, para activar un resultado según las evaluaciones realizadas.

✓ **Evaluación de los riesgos:** un número determinado de expertos S realizan su evaluación de los riesgos r identificados, con respecto a las variables de entrada definidas con sus etiquetas lingüísticas en las tablas 5, 6 y 7. Estas evaluaciones son transformadas en un número difuso trapezoidal,

$$Eval_i^s = Etiqueta = (l, m, n, u), \forall i, \in \{1, \dots, r\}$$

$$\forall s \in \{1, \dots, S\}$$

Luego, se promedian las evaluaciones de los expertos por cada riesgo y categoría

$$PROMEVAL_i = \frac{\sum_{s=1}^S Eval_i^s}{S}, \forall i \in \{1, \dots, r\},$$

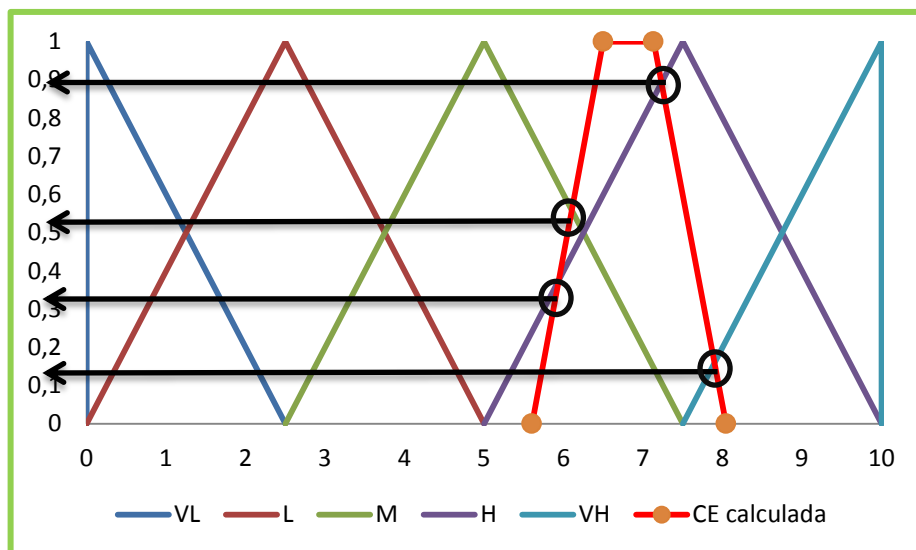
✓ **Cálculo de la variable de entrada total:** como cada riesgo tiene un peso asociado que lo relaciona con la totalidad de los riesgos, el resultado del promedio de las evaluaciones de las variables de entrada E es multiplicado por este peso y luego sumados estos resultados para conseguir un solo valor por cada variable e . Al emplear el peso asociado a cada riesgo, la evaluación se convierte completamente objetiva y acercada a la realidad de las condiciones de los riesgos

²⁵ PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos PMBOK, Quinta edición. EE.UU: PMI Publication. 2013, 333 p

$$VE_e = \sum_{i=1}^r PROMEVAL_i * w_i, \forall e \in \{1, \dots, E\}$$

✓ **Inferencia difusa:** el valor promedio correspondiente de las variables de entrada, efectúa el proceso de inferencia difusa que consiste en ingresar el número difuso trapezoidal generado, a su respectiva gráfica para observar y anotar el grado de pertenencia a las funciones de esta variable de entrada. Se toman aquellas con las que se intersecta. En caso de intersectarse dos o más veces con una misma función, se toma el que tenga mayor grado de pertenencia así como se muestran en la figura 27.

Figura 27. Inferencia difusa de variables de estado



Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

✓ **Reglas difusas:** la matriz de asociación fuzzy para evaluación de riesgos para la variable de control que es la Magnitud Total del Riesgos (*RM*) describe las reglas difusas en la forma *if-then*. Considerando la k_{th} regla de la matriz de asociación difusa FAM mostrada en la tabla 17, esta se representa con la siguiente premisa:

R^k : If VE_1 es $\mu_{VE_1}^k$ y VE_2 es $\mu_{VE_2}^k$ y ... y VE_e es $\mu_{VE_e}^k$ luego RM es μ_{RM}^k ,

en donde $\mu_{VE_e}^k$ representa las funciones de pertenencia, activadas en el punto anterior y μ_{RM}^k la función de pertenencia activada de la variable de salida según la combinación de las variables de entrada activadas. Por ejemplo:

RM^k : If CE es VL y GR es VH y PL es VL luego RM es Mi ,

siendo CE la consecuencia económica, GR la gravedad del riesgo y PL la probabilidad de riesgo.

Tabla 17. Matriz de asociación fuzzy FAM para evaluación de riesgos

Consecuencia Económica	Gravedad del riesgo	Probabilidad de Riesgo				
		VL	L	M	H	VH
Marginal(VL)	VH	Mi	Mi	Ma	C	C
	H	N	Mi	Mi	Ma	C
	M	N	N	Mi	Mi	Ma
	L	N	N	N	Mi	Mi
	VL	N	N	N	N	Mi
Importante (L)	VH	Mi	Mi	Ma	C	C
	H	N	Mi	Ma	C	C
	M	N	N	Mi	Ma	C
	L	N	N	Mi	Mi	Ma
	VL	N	N	N	Mi	Mi
Severo(M)	VH	Mi	Mi	Ma	C	C
	H	Mi	Mi	Ma	C	C
	M	N	Mi	Ma	Ma	C
	L	N	Mi	Ma	Ma	Ma
	VL	N	N	Mi	Ma	Ma
Grave(H)	VH	Mi	Ma	Ma	C	C
	H	Mi	Ma	Ma	C	C
	M	Mi	Ma	Ma	C	C
	L	N	Mi	Ma	Ma	C
	VL	N	N	Ma	Ma	Ma
Catastrófica(VH)	VH	Mi	Ma	C	C	C
	H	Mi	Ma	C	C	C
	M	Mi	Ma	Ma	C	C
	L	Mi	Mi	Ma	Ma	C
	VL	N	Mi	Ma	Ma	C

Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao, AN, Min, SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

Las partes en la premisa están conectadas con el operador “and”, esto implica que el valor RM^k que activará la variable de salida para este caso la Magnitud Total del Riesgo, puede obtenerse por medio de la operación de intersección difusa (mínimo). Esta implicación se expresa:

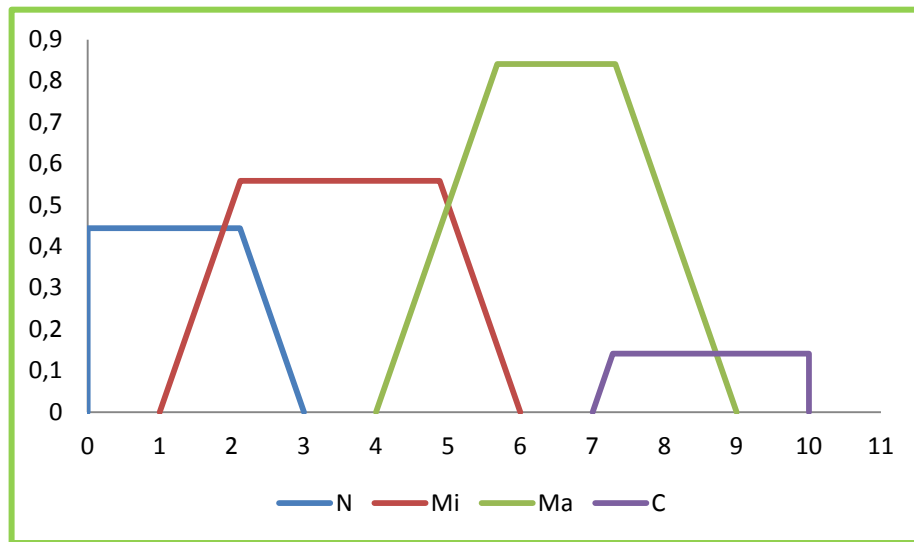
$$\mu_{RM^k}(x, y) = \mu_{VE1}^k(x_1) \wedge \mu_{VE2}^k(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{VEe}^k(x_e), k = 1, 2, \dots, K,$$

en donde x representan los grados de pertenencia de las funciones de pertenencia de las variables de entrada μ_{VEe}^k y y el valor mínimo de las x_e combinadas siendo $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_e \in X_e, x \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_e$ y $y \in U$, siendo (X_1, X_2, \dots, X_e) el universo en discurso de las variables de estado y U el universo de la variable de control. El valor de mayor relevancia en las premisas activadas está relacionado con la función de membresía concluyente y la salida que es una función de pertenencia truncada. La función de pertenencia truncada que representa la implicación de salida de cada regla es agregada en una sola función de membresía como se ilustra en la figura 28. La agregación que se realiza por medio del operador unión (máximo) se denota como:

$$\mu_R(x, y) = \bigvee_{k=1}^K \mu_{RM^k}(x, y)$$

en donde $\mu_R(x, y)$ es la función de membresía difusa de salida después de la agregación es decir la función que representa el conjunto de funciones de pertenencias truncadas en el paso anterior.

Figura 28. Funciones de pertenencia truncadas



Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao, AN, Min, SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

✓ **Defusificación:** la variable de salida del procedimiento anterior es un conjunto difuso, la defusificación se usa para convertir este resultado en un valor numérico que representará la Magnitud del riesgo (RM). El método del centro medio se empleará para la defusificación. El valor que representará al conjunto puede calcularse de la manera:

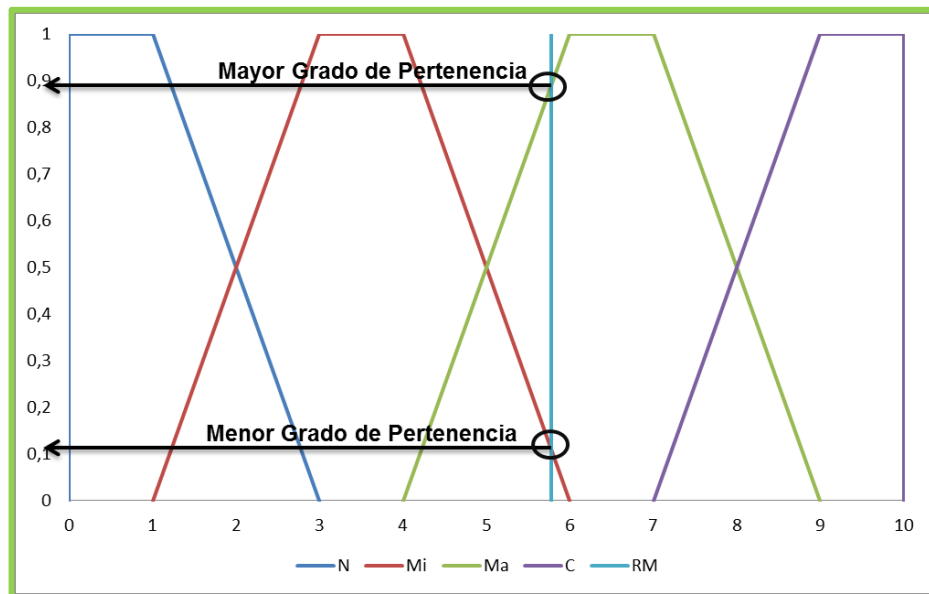
$$RM = \frac{(\sum_{i=1}^q Y_i \mu_{RM}(y_i))}{(\sum_{i=1}^q \mu_{RM}(y_i))}$$

en donde Y_i denota el centro del i – ésimo término del conjunto difuso q de RM y $\mu_{RM}(y_i)$ denota la función de pertenencia del i – ésimo término del conjunto difuso de RM.

El valor conseguido de Magnitud del Riesgo se ubica en la gráfica de sus etiquetas lingüísticas para conocer la función con que tenga mayor grado de pertenencia.

Para el ejemplo de la figura 29, la Magnitud total del riesgo tiene un grado de pertenencia del 10% para la función Menor y un grado de pertenencia del 90% para la función Mayor, es decir la Magnitud total del riesgo es Mayor, y según lo definido en la tabla 7 el riesgo debe reducirse si es razonablemente practicable de hacerlo.

Figura 29. Magnitud total del riesgo

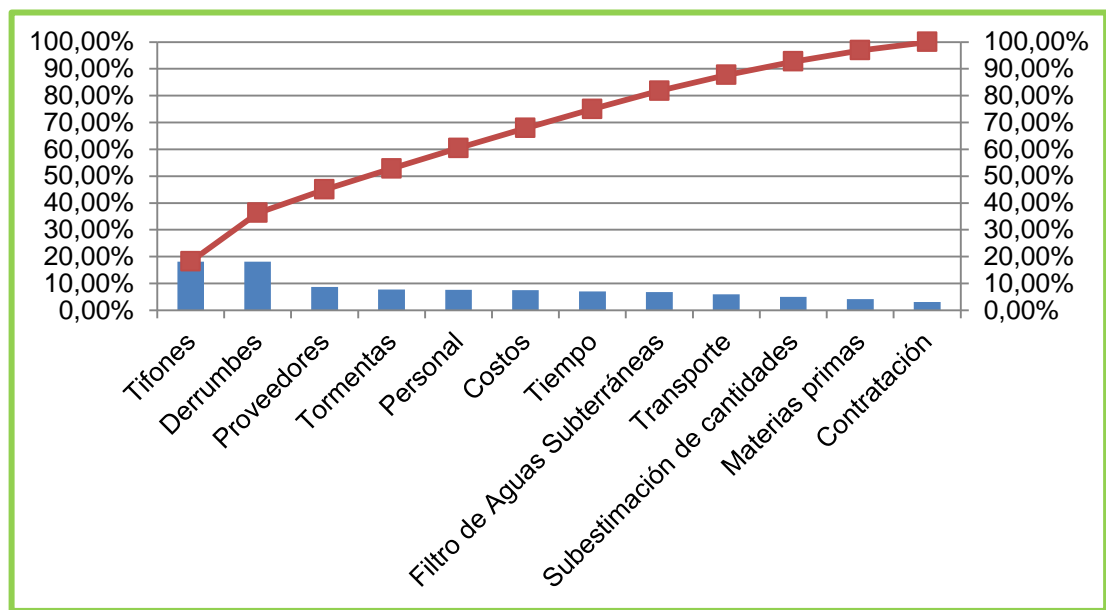


Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao, AN, Min, SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

➤ **Análisis de riesgos de mayor oportunidad o amenaza.** En este punto se busca examinar los riesgos de alto impacto, según las dos categorías establecidas una de amenazas y otra de oportunidades. Este análisis se efectúa en los casos en donde la Magnitud del Riesgo es diferente a *Negligente* porque es en este caso en donde no se toman acciones para mejorar las condiciones de los riesgos. Para efectuar el análisis de riesgos de mayor oportunidad o amenaza se llevará a cabo un diagrama de Pareto con el resultado de la priorización de riesgos.

✓ **Diagrama de Pareto²⁶**: consiste en un gráfico de barras similares al histograma que se conjuga con una ojiva o curva de tipo creciente y que representa en forma decreciente el grado de importancia o peso que tienen los diferentes factores que afectan a un proceso, operación o resultado. El análisis de Pareto es una técnica que permite separar los “Pocos Vitales” y los “Muchos Triviales”. La figura 30, muestra un ejemplo de Diagrama de Pareto

Figura 30. Diagrama de Pareto



²⁶<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4100002/lecciones/instrumentos/pareto.htm>

➤ **Matriz de administración del riesgo**²⁷: permite desarrollar respuestas y asignar responsables para el manejo de riesgos. Según los riesgos definidos como amenazas y oportunidades, se describe el plan a seguir ya sea para evitar, reducir, asumir, transferir u obtener mayor información para mejorar las condiciones del riesgo o sacar mayor provecho de este. En la tabla 18 se muestran las soluciones a los riesgos que se pueden presentar en el proyecto.

Tabla 18. Ejemplo de matriz de administración de riesgos

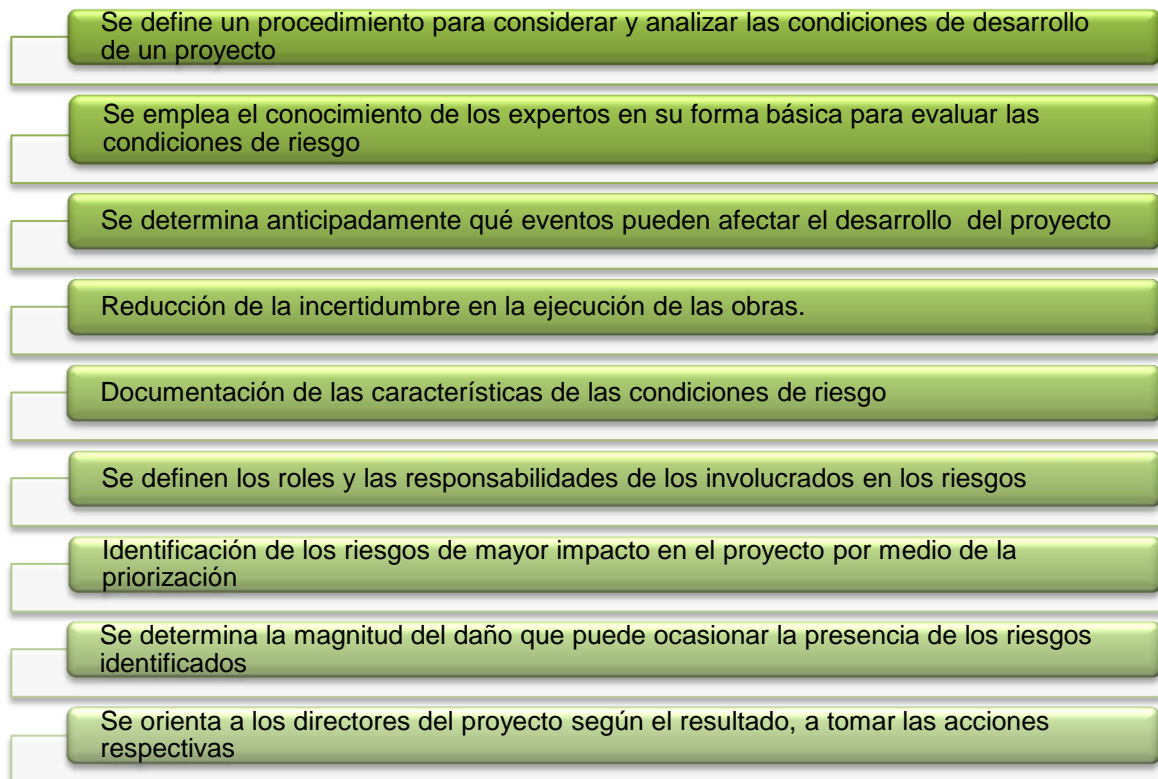
Riesgo	Posibles Respuestas	Plan de Acción	Responsable
Riesgo 1	Evitarlo: eliminar la causa, no aceptar el sistema o la opción propuesta	Acciones para eliminar o evitar las causas	Según la categoría
Riesgo 2	Reducirlo: tomar las medidas necesarias para controlar y continuamente reevaluar los riesgos, y desarrollar planes de contingencia aplicables al caso	Acciones para mitigar o reducir con un debido control para efectuar reevaluación de las condiciones de los riesgos	Según la categoría
Riesgo 3	Asumirlo: aceptar las consecuencias del riesgo, en caso de que ocurra.	Aceptar el riesgo y sus consecuencias	Según la categoría
Riesgo 4	Transferirlo: compartir los riesgos parcialmente con otros o transferirlos en su totalidad.	Asignación de responsables externos o internos para mitigar el impacto de los riesgos	Según la categoría
Riesgo 5	Obtener mayor información: Desarrollar pruebas y simulacros, para poder predecir los resultados	Implementación de acciones simuladas para ver la evolución del riesgo tomando estas acciones.	Según la categoría

Fuente: Adaptado de Yamal Chamaun. Administración Profesional de Proyectos

²⁷ CHAMAUN NICOLÁS, Juan Yamal. Administración Profesional de Proyectos. Mexico, D.F., McGraw-Hill, 2002

3.4 BENEFICIOS DE LAS HERRAMIENTAS FUNDAMENTADAS EN LÓGICA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS EN PROYECTOS DE CONTRUCCIÓN

Figura 31. Beneficios de la lógica difusa para evaluación de riesgos



4. CASO DE ESTUDIO

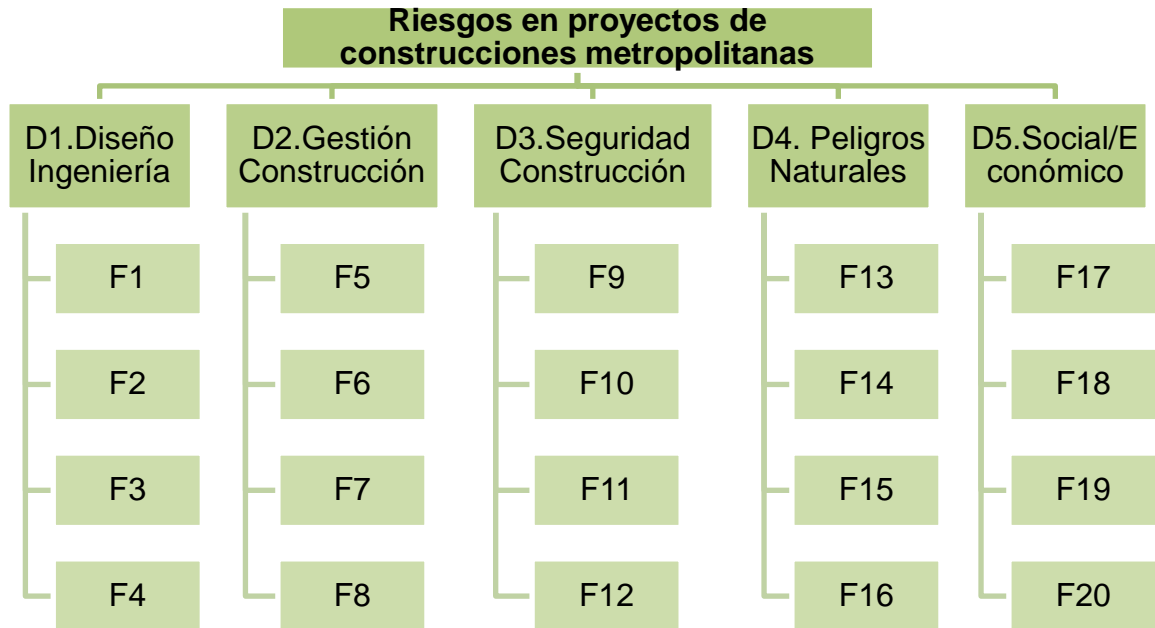
En la literatura se encuentran diversos artículos, que tratan la priorización de riesgos mediante lógica difusa, pero ninguno de estos hace una evaluación de la magnitud del riesgo. El caso de estudio que aplica la metodología de magnitud del riesgo, y el que posee la base de conocimiento para evaluar riesgos por mamdani, solo evalúa las condiciones de riesgo a nivel global del proyecto y no por cada riesgo. Por consiguiente se hace una adaptación a uno de los modelos estudiados en la revisión bibliográfica para poder demostrar la utilidad de este nuevo modelo de evaluación de riesgos.

4.1 PLANTEAMIENTO

El caso de estudio a emplear es el trabajado por KUO y LU en *“Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects”*²⁸. En este reunieron a 5 expertos con 15 años de experiencia en gestión de proyectos de construcción. Todos ellos para evaluar los riesgos en la construcción de un sistema de metro en Taipei. El alcance de este proyecto incluye la construcción de una estación subterránea, que requiere excavaciones profundas, con medidas de protección para la excavación y trabajos de drenaje. Los riesgos que se identificaron para este proyecto se ilustran en la estructura jerárquica mostrada en la figura 32 y descritos en la tabla 19.

²⁸ KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

Figura 32. Estructura de desglose del riesgo para el caso de estudio



Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

Tabla 19. Riesgos definidos en caso de estudio

Factor de Riesgo	Código	Descripción
Errores en el diseño	F1	Planos mal diseñados
Interfaces de conflicto	F2	Diseños del proyecto sin detalles
Estudios de construcción malos	F3	Estudios no describen la geología, tuberías e instalaciones existentes, condiciones de transporte.
Diseño e ingeniería inapropiada	F4	Distribuciones, materiales y estructuras mal definidos
Filtro de aguas subterráneas	F5	Presencia de aguas subterráneas que debilitan el terreno
Tifones	F6	Alta presencia de tifones en el área a construir
Lluvias fuertes	F7	Temporada alta de lluvias en el momento de la ejecución
Terremotos	F8	Terreno con antecedentes de movimientos telúricos
Protección insuficiente de edificios e instalaciones adyacentes	F9	Edificios e instalaciones aledañas pueden perjudicar la ejecución del proyecto
Seguridad de los trabajadores insuficiente	F10	Elementos de protección personal en malas condiciones
Control y gestión inefectiva del tráfico	F11	Alta congestión del tráfico por trabajos de la construcción
Protección ineficiente de ambientes alrededores	F12	Alrededores de la construcción afectan negativamente el desarrollo de la obra
Incremento de precio de materiales de construcción	F13	No consideración de cambios en los precios de materiales que desequilibran los fondos de la construcción
Protestas de los habitantes aledaños	F14	Inconformidad de los vecinos a la construcción
Interferencias políticas	F15	Problemas políticos que retrasan la ejecución del proyecto
Incremento en labores y sueldos de los empleados	F16	Aumento de trabajo y por consiguiente en el pago de horas hombre
Insuficiente experiencia y habilidades en trabajos de construcción	F17	Trabajadores del proyecto con poca o nada de experiencia en realización de obras
Plan de construcción inadecuado	F18	Planeación de trabajos mal realizada.
Retrasos en reubicación de tuberías e instalaciones	F19	Demoras en los trabajos de alistamiento del terreno
Suministro inestable de materiales críticos	F20	Los proveedores no cumplen con el suministro de material importante para la obra.

Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

Las variables lingüísticas empleadas para la comparación de los riesgos son las siguientes:

Tabla 20. Variables lingüísticas para comparación de los riesgos del caso de estudio

Variable lingüística	Valor
Menos absolutamente seria LA	1/9
Menos fuertemente seria LS	1/7
Menos justamente seria LF	1/5
Menos débilmente seria LW	1/3
Igualmente seria E	1
Débilmente seria W	3
Justamente seria F	5
Fuertemente seria S	7
Absolutamente seria A	9

Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

Como se puede evidenciar, las variables lingüísticas empleadas, a pesar de utilizar palabras, están directamente relacionadas con un valor numérico exacto que no contribuye a trabajar con la ambigüedad de los juicios de los expertos. Las evaluaciones realizadas por los expertos fueron las siguientes:

Tabla 21. Tabla de comparaciones de los expertos para el caso de estudio

	E1	E2	E3	E4	E5	
D1	E	E	W	LW	E	D2
D2	F	W	W	F	A	D3
D3	W	F	S	F	LF	D4
D4	W	W	E	F	LW	D5
F1	F	LW	S	LW	E	F2
F2	F	W	S	F	F	F3
F3	W	E	W	W	F	F4
F5	E	LF	F	S	LF	F6
F6	W	E	E	LW	F	F7
F7	W	F	S	E	W	F8
F9	LW	E	E	W	F	F10
F10	F	S	F	F	F	F11
F11	F	W	E	F	W	F12
F13	E	E	E	S	F	F14
F14	S	F	F	LF	LW	F15
F15	F	F	W	LW	LF	F16
F17	LW	E	E	W	F	F18
F18	F	W	F	F	F	F19
F19	F	E	W	F	W	F20

Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

Los resultados obtenidos mediante esta metodología son los siguientes:

Tabla 22. Priorización de riesgos obtenida mediante método convencional del caso de estudio

Código	Riesgo	Peso local	Puesto	Peso Global	Puesto
D1	Diseño de Ingeniería	0,384	1		
F1	Errores en el diseño	0,463	1	0,178	1
F2	Interfaces de conflicto	0,375	2	0,144	2
F3	Estudios de construcción malos	0,110	3	0,042	8
F4	Diseño e ingeniería inapropiada	0,051	4	0,020	11
D2	Peligros Naturales	0,384	2		
F5	Filtro de aguas subterráneas	0,354	1	0,136	3
F6	Tifones	0,331	2	0,127	4
F7	Lluvias fuertes	0,240	3	0,092	5
F8	Terremotos	0,076	4	0,029	10
D3	Seguridad en la construcción	0,126	3		
F9	Protección insuficiente de edificios e instalaciones adyacentes	0,466	1	0,059	6
F10	Seguridad de los trabajadores insuficiente	0,370	2	0,047	7
F11	Control y gestión inefectiva del tráfico	0,112	3	0,014	15
F12	Protección ineficiente de ambientes alrededores	0,052	4	0,007	17
D4	Social/Económico	0,063	4		
F13	Incremento de precio de materiales de construcción	0,498	1	0,032	9
F14	Protestas de los habitantes aledaños	0,244	2	0,016	14
F15	Interferencias políticas	0,150	3	0,009	16
F16	Incremento en labores y sueldos de los empleados	0,108	4	0,007	18
D5	Gestión de la Construcción	0,043	5		
F17	Insuficiente experiencia y habilidades en trabajos de construcción	0,454	1	0,019	12
F18	Plan de construcción inadecuado	0,365	2	0,016	13
F19	Retrasos en reubicación de tuberías e instalaciones	0,131	3	0,006	19
F20	Suministro inestable de materiales críticos	0,050	4	0,002	20

Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

4.2 PUESTA EN MARCHA DE LA HERRAMIENTA.

Para ajustar las variables lingüísticas empleadas en el caso de estudio con las del modelo actual (MA), se realizó una comparación entre las dos tablas y así poder correr el modelo con estas nuevas variables. Esta comparación se muestra en la tabla 23.

Tabla 23. Comparación de variables lingüísticas entre modelos

Variable lingüística	Variable lingüística (Modelo Actual)
Menos absolutamente seria LA	Absolutamente no importante AN
Menos fuertemente seria LS	Muy fuertemente no importante VN
Menos justamente seria LF	Esencialmente no importante EN
Menos débilmente seria LW	Débilmente no importante WN
Igualmente seria E	Igualmente importante EQ
Débilmente seria W	Débilmente importante WK
Justamente seria F	Esencialmente importante ES
Fuertemente seria S	Muy fuertemente importante VS
Absolutamente seria A	Absolutamente importante AB

Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

Las evaluaciones de los expertos empleando las variables del modelo actual se muestran en la tabla 23 y los resultados obtenidos mediante el modelo actual se muestran en la tabla 24.

Tabla 24. Evaluación de los expertos empleando las variables del modelo actual

	E1	E2	E3	E4	E5	
D1	EQ	EQ	WK	WN	EQ	D2
D2	ES	WK	WK	ES	AB	D3
D3	WK	ES	VS	ES	EN	D4
D4	WK	WK	EQ	ES	WN	D5
F1	ES	WN	VS	WN	EQ	F2
F2	ES	WK	VS	ES	ES	F3
F3	WK	EQ	WK	WK	ES	F4
F5	EQ	EN	ES	VS	EN	F6
F6	WK	EQ	EQ	WN	ES	F7
F7	WK	ES	VS	EQ	WK	F8
F9	WN	EQ	EQ	WK	ES	F10
F10	ES	VS	ES	ES	ES	F11
F11	ES	WK	EQ	ES	WK	F12
F13	EQ	EQ	EQ	VS	ES	F14
F14	VS	ES	ES	EN	WN	F15
F15	ES	ES	WK	WN	EN	F16
F17	WN	EQ	EQ	WK	ES	F18
F18	ES	WK	ES	ES	ES	F19
F19	ES	EQ	WK	ES	WK	F20

Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

Tabla 25. Priorización de riesgos obtenida mediante método actual del caso de estudio

Código	Riesgo	Peso local	Puesto	Peso Global	Puesto
D1	Diseño de Ingeniería	0,253	2		
F1	Errores en el diseño	0,321	1	0,081	1
F2	Interfaces de conflicto	0,301	2	0,076	2
F3	Estudios de construcción malos	0,214	3	0,054	8
F4	Diseño e ingeniería inapropiada	0,164	4	0,042	11
D2	Peligros Naturales	0,257	1		
F5	Filtro de aguas subterráneas	0,286	1	0,074	3
F6	Tifones	0,282	2	0,073	4
F7	Lluvias fuertes	0,259	3	0,067	5
F8	Terremotos	0,173	4	0,044	10
D3	Seguridad en la construcción	0,196	3		
F9	Protección insuficiente de edificios e instalaciones adyacentes	0,319	1	0,062	6
F10	Seguridad de los trabajadores insuficiente	0,307	2	0,060	7
F11	Control y gestión inefectiva del tráfico	0,215	3	0,042	15
F12	Protección ineficiente de ambientes alrededores	0,158	4	0,031	17
D4	Social/Económico	0,159	4		
F13	Incremento de precio de materiales de construcción	0,315	1	0,050	9
F14	Protestas de los habitantes aledaños	0,268	2	0,042	14
F15	Interferencias políticas	0,224	3	0,035	16
F16	Incremento en labores y sueldos de los empleados	0,194	4	0,031	18
D5	Gestión de la Construcción	0,136	5		
F17	Insuficiente experiencia y habilidades en trabajos de construcción	0,314	1	0,043	12
F18	Plan de construcción inadecuado	0,302	2	0,041	13
F19	Retrasos en reubicación de tuberías e instalaciones	0,222	3	0,030	19
F20	Suministro inestable de materiales críticos	0,162	4	0,022	20

Fuente: Módulo de evaluación de riesgos

Para seguir con el modelo actual y hacer el cálculo de la Magnitud total del riesgo que no efectúan en el caso de estudio, se tomarán los datos de probabilidad de ocurrencia recolectados en el caso de estudio y se ajustarán a las variables lingüísticas del modelo actual para evaluar la Magnitud del riesgo.

Tabla 26. Comparación de variables lingüísticas de probabilidad de ocurrencia

Variable lingüística caso de estudio	Variable lingüística (MA)
Virtualmente cierto VC	Ocurrencia es casi inevitable VH
Extremadamente probable EL	Muy probable que ocurra H
Muy probable VL	Muy probable que ocurra H
Probable L	Probable que ocurra M
Más probable que no LN	Ocurrencia es poco probable L
Muy poco probable VU	Ocurrencia es poco probable L
Extremadamente improbable EU	Muy poco probable que suceda VL

Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

Este ajuste al modelo actual se muestra en la tabla 27

Tabla 27. Evaluaciones de los expertos de la probabilidad de ocurrencia

	E1	E2	E3	E4	E5
F1	L	L	L	M	L
F2	L	L	L	L	L
F3	L	L	L	L	L
F4	M	M	L	L	L
F5	M	L	M	M	M
F6	L	L	M	L	M
F7	H	H	H	H	M
F8	L	L	M	M	L
F9	L	L	L	L	L
F10	M	M	M	L	L
F11	M	L	L	L	M
F12	L	M	L	L	M
F13	M	M	M	L	L
F14	M	L	L	M	M
F15	H	M	M	L	L
F16	H	H	H	H	H
F17	M	M	H	L	H
F18	M	H	H	H	H
F19	H	H	H	H	L
F20	H	L	L	L	L

Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

El cálculo del número difuso que representa la variable de entrada total para la probabilidad de riesgo se muestra en la tabla 28

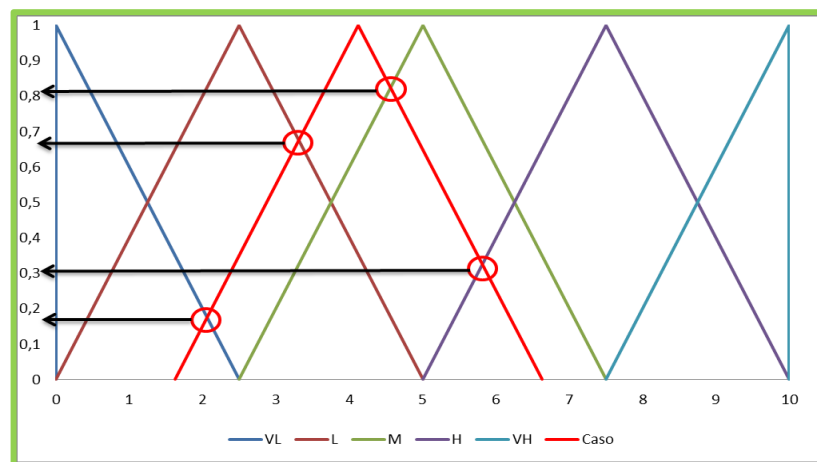
Tabla 28. Cálculo de la variable de entrada probabilidad del riesgo

	Prom. Exp	Peso Global	Prom. Pond
F1	(0,5;3;3;5,5)	0,081	(0,041;0,243;0,243;0,446)
F2	(0;2,5;2,5;5)	0,076	(0,000;0,190;0,190;0,380)
F3	(0;2,5;2,5;5)	0,054	(0,000;0,135;0,135;0,271)
F4	(1;3,5;3,5;6)	0,042	(0,042;0,145;0,145;0,249)
F5	(2;4,5;4,5;7)	0,074	(0,147;0,331;0,331;0,515)
F6	(1;3,5;3,5;6)	0,073	(0,073;0,254;0,254;0,436)
F7	(4,5;7;7;9,5)	0,067	(0,300;0,467;0,467;0,633)
F8	(1;3,5;3,5;6)	0,044	(0,044;0,155;0,155;0,266)
F9	(0;2,5;2,5;5)	0,062	(0,000;0,156;0,156;0,312)
F10	(1,5;4;4;6,5)	0,060	(0,090;0,241;0,241;0,391)
F11	(1;3,5;3,5;6)	0,042	(0,042;0,147;0,147;0,253)
F12	(1;3,5;3,5;6)	0,031	(0,031;0,109;0,109;0,186)
F13	(1,5;4;4;6,5)	0,050	(0,075;0,200;0,200;0,324)
F14	(1,5;4;4;6,5)	0,042	(0,064;0,170;0,170;0,276)
F15	(2;4,5;4,5;7)	0,035	(0,071;0,160;0,160;0,248)
F16	(5;7,5;7,5;10)	0,031	(0,153;0,230;0,230;0,307)
F17	(3;5,5;5,5;8)	0,043	(0,128;0,234;0,234;0,341)
F18	(4,5;7;7;9,5)	0,041	(0,184;0,287;0,287;0,389)
F19	(4;6,5;6,5;9)	0,030	(0,120;0,196;0,196;0,271)
F20	(1;3,5;3,5;6)	0,020	(0,022;0,077;0,077;0,132)
			(1,627;4,127;4,127;6,627)

Fuente: Módulo de evaluación de riesgos

$$Probabilidad\ de\ riesgo = (1,627; 4,127; 4,127; 6,627)$$

Figura 33. Inferencia difusa para variable de entrada probabilidad de riesgo



$$Probabilidad\ de\ riesgo = \{(VL\ 0,1746), (L\ 0,6746), (M\ 0,8254), (H\ 0,3254)\}$$

De igual forma para las demás variables de entrada o estado. Para evaluar todo el modelo, se consideró la misma evaluación para las demás variables de estado.

Las reglas activadas son las mostradas en la tabla 29

Tabla 29. Reglas activadas para caso de estudio modelo actual

CE	RS	RL			
		VL 0,1746	L 0,6746	M 0,8254	H 0,3254
Marginal(VL) 0,1746	H 0,3254	N 0,1746	Mi 0,1746	Mi 0,1746	Ma 0,1746
	M 0,8254	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746	Mi 0,1746
	L 0,6746	N 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746
	VL 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	N 0,1746
Importante (L) 0,6746	H 0,3254	N 0,1746	Mi 0,3254	Ma 0,3254	C 0,3254
	M 0,8254	N 0,1746	N 0,6746	Mi 0,6746	Ma 0,3254
	L 0,6746	N 0,1746	N 0,6746	Mi 0,6746	Mi 0,3254
	VL 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746
Severo(M) 0,8254	H 0,3254	Mi 0,1746	Mi 0,3254	Ma 0,3254	C 0,3254
	M 0,8254	N 0,1746	Mi 0,6746	Ma 0,8254	Ma 0,3254
	L 0,6746	N 0,1746	Mi 0,6746	Ma 0,6746	Ma 0,3254
	VL 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746	Ma 0,1746
Grave(H) 0,3254	H 0,3254	Mi 0,1746	Ma 0,3254	Ma 0,3254	C 0,3254
	M 0,8254	Mi 0,1746	Ma 0,3254	Ma 0,3254	C 0,3254
	L 0,6746	N 0,1746	Mi 0,3254	Ma 0,3254	Ma 0,3254
	VL 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746	Ma 0,3254

Fuente: KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

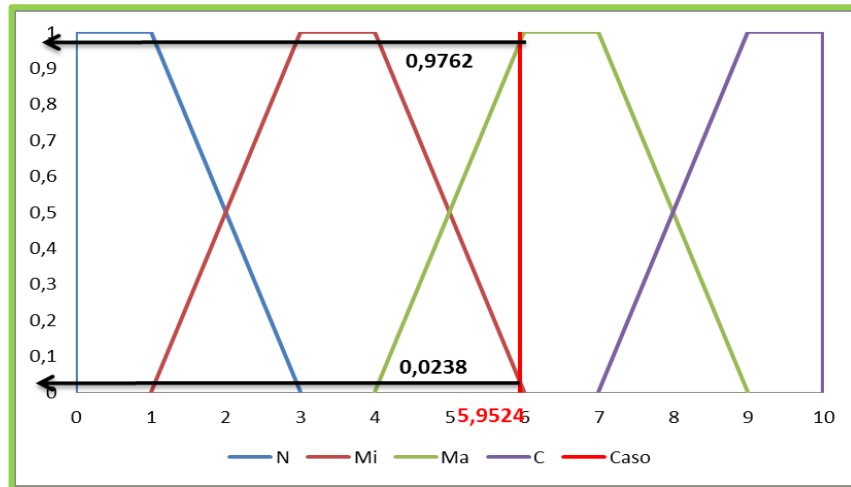
La Magnitud del riesgo por método de centro medio es igual a

$$RM = \frac{1 * 0,1746 + 4 * 0,6746 + 7 * 0,8254 + 10 * 0,3253}{0,1746 + 0,6746 + 0,8254 + 0,3254}$$

$$RM = 5,9524$$

Este valor se ingresa en la gráfica de Magnitud del riesgo para conocer el grado de pertenencia a las funciones de pertenencia, como se muestra en la figura 31.

Figura 34. Magnitud del riesgo para caso de estudio



Fuente: adaptado de ZENG, Jiahao,. AN, Min,. SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

Según los resultados que muestra la gráfica, la Magnitud del riesgo para este caso es Mayor y según la tabla 7 “*el riesgo debe reducirse si es razonablemente practicable hacerlo*”.

4.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

El método actual de priorización de riesgos reduce a casi cero la posibilidad de que dos riesgos tengan el mismo peso, pues este emplea variables lingüísticas con un dominio amplio y no con un valor numérico exacto. En el caso del modelo inicial los riesgos de plan de construcción inadecuado y protestas de los habitantes aledaños poseen el mismo peso, creando confusión al no definir qué riesgo es más importante. De igual manera sucede para los riesgos de incremento en las labores y sueldos de los empleados y protección ineficiente de ambientes alrededores. La evaluación de la Magnitud total del riesgo, contribuye a conocer el estado del proyecto con los riesgos que están presentes en este. Para este caso, la Magnitud del riesgo es Mayor, lo que implica tomar acciones para reducir la Magnitud a Menor o Negligente, esto por medio del análisis de los riesgos de mayor peso en la priorización, estudiando qué gestión se puede llevar a cabo para reducir el impacto que generan en la ejecución del proyecto.

5. MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA QUE SOPORTA LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

La preparación del Manual de Procedimiento se destina a las empresas constructoras, para facilitar el proceso de planificación de gestión del riesgo con el propósito de transmitir e incentivar a incorporar el estudio de riesgos en los proyectos a desarrollar y así lograr la culturización de esta área de conocimiento que ha sido poco considerada en la ejecución de las obras civiles y edificaciones.

5.1 ¿QUÉ ES UN MANUAL?

Es un documento que sirve como medio de comunicación y coordinación que permiten registrar y transmitir en forma ordenada y sistemática, información de una organización (antecedentes, legislación, estructura, objetivos, políticas, sistemas, procedimiento, etc.). Así como las instrucciones y lineamientos que se consideren necesarios para el mejor desempeño de sus tareas²⁰.

“El manual presenta sistemas y técnicas específicas. Señala el procedimiento a seguir para lograr el trabajo de todo el personal de oficina o de cualquier otro grupo de trabajo que desempeña responsabilidades específicas. Un procedimiento por escrito significa establecer debidamente un método estándar para ejecutar algún trabajo.” **Graham Kellog**

5.2 OBJETIVOS DEL MANUAL

➤ Contribuir con el desarrollo de un procedimiento estándar para la correcta realización de las labores de gerenciamiento de riesgos en proyectos de construcción.

- Incentivar a efectuar estudios y análisis de riesgos, por medio de una técnica sencilla de evaluación de riesgos.
- Evitar consecuencias negativas en la ejecución y entrega de la obra por falta de administración del riesgo.
- Realizar un análisis objetivo de las condiciones de riesgo, eliminando las corazonadas o empirismo.
- Guiar al desarrollo de resultados exactos para efectuar acciones de control y mejora.
- Contribuir una base para el mejoramiento de los procesos de planeación en dirección de proyectos.
- Reducir la incertidumbre en la ejecución del proyecto, por ser una fuente permanente de información sobre las condiciones de las actividades y procesos.
-

5.3 IMPORTANCIA DEL MANUAL

Este elemento es considerado como una forma eficaz y de soporte para la toma de decisiones pues facilitan el conocimiento y la orientación que requieren los directores de proyectos, para realizar mejoramiento en los procesos de planeación que son aquellos en donde la industria colombiana tiene mayor falencia.

Son una forma dinámica que está en constante cambio por las nuevas necesidades que se van generando o al avanzar o mejorar los procesos sobre todo en proyectos de construcción en donde cada uno tiene requerimientos distintos.

5.4 CREACIÓN DEL MANUAL “HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA COMO SOPORTE A LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS PARA PROYECTOS, SOMETIDA A LAS PAUTAS DE DIRECCIÓN DE PROYECTOS PMI”

5.4.1 Introducción: la idea de crear este manual es servir de soporte al equipo de dirección de proyectos en empresas de la industria de la construcción, para que incluyan el estudio de riesgos en sus proyectos, para que se reduzca la incertidumbre en la ejecución de las obras y así lograr que cubra las necesidades que los clientes exigen. Esto por medio de una metodología sencilla que guía de forma práctica a efectuar un análisis de riesgo. En el Anexo A, se encuentra la descripción detallada del Manual para el desarrollo de planificación de la gestión de riesgos, utilizando la herramienta computacional ubicada en el anexo B.

5.4.2 ¿Para quién va dirigido este manual?: este manual va dirigido a los directores de proyectos o empresarios que deseen iniciar actividades relacionados con el gerenciamiento de riesgos en proyectos, en especial si se trata de proyectos de construcción. Este manual es realizado teniendo en cuenta que las personas que han efectuado proyectos exitosos, no son expertos en esta área de conocimiento.

Permite a las personas sin una formación en este proceso, que conozcan y se introduzcan en estos conceptos y aquellos que tengan algo de formación, contribuirá al desarrollo de un enfoque sistemático para el correcto análisis de riesgos.

5.4.3 Formato y diseño del manual: el manual de planificación de riesgos se tituló **“HERRAMIENTA BASADA EN LÓGICA DIFUSA PARA SOPORTE A LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE RIESGOS PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN, SOMETIDA A LAS PAUTAS DE DIRECCIÓN DE PROYECTOS PMI”**, pues tiene como componentes una herramienta computacional denominada **“MÓDULO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS”** que soportará las operaciones de lógica difusa y el soporte documental que describe el procedimiento ideal para darle las entradas adecuadas a la herramienta computacional para que genere las salidas correctas y así tomar las acciones ideales para el caso

Figura 35. Portada del manual

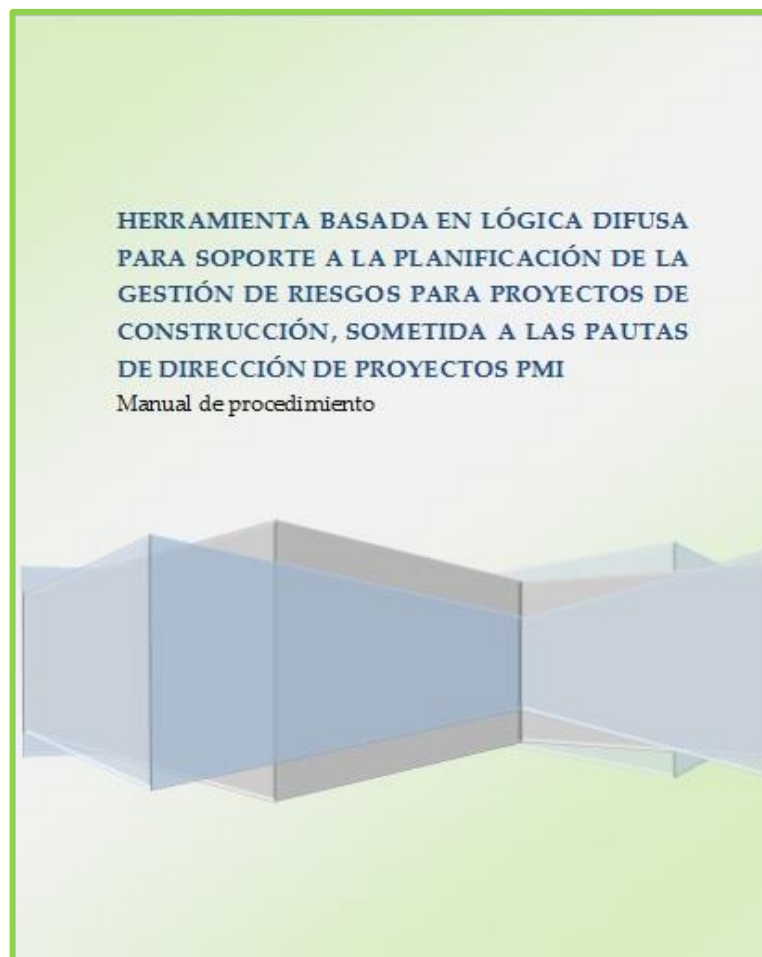
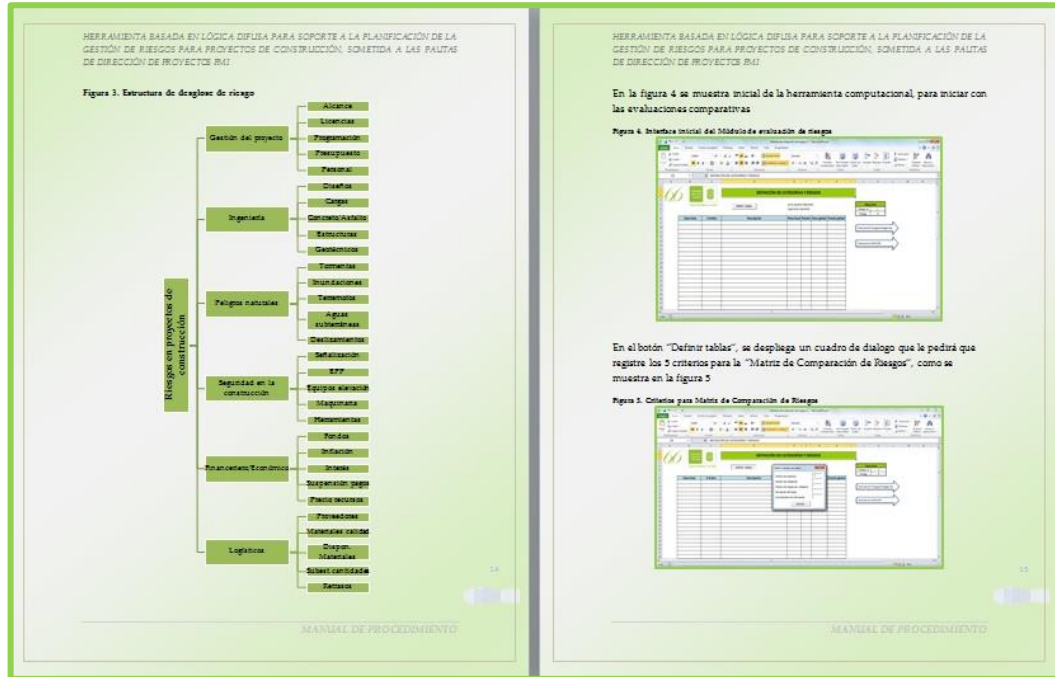


Figura 36. Formato del manual



6. CONCLUSIONES

- Un novedoso modelo para la planificación de la gestión de los riesgos en proyectos de construcción ha sido creado para apoyar a los directores de proyecto en el análisis de las condiciones o estados que rodean las actividades y/o procesos involucrados en el desarrollo del proyecto.
- La consideración del juicio de expertos empleando un lenguaje de evaluación más adaptado a su forma de toma de decisiones, es decir mediante su lenguaje cotidiano, facilita el de análisis del riesgo y anima a los expertos a realizar el proceso de planificación de la gestión de los riesgos.
- La realización de la herramienta basada en lógica difusa sometida a los lineamientos del PMI, proporciona confianza a los directores de proyectos, por ser estos estándares los que han mostrado éxito por los proyectos ejecutados bajo estos lineamientos.
- El desarrollo del “*Modulo de evaluación de riesgos*”, facilitará el proceso de análisis cualitativo y cuantitativo del riesgo, para que los expertos y directores del proyecto, dirijan sus esfuerzos en las acciones a tomar según los resultados arrojados por la herramienta computacional y así lograr una adecuada planificación de gestión del riesgo.
- El soporte documental que se desarrolló a modo de Manual, es el vínculo entre la metodología desarrollada y el Módulo de evaluación de riesgos para que se puedan crear las entradas adecuadas considerando la evaluación de los expertos, para que la herramienta computacional genere los resultados para que la planificación a la gestión del riesgo sea lo más cercana a la realidad posible.

7. RECOMENDACIONES

- Los resultados de la herramienta deben ser validados con un caso de estudio de proyecto de construcción colombiana, para así mostrar la importancia de realizar análisis del riesgo y culturizar a las constructoras en el proceso de planificación de gestión del riesgo.

- La base de conocimiento empleada para el análisis cuantitativo del riesgo deber ser actualizada mediante la realización de encuestas u otro medio de recopilación de información basada en juicio de expertos que estén más cercanos a la realidad colombiana de ejecución de proyectos de construcción.

- En la literatura existen diversos artículos fundamentos en lógica difusa que estudian la asignación de roles y responsabilidades para los riesgos identificados que sería ideal incluir en la herramienta actual propuesta.

- La realización de una investigación de riesgos en proyectos de construcción colombiana empleando las diferentes técnicas de recopilación de información es ideal para completar el estudio de riesgos identificados realizados en este proyecto de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- BONISSONE, Piero. RUSPINI, Enrique. PEDRYCZ, Witold. Handbook of fuzzy computation
- CHAMAUN NICOLÁS, Juan Yamal. Administración Profesional de Proyectos. Mexico, D.F., McGraw-Hill, 2002.
- HERRERA-VIEDMA, F., HERRERA, F., CHICLANA, F., LUQUE, M. Some issues on consistency of fuzzy preference relations. En: European Journal of Operational Research. Vol. 154, (2004); p. 98-109
- IDRUS, Arazi,. FADHIL NURUDDIN, Muhd,. ROHMAN, M.Arif. Development of project cost contingency estimation model using risk analysis and fuzzy expert system. En: Expert System with Applications. Vol 38, (2011); p. 1501-1508.
- KHAZAENI, Garshasb., Khanzadi, Mostafa., Afshar, Abas. Fuzzy adaptive decision making model for selection balanced risk allocation. En: International Journal of Project Management. Vol. 30, (2012); p. 511-522.
- KLIR, George Y YUAN, Bo. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic.
- KUO, Yao-Chen., LU, Shig-Tong. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. En: International Journal of Project Management. Vol 31, (2013); p. 602-614.

- LUO, Shih-Tong., LIN, Cheng-Wei., DAI, Yuan-Fung., SHIUE, Yih-Chearing. The Evaluation Criteria of Recruiting Local Staffs for Taiwanese Enterprise in China. En: Journal of Testing and Evaluating. Vol. 42, No.1(2014);p. 1-12.

- MATOS ZAMBRANO, Luis Ernesto. En Mejores prácticas en la Administración de Proyectos. Editorial LiderDeProyecto [en línea].<
http://www.liderdeproyecto.com/noticias/pmi_mexico_mejores_practicas_en_administracion_de_riesgos.html> [citado el 17 de Mayo del 2014].

- MINGA BECERRA, Pedro V. MORA TERÁN, Galo R. Herramienta para la evaluación de perfiles de proyectos de investigación científica utilizando lógica difusa. Quito, 2008, p. 8-9. Tesis (Ingeniería de Sistemas Informáticos y de Computación). Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería de Sistemas.

- NIETO-MOROTE, A., RUZ-VLA, F. A fuzzy approach to construction Project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol. 29, (2011); p. 220-231.

- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Fundamentos de la Dirección de Proyectos. Quinta Edición. Pensilvania: PMI Publications, 2013.

- REZAKHANI, Pejman. Classifying key risk factors in construction projects. Disponible en: <http://www.ce.tuiasi.ro/~bipcons/Archive/292.pdf>.

- RIEBELING, Claudia. En: Investigación Project Management Institute. México: Universidad Autónoma de México. 2009. Disponible en: http://webche.googleusercontent.com/search?q=cache:byZqSGxjw6EJ:rigel.fca.unam.mx/~li406081049/gestion_de_la_informacion/PMBOK.doc+resumen+pmbok+en+espa%C3%B1ol&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=co [citado el 14 de Febrero del 2014]14/02/2014).

- SEGUROS MAPFRE. Manual sobre riesgos en la construcción, daños a la obra y pérdida a la obra y pérdida de beneficios anticipada (ALOP). Disponible en: <http://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/mapfrere/fichero/es/Manual-Riesgos-Construccion-ALOP.pdf>

- WANG, Shou Qing. MOHAMMED, Fadhil Dulami. MUKAMMAD, Yousuf Aguria. En. Construction Management and Economics. Vol. 22, (2004); p. 237-252

- TIAN, J., YAN, Z.F., Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Risk Assessment to General-assembling of Satellite. En: Journal of Applied Research and Technology. Vol. 11, (2013); p. 568-577.

- UNIVERSIDAD DE PIURA. Lógica difusa y sistemas de control. Disponible en: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf

- WANG, Tien-Ching., CHEN, Yueh-Hsiang. Applying fuzzy linguistic preference relations to the improvement of consistency of fuzzy AHP. En: Information Sciences. Vol 178, (2008); p. 3755-3765.

- ZENG, Jiahao., AN, Min., SMITH, Nigel John. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. En: International Journal of Project Management. Vol 25, (2007); p. 589-600.

ANEXOS

ANEXO A- MANUAL DE PROCEDIMIENTO

Desarrollo de una herramienta basada en lógica difusa que soporta la planificación de la gestión de riesgos para proyectos de construcción, sometida a la pauta de dirección de proyectos PMI

Manual de procedimiento

Desarrollo de una herramienta basada en lógica difusa que soporta la planificación de la gestión de riesgos para proyectos de construcción, sometida a la pauta de dirección de proyectos PMI

Manual de procedimiento

Realizado por:

ANNY PAULINE MÁSMELA FUENTES

Dirigido por:

Msc. JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ

Codirigido por:

Msc. EDWIN ALBERTO GARAVITO HERNÁNDEZ

PRESENTACIÓN

La generación de nuevos métodos para mejorar los resultados en las actividades y proyectos que realiza una compañía, se han venido desarrollando por medio de laboratorios y trabajos de investigación. El inconveniente que se presenta con este tipo de trabajos, es que su procedimiento se encuentra resumido en un artículo, y este no le permite a los empresarios conocer a detalle los pasos a seguir para poder aplicar la metodología planteada en sus proyectos y así lograr el desempeño que se desea en sus operaciones.

Considerando lo mencionado, se decidió crear un manual de procedimiento para explicar el paso a paso de la herramienta basada en lógica difusa para la planificación de la gestión de riesgos en proyectos de construcción bajo los lineamientos del PMI, para tener un soporte documental que pueda guiar a los interesados en la correcta elaboración de la planificación de gestión de riesgos.

Por medio de este manual, la metodología creada se vuelve confiable, puesto que permite desarrollar la planificación de gestión de riesgos de una manera organizada y estandarizada y se vuelve un instrumento aliado para el desarrollo de los proyectos.

La estructura de este manual, sigue los cuatro primeros elementos de la planificación de gestión de riesgos que presenta el PMBOK®, explicando las entradas que se deben ingresar para que las herramientas se activen y así las salidas de los elementos se generen con los resultados pertinentes para su posterior análisis y propuesta de acciones.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. PLANIFICAR LA GESTIÓN DE LOS RIESGOS

- 1.1 DEFINICIÓN
- 1.2 PLAN DE GESTIÓN DE RIESGOS

CAPÍTULO 2. IDENTIFICAR LOS RIESGOS

- 2.1 DEFINICIÓN
- 2.2 REGISTRO DE RIESGOS

CAPÍTULO 3. REALIZAR EL ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS RIESGOS

- 3.1 DEFINICIÓN
- 3.2 ESTRUCTURA DE DESGLOSE DE RIESGOS
- 3.3 MATRIZ DE COMPARACIÓN DE RIESGOS POR PARTE DE LOS EXPERTOS
- 3.4 LISTADO DE RIESGOS PRIORIZADOS

CAPÍTULO 4. REALIZAR EL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS RIESGOS

- 4.1 DEFINICIÓN
- 4.2 REGISTRO DE RIESGOS
- 4.3 MATRIZ DE CONDICIONES DEL RIESGO
- 4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 1. PLANIFICAR LA GESTIÓN DE LOS RIESGOS

1.1 DEFINICIÓN: es el proceso que establece las actividades de gestión de riesgos de un proyecto. Define los procedimientos con sus responsables, recursos necesarios y frecuencia con que se llevará a cabo los procesos de gestión de riesgos a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

1.2 PLAN DE GESTIÓN DE RIESGOS: documento que describe los involucrados con sus responsabilidades y los elementos que intervendrán para efectuar el análisis de riesgos. Se deben definir:

✚ **Evaluadores** que deben ser expertos en las áreas en que se categoricen los riesgos, pues se necesita de juicios completamente objetivos para la clasificación que se defina. Para este caso y según diversas investigaciones realizadas, se recomienda, especialistas en las siguientes áreas:

- **Gerente de Proyecto:** profesional(es) en ingeniería, administración o arquitectura, preferiblemente con PMP con experiencia en gerenciamiento de proyectos de obras de construcción.
- **Ingeniero de Obra:** profesional(es) en ingeniería o arquitectura o similares con experiencia en desarrollo y control de obras civiles.
- **Ingeniero de suelos:** profesional(es) en ingeniería de suelos, geólogo o carreras afines, con experiencia en estudio de suelos y estructuras.
- **Ingeniero ambiental:** profesional(es) en ingeniería ambiental o afines, con experiencia en estudio y control de contaminación ambiental en el desarrollo de las obras.
- **Profesional en seguridad y salud ocupacional:** profesional SYSO con experiencia en prevención de accidentes laborales. Con certificaciones en OHSAS 18.000 y 18.001.

- **Profesional en finanzas y economía:** profesional en ingeniería industrial, financiera, administración de empresa, economía y afines con experiencia en manejo de recursos económicos y financieros en proyectos de construcción.
- **Profesional en logística:** profesional en ingeniería industrial, logística o afines con experiencia en gestión de la cadena de suministro de obras de construcción.
- **Profesional de procesos:** profesional en ingeniería de producción, civil, industrial o afines con experiencia en programación y control de procesos en proyectos de construcción.

✚ **Categorías de riesgos** que es la clasificación que se le dará a todos los riesgos identificados. Esta clasificación es basada en diversas investigaciones realizadas, en donde ordenan los riesgos, según características comunes que se ajustan a una categoría en específico. Estas categorías son:

- **Gestión del proyecto**
- **Ingeniería**
- **Peligros Naturales**
- **Seguridad en la construcción**
- **Sociales**
- **Financieros/Económicos**
- **Logísticos**
- **Procesos y actividades**

✚ **Criterios de evaluación** que describirán las condiciones de los riesgos según las evaluaciones de los expertos. A cada riesgo se le evaluará tres aspectos

- **Grado de importancia con respecto al siguiente de su lista**

- **Probabilidad de ocurrencia**
- **Gravedad del riesgo con respecto al retraso que representa**
- **Consecuencia económica**

Cada uno de los expertos dará su criterio sobre cada riesgo identificado, y lo consignará en los formatos de la figura 1 y 2.

En el primer formato se registra la evaluación relacionada con el grado de importancia de un riesgo con respecto al siguiente de su lista. Se inicia comparando las categorías y seguido los riesgos por categorías. Para el formato de ejemplo, se establecieron 6 categorías, cada una de ellas con 5 riesgos.



En el segundo formato se evalúan tres condiciones del riesgo: **la probabilidad de riesgo** que describe la posibilidad de ocurrencia del evento, **la gravedad del riesgo** que define el impacto en el tiempo pues describe cuanto atrasará las labores del proyecto y **la consecuencia económica** que representa la pérdida económica que puede llegar a tener la ocurrencia del riesgo, cuantificada en daños a la obra, accidentes, sobrecostos en precios de materiales, pérdida de clientes, etc.

A cada experto se le entregará uno de cada formato, para que evalúen los riesgos y posteriormente, esta información sea registrada en la herramienta computacional.

Figura 37. Formato de Evaluación de Riesgos- Grado de importancia

		CONSTRUCTORA N NOMBRE DEL PROYECTO FORMATO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS			
COMPARACIÓN DE CATEGORÍAS DE RIESGO					
Evalúe con las siguientes abreviaciones el grado de importancia entre categorías					
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación
Absolutamente importante	AB	Débilmente no importante	WN		
Muy fuertemente importante	VS	Esencialmente no importante	EN		
Esencialmente importante	ES	Muy fuertemente no importante	VN		
Débilmente importante	WK	Absolutamente no importante	AN		
Igualmente importante	EQ				
COMPARACIÓN DE RIESGOS POR CATEGORÍAS					
Evalúe con las siguientes abreviaciones el grado de importancia entre riesgos por categoría					
Categoría 1					
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
Evaluación					
	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Categoría 6
Categoría 1					
	Riesgo 11	Riesgo 12	Riesgo 13	Riesgo 14	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 12	Riesgo 13	Riesgo 14	Riesgo 15	
Categoría 2					
	Riesgo 21	Riesgo 22	Riesgo 23	Riesgo 24	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 22	Riesgo 23	Riesgo 24	Riesgo 25	
Categoría 3					
	Riesgo 31	Riesgo 32	Riesgo 33	Riesgo 34	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 32	Riesgo 33	Riesgo 34	Riesgo 35	
Categoría 4					
	Riesgo 41	Riesgo 42	Riesgo 43	Riesgo 44	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 42	Riesgo 43	Riesgo 44	Riesgo 45	
Categoría 5					
	Riesgo 51	Riesgo 52	Riesgo 53	Riesgo 54	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 52	Riesgo 53	Riesgo 54	Riesgo 55	
Categoría 6					
	Riesgo 61	Riesgo 62	Riesgo 63	Riesgo 64	
Evaluación					Evaluación
	Riesgo 62	Riesgo 63	Riesgo 64	Riesgo 65	

Figura 38. Formato de Condición de los Riesgos

		CONSTRUCTORA N NOMBRE DEL PROYECTO FORMATO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS			
CONDICIÓN DE LOS RIESGOS					
Evalúe con las siguientes abreviaciones el estado de los riesgos según la característica definida					
PROBABILIDAD DE RIESGO (RL)					
Descripción		Abreviación	Descripción		Abreviación
Muy bajo(Muy poco probable)		VL	Alto(Muy probable que ocurra)		H
Bajo(Poco probable)		L	Muy alto(Ocurrencia inevitable)		VH
Medio(Probable que ocurra)		M			
GRAVEDAD DEL RIESGO (RS)					
Descripción		Abreviación	Descripción		Abreviación
Muy bajo(0-5 días de retraso)		VL	Alto(3-5 semanas de retraso)		H
Bajo(6-12 días de retraso)		L	Muy alto(Más de 5 semanas de retraso)		VH
Medio(13-21 días de retraso)		M			
CONSECUENCIA ECONÓMICA (EC)					
Descripción		Abreviación	Descripción		Abreviación
Marginal(<US\$10.000)		VL	Grave(US\$1million-10million)		H
Importante(US\$10.000-100.000)		L	Catastrófica(>US\$10million)		VH
Severo(US\$100.000-1 millon)		M			
			RL	RS	EC
Categoría 1	Riesgo 1				
	Riesgo 2				
	Riesgo 3				
	Riesgo 4				
	Riesgo 5				
Categoría 2	Riesgo 6				
	Riesgo 7				
	Riesgo 8				
	Riesgo 9				
	Riesgo 10				
Categoría 3	Riesgo 11				
	Riesgo 12				
	Riesgo 13				
	Riesgo 14				
	Riesgo 15				
Categoría 4	Riesgo 16				
	Riesgo 17				
	Riesgo 18				
	Riesgo 19				
	Riesgo 20				
Categoría 5	Riesgo 21				
	Riesgo 22				
	Riesgo 23				
	Riesgo 24				
	Riesgo 25				
Categoría 6	Riesgo 26				
	Riesgo 27				
	Riesgo 28				
	Riesgo 29				
	Riesgo 30				

CAPÍTULO 2. IDENTIFICAR LOS RIESGOS

2.1 DEFINICIÓN: es el proceso que busca y registra los riesgos que pueden afectar al proyecto y describe sus características. Este es el primer paso para determinar que componentes de riesgo pueden afectar de forma adversa los objetivos del proyecto.

2.2 REGISTRO DE RIESGOS: informe en el que se documentan los riesgos identificados con sus características. Se estudian las diferentes condiciones en las que se ejecutará el proyecto y se evalúa si se puede convertir en riesgo. A continuación se presenta una recopilación de riesgos basada en diferentes investigaciones estudiadas.

Tabla 30. Registro de Riesgos con características

Código	Riesgo	Descripción
C1	Gestión del Proyecto	Referente a los procesos para la planificación del proyecto
R11	Alcance del proyecto mal definido	Proyecto no cumple con los requerimientos y necesidades de los usuarios y/o clientes
R12	Demora en otorgamiento de licencias	Los entes gubernamentales no entregan las licencias por incumplimiento en los requisitos
R13	Programación del tiempo no realista	Fecha de inicio y terminación del proyecto no es coherente
R14	Planeación errónea de los costos y el presupuesto	Sobreestimación o Subestimación del valor de las actividades y recursos del proyecto
R15	Personal de gestión inexperto	Administradores del proyecto con nada/poca experiencia en gerenciamiento de proyectos
C2	Ingeniería	Referente a requisitos mínimos de sismo resistencia
R21	Diseños de Ingeniería no son realistas	Los planos de la obra no son consistentes con lo permitido a construir en el área geográfica definida
R22	Estudios de Cargas mal realizados	Cargas(Fuerzas) identificadas no contribuyen al establecimiento exacto de estructuras y materiales para el soporte de la obra
R23	Mala Calidad del Concreto/Asfalto	El concreto/asfalto estudiado no es el adecuado para la obra a construir
R24	Estructuras metálicas inestables	Las estructuras metálicas definidas no soportan toda la infraestructura de la obra

R25	Estudios geotécnicos mal realizados	Estudio de suelos no refleja las condiciones del terreno
C3	Peligros Naturales	Referente a Eventos de Fuerza Mayor
R31	Tormentas	Área geográfica de la obra con riesgo de tormentas
R32	Inundaciones	Ubicación del terreno con posibilidad de desbordamiento de aguas o lluvias fuertes
R33	Terremotos	Ubicación del terreno con alto grado de movimiento telúrico
R34	Filtro de Aguas Subterráneas	Terrenos aledaños con alto índice de humedad o agua que pueden moverse al de la obra
R35	Deslizamiento de Tierra	Área geográfica de la obra con elevaciones de tierra inestables
C4	Seguridad en la Construcción	Referente a la seguridad y accidentes en la obra
R41	No señalización de riesgos en la obra	Peligros y riesgos de la obra no son debidamente señalizados
R42	Trabajadores con elementos de seguridad inadecuados	Los elementos de protección personal no son los adecuados o están deteriorados
R43	Estructuras y equipos de elevación en mal estado	Andamios inestables, grúas en malas condiciones.
R44	Maquinaria inadecuada	Maquinaria deteriorada o no es la adecuada para la obra
R45	Herramientas de trabajo en estado de deterioro	Herramientas que emplean los trabajadores no cumplen con su funcionamiento por vencimiento de su vida útil
C5	Financieros/Económicos	Referente a las finanzas y economía del proyecto
R51	No Disponibilidad de fondos	Falta de Recursos económicos para la continuación de las actividades del proyecto
R52	Inflación	Aumento de los precios de bienes y servicios del país
R53	Tasas de Interés Altas	Entes financieras ofrecen altos intereses para préstamos
R54	Quiebra suspensión de pagos contratista	Falta de Recursos para pagar a los contratistas o proveedores
R55	Cambio precios de recursos	Variación constante de los precios de los materiales y demás recursos
R6	Logísticos	Referentes a la cadena de suministro para la obra
R61	Mala selección de los	Los proveedores seleccionados no cumplen

	proveedores	con los requisitos de cumplimiento y calidad de sus productos
R62	Materiales y materias primas comprados de calidad baja	Los materiales y materias primas empleados no son los ideales para la obra
R63	Disponibilidad baja de Materias Primas y herramientas	Poca disponibilidad de requerimiento para la obra en el mercado
R64	Subestimación de cantidades	Mala asignación de cantidades a los recursos necesitados para la obra
R65	Retrasos en el suministro de materiales y materias primas	Suministro tardío de requerimientos que atrasan las actividades

CAPÍTULO 3. REALIZAR EL ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS RIESGOS

3.1 DEFINICIÓN: proceso en el que los riesgos identificados son evaluados según sus cualidades, para ser priorizados e identificar cuáles son los riesgos de mayor atención.

3.2 ESTRUCTURA DE DESGLOSE DE RIESGOS: es la representación jerárquica de los riesgos identificados. Aquí se clasifican los riesgos para hacer la comparación de las categorías y riesgos definidos. En la figura 3 se muestra un ejemplo de estructura de desglose.

3.3 MATRIZ DE COMPARACIÓN DE RIESGOS: es una cuadrícula en donde se registrarán las evaluaciones que los expertos realizaron en el “Formato de evaluación de Riesgos” en la sección de “Comparación de Categorías de Riesgo” y “Comparación de Riesgos por Categorías”.

Antes de registrar esta información en esta matriz, se deben definir 5 criterios:

✚ Número de Expertos: la cantidad de expertos que participarán en la evaluación.

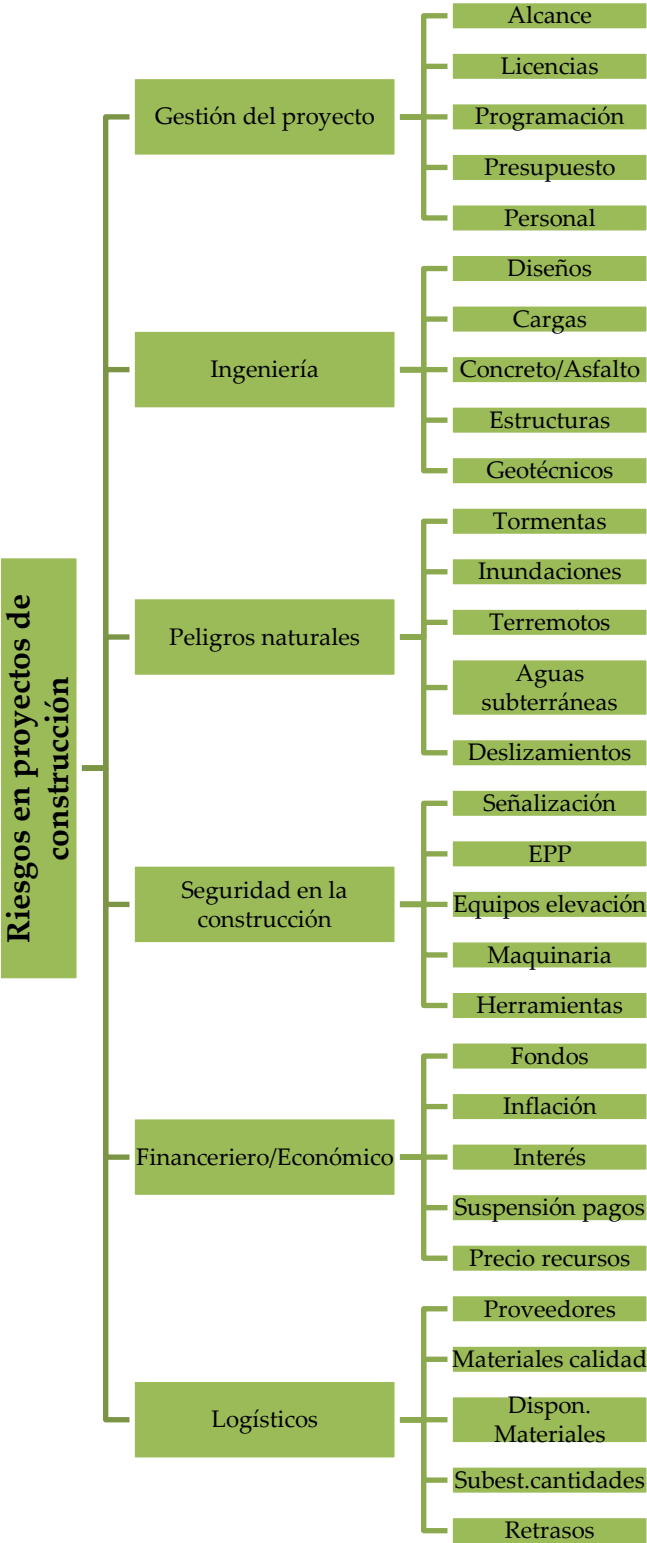
✚ Número de categorías: cantidad de categorías que se definieron en la estructura de desglose del riesgo.

✚ Número de riesgos por categorías: cantidad de riesgos que se despliegan de las categorías. Para efectos prácticos de la herramienta computacional, todas las categorías tendrán la misma cantidad de riesgo. En caso de ser diferentes, se recomienda agrupar por categorías con la misma cantidad de riesgos para que la herramienta pueda trabajarlas.

✚ Percepción del riesgo: es un dato de 0 a 1 que representa la posición de los expertos con respecto a los riesgos que evalúan. Es decir si la percepción del riesgo es de 0 significa que son optimistas y si la percepción del riesgo es de 1 significa que son pesimistas ante las condiciones de riesgo evaluadas.

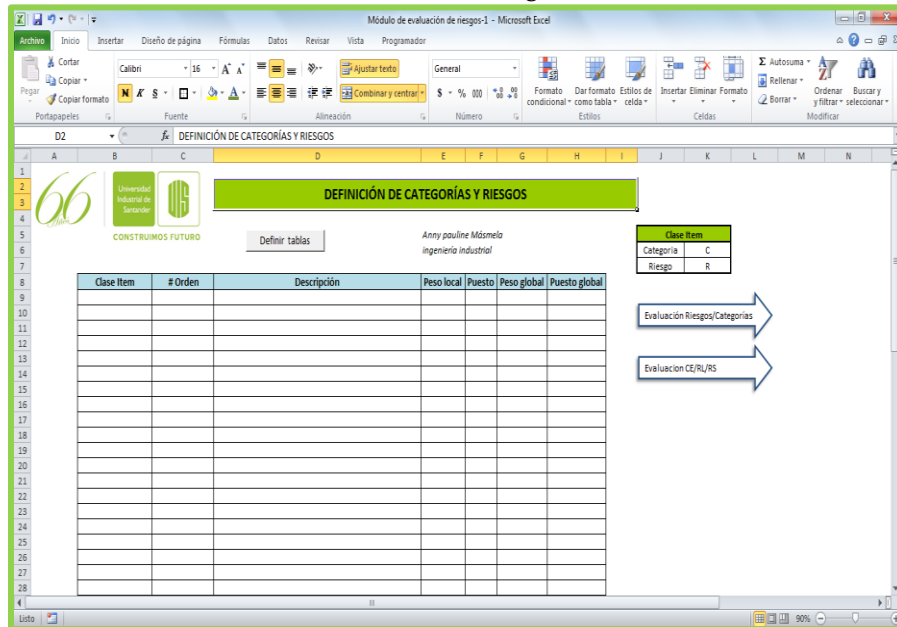
✚ Incertidumbre de la información: representa la estabilidad de la información que se registra, es decir que tan estable es la evaluación realizada. Es un valor entre 0 y 1 siendo 0 cuando la incertidumbre es alta y 1 cuando es estable.

Figura 39. Estructura de desglose de riesgo



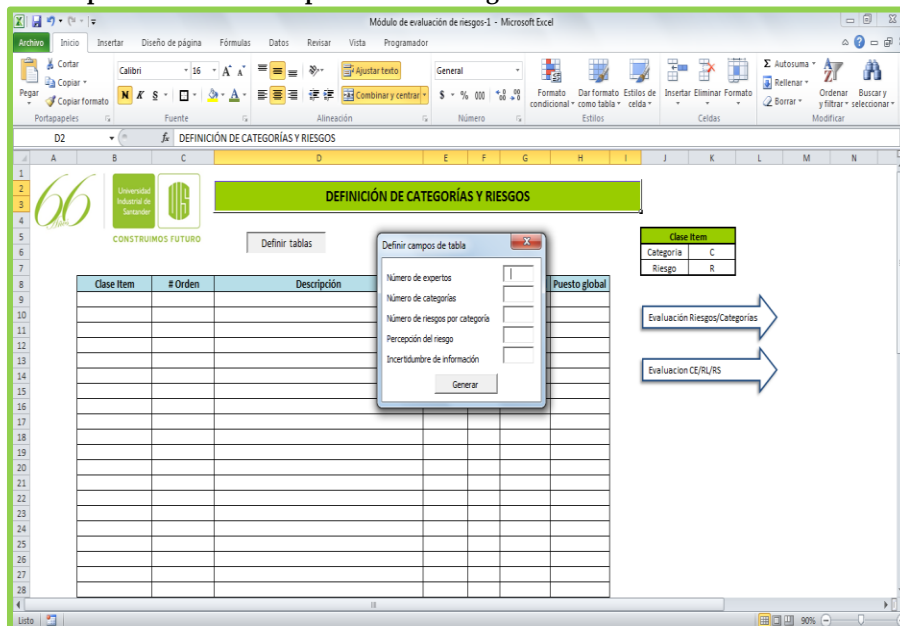
En la figura 4 se muestra inicial de la herramienta computacional, para iniciar con las evaluaciones comparativas

Figura 40. Interface inicial del Módulo de evaluación de riesgos



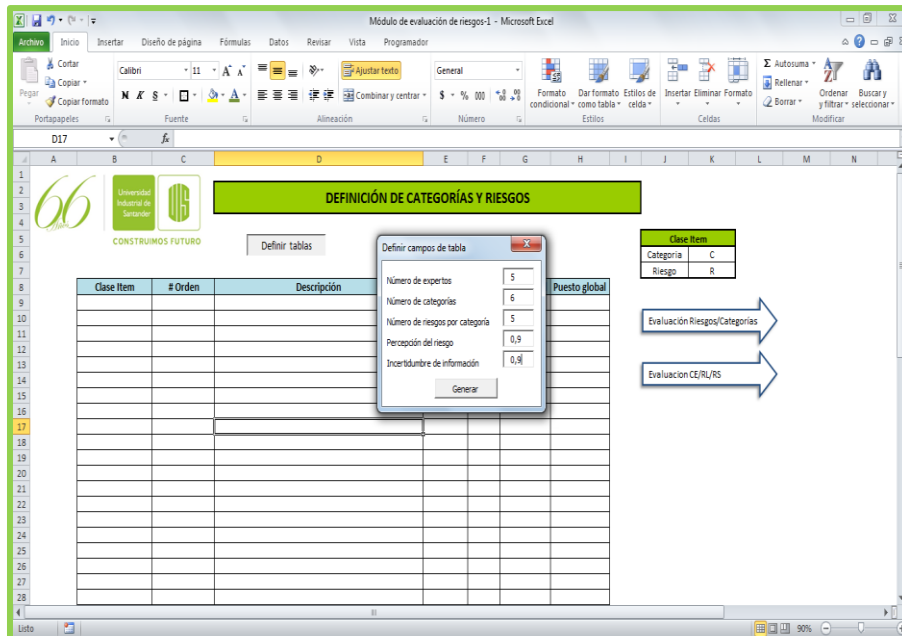
En el botón “Definir tablas”, se despliega un cuadro de dialogo que le pedirá que registre los 5 criterios para la “Matriz de Comparación de Riesgos”, como se muestra en la figura 5

Figura 41. Criterios para Matriz de Comparación de Riesgos



Para seguir con el ejemplo llevado hasta el momento, se definirán 5 expertos, 6 categorías, 5 riesgos por categorías, percepción del riesgo de 0,9 al igual que la incertidumbre de la información.

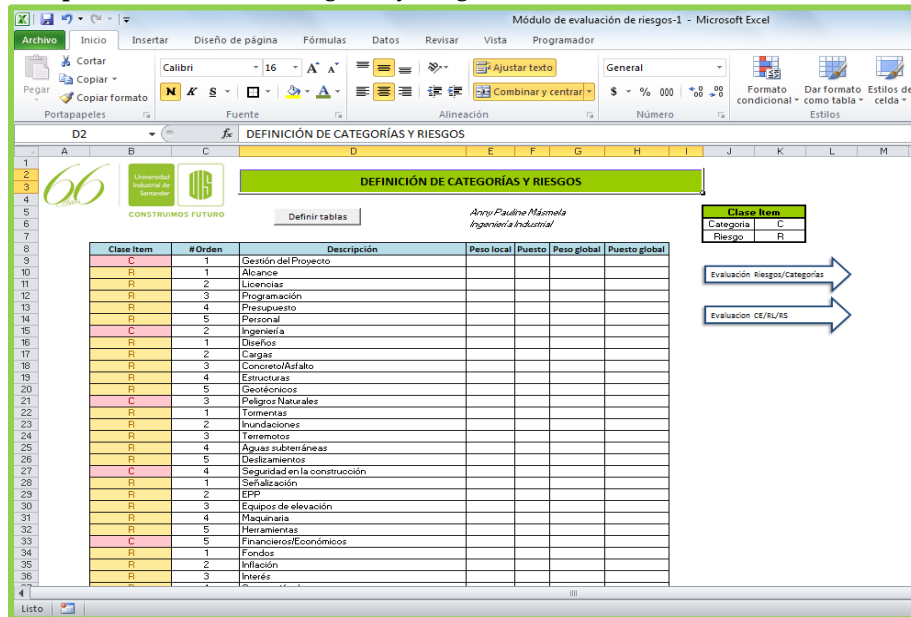
Figura 42. Introducción de los criterios a la herramienta



Después de introducidos estos valores, aparecerá una tabla, en donde se deben registrar las categorías y los riesgos, como se describe a continuación y como se ilustra en la figura 7:

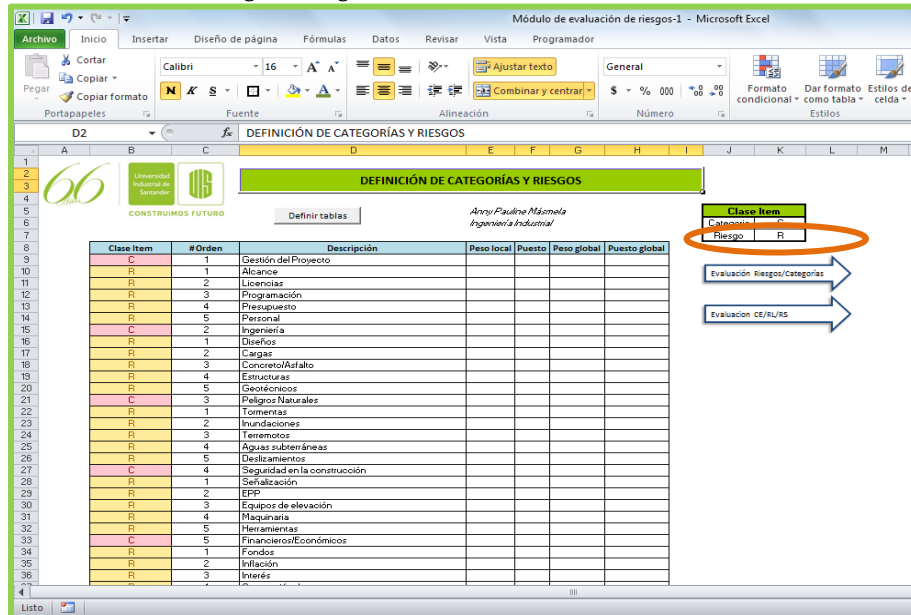
- ✚ En la columna “Clase ítem”, se especificará si es “C” una categoría o “R” un riesgo.
- ✚ En la columna “#Orden”, las categorías ordenadas de 1 hasta 6(para el ejemplo que son 6 categorías) y los riesgos de 1 hasta 5(para el ejemplo que son 5 riesgos por categoría).
- ✚ En la columna “Descripción” se digita el nombre de la categoría o riesgo respectivo.

Figura 43. Descripción de la tabla de categorías y riesgos



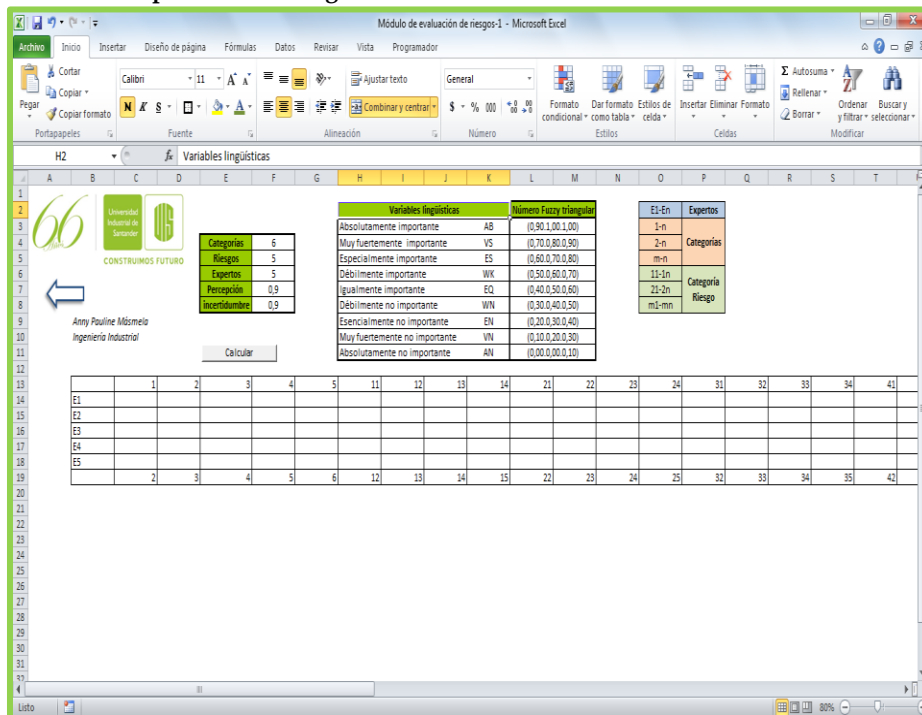
Después de registrada esta información se procede a llenar la matriz de comparación de riesgos. Esta aparecerá, dando click en la flecha “Evaluación Riesgos/Categorías”.

Figura 44. Flecha Evaluación Riesgos/Categorías



La “Matriz de comparación de riesgos” se muestra en la herramienta computacional según la figura 9.

Figura 45. Matriz de comparación de riesgos



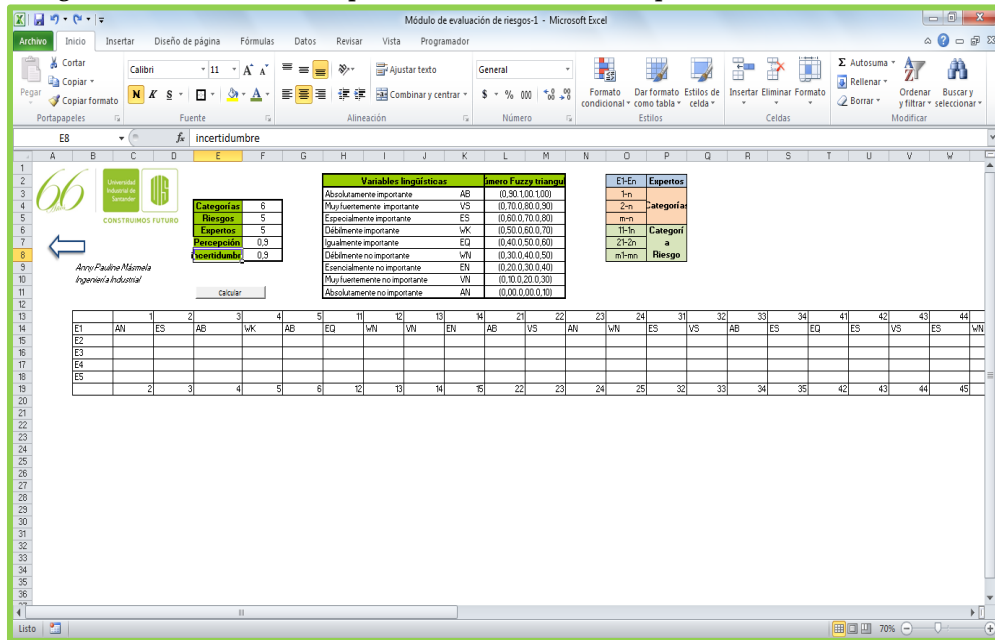
En las filas se ubican los expertos y en las columnas las categorías y los riesgos. La comparación de categorías se realiza en las primeras columnas de la matriz donde se muestra números de un solo dígito y enseguida se registran las comparaciones de los riesgos por categoría, en donde el primer número representa la categoría a la que pertenece y el segundo el riesgo correspondiente.

Cada uno de los formatos diligenciados por los expertos se guarda en esta matriz, para que posteriormente haga el cálculo de los pesos y arroje la priorización de las categorías y riesgos. A continuación se muestra un ejemplo de formato diligenciado por un experto y su posterior registro en la herramienta computacional.

Figura 46. Comparación de Categorías/Riesgos realizada por un experto

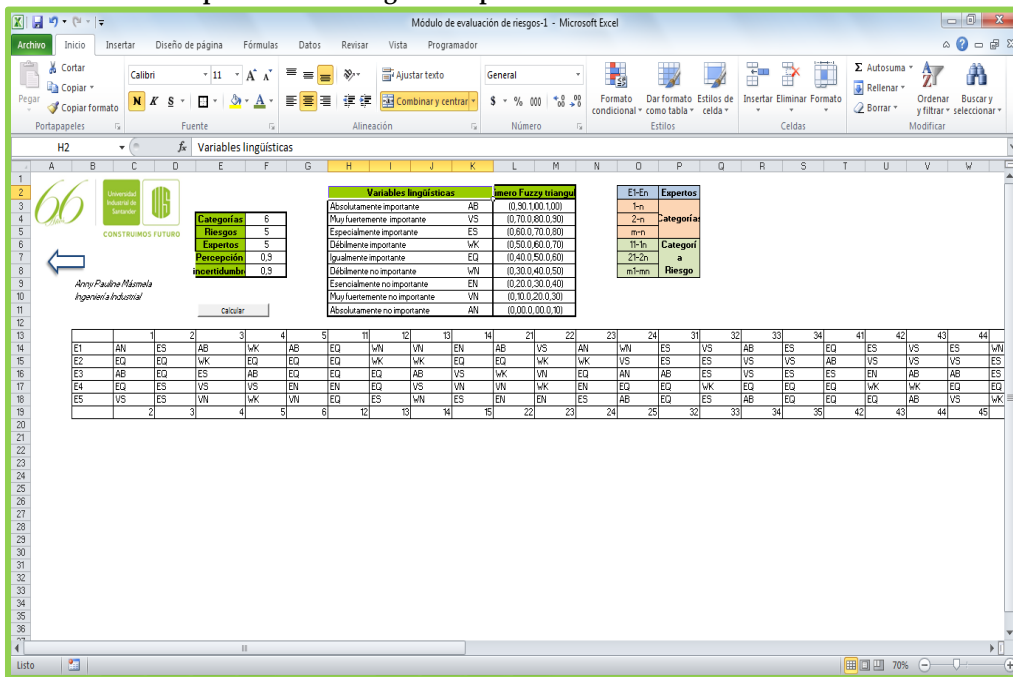
 CONSTRUCTORA N NOMBRE DEL PROYECTO FORMATO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS 					
COMPARACIÓN DE CATEGORÍAS DE RIESGO					
Evalúe con las siguientes abreviaciones el grado de importancia entre categorías					
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación
Absolutamente importante	AB	Débilmente no importante	WN		
Muy fuertemente importante	VS	Esencialmente no importante	EN		
Esencialmente importante	ES	Muy fuertemente no importante	VN		
Débilmente importante	WK	Absolutamente no importante	AN		
Igualmente importante	EQ				
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
Evaluación	AN	ES	AB	WK	AB
	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5	Categoría 6
COMPARACIÓN DE RIESGOS POR CATEGORÍAS					
Evalúe con las siguientes abreviaciones el grado de importancia entre riesgos por categoría					
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación
Absolutamente importante	AB	Débilmente no importante	WN		
Muy fuertemente importante	VS	Esencialmente no importante	EN		
Esencialmente importante	ES	Muy fuertemente no importante	VN		
Débilmente importante	WK	Absolutamente no importante	AN		
Igualmente importante	EQ				
Categoría 1					
	Riesgo 11	Riesgo 12	Riesgo 13	Riesgo 14	
Evaluación	EQ	WN	VN	EN	Evaluación
	Riesgo 12	Riesgo 13	Riesgo 14	Riesgo 15	
Categoría 2					
	Riesgo 21	Riesgo 22	Riesgo 23	Riesgo 24	
Evaluación	AB	VS	AN	WN	Evaluación
	Riesgo 22	Riesgo 23	Riesgo 24	Riesgo 25	
Categoría 3					
	Riesgo 31	Riesgo 32	Riesgo 33	Riesgo 34	
Evaluación	ES	VS	AB	ES	Evaluación
	Riesgo 32	Riesgo 33	Riesgo 34	Riesgo 35	
Categoría 4					
	Riesgo 41	Riesgo 42	Riesgo 43	Riesgo 44	
Evaluación	EQ	ES	VS	ES	Evaluación
	Riesgo 42	Riesgo 43	Riesgo 44	Riesgo 45	
Categoría 5					
	Riesgo 51	Riesgo 52	Riesgo 53	Riesgo 54	
Evaluación	WN	AB	VN	EQ	Evaluación
	Riesgo 52	Riesgo 53	Riesgo 54	Riesgo 55	
Categoría 6					
	Riesgo 61	Riesgo 62	Riesgo 63	Riesgo 64	
Evaluación	VS	AB	WK	VS	Evaluación
	Riesgo 62	Riesgo 63	Riesgo 64	Riesgo 65	

Figura 47. Registro de evaluación del experto en la herramienta computacional



De esta forma se ingresan todas las evaluaciones realizadas por los expertos hasta obtener la “Matriz de Comparación de Riesgos” completa como se muestra en la figura 12.

Figura 48. Matriz de Comparación de Riesgos Completa



3.4 LISTADO DE RIESGOS PRIORIZADOS: después de completada la matriz y dando click en el botón calcular, se llega a un registro de riesgos, en donde se describe el peso de cada riesgo con respecto a los de su categoría, con respecto a todos los riesgos del proyecto y el puesto que ocupa en los riesgos siendo 1 el más relevante y 30 el menos importante (para el ejemplo que se está realizando).

Figura 49. Botón "Calcular" para conocer la priorización de riesgos

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following components:

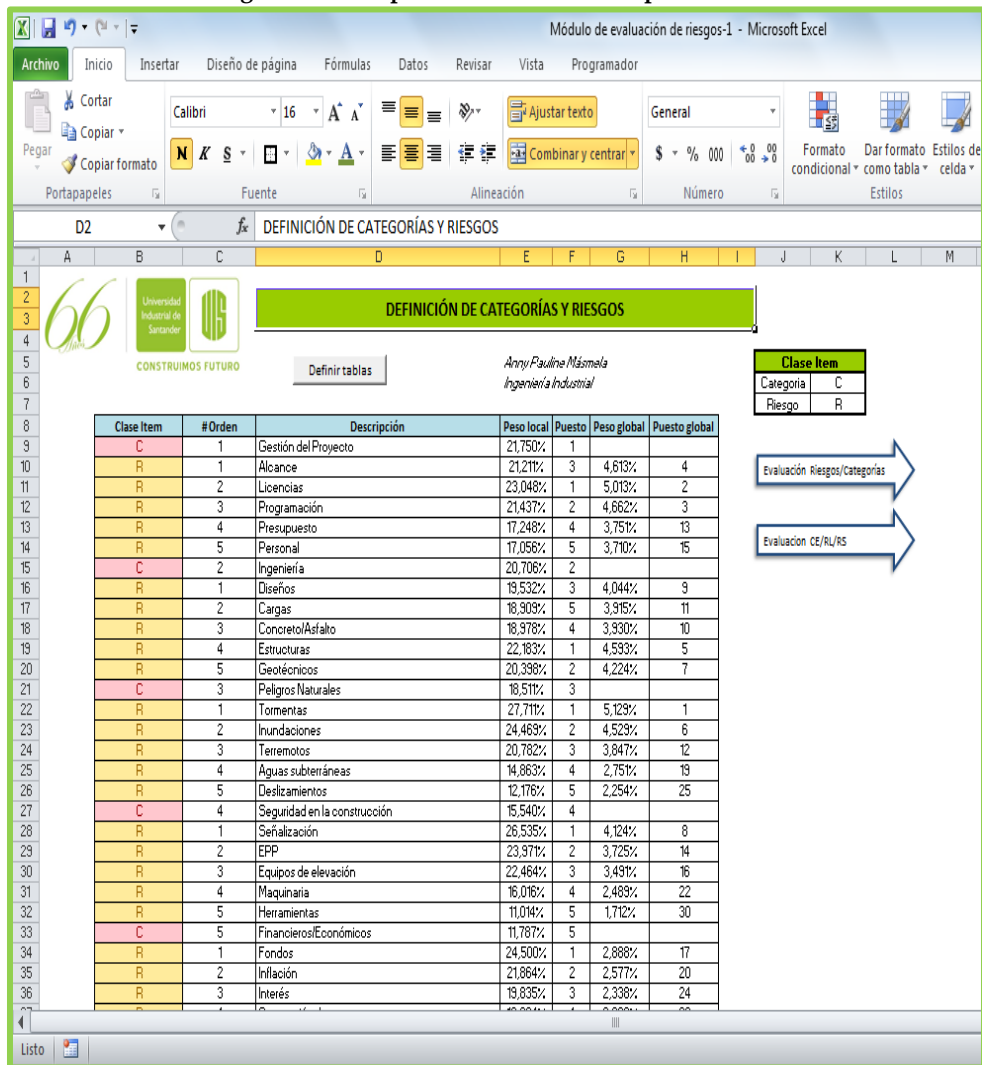
- Header:** Logos for '66 años Universidad Industrial de Santander' and 'CONSTRUIAMOS FUTURO'. Name: 'Anny Pauline Masmela, Ingeniería Industrial'.
- Parameters Table:**

Categorías	6
Riesgos	5
Expertos	5
Percepción	0,9
Incertidumbre	0,9
- Variables lingüísticas Table:**

Variables lingüísticas	Número Fuzzy triangular
Absolutamente importante	AB (0,90,1,00,1,00)
Muy fuertemente importante	VS (0,70,0,80,0,90)
Especialmente importante	ES (0,60,0,70,0,80)
Débilmente importante	WK (0,50,0,60,0,70)
Igualmente importante	EQ (0,40,0,50,0,60)
Débilmente no importante	WN (0,30,0,40,0,50)
Esencialmente no importante	EN (0,20,0,30,0,40)
Muy fuertemente no importante	VN (0,10,0,20,0,30)
Absolutamente no importante	AN (0,00,0,00,0,10)
- E1-En Expertos Table:**

E1-En	Expertos
1-n	Categorías
2-n	Categorías
m-n	Categorías
11-1n	Categoría
21-2n	Riesgo
m1-mn	Riesgo
- Calcular Button:** A button labeled 'Calcular' is circled in red.
- Matrix:** A large matrix with columns numbered 1-34 and rows labeled E1-E5. The cells contain linguistic variables (e.g., AN, ES, AB, WK, EQ, WN, VN, EN, VS, WK, AN, ES, VS, AB, EQ, EQ, EQ, AB, VS, WK, VN, EQ, AN, AB, ES, VS, EQ, EQ, ES, VS, EN, EN, EQ, VS, VN, VN, WK, EN, EQ, WK, EQ, ES, EN, ES, EN, ES, AB, EQ, ES, AB).

Figura 50. Priorización de Riesgos realizada por la herramienta computacional



Según el resultado generado, las categorías más relevantes son la de “Gestión del Proyecto”, “Ingeniería” y “Peligros Naturales”, pero los riesgos más relevantes según los expertos son “Tormentas”, “Licencias” y “Programación”. En la figura 15 se muestra el registro de riesgos total con sus respectivos pesos y puestos en el proyecto.

Figura 51. Registro de riesgos priorizados

Clase Item	# Orden	Descripción	Peso local	Puesto	Peso global	Puesto global
C	1	Gestión del Proyecto	21,750%	1		
R	1	Alcance	21,211%	3	4,613%	4
R	2	Licencias	23,048%	1	5,013%	2
R	3	Programación	21,437%	2	4,662%	3
R	4	Presupuesto	17,248%	4	3,751%	13
R	5	Personal	17,056%	5	3,710%	15
C	2	Ingeniería	20,706%	2		
R	1	Diseños	19,532%	3	4,044%	9
R	2	Cargas	18,909%	5	3,915%	11
R	3	Concreto/Asfalto	18,978%	4	3,930%	10
R	4	Estructuras	22,183%	1	4,593%	5
R	5	Geotécnicos	20,398%	2	4,224%	7
C	3	Peligros Naturales	18,511%	3		
R	1	Tormentas	27,711%	1	5,129%	1
R	2	Inundaciones	24,469%	2	4,529%	6
R	3	Terremotos	20,782%	3	3,847%	12
R	4	Aguas subterráneas	14,863%	4	2,751%	19
R	5	Deslizamientos	12,176%	5	2,254%	25
C	4	Seguridad en la construcción	15,540%	4		
R	1	Señalización	26,535%	1	4,124%	8
R	2	EPP	23,971%	2	3,725%	14
R	3	Equipos de elevación	22,464%	3	3,491%	16
R	4	Maquinaria	16,016%	4	2,489%	22
R	5	Herramientas	11,014%	5	1,712%	30
C	5	Financieros/Económicos	11,787%	5		
R	1	Fondos	24,500%	1	2,888%	17
R	2	Inflación	21,864%	2	2,577%	20
R	3	Interés	19,835%	3	2,338%	24
R	4	Suspensión de pagos	16,984%	4	2,002%	26
R	5	Precio de recursos	16,817%	5	1,982%	28
C	6	Logísticos	11,707%	6		
R	1	Proveedores	21,714%	2	2,542%	21
R	2	Materiales calidad	23,553%	1	2,757%	18
R	3	Disponibilidad de materiales	16,965%	4	1,986%	27
R	4	Subestimación de cantidades	16,894%	5	1,978%	29
R	5	Retrasos	20,874%	3	2,444%	23

CAPÍTULO 4. REALIZAR EL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS RIESGOS

4.1 DEFINICIÓN: proceso en el que se estudian diversas características del riesgo para evaluar el impacto total de los riesgos en la ejecución del proyecto.

4.2 REGISTRO DE RIESGOS: para esta sección se emplean los riesgos sin categorías, para evaluar sus condiciones en el proyecto de estudio. Aunque no se emplean las categorías, se lleva el orden de los riesgos según las categorías ingresar en la aplicación.

Tabla 31. Registro de Riesgos para evaluación de condiciones

Código Riesgo	Riesgo
R1	Alcance del proyecto mal definido
R2	Demora en otorgamiento de licencias
R3	Programación del tiempo no realista
R4	Planeación errónea de los costos y el presupuesto
R5	Personal de gestión inexperto
R6	Diseños de Ingeniería no son realistas
R7	Estudios de Cargas mal realizados
R8	Mala Calidad del Concreto/Asfalto
R9	Estructuras metálicas inestables
R10	Estudios geotécnicos mal realizados
R11	Tormentas
R12	Inundaciones
R13	Terremotos
R14	Filtro de Aguas Subterráneas
R15	Deslizamiento de Tierra
R16	No señalización de riesgos en la obra
R17	Trabajadores con elementos de seguridad inadecuados
R18	Estructuras y equipos de elevación en mal estado
R19	Maquinaria inadecuada
R20	Herramientas de trabajo en estado de deterioro
R21	No Disponibilidad de fondos
R22	Inflación
R23	Tasas de Interés Altas
R24	Quiebra suspensión de pagos contratista
R25	Cambio precios de recursos
R26	Mala selección de los proveedores
R27	Materiales y materias primas comprados de calidad baja
R28	Disponibilidad baja de Materias Primas y herramientas
R29	Subestimación de cantidades
R30	Retrasos en el suministro de materiales y materias primas

4.3 MATRIZ DE CONDICIONES DE RIESGO: es una cuadrícula por condición que se le evaluará a los riesgos. Para este caso son tres matrices, una para la probabilidad del riesgo, otra para la gravedad del riesgo y otra para la consecuencia económica.

Para entrar a estas matrices, se debe haber realizado la Evaluación Riesgos/Categorías. Se ingresa por medio de la flecha “Evaluación CE/RL/RS”

Figura 52. Entrada para evaluar las condiciones de los riesgos

DEFINICIÓN DE CATEGORÍAS Y RIESGOS

Clase Item	# Orden	Descripción	Peso local	Puesto	Peso global	Puesto global
C	1	Gestión del Proyecto	21,750%	1		
R	1	Alcance	21,211%	3	4,613%	4
R	2	Licencias	23,048%	1	5,013%	2
R	3	Programación	21,437%	2	4,662%	3
R	4	Presupuesto	17,248%	4	3,751%	13
R	5	Personal	17,056%	5	3,710%	15
C	2	Ingeniería	20,706%	2		
R	1	Diseños	19,532%	3	4,044%	9
R	2	Cargas	18,909%	5	3,915%	11
R	3	Concreto/Asfalto	18,978%	4	3,930%	10
R	4	Estructuras	22,183%	1	4,593%	5
R	5	Geotécnicos	20,398%	2	4,224%	7
C	3	Peligros Naturales	18,511%	3		
R	1	Tormentas	27,711%	1	5,129%	1
R	2	Inundaciones	24,469%	2	4,529%	6
R	3	Terremotos	20,782%	3	3,847%	12
R	4	Aguas subterráneas	14,863%	4	2,751%	19
R	5	Deslizamientos	12,176%	5	2,254%	25
C	4	Seguridad en la construcción	15,540%	4		
R	1	Señalización	26,535%	1	4,124%	8
R	2	EPP	23,971%	2	3,725%	14
R	3	Equipos de elevación	22,464%	3	3,491%	16
R	4	Maquinaria	16,016%	4	2,489%	22
R	5	Herramientas	11,014%	5	1,713%	30

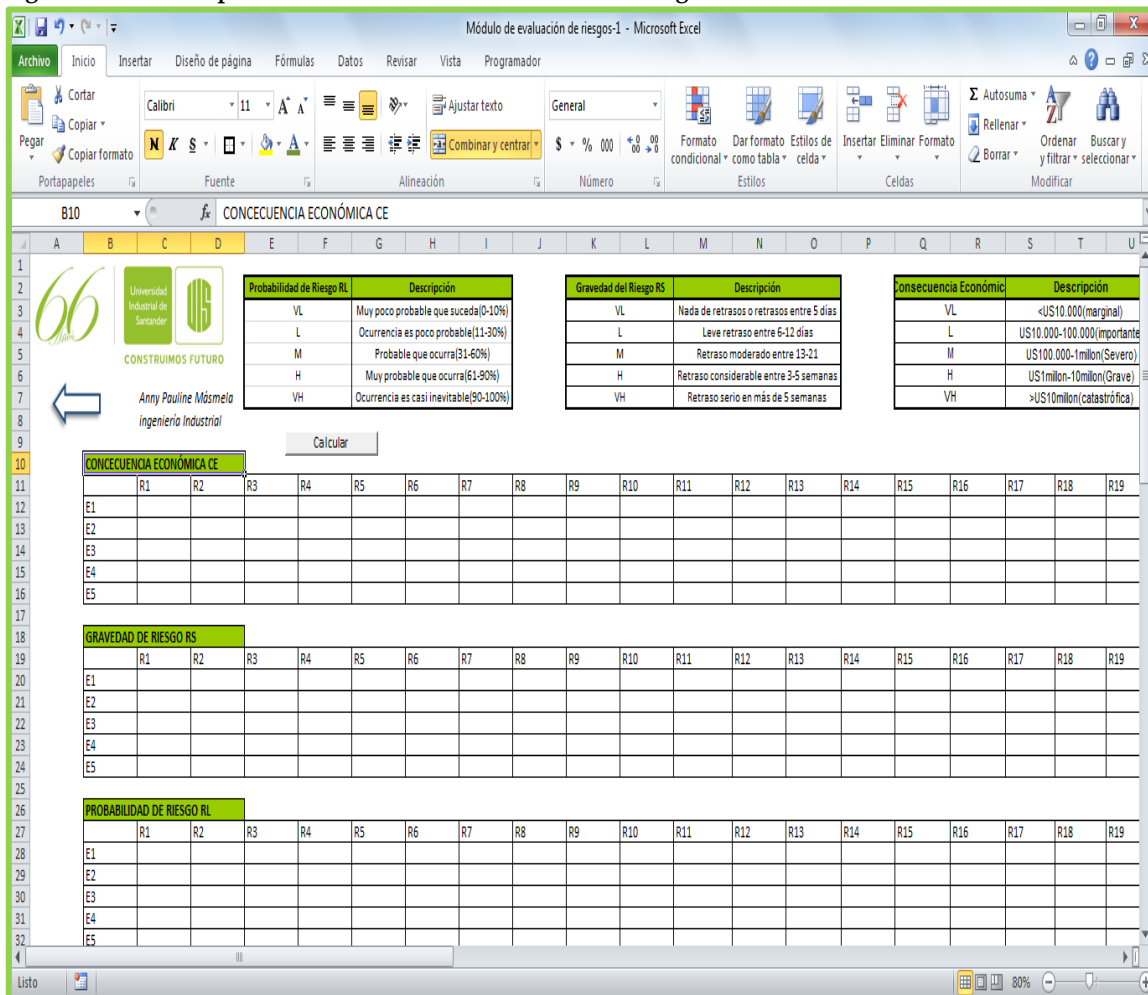
Clase Item

Categoría	C
Riesgo	R

Evaluación Riesgos/Categorías →

Evaluación CE/RL/RS →

Figura 53. Matrices para evaluación de condiciones de los riesgos



Los datos que se ingresaran en estas matrices son los anotados por los expertos en el segundo formato de evaluación llamado "Condición de los Riesgos". A continuación se muestra un formato de "Condición de los Riesgos" diligenciado por un experto e ingresado en el "Módulo de Evaluación de Riesgos".

Figura 54. Formato de condición de los riesgos diligenciado


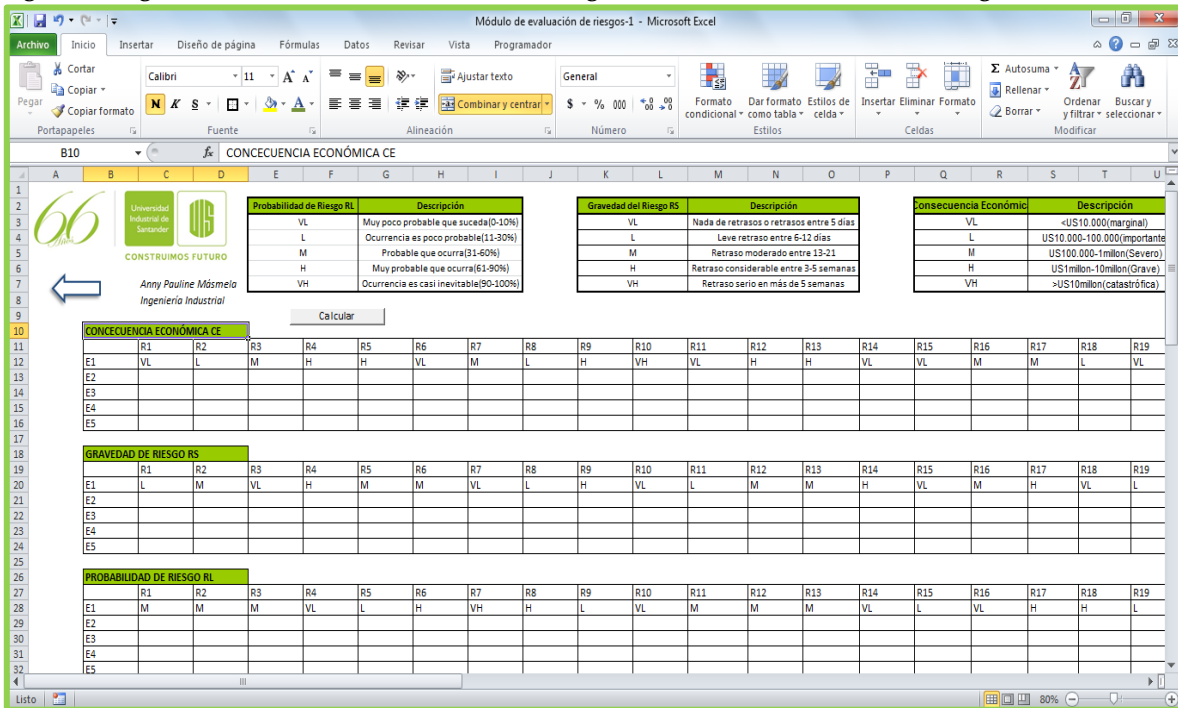
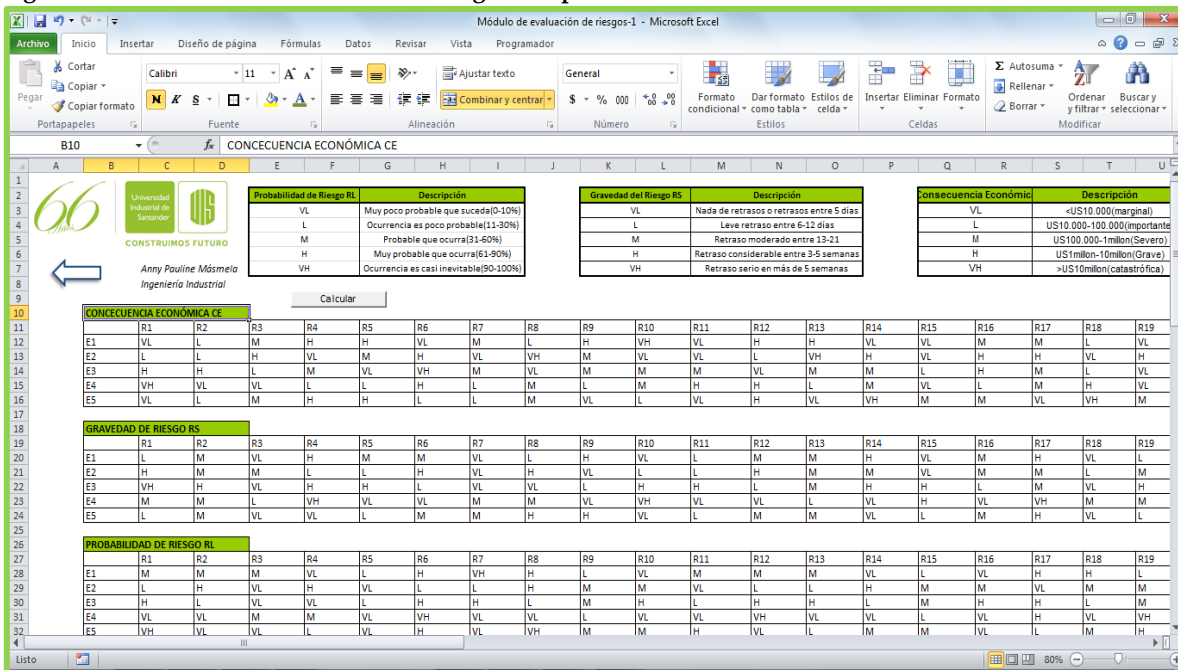
 CONSTRUCTORA N NOMBRE DEL PROYECTO FORMATO DE EVALUACIÓN DE RIESGOS				
CONDICIÓN DE LOS RIESGOS				
Evalúe con las siguientes abreviaciones el estado de los riesgos según la característica definida				
PROBABILIDAD DE RIESGO (RL)				
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación	
Muy bajo(Muy poco probable)	VL	Alto(Muy probable que ocurra)	H	
Bajo(Poco probable)	L	Muy alto(Ocurrencia inevitable)	VH	
Medio(Probable que ocurra)	M			
GRAVEDAD DEL RIESGO (RS)				
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación	
Muy bajo(0-5 días de retraso)	VL	Alto(3-5 semanas de retraso)	H	
Bajo(6-12 días de retraso)	L	Muy alto(Más de 5 semanas de retraso)	VH	
Medio(13-21 días de retraso)	M			
CONSECUENCIA ECONÓMICA (EC)				
Descripción	Abreviación	Descripción	Abreviación	
Marginal(<US\$10.000)	VL	Grave(US\$1million-10million)	H	
Importante(US\$10.000-100.000)	L	Catastrófica(>US\$10million)	VH	
Severo(US\$100.000-1 millon)	M			
		RL	RS	EC
Categoría 1	Riesgo 1	VL	L	M
	Riesgo 2	L	M	M
	Riesgo 3	M	VL	M
	Riesgo 4	H	H	VL
	Riesgo 5	H	M	L
Categoría 2	Riesgo 6	VL	M	H
	Riesgo 7	M	VL	VH
	Riesgo 8	L	L	H
	Riesgo 9	H	H	L
Categoría 3	Riesgo 10	VH	VL	VL
	Riesgo 11	VL	L	M
	Riesgo 12	H	M	M
	Riesgo 13	H	M	M
	Riesgo 14	VL	H	VL
Categoría 4	Riesgo 15	VL	VL	L
	Riesgo 16	M	M	VL
	Riesgo 17	M	H	H
	Riesgo 18	L	VL	H
Categoría 5	Riesgo 19	VL	L	L
	Riesgo 20	VL	VL	L
	Riesgo 21	M	VL	VL
	Riesgo 22	M	L	M
	Riesgo 23	H	M	M
Categoría 6	Riesgo 24	VH	H	VL
	Riesgo 25	M	M	L
	Riesgo 26	L	M	VL
	Riesgo 27	VL	VH	M
	Riesgo 28	M	VL	M
	Riesgo 29	L	M	L
	Riesgo 30	L	M	VL

Figura 55. Ingreso de formato de condición de los riesgos al Módulo de evaluación de riesgos



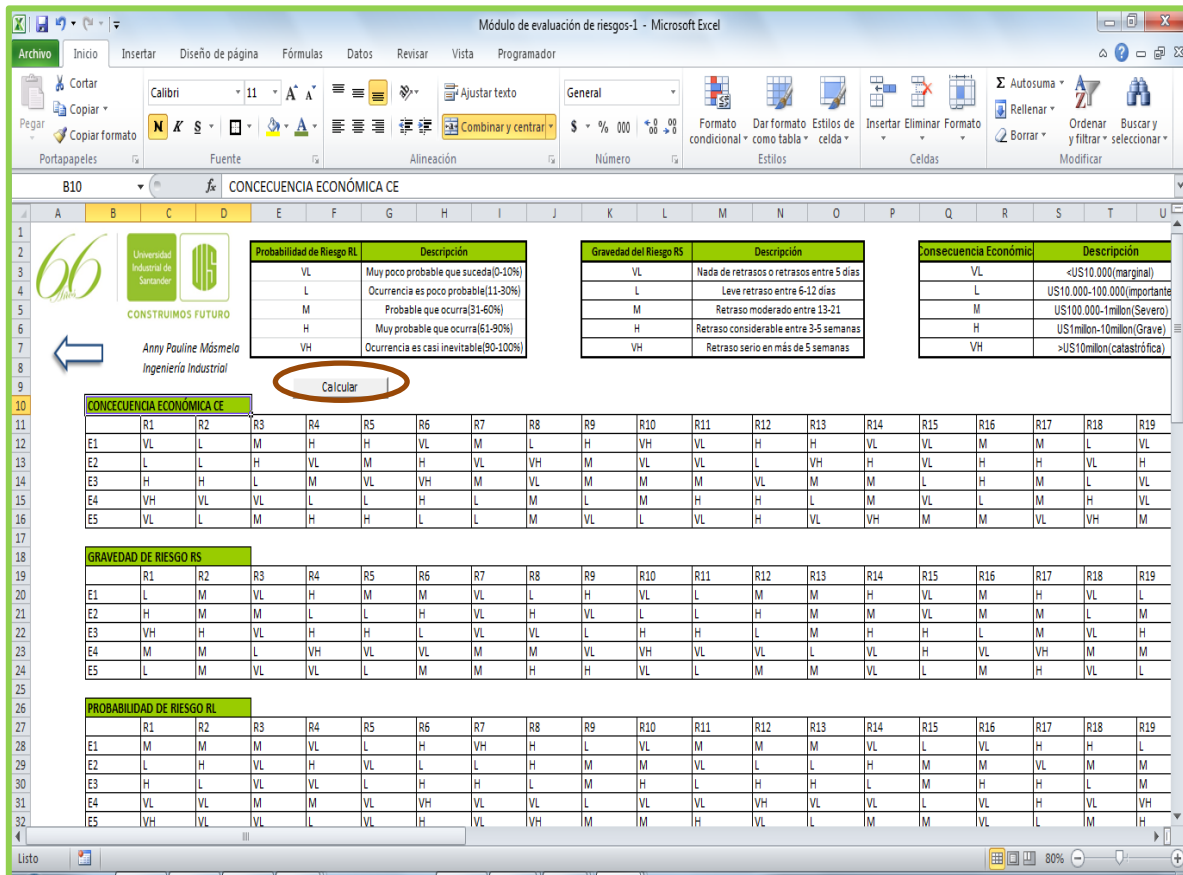
Los demás formatos diligenciados por los otros expertos también son consignados en el Módulo de evaluación de riesgos como se muestra en la figura 20.

Figura 56. Matrices de condición de los riesgos completadas



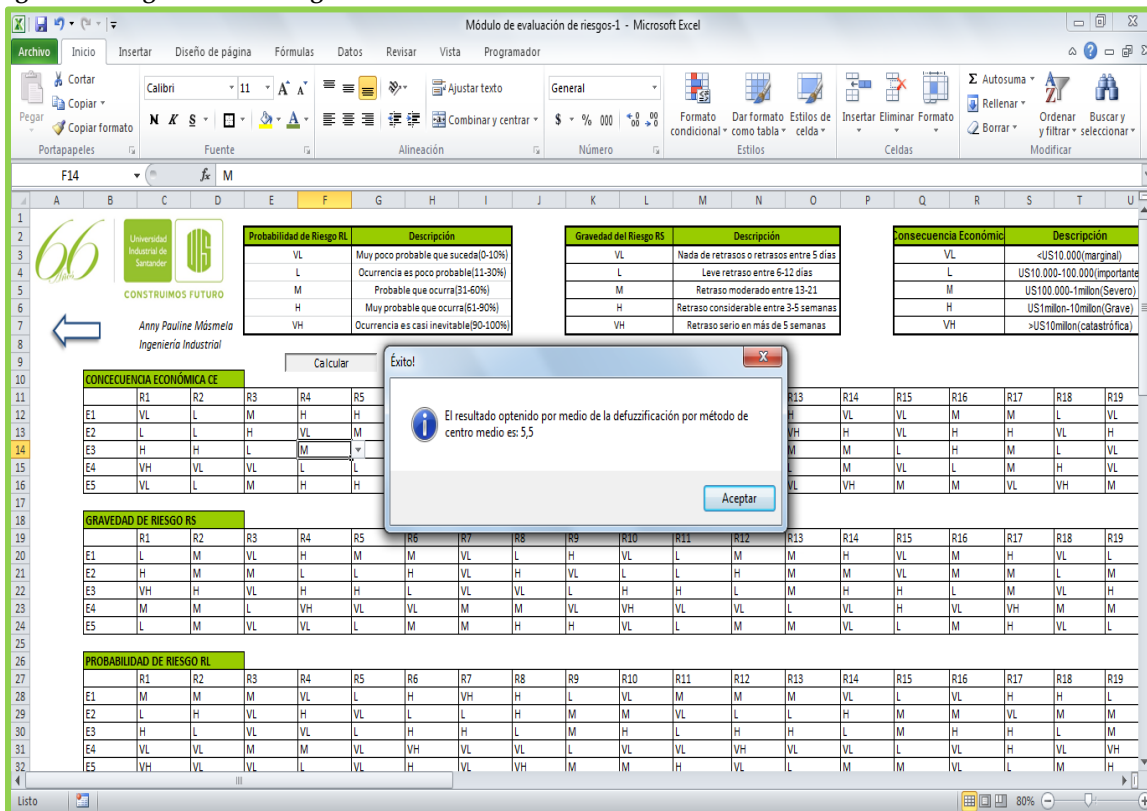
Terminado de registrarse las evaluaciones realizadas por los expertos se procede a calcular la Magnitud Total de los Riesgos, que representa el impacto de los riesgos en la ejecución del proyecto. Este paso se logra al oprimir el botón de calcular ubicado en la parte superior de las matrices de condiciones de los riesgos.

Figura 57. Botón "Calcular" para hallar la Magnitud total del Riesgo



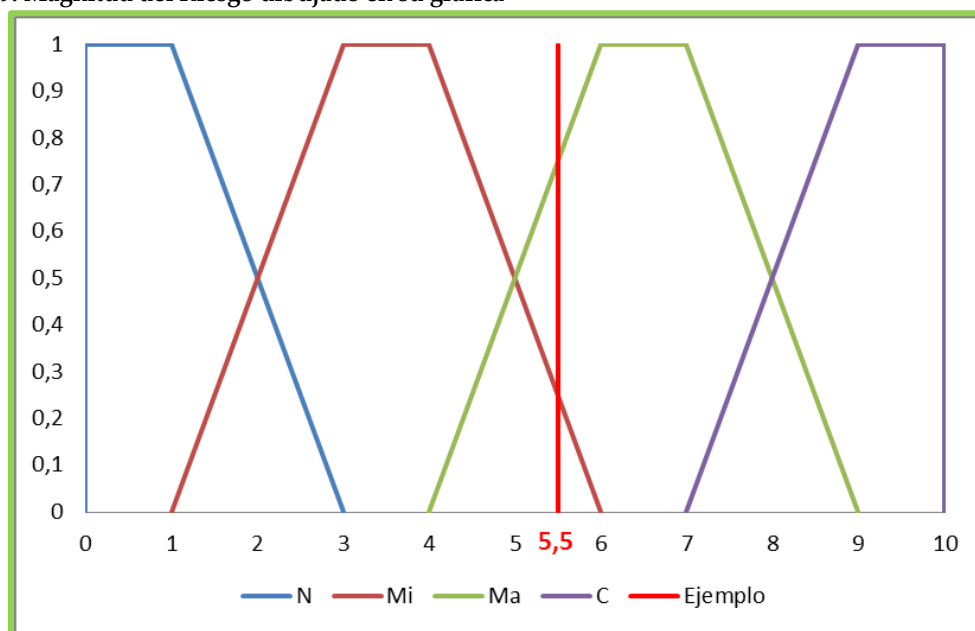
Después de oprimir "Calcular", aparecerá un cuadro de dialogo como se muestra en la figura 22 que refleja el valor de Magnitud del Riesgo.

Figura 58. Magnitud del Riesgo calculada



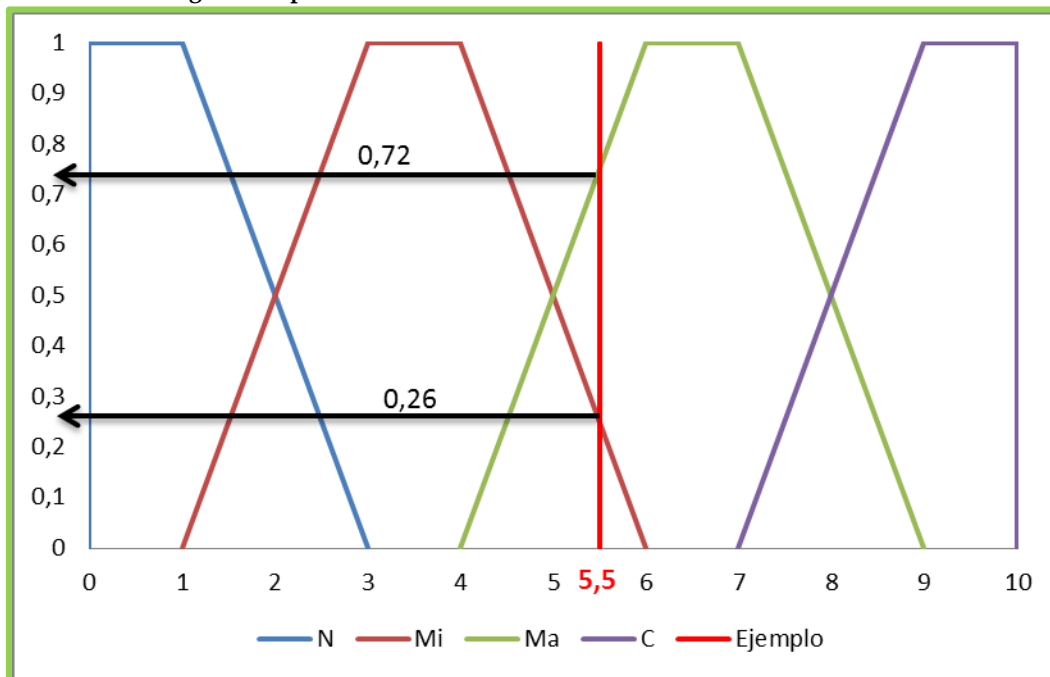
El resultado que arroja la aplicación se lleva a la siguiente gráfica.

Figura 59. Magnitud del Riesgo dibujado en su gráfica



En este punto se analiza a que función tiene mayor grado de pertenencia.

Figura 60. Análisis de grado de pertenencia



Para el caso de ejemplo, la Magnitud del riesgo de 5,5 tiene un grado de pertenencia de 26% con la función “Menor” y un grado de pertenencia de 72% con la función “Mayor”, es decir la Magnitud total del riesgo es Mayor, y según la tabla 3 “El riesgo debe reducirse si es razonablemente practicable de hacerlo.

Tabla 32. Descripción de la Magnitud del Riesgo

Magnitud del Riesgo RM	Descripción
N	Riesgo Aceptable
Mi	El riesgo es tolerable. Control de riesgo debe ser emprendido si es rentable hacerlo.
Ma	El riesgo debe reducirse si es razonablemente practicable de hacerlo.
C	El riesgo debe ser reducido, salvo en circunstancias excepcionales.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS: en este numeral se explican algunas de las acciones a tomar según los resultados arrojados por el Módulo de evaluación de riesgos.

✚ Riesgos N-Riesgo Negligente: si el resultado de la Magnitud del riesgo es Negligente, ninguna acción debe ser tomada, porque indica que el proyecto se puede ejecutar sin ningún tipo de inconveniente.

✚ Riesgo Mi-Riesgo Menor: si el resultado de la Magnitud del riesgo es Menor, el proyecto se puede ejecutarse sin ningún inconveniente, pero es ideal hacer revisión de los riesgos nuevamente en una etapa más avanzada del proyecto para confirmar si los riesgos siguen en el mismo estado que al inicio. Se realiza el mismo procedimiento de este manual, y si el riesgo es igual o menor, el proyecto sigue ejecutándose sin inconvenientes. Por el contrario, si este pasa a “Mayor” o “Crítico” se deben tomar las acciones establecidas para estos casos de riesgos.

✚ Riesgo Ma-Riesgo Mayor: si el resultado de la Magnitud del riesgo es Mayor, el riesgo debe reducirse. Se recomienda, según los riesgos de mayor prioridad definidos en la priorización de riesgos, revisar quien es responsable de las áreas en riesgo para que dé las recomendaciones respectivas y también revisar en los formatos de condición del riesgo diligenciados por los expertos, las condiciones para estos riesgos de prioridad alta.

✚ Riesgo C-Riesgo Crítico: si el resultado de la Magnitud del riesgo es Crítico, el riesgo debe reducirse. Si esta condición existe se debe a que los riesgos identificados de mayor prioridad tienen una probabilidad alta o muy alta de ocurrencia y su impacto en tiempo y costos es igualmente alta. Se recomienda hablar con los encargados de estas áreas, para tomar acciones correctivas para disminuir estas condiciones de riesgo altas.

CONCLUSIONES

1. La consideración del conocimiento de los expertos en la evaluación de riesgos es de gran utilidad, pues es esta información la que es realmente certera especialmente cuando ellos pueden emplear su lenguaje natural para emitir estos juicios valorativos.
2. desarrollo de una herramienta computacional, permite facilitar a los directores de proyecto el proceso matemático de las evaluaciones lingüísticas que emiten los expertos con respecto a los riesgos identificados.
3. El manual de procedimiento para la ejecución del Módulo de evaluación de Riesgos, es un soporte útil, para que los directores de proyecto realicen de manera más sencilla la planificación de la gestión de riesgos.
4. La descripción del procedimiento, basado en los lineamientos del PMI, brinda confianza a los directores de proyectos, por el éxito que se evidencia en la realización de proyectos bajo estos lineamientos.

ANEXO B- ARTÍCULO ACADÉMICO

Desarrollo de una herramienta basada en lógica difusa que soporta la planificación de la gestión de riesgos para proyectos de construcción, sometida a las pautas de dirección de proyecto PMI

JORGE ENRIQUE MENESES FLÓREZ

Magister en Ingeniería Mecánica
Universidad Industrial de Santander
jorge.enrique.meneses@gmail.com

EDWIN ALBERTO GARAVITO HERNÁNDEZ

Candidato a Magister en Ingeniería Industrial
Universidad Industrial de Santander
garavito@uis.edu.co

ANNY PAULINE MÁSMELA FUENTES

Ingeniera Industrial
Universidad Industrial de Santander
annypauline@gmail.com

Resumen

En la última década, la mala planificación de la gestión de riesgos por parte de la industria de construcción colombiana se ha evidenciado con los sucesos siniestros que han ocurrido con sus proyectos afectando el factor económico, social y ambiental no solo de los realizadores del proyecto sino también al estado y a los usuarios y/o clientes. Esta mala gestión se debe a la no culturización en el desarrollo de estudios de riesgos porque los directores de proyecto quienes son los encargados de hacer la planeación de todas las áreas de conocimiento definidas por el PMI, se les dificulta establecer una forma de planificación y análisis a estas problemáticas que son no perfectamente definidas. Este artículo tratará sobre un método de evaluación de riesgos que emplea lógica difusa, para que los expertos puedan utilizar su lenguaje poco exacto para evaluar diversas características de los riesgos y así conseguir con estos juicios cualitativos resultados cuantitativos que representarán el impacto individual y global de los riesgos en la ejecución del proyecto. Todo este procedimiento sometido a las pautas de dirección de proyectos PMI para que cada una de las etapas del método sea más confiable de desarrollar pues se ha mostrado éxito con los proyectos ejecutados bajo este estándar.

PALABRAS CLAVE: Lógica difusa, Riesgos en Proyectos de Construcción, Evaluación de Riesgos, Lineamientos del PMI, Lógica Difusa en Toma de Decisiones, Juicio de Expertos.

Abstract

In the last decade, the wrong plan risk management by Colombian construction companies has been shown with the accidents that have happened with their projects affecting the economic, social and environmental factors not only for the developers of the project but also the State and the users/customers. This wrong management is due to the no culture in the development of risk studies because the project managers, who are in charge of doing the planning of all knowledge areas defined by PMI, get difficult to establish a way of planning and analysis these problematic situations which are not perfectly defined. This paper is about a risk evaluation method that employs fuzzy logic, so the experts can use their less exact language to evaluate different risk characteristics and so getting with these qualitative judgments quantitative outputs that represents global and individual risk impacts in the project execution. All this procedure under the guidelines of PMI so every stage of the model is more trusted of developing since has exposed success in projects execute under this standard.

KEY WORDS: Fuzzy Logic, Risk in Construction Projects, Risk Assessment, PMI guidelines, Fuzzy Logic in Decision Making, Expert Judgment.

1. Introducción

La industria de la construcción, más que cualquier otra industria, se encuentra expuesta a diversos riesgos debido a que las actividades se desarrollan bajo condiciones de incertidumbre que pueden convertirse en incremento de costos, retrasos o falla total del riesgo si no se tiene definido un plan de gestión para cuando estos se presenten. Pero, la tarea de gestionar los riesgos es bastante complicada pues la naturaleza de estos se ve afectada por diversos factores que pueden hacer que estos cambien o se generen nuevos a partir de los cambios. Por esta razón la evaluación de riesgos se convierte en la tarea más complicada de realizar porque se vuelve difícil evaluar condiciones que no están perfectamente definidas. Diversas técnicas como Análisis de sensibilidad, Análisis del valor monetario esperado, Simulación de Monte Carlo, Análisis Causa y Efecto son empleados para evaluar los riesgos pero requieren gran cantidad de información que es complicada de obtener para esta clase de proyectos además que no manejan en su totalidad la incertidumbre asociada a estos. Por consiguiente, las investigaciones se han ido ampliando y han creado modelos y metodologías en donde se permita introducir las características inexactas de los riesgos por medio de lógica difusa que permite incorporar en la evaluación de riesgos la opinión de los expertos en su lenguaje natural de emitir juicios.

2. Antecedentes

Idrus, Fadhil y Rohman [1] por medio de lógica difusa hacen estimaciones del costo de contingencia con una variable de salida llamada Magnitud del riesgo, utilizando análisis de riesgos y considerando la probabilidad y gravedad del riesgo. Khazaeni, Khanzadi y Afshar [2] emplean el proceso analítico jerárquico difuso para abordar la asignación balanceada de los riesgos a la parte contractual apropiada. Kuo y Lu [3] aplican nuevas herramientas como la toma de decisiones con múltiples criterios difusos (FMCDM) para evaluar los riesgos y la puntuación directa de diversos atributos difusos (FMADR) para analizar la probabilidad de ocurrencia de múltiples factores de riesgo. Utilizan el enfoque de relaciones de preferencias difusas consistentes para hacer la priorización de riesgos. Para el año 2014, Luo, Lin y Dai [4], introducen el enfoque Fuzzy LinPreRa, que elimina la inconsistencia en la matriz de comparación que presenta el proceso analítico jerárquico, por medio de la propiedad de consistencia recíproca aditiva. Esto lo aplican para los criterios de evaluación para el reclutamiento de personal. Nieto y Ruz [5] decidieron hacer su aporte creando una metodología que permite priorizar los riesgos. Estos son identificados y pasados por el proceso analítico jerárquico que luego de la agregación que se representa por medio de un número difuso, se emplea el método de centro de masas para conocer el peso que representan el grado de importancia en el grupo de riesgos. Zeng, An y Smith [11]

crea una metodología cuyo resultado es la cuantificación de la magnitud total de los riesgos, por medio de un sistema tradicional de lógica difusa con una interface de fusificación, una base de conocimiento y una defusificación. Además emplea el proceso analítico jerárquico difuso para la priorización de los riesgos.

Se pueden encontrar en la literatura cientos de metodologías para evaluar riesgos, pero estas siempre son restringidas a evaluar el impacto individual o el global. Ninguna genera un resultado integral para que las constructoras conozcan la medida completa de los riesgos a los que sus proyectos están expuestos. Por eso se decide crear este método que permite evaluar ciertas características del riesgo que se pasan por el modelo de relaciones de preferencias lingüísticas difusas (Fuzzy LINPRERA) y arroja una priorización de riesgos precisa pues este enfoque elimina la inconsistencia que traen las evaluaciones con valores lingüísticos y además estas características pasan por una adaptación del modelo de Zeng para evaluar la Magnitud total del riesgo y de esta forma que los directores de proyecto tengan diversas perspectivas del riesgo para tomar las acciones más idóneas.

Lo interesante en este nuevo modelo de evaluación de riesgos, es que se desarrolla siguiendo el capítulo de gestión del riesgo del estándar internacional de gestión de proyectos PMBOK® para que cada una de sus fases sea más confiable y así conseguir la gestión de riesgos más acertada.

3. Modelo de evaluación de riesgos

Efectuar gestión de riesgos es de las actividades más complicadas para el director de proyectos, pues requiere de muchas fuentes de información no solo para identificar los riesgos sino para conocer cuáles son las mejores respuestas ante la ocurrencia de estos. El típico marco de referencia para la evaluación consiste en cuatro etapas: identificación de riesgos, evaluación de riesgos, respuesta a los riesgos y monitoreo de riesgos [6]. En este nuevo modelo, se emplean los cuatro primeros procesos de gestión del riesgo del PMI para mejorar el modelo y junto con los enfoques Fuzzy Linprera y sistema difuso tradicional, construir una forma de evaluación de riesgos integral considerando los atributos más importantes que puedan tener los riesgos.

3.1 Plan de gestión de los riesgos

El plan de gestión de los riesgos es un documento que lleva descrito los elementos y el tratamiento que se le dará a los riesgos identificados.

3.1.1 Evaluadores

Para que las evaluaciones de los riesgos sean objetivas, se deben establecer expertos de diversas de las

diversas disciplinas a considerar. Estos expertos deben tener como requisito mínimo dos años de experiencia en trabajos de obras de construcción para asegurar que sus evaluaciones son realistas.

3.1.2 Categorías de riesgo

Proporciona un medio para agrupar las causas potenciales de riesgos [6]. Se pueden emplear distintos enfoques para clasificar riesgos dependiendo del proyecto. Diversos estudios se han realizado, algunos empleando encuestas otros evaluando las posibles condiciones de riesgo que un proyecto en específico, otros apuntando hacia los objetivos del proyecto. Según diversos estudios revisados [7, 9] los riesgos más comunes en proyectos de construcción se encuentran bajo la siguiente clasificación:

- **Gestión del proyecto:** riesgos asociados a los procesos de definición de los entregables y planeación de las actividades y recursos que se emplearán en el proyecto.
- **Ingeniería:** riesgos referentes a los diseños y estudios de ingeniería, suelos, estructuras y demás documentos que definen las condiciones de sismoresistencia del terreno y de la infraestructura a realizar.
- **Peligros naturales:** riesgos asociados a los eventos de fuerza mayor que pueden presentarse en la obra de construcción.
- **Seguridad en la construcción:** riesgos a los que se encuentran expuestos los trabajadores en el momento que realizan sus labores.
- **Sociales:** por ser proyectos que se ejecutan en áreas abiertas y en donde participan diferentes interesados, se presentan riesgos generados por los diferentes involucrados.
- **Financieros/Económicos:** riesgos asociados a cambios en la economía del país y de los recursos que disponga la compañía constructora.
- **Logísticos:** riesgos presentes en toda la cadena de abastecimiento de recursos para la ejecución de la obra.
- **Procesos y actividades:** la preparación y realización de los trabajos conlleva a riesgos referentes a la eficiencia, efectividad y calidad de los procesos.

3.1.3 Criterios de evaluación

Para el correcto análisis de riesgos, se necesita que se establezcan las características que describirán el estado de los riesgos para el proyecto a desarrollar. Para hacer este proceso más sencillo, se incorporan etiquetas lingüísticas que permitirán a los expertos emitir juicios empleando su lenguaje natural de toma de decisiones. Esto mediante el empleo de lógica difusa que relaciona a cada etiqueta una función de pertenencia a un conjunto determinado.

- **Etiquetas lingüísticas para priorizar los riesgos:** Absolutamente importante (AB), Muy fuertemente importante (VS), Esencialmente importante (ES), Débilmente importante (WK), Igualmente importante (EQ),

Débilmente no importante (WN), Esencialmente no importante (EN), Muy fuertemente no importante (VN), Absolutamente no importante (AN).

- **Etiquetas lingüísticas para variables de estado de los riesgos:** para la probabilidad y gravedad del riesgo se denominan Muy bajo (VL), Bajo (L), Medio (M), Alto (H), Muy alto (VH). Para la consecuencia económica se denominan Marginal (VL), Importante (L), Severo (M), Grave (H), Catastrófica (VH). En la figura 2 se muestran las funciones de pertenencia para estas etiquetas lingüísticas.

- **Etiquetas lingüísticas para variable de resultado de los riesgos:** Negligente (N), Menor (Mi), Mayor (Ma), Crítico (C). En la figura 3 se muestran las funciones de pertenencia para esta variable

3.1.4 Métodos de evaluación

Para conocer el impacto de los riesgos de manera individual y global se emplean dos métodos que se combinan en la nueva herramienta propuesta:

- **Enfoque fuzzy Linprera:** metodología que se emplea para priorizar los elementos de una estructura de desglose.
- **Sistema difuso tipo mamdani:** modelo difuso en donde las tres características de los riesgos son evaluadas y entran en una base de conocimiento que generan un resultado que representa la Magnitud del Riesgo.

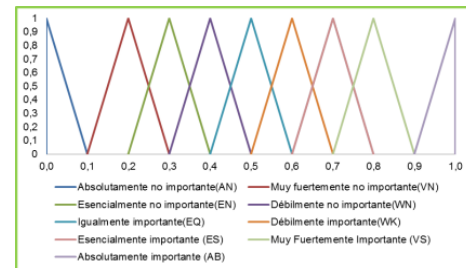


Figura 61. Funciones de pertenencia para variables de comparación

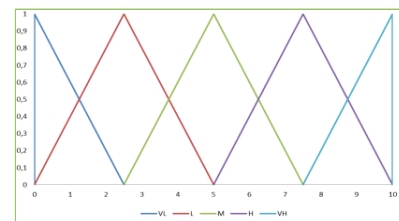


Figura 62. Funciones de pertenencia para variables de entrada

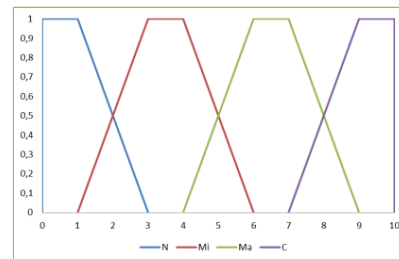


Figura 63. Funciones de pertenencia para variable de salida

3.2 Identificación de riesgos

La identificación de riesgos investigada para proyectos de construcción es la siguiente: [7,9].

Tabla 33. Riesgos en proyectos de construcción

Código	Riesgo
C1	Gestión del proyecto
R11	Alcance del proyecto mal definidos
R12	Demora en otorgamiento de licencias
R13	Programación del tiempo no realista
R14	Planeación errónea de los costos y el presupuesto
R15	Personal de gestión inexperto
R16	Estrategia de contratación incorrecta
C2	Ingeniería
R21	Diseños de ingeniería no son realistas
R22	Estudios de cargas mal realizados
R23	Mala calidad del concreto/asfalto
R24	Mampostería mal realizada
R25	Estructuras metálicas inestables
R26	Estudios geotécnicos mal realizados
C3	Peligros Naturales
R31	Tormentas
R32	Inundaciones
R33	Terremotos
R34	Filtro de Aguas subterráneas
R35	Deslizamiento de tierra
R36	Contaminación ambiental
C4	Seguridad en la construcción
R41	No señalización de riesgos en la obra
R42	Trabajadores con EPP inadecuados
R43	Equipos de elevación en mal estado
R44	Maquinaria inadecuada
R45	Herramientas de trabajo en estado de deterioro
R46	Alto nivel de accidentalidad
C5	Sociales
R51	Protestas
R52	Vandalismo
R53	Sabotaje
R54	Terrorismo
R55	Robo
R56	Corrupción
C6	Financieros/Económicos
R61	No disponibilidad de fondos
R62	Inflación
R63	Tasas de cambios de divisas
R64	Tasas de Interés altas
R65	Quiebra suspensión de pago contratista
R66	Cambio precios de recursos
C7	Logísticos
R71	Mala selección de proveedores
R72	Materiales comprados de calidad baja
R73	Disponibilidad baja de materiales y herramientas
R74	Subestimación de cantidades
R75	Retrasos en el suministro de materiales
R76	Transporte de carga inadecuado
C8	Procesos y actividades
R81	Baja productividad
R82	Personal de la obra inexperto
R83	Paquetes de trabajo mal definidos
R84	Mala programación de las actividades de paquetes de trabajo
R85	Subestimación de horas hombres para las actividades
R86	Baja calidad en los procesos y actividades

3.3 Análisis cualitativo de riesgos

En esta etapa se desarrollan los procesos para priorizar los riesgos con el propósito de conocer los riesgos de mayor urgencia de atención. Para efectuar un correcto análisis cualitativo de riesgos se deben seguir los siguientes pasos:

- *Estructura de desglose de riesgos*: es una representación jerárquica, en donde se muestran los riesgos en sus respectivas categorías. Un ejemplo de estructura de desglose del riesgo se presenta en la figura 5.
- *Matriz de comparación de riesgos por parte de los expertos*: esta matriz se crea para que cada uno de los evaluadores efectúe su juicio comparativo de los riesgos entre sí. Basada en la estructura de desglose de riesgos, primero se evalúan las categorías y seguido los riesgos en su respectivo orden por categoría. Estas comparaciones empleando las etiquetas lingüísticas definidas para priorizar los riesgos.
- *Sistema difuso para priorizar los riesgos*: el método para priorizar los riesgos es fuzzy Linprera (linguistic preference relations) que está basado en el método de relaciones de preferencias difusas consistentes CFPR (consistent fuzzy preference relations) que permite usar variables lingüísticas para una serie de criterios y evita la necesidad de revisar la consistencia del proceso de toma de decisiones.

Sea $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ un conjunto finito de criterios de evaluación. La relación de preferencia difusa P está dada por la función de pertenencia $\mu_p: C \times C \rightarrow [0, 1]$. Las relaciones de preferencia difusa se representa por la matriz $P = [p_{ij}]$ en donde $\mu_p = P(C_i, C_j)$, $p_{ij} + p_{ji} = 1$ y $p_{ii} = 0,5 \forall i, j \in \{1, \dots, n\}$. Cuando la matriz de relaciones de preferencia $P = [p_{ij}]$ tiene la propiedad de consistencia aditiva, existen relaciones que pueden ser formuladas como en las ecuaciones 1 y 2.

$$(1) \quad p_{ij} + p_{jk} + p_{ki} = \frac{2}{3}, \forall i, j, k,$$

$$(2) \quad p_{i(i+1)} + p_{(i+1)(i+2)} + \dots + p_{(j-1)(j)} + p_{ji} = \frac{j-i+1}{2}, \forall i, < j$$

Por medio de las ecuaciones 1 y 2 se puede construir una matriz de relaciones de preferencias difusas consistente. Cuando los valores calculados de esta matriz, están por fuera del intervalo $[0,1]$, pero en el intervalo $[-a, 1+a]$, $a = \min(p_{ij}, p_{ij} \in P)$ se requiere de una función de transformación para preservar la consistencia recíproca y aditiva. A cada uno de los elementos de la matriz se aplica la siguiente fórmula

$$(3) \quad f(x) = \frac{x+a}{1+2a}$$

Para cada una de las etiquetas lingüísticas se asocia un número difuso triangular como la ecuación 4, cuya función de membresía va de 0 a 1

$$(4) \quad \mu_A(x) = \begin{cases} (x - a^l)/(a^m - a^l), & \text{para } a^l \leq x \leq a^m \\ 1, & \text{para } a^m \leq x \leq a^n \\ (a^u - x)/(a^u - a^n), & \text{para } a^n \leq x \leq a^u \\ 0, & \text{para } a^l \geq x \geq a^u \end{cases}$$

en donde l y u son el límite inferior y superior del número difuso. En la tabla 2 se muestran los números difusos triangulares para las etiquetas lingüísticas para la comparación de los riesgos.

Tabla 34. Etiquetas lingüísticas para comparación de los riesgos

Variable lingüística	N° difuso triangular
Absolutamente importante (AB)	(0.90, 1.00, 1.00)
Muy fuertemente importante (VS)	(0.70, 0.80, 0.90)
Esencialmente importante (ES)	(0.60, 0.70, 0.80)
Débilmente importante (WK)	(0.50, 0.60, 0.70)
Igualmente importante (EQ)	(0.40, 0.50, 0.60)
Débilmente no importante (WN)	(0.30, 0.40, 0.50)
Esencialmente no importante (VN)	(0.20, 0.30, 0.40)
Muy fuertemente no importante (VN)	(0.10, 0.20, 0.30)
Absolutamente no importante (AN)	(0.00, 0.00, 0.10)

El método fuzzy Linprera propuesto por Wang y Chen trata con estos juicios vagos. Una serie de evaluaciones finitas se asocia con la matriz de relaciones de preferencias explicada con anterioridad que emplea el método de relaciones de preferencias difusas consistentes CFPR. Si la matriz anterior cumple con la propiedad de consistencia recíproca aditiva, luego las siguientes expresiones deben ser equivalentes.

$$(5) \quad p_{ij}^l + p_{ji}^u = p_{ij}^m + p_{ji}^m = p_{ij}^u + p_{ji}^l = 1$$

$$(6) \quad p_{ij}^l + p_{jk}^l + p_{ki}^u = p_{ij}^m + p_{jk}^m + p_{ki}^m = p_{ij}^u + p_{jk}^u + p_{ki}^l = \frac{3}{2} \quad \forall i < j < k$$

$$(7) \quad \begin{cases} p_{i(i+1)}^l + p_{(i+1)(i+2)}^l + \dots + p_{(j-1)j}^l + p_{ji}^u \\ p_{i(i+1)}^m + p_{(i+1)(i+2)}^m + \dots + p_{(j-1)j}^m + p_{ji}^m = \frac{j-i+1}{2} \\ p_{i(i+1)}^u + p_{(i+1)(i+2)}^u + \dots + p_{(j-1)j}^u + p_{ji}^l \end{cases}$$

Igualmente a CFPR, cuando los valores conseguidos de la matriz P no están en el rango de 0 a 1 se aplica la fórmula 3 para mantener la consistencia aditiva y recíproca.

Para determinar los pesos de cada uno de los riesgos, la matriz de preferencias lingüísticas debe ser completamente consistente. Para obtener los pesos, este estudio adopta el enfoque de vector columna medio propuesto por Saaty y Vargas [8].

$$(8) \quad r_{ij} = \frac{p_{ij}}{p_{ij} \oplus p_{2j} \oplus \dots \oplus p_{nj}}$$

$$w_i = \frac{1}{n} (r_{i1} \oplus r_{i2} \oplus \dots \oplus r_{in}) = (w_i^l, w_i^m, w_i^u)$$

El resultado de este enfoque es un número difuso triangular que debe ser defusificado. Los métodos de defusificación más empleados son la media del máximo, centro de área, o α -corte. El método de α -corte es el empleado para este estudio y presentado en la ecuación 9 y presentado por Liou y Wang. La ventaja de este método es que considera la preferencia α y percepción λ del riesgo por parte de los tomadores de decisión. Para un $\alpha=0$ significa que el grado de incertidumbre es amplio y un $\alpha=1$ indica que la decisión es más estable. Para un $\lambda=0$ significa que el tomador de decisión es optimista y $\lambda=1$ el tomador de decisión es pesimista. La suma de todos los pesos calculados cumple con la ecuación 9.

$$(9) \quad \sum_{i=1}^n w_n = 1$$

Las ecuaciones 10 y 11 se usan para indicar los valores normalizados de los pesos de las categorías y riesgos evaluados.

$$(10) \quad w_i^{l\alpha} = (w_i^m - w_i^l) \times \alpha + w_i^l, w_i^{u\alpha} = (w_i^u - w_i^m) \times \alpha$$

$$(w_i^\alpha)^\lambda = \lambda \times w_i^{l\alpha} + (1 - \lambda) \times w_i^{u\alpha}, 0 \leq \lambda \leq 1, 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$(11) \quad w_i = \frac{(w_i^\alpha)^\lambda}{\sum_{i=1}^n (w_i^\alpha)^\lambda}$$

Al final, se tabula en forma de lista cada uno de las categorías y riesgos con su respectivo peso para visualizar que riesgos son los de mayor impacto en la ejecución del proyecto.

3.4 Análisis cuantitativo de riesgos

Es el proceso de analizar numéricamente el efecto de los riesgos identificados sobre los objetivos del proyecto. El beneficio clave de este proceso es que por medio de un resultado total generado, se definen acciones para reducir la incertidumbre del proyecto. Para hacer este análisis, se emplea un sistema difuso tipo mamdani, que está compuesto por tres variables de entrada que son la probabilidad de riesgo, la gravedad del riesgo y la consecuencia económica cuyas etiquetas fueron descritas en el numeral 2.1.3. En la tabla 3, 4 y 5 se muestran los números difusos para las variables de entrada al sistema difuso respectivamente.

Tabla 35. Etiquetas lingüísticas para variable de estado probabilidad de riesgo

Prob. Riesgo	Descripción	Nº difuso triangular
Muy bajo (VL)	Muy poco probable que suceda (0-10%)	(0,0,2,5)
Bajo(L)	Ocurrencia es poco Probable (11-30%)	(0,2,5,5)
Medio(M)	Probable que ocurra (31-60%)	(2,5,5,7,5)
Alto(H)	Muy probable que ocurra (61-90%)	(5,7,5,10)
Muy alto(VH)	Ocurrencia es casi inevitable (90-100%)	(7,5,10,10)

Tabla 36. Etiquetas lingüísticas para variable de estado gravedad del riesgo

Grav. del Riesgo	Descripción	Nº difuso triangular
Muy bajo (VL)	Nada de retrasos o retrasos entre 5 días	(0,0,2,5)
Bajo(L)	Leve retraso entre 6-12 días	(0,2,5,5)
Medio(M)	Retraso moderado entre 13-21	(2,5,5,7,5)
Alto(H)	Retraso considerable entre 3-5 semanas	(5,7,5,10)
Muy alto(VH)	Retraso serio en más de 5 semanas	(7,5,10,10)

Tabla 37. Etiquetas lingüísticas para variable de estado consecuencia económica

Consecuencia Económica	Descripción	Nº difuso triangular
Marginal (VL)	<US10.000(marginal)	(0,0,2,5)
Importante(L)	US10.000-100.000(importante)	(0,2,5,5)
Severo(M)	US100.000-1millon(Severo)	(2,5,5,7,5)
Grave(H)	US1 millon-10millon(Grave)	(5,7,5,10)
Catastrófica(VH)	>US10millon(catastrófica)	(7,5,10,10)

Tabla 38. Etiquetas lingüísticas para variable de resultado de los riesgos

Magnitud del Riesgo	Descripción	Número difuso
Negligente (N)	Riesgo Aceptable	(0,0,1,3)
Menor (Mi)	El riesgo es tolerable. Control de riesgo debe ser emprendido si es rentable hacerlo.	(1,3,4,6)
Mayor (Ma)	El riesgo debe reducirse si es razonablemente practicable de hacerlo.	(4,6,7,9)
Crítico (C)	El riesgo debe ser reducido, salvo en circunstancias excepcionales.	(7,9,10,10)

✓ *Evaluación de los riesgos:* un número determinado de expertos S realizan su evaluación de todos los riesgos r identificados, con respecto a las variables de entrada definidas con sus etiquetas lingüísticas en las tablas 3, 4 y 5. Estas evaluaciones son transformadas en un número difuso trapecoidal,

$$(12) \quad Eval_i^s = Etiqueta = (l, m, n, u), \forall i, \in \{1, \dots, r\}, \forall s, \in \{1, \dots, S\}$$

Luego, se promedian las evaluaciones de los expertos por cada riesgo y categoría

$$(13) \quad PROMEVAL_i = \frac{\sum_{s=1}^S Eval_i^s}{S}, \forall i \in \{1, \dots, r\},$$

✓ *Cálculo de la variable de entrada total:* como cada riesgo tiene un peso entre todos los riesgos, el promedio de las evaluaciones es multiplicado por este peso y luego sumados estos resultados para conseguir un solo valor por cada variable. Por emplear el peso asociado a cada riesgo, la evaluación se convierte más objetiva y acercada a la realidad de las condiciones de los riesgos

$$(14) \quad VE_e = \sum_{i=1}^r PROMEVAL_i * w_i, \forall e \in \{1 \dots E\},$$

en donde E es la cantidad de variables de entrada o estado del modelo, que para este caso son la probabilidad, gravedad y consecuencia económica del riesgo.

✓ *Inferencia difusa:* el valor promedio correspondiente de las variables de entrada, efectúa el proceso de inferencia difusa que consiste en ingresar el número difuso trapecoidal

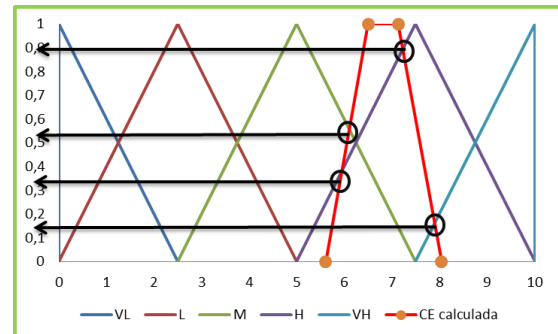


Figura 64. Inferencia difusa de variables de estado

generado, a su respectiva gráfica para observar y anotar el grado de pertenencia a las funciones de esta variable de entrada. Se toman aquellas con las que se intersecta. En caso de intersectarse dos o más veces con una misma función, se toma el que tenga mayor grado de pertenencia.

✓ *Reglas difusas:* la matriz de asociación fuzzy para evaluación de riesgos para la variable de control que es la Magnitud Total de los Riesgos (RM) se describe en la forma de reglas if-then. Considerando la kth se representa con la siguiente premisa

$$(15) \quad R^k: \text{If } VE_1 \text{ es } \mu_{VE_1}^k \text{ y } VE_2 \text{ es } \mu_{VE_2}^k \text{ y } \dots \text{ y } VE_e \text{ es } \mu_{VE_e}^k \text{ luego } RM \text{ es } \mu_{RM}^k$$

en donde $\mu_{V_{Ee}}^k$ denota las funciones de pertenencia que se activaron de las variables de entrada o de estado de los riesgos en las condiciones que los expertos decidieron en que estos se encontraban. Las partes en la premisa están conectadas con el operador “and” esto implica que el valor RM^k que activará la variable de salida para este caso la Magnitud Total de los Riesgos puede obtenerse por medio de la operación de intersección difusa (mínimo). Esta implicación se expresa:

$$(16) \quad \mu_{RM^k}(x, y) = \mu_{V_{E1}}^k(x_1) \wedge \mu_{V_{E2}}^k(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{V_{Ee}}^k(x_e),$$

$$k = 1, 2, \dots, K,$$

en donde x representan los grados de pertenencia de las funciones de pertenencia de las variables de entrada $\mu_{V_{Ee}}^k$ y y el valor mínimo de las x_e combinadas siendo $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_e \in X_e, x \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_e$ y $y \in U$, siendo (X_1, X_2, \dots, X_e) el universo en discurso de las variables de estado y U el universo de la variable de control. El valor de mayor relevancia en las premisas activadas está relacionado con la función de membresía concluyente y la salida que es una función de pertenencia truncada. La función de pertenencia truncada que representa la implicación de salida de cada regla es agregada en una sola función de membresía como se ilustra en la figura 25. La agregación que se realiza por medio del operador unión (máximo) se denota como:

$$(17) \quad \mu_R(x, y) = \bigvee_{k=1}^K \mu_{RM^k}(x, y)$$

en donde $\mu_R(x, y)$ es la función de membresía difusa de salida después de la agregación es decir la función que representa el conjunto de funciones de pertenencias truncadas en el paso anterior.

✓ *Defusificación:* la variable de salida del procedimiento anterior es un conjunto difuso, la defusificación se usa para convertir este resultado en un valor numérico que representará la Magnitud del riesgo (RM). El método del centro medio se empleará para la defusificación. El valor que representará al conjunto puede calcularse de la manera:

$$(18) \quad RM = \frac{(\sum_{i=1}^q Y_i \mu_{RM^*}(y_i))}{(\sum_{i=1}^q \mu_{RM^*}(y_i))}$$

en donde Y_i denota el centro del i – ésimo término del conjunto difuso q de RM y $\mu_{RM^*}(y_i)$ denota la función de pertenencia del i – ésimo término del conjunto difuso de RM.

El valor conseguido de Magnitud del Riesgo se ubica en la gráfica de sus etiquetas lingüísticas para conocer la función con que tenga mayor grado de pertenencia.

4. Caso de estudio

Para validar el modelo de evaluación de riesgos se empleará el trabajado por Kuo y Lu en “Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects” en donde estudian los riesgos en la construcción de un sistema de metro de Taipei. En este se consideran 5 expertos con 15 años de experiencia en gestión de proyectos de construcción. Una aproximación a las variables lingüísticas empleadas en el modelo original se realiza para desarrollar este modelo. Los riesgos identificados para este proyecto se ilustran en estructura de desglose del riesgo ilustrada en la figura 5 y descritos en la tabla 7.

La matriz de relaciones de preferencias lingüísticas difusas se muestra en la tabla 8.

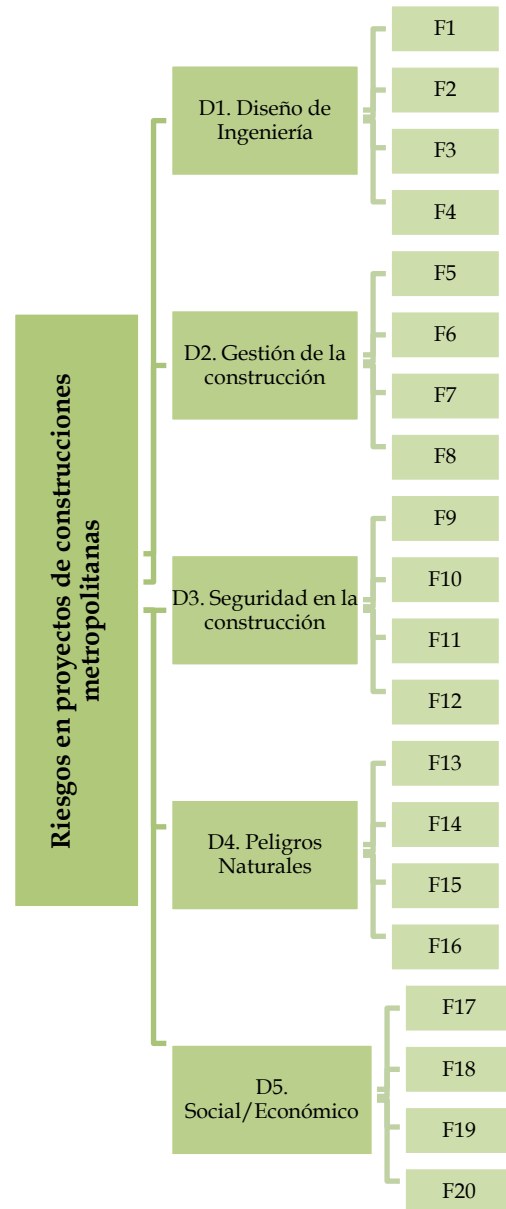


Figura 65. Estructura de desglose del riesgo

Tabla 39. Riesgos identificados para caso de estudio

Código	Factor de Riesgo
F1	Errores en el diseño
F2	Interfaces de conflicto
F3	Estudios de construcción malos
F4	Diseño e ingeniería inapropiada
F5	Filtro de aguas subterráneas
F6	Tifones
F7	Lluvias fuertes
F8	Terremotos
F9	Protección insuficiente de edificios e instalaciones adyacentes
F10	Seguridad de los trabajadores insuficiente
F11	Control y gestión inefectiva del tráfico
F12	Protección ineficiente de ambientes alrededores
F13	Incremento de precio de materiales de construcción
F14	Protestas de los habitantes aledaños
F15	Interferencias políticas
F16	Incremento en labores y sueldos de los empleados
F17	Insuficiente experiencia y habilidades en trabajos de construcción
F18	Plan de construcción inadecuado
F19	Retrasos en reubicación de tuberías e instalaciones
F20	Suministro inestable de materiales críticos

Tabla 40. Matriz de preferencias lingüísticas difusas

	E1	E2	E3	E4	E5	
D1	EQ	EQ	WK	WN	EQ	D2
D2	ES	WK	WK	ES	AB	D3
D3	WK	ES	VS	ES	EN	D4
D4	WK	WK	EQ	ES	WN	D5
F1	ES	WN	VS	WN	EQ	F2
F2	ES	WK	VS	ES	ES	F3
F3	WK	EQ	WK	WK	ES	F4
F5	EQ	EN	ES	VS	EN	F6
F6	WK	EQ	EQ	WN	ES	F7
F7	WK	ES	VS	EQ	WK	F8
F9	WN	EQ	EQ	WK	ES	F10
F10	ES	VS	ES	ES	ES	F11
F11	ES	WK	EQ	ES	WK	F12
F13	EQ	EQ	EQ	VS	ES	F14
F14	VS	ES	ES	EN	WN	F15
F15	ES	ES	WK	WN	EN	F16
F17	WN	EQ	EQ	WK	ES	F18
F18	ES	WK	ES	ES	ES	F19
F19	ES	EQ	WK	ES	WK	F20

$$p_{12} = \frac{1}{5}(EQ + EQ + WK + WN + EQ)$$

$$p_{12} = \frac{1}{5}((0.4, 0.50, 0.60) + (0.4, 0.50, 0.60) + (0.5, 0.60, 0.70) + (0.30, 0.40, 0.50) + (0.4, 0.50, 0.60))$$

$$p_{12} = (0.4, 0.50, 0.60)$$

$$p_{21} = (0.40, 0.50, 0.6)$$

Tabla 41. Promedios de evaluaciones de los expertos

Categorías	D1	D2	D3	D5	D6
D1	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.40, 0.50, 0.60)			
D2	(0.40, 0.50, 0.60)	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.62, 0.72, 0.80)		
D3		(0.20, 0.28, 0.38)	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.52, 0.62, 0.72)	
D4			(0.28, 0.38, 0.48)	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.46, 0.56, 0.66)
D5				(0.34, 0.44, 0.54)	(0.50, 0.50, 0.50)

Para los valores restantes se emplean las ecuaciones 1 y 2

$$p_{31}^l = \frac{3-1+1}{2} - p_{12}^u - p_{23}^u = 1.5 - 0.60 - 0.80 = 0.1$$

$$p_{31}^m = \frac{3-1+1}{2} - p_{12}^m - p_{23}^m = 1.5 - 0.50 - 0.72 = 0.28$$

$$p_{31}^u = \frac{3-1+1}{2} - p_{12}^l - p_{23}^l = 1.5 - 0.40 - 0.62 = 0.48$$

Tabla 42. Matriz de evaluaciones de los expertos

Categorías	D1	D2	D3	D5	D6
D1	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.40, 0.50, 0.60)	(0.52, 0.72, 0.90)	(0.54, 0.84, 1.12)	(0.50, 0.90, 1.28)
D2	(0.40, 0.50, 0.60)	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.62, 0.72, 0.80)	(0.64, 0.84, 1.02)	(0.60, 0.90, 1.18)
D3	(0.10, 0.28, 0.48)	(0.20, 0.28, 0.38)	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.52, 0.62, 0.72)	(0.48, 0.68, 0.88)
D4	(-0.12, 0.16, 0.46)	(-0.02, 0.16, 0.36)	(0.28, 0.38, 0.48)	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.46, 0.56, 0.66)
D5	(-0.28, 0.10, 0.50)	(-0.18, 0.10, 0.40)	(0.12, 0.32, 0.52)	(0.34, 0.44, 0.54)	(0.50, 0.50, 0.50)

El valor mínimo a es de 0,28. Con este valor se aplica la ecuación 3 a todos los elementos de la matriz para que la sea consistente

Tabla 43. Matriz de preferencias lingüísticas difusas en su forma consistente

Categorías	D1	D2	D3	D5	D6
D1	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.44, 0.50, 0.56)	(0.51, 0.64, 0.76)	(0.53, 0.72, 0.90)	(0.50, 0.76, 1.00)
D2	(0.44, 0.50, 0.56)	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.58, 0.64, 0.69)	(0.59, 0.72, 0.83)	(0.56, 0.76, 0.94)
D3	(0.24, 0.36, 0.49)	(0.31, 0.36, 0.42)	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.51, 0.58, 0.64)	(0.49, 0.62, 0.74)
D4	(0.10, 0.28, 0.47)	(0.17, 0.28, 0.41)	(0.36, 0.42, 0.49)	(0.50, 0.50, 0.50)	(0.47, 0.54, 0.60)
D5	(0.00, 0.24, 0.50)	(0.06, 0.24, 0.44)	(0.26, 0.38, 0.51)	(0.40, 0.46, 0.53)	(0.50, 0.50, 0.50)

Con estos valores, se aplica la ecuación 8 a 11 con $\alpha=\lambda=0.5$ y se obtiene la el listado de riesgos priorizados como se muestra en la tabla 12.

Para seguir con el modelo actual y hacer el cálculo de Magnitud del riesgo que no efectúan en el caso de estudio, se tomarán los datos de probabilidad de ocurrencia recolectados en el caso de estudio y se ajustarán a las variables lingüísticas del modelo actual.

Tabla 44. Evaluaciones de los expertos de la probabilidad de ocurrencia

	E1	E2	E3	E4	E5
F1	L	L	L	M	L
F2	L	L	L	L	L
F3	L	L	L	L	L
F4	M	M	L	L	L
F5	M	L	M	M	M
F6	L	L	M	L	M
F7	H	H	H	H	M
F8	L	L	M	M	L
F9	L	L	L	L	L
F10	M	M	M	L	L
F11	M	L	L	L	M
F12	L	M	L	L	M
F13	M	M	M	L	L
F14	M	L	L	M	M
F15	H	M	M	L	L
F16	H	H	H	H	H
F17	M	M	H	L	H
F18	M	H	H	H	H
F19	H	H	H	H	L
F20	H	L	L	L	L

Tabla 45. Priorización de riesgos obtenidos mediante método actual del caso de estudio

Código	Riesgo	Peso local	Puesto	Peso Global	Puesto
D1	Diseño de Ingeniería	0,253	2		
F1	Errores en el diseño	0,321	1	0,081	1
F2	Interfaces de conflicto	0,301	2	0,076	2
F3	Estudios de construcción malos	0,214	3	0,054	8
F4	Diseño e ingeniería inapropiada	0,164	4	0,042	11
D2	Peligros Naturales	0,257	1		
F5	Filtro de aguas subterráneas	0,286	1	0,074	3
F6	Tifones	0,282	2	0,073	4
F7	Lluvias fuertes	0,259	3	0,067	5
F8	Terremotos	0,173	4	0,044	10
D3	Seguridad en la construcción	0,196	3		
F9	Protección insuficiente de edificios e instalaciones adyacentes	0,319	1	0,062	6
F10	Seguridad de los trabajadores insuficiente	0,307	2	0,060	7
F11	Control y gestión inefectiva del tráfico	0,215	3	0,042	15
F12	Protección ineficiente de ambientes alrededores	0,158	4	0,031	17
D4	Social/Económico	0,159	4		
F13	Incremento de precio de materiales de construcción	0,315	1	0,050	9
F14	Protestas de los habitantes aledaños	0,268	2	0,042	14
F15	Interferencias políticas	0,224	3	0,035	16
F16	Incremento en labores y sueldos de los empleados	0,194	4	0,031	18
D5	Gestión de la Construcción	0,136	5		
F17	Insuficiente experiencia y habilidades en trabajos de construcción	0,314	1	0,043	12
F18	Plan de construcción inadecuado	0,302	2	0,041	13
F19	Retrasos en reubicación de tuberías e instalaciones	0,222	3	0,030	19
F20	Suministro inestable de materiales críticos	0,162	4	0,022	20

Aplicando las ecuaciones 13 y 14 se obtiene

$$Probabilidad\ de\ riesgo = (1,627; 4,127; 4,127; 6,627)$$

La inferencia difusa para esta variable de estado se muestra en la figura 6.

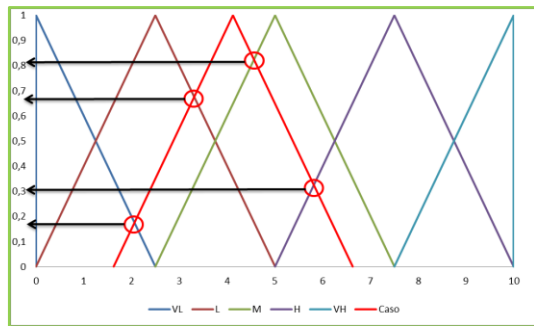


Figura 66. Inferencia difusa para variables de estado

$$RL = (VL\ 0,1746), (L\ 0,6746), (M\ 0,8254), (H\ 0,3254)\}$$

De igual forma para las demás variables de entrada o estado. Para evaluar todo el modelo, se consideró la misma evaluación para las demás variables de estado.

Las reglas activadas son las mostradas en la tabla 14.

La Magnitud del riesgo por método de centro medio es igual

$$RM = \frac{1 * 0,1746 + 4 * 0,6746 + 7 * 0,8254 + 10 * 0,3254}{0,1746 + 0,6746 + 0,8254 + 0,3254}$$

$$RM = 5,9524$$

Tabla 46. Reglas activadas para el modelo actual

CE	RS	RL			
		VL 0,1746	L 0,6746	M 0,8254	H 0,3254
Marginal(VL) 0,1746	H 0,3254	N 0,1746	Mi 0,1746	Mi 0,1746	Ma 0,1746
	M 0,8254	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746	Mi 0,1746
	L 0,6746	N 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746
	VL 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	N 0,1746
Importante (L) 0,6746	H 0,3254	N 0,1746	Mi 0,3254	Ma 0,3254	C 0,3254
	M 0,8254	N 0,1746	N 0,6746	Mi 0,6746	Ma 0,3254
	L 0,6746	N 0,1746	N 0,6746	Mi 0,6746	Mi 0,3254
	VL 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746
Severo(M) 0,8254	H 0,3254	Mi 0,1746	Mi 0,3254	Ma 0,3254	C 0,3254
	M 0,8254	N 0,1746	Mi 0,6746	Ma 0,8254	Ma 0,3254
	L 0,6746	N 0,1746	Mi 0,6746	Ma 0,6746	Ma 0,3254
	VL 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746	Ma 0,1746
Grave(H) 0,3254	H 0,3254	Mi 0,1746	Ma 0,3254	Ma 0,3254	C 0,3254
	M 0,8254	Mi 0,1746	Ma 0,3254	Ma 0,3254	C 0,3254
	L 0,6746	N 0,1746	Mi 0,3254	Ma 0,3254	Ma 0,3254
	VL 0,1746	N 0,1746	N 0,1746	Mi 0,1746	Ma 0,3254

Este valor se ingresa en la gráfica de Magnitud del riesgo para conocer el grado de pertenencia a las funciones de pertenencia, como se muestra en la figura 7.

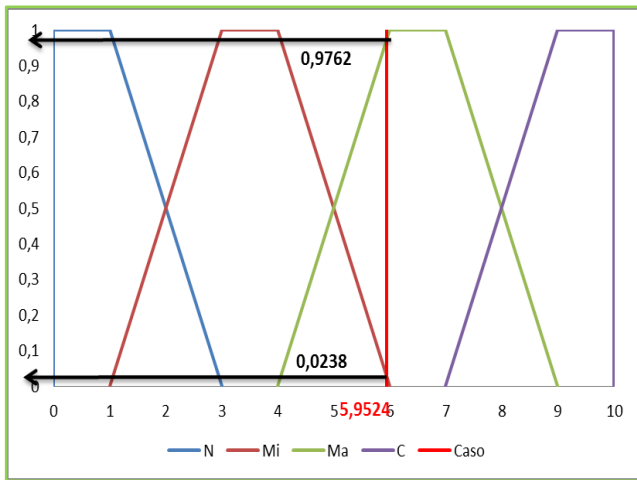


Figura 67. Magnitud del riesgo para proyecto evaluado

Para el ejemplo, la Magnitud total del riesgo tiene un grado de pertenencia del 10% para la función Menor y un grado de pertenencia del 90% para la función Mayor, es decir según los resultados que muestra la gráfica, la Magnitud del riesgo para este caso es Mayor y según la tabla 7 “*el riesgo debe reducirse si es razonablemente practicable hacerlo*”.

5. Conclusiones

La gestión del riesgo en proyectos de construcción requiere de un efectivo plan de evaluación y tratamiento de los riesgos. La forma tradicional de realizar estos planes, es por medio de evaluaciones probabilísticas que los expertos del proyecto no manejan con destreza. Los involucrados en la realización del proyecto, realizan estas evaluaciones por medio de su lenguaje natural, llamado valores lingüísticos, que es difícil de cuantificar.

Un nuevo modelo que apoya la planificación de la gestión de los riesgos es creado con el propósito de facilitar este proceso en la dirección del proyecto y a animar a los expertos a realizar el proceso de planificación de la gestión de los riesgos.

Incorporando dos modelos de lógica difusa permitirán convertir estos valores lingüísticos en valores numéricos que representarán las condiciones de ejecución del proyecto. Por medio de estos dos métodos, el enfoque de relaciones de preferencias lingüísticas difusas y un modelo tipo mamdani se logra tener dos perspectivas del riesgo, una perspectiva individual para trabajar en aquellos riesgos que son de mayor atención y otra grupal que refleja la condición del proyecto para dirigir los esfuerzos en el mejoramiento del estado del proyecto.

La realización de la herramienta basada en lógica difusa sometida a los lineamientos del PMI, proporciona confianza a los directores de proyectos, por ser estos estándares los que han mostrado éxito por los proyectos ejecutados bajo estos lineamientos.

6. Referencias

- [1] Idrus, A., Fadhil, N. M., Rohman, M.A. (2011). Development of project cost contingency estimation model using risk analysis and fuzzy expert system. *Expert System with Applications*. (38), p. 1501-1508.
- [2] Khazaeni, G., Khanzadi, M., Afshar, A. (2012). Fuzzy adaptive decision making model for selection balanced risk allocation. *International Journal of Project Management*. (30), p. 511-522.
- [3] Kuo, Y.C., Lu, S.T. (2013). Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. *International Journal of Project Management*. (31), p. 602-614.
- [4] Luo, S.T., Lin, C.W., Dai, Y.F., Shiue, Y.C. (2014). The Evaluation Criteria of Recruiting Local Staffs for Taiwanese Enterprise in China. En: *Journal of Testing and Evaluating*. (42), p. 1-12.
- [5] Nieto-Morote, A., Ruz-Vila, F. (2011). A fuzzy approach to construction Project risk assessment. *International Journal of Project Management*. (29), p. 220-231.
- [6] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. Fundamentos de la Dirección de Proyectos. Quinta Edición. Pensilvania: PMI Publications, 2013.
- [7] REZAKHANI, P. Classifying key risk factors in construction projects. Disponible en: <http://www.ce.tuiasi.ro/~bipcons/Archive/292.pdf>.
- [8] Saaty, T., Vargas, L. G., *The logic of Priorities*, Luwer Academic, Boston, 1982.
- [9] Wang, S.Q., Mohammed, F.D., Mukammad, Y.A. Risk Management framework for construction projects in developing countries. (2004). *Construction Management and Economics*. (22), p. 237-252
- [10] Wang, T.C., Chen, Y.H. (2008). Applying fuzzy linguistic preference relations to the improvement of consistency of fuzzy AHP. *Information Sciences*. (178), p. 3755-3765.
- [11] Zeng, J., An, M., Smith, N.J. (2007). Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. *International Journal of Project Management*. (25), p. 589-600.

7. Curriculum

Jorge Enrique Meneses Flórez. Ingeniero Mecánico UIS, Magíster en Ingeniería Mecánica con especialidad en Control Numérico Computarizado (CNC), Universidad Guanajuato. Investigador para la OEA. Director Grupo de Investigación Mecatrónica UIS.

Edwin Alberto Garavito Hernández. Ingeniero Industrial UIS, Especialista en Gerencia de la Producción y Mejoramiento continuo UIS, Candidato a Magister en Ingeniería Industrial de la Universidad de Mayagüez (Puerto Rico). Profesor Asistente de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales de la UIS. Investigador del Grupo OPALO. Áreas de trabajo: Diseño de sistemas productivos y logísticos, simulación, Ingeniería de Calidad.

Anny Pauline Másmela Fuentes. Ingeniera Industrial de la UIS.