

EVALUACIÓN DE RIESGOS DEL PROYECTO MEDIANTE VALORACIONES LINGÜÍSTICAS

Ana Nieto-Morote

Francisco Ruz-Vila

Universidad Politécnica de Cartagena

Abstract

The increasing complexity and dynamism of construction projects have imposed substantial uncertainties and subjectivities in the risk analysis process. Most of the real-world risk analysis problems contain a mixture of quantitative and qualitative data; therefore quantitative risk assessment techniques are inadequate for prioritizing risks. This article presents a risk assessment methodology based on the Fuzzy Sets Theory, which is an effective tool to deal with subjective judgment. The proposed methodology incorporates knowledge and experience acquired from many experts, since they carry out the risks identification and their structuring, and also the subjective judgments of the parameters which are considered to assess the overall risk factor: risk impact and risk probability. These two factors are expressed by qualitative scales which are defined by trapezoidal fuzzy numbers to capture the vagueness in the linguistic variables. An illustrative example on risk assessment of a project of a rehabilitation building is used to demonstrate the proposed methodology.

Keywords: *Project risk management; Linguistic judgments; Fuzzy sets*

Resumen

La complejidad creciente y el dinamismo de los actuales proyectos de la construcción han provocado una gran incertidumbre y subjetividad en el proceso de análisis de riesgos. La mayoría de problemas reales de análisis de riesgos contiene una mezcla de datos cuantitativos y cualitativos, por lo que las técnicas de valoración de riesgo cuantitativas son inadecuadas para priorizar riesgos. Este artículo presenta una metodología de valoración de riesgo basada en la Teoría de los Números Difusos que es una herramienta eficaz para tratar con valoraciones subjetivas. La metodología propuesta incorpora el conocimiento y experiencia adquiridas por diferentes expertos, ya que ellos llevan a cabo la identificación de riesgos, así como las valoraciones subjetivas de los parámetros que se consideran para evaluar el riesgo global del mismo: impacto y probabilidad de riesgo. Todos estos factores son valorados mediante términos lingüísticos posteriormente se transforman en números difusos. Finalmente para demostrar la utilidad de la metodología propuesta se analizan los riesgos asociados al caso del proyecto de rehabilitación de un edificio.

Palabras clave: *Gestión de riesgos del proyecto; Valoraciones lingüísticas; Lógica difusa*

1. Introducción

La creciente complejidad y el dinamismo de los proyectos de construcción han añadido riesgos a la ejecución de los mismos. A menudo, estos riesgos no se tratan adecuadamente, de modo que la ejecución del proyecto se realiza con mayores costes respecto al presupuesto inicial y demoras de tiempo en relación al tiempo planificado para su ejecución (Tah & Carr, 2000). Dada la necesidad de mejorar los resultados en la ejecución de los proyectos debido, entre otras razones, al aumento de las obligaciones contractuales, es fundamental una adecuada y eficaz gestión de riesgos.

Diversas son las metodologías que para mejorar el proceso de gestión de riesgos del proyecto se han propuesto, entre las que destacan PRAM (Chapman, 1997), RAMP (Institution of Civil Engineering, 2002), PMBOK (Project Management Institute, 2008), RMS (Institute of Risk Management, 2002). Aún presentando diferencias, todas ellas tienen en común las siguientes etapas (Seyedhoseini et al, 2009):

1. Identificación de riesgos: determinar qué riesgos pueden afectar el proyecto y documentar sus características.
2. Evaluación de riesgos: analizar los riesgos priorizándolos mediante su evaluación de su probabilidad de ocurrencia e impacto.
3. Respuesta ante el riesgo: desarrollar opciones y acciones para mejorar las oportunidades y reducir las amenazas a los objetivos del proyecto.
4. Supervisión y revisión de riesgos: implementar el plan de respuesta ante el riesgo, evaluando la eficacia del proceso sobre el proyecto.

De entre todas estas fases, la fase de evaluación de riesgos merece especial atención debido a la naturaleza del contexto en el que actualmente se ejecutan los proyectos de construcción, caracterizado por la incertidumbre y la subjetividad. En este entorno, los directores de proyecto se enfrentan a problemas de evaluación a partir de datos que pueden ser fiables o no, y en situaciones en las que se desconoce si puede haber cambios, lo que significa que, en muchos casos, la información disponible es imprecisa, incompleta o bien no está disponible.

Tradicionalmente, la evaluación cuantitativa de riesgos se ha basado en estimaciones de probabilidades y distribuciones de probabilidades. Sin embargo, la imposibilidad de tratar con la subjetividad, inherente al proceso de evaluación, con este tipo de métodos matemáticos requiere la aplicación de otras técnicas. Cuando los directores de proyecto no son capaces de proporcionar evaluaciones exactas sobre la probabilidad de un evento y/o las consecuencias asociadas, debido a la falta de disponibilidad y/o la subjetividad de la información, una herramienta adecuada para tratar estas situaciones es el uso de un sistema lingüístico. Un sistema lingüístico es una técnica aproximada que representa aspectos cualitativos o imprecisos como valores lingüísticos (Zadeh, 1975) por medio de variables lingüísticas, definidas como variables cuyos valores no son números sino palabras o frases en lenguaje artificial o natural. Como con los valores lingüísticos no es posible operar matemáticamente, para hacer frente a esta dificultad, cada término lingüístico se asocia con un número difuso, concepto introducido en la Teoría de Conjuntos Difusos (Zadeh, 1965) (Goguen, 1967, 1969).

El principal objetivo de este artículo es describir un modelo para apoyar a los directores de proyectos en el proceso de análisis de riesgos mediante un procedimiento de toma de decisiones difuso, caracterizado por el uso eficiente de la información lingüística.

2. Incertidumbre asociada al análisis de riesgos

Dependiendo del conocimiento que los directores del proyecto tienen con respecto a la probabilidad del riesgo y su impacto, tres tipos de evaluaciones son posibles:

1. Evaluación bajo certidumbre: los directores de proyecto están razonablemente seguros de la probabilidad y el impacto de un cierto riesgo porque la información está disponible y se considera fiable.
2. Evaluación con riesgo: puede existir información objetiva, pero puede estar incompleta. Los directores de proyecto pueden estimar sus valoraciones objetivas mediante modelos matemáticos o probabilidad subjetiva, basándose en su experiencia.

3. Evaluación bajo incertidumbre: los directores de proyecto tienen sólo datos escasos, y desconocen la fiabilidad de los mismos.

La situación ideal para cualquier problema de evaluación sería aquella en la que la información fuese exacta sin ningún tipo de riesgo o incertidumbre. Sin embargo, prácticamente todas las evaluaciones se realizan en un ambiente de cierta incertidumbre ya que generalmente la información disponible no es exacta debido a las siguientes causas (Chen & Hwang, 1992):

1. Información cuantificable. El precio de una nueva construcción puede fácilmente determinado, mientras que la seguridad de una construcción no es cuantificable.
2. Incompleta información. La velocidad de rotación de una bomba puede medirse usando ciertos equipos como "alrededor de 1750 rpm" pero no "exactamente 1750 rpm".
3. Información no disponible. A veces, los datos exactos están disponibles, pero a un precio muy alto, por lo que las decisiones se realizan a partir de datos aproximados.
4. Información parcial. Algunas imprecisiones corresponden al desconocimiento parcial del problema puesto que solo se conocen partes del mismo.

Para tratar el problema de la incertidumbre en las valoraciones podemos recurrir a la Teoría de la Probabilidad o la Teoría de los Conjuntos Difusos. La primera teoría permite captar la naturaleza estocástica de las evaluaciones, mientras que la segunda capta la subjetividad de la conducta humana. De este modo dado que el modelo estocástico no permite medir la imprecisión de la conducta humana es la Teoría de los Conjuntos Difusos la herramienta perfecta para modelar la incertidumbre y la imprecisión derivadas de fenómenos psíquicos que no son de naturaleza estocástica o derivadas del azar.

3. Teoría de los conjuntos difusos

3.1 Conjuntos difusos

Un conjunto difuso A se representa mediante la expresión $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\}$, donde U es el conjunto universal, x es un elemento de U, A es un conjunto difuso de U, $\mu_A(x)$ es la función de pertenencia de A en x. Cuanto mayor sea el valor de $\mu_A(x)$, mayor es el grado de pertenencia de x en A.

3.2 Números difusos

Un número difuso (Dubois & Prade, 1978) es un conjunto difuso definido como $A = \{x, \mu_A(x) \mid x \in \mathbb{R}\}$, donde x es un elemento del conjunto de números reales \mathbb{R} y la función de pertenencia $\mu_A: \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$, que cumple las siguientes propiedades (Klir): (i) Constante en $(-\infty, a]$ and $[d, \infty)$: $\mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in (-\infty, a] \cup [d, \infty)$; (ii) Estrictamente decreciente en el intervalo $[a, b]$ y estrictamente creciente en el intervalo $[c, d]$; and (iii) Constante en el intervalo $[b, c]$: $\mu_A(x) = 1 \quad \forall x \in [b, c]$, donde a, b, c, d son números reales y eventualmente $a = -\infty$, or $b = c$, or $a = b$, or $c = d$ or $d = \infty$.

Un número difuso trapezoidal puede ser representado por cuatro valores $A = [a, b, c, d]$ tal que $a < b < c < d$ y cuya función de pertenencia es:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a \\ \mu_{lA}(x) = \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{for } b \leq x \leq c \\ \mu_{rA}(x) = \frac{x-d}{c-d} & \text{for } c \leq x \leq d \\ 0 & \text{for otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

3.3 Valores lingüísticos

Una variable lingüística es una variable cuyos valores se expresan en términos lingüísticos. Variable lingüística es un concepto muy útil para hacer frente a situaciones que son demasiado complejas o bien no están bien definidos para poder ser descritas razonablemente mediante expresiones cuantitativas tradicionales (Zadeh, 1975). Por ejemplo, 'Importancia' es una variable lingüística cuyos valores pueden ser UI (Sin importancia), SI (Poco importante), FI (Bastante importante), I (Importante) y VI (Muy importante). Estos valores lingüísticos pueden ser representados por números trapezoidales difusos como IU = (0.0, 0.0, 0.1, 0.2), SI = (0,1, 0.25, 0.25, 0.4), FI = (0,3, 0.5, 0.5, 0,7), I = (0,6, 0,75, 0.75, 0,9) y VI = (08.7, 0.9, 0.9, 1.0).

3.4 Operaciones aritméticas con números difusos

Por el principio de la extensión (Zadeh, 1975), las operaciones aritméticas entre dos números difusos trapezoidales $A_1=(a_1,b_1,c_1,d_1)$ y $A_2=(a_2,b_2,c_2,d_2)$ se definen como sigue:

Suma difusa

$$A_1 \oplus A_2 = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2, d_1 + d_2) \quad (2)$$

Resta difusa

$$A_1 \ominus A_2 = (a_1 - d_2, b_1 - c_2, c_1 - b_2, d_1 - a_2) \quad (3)$$

Producto difuso

$$A_1 \otimes A_2 \approx (a_1 \cdot a_2, b_1 \cdot b_2, c_1 \cdot c_2, d_1 \cdot d_2) \quad (4)$$

Cociente difuso

$$A_1 \oslash A_2 \approx (a_1/d_2, b_1/c_2, c_1/b_2, d_1/a_2) \quad (5)$$

La multiplicación y el cociente entre números difusos trapezoidales no es un número difuso trapezoidal, si bien en la mayoría de las aplicaciones prácticas se aproxima a un número trapezoidal.

Por otra parte el producto de un escalar por un número difuso se define como sigue:

$$A_1 \times k = (a_1 \times k, b_1 \times k, c_1 \times k, d_1 \times k) \text{ si } k > 0 \quad (6)$$

$$A_1 \times k = (d_1 \times k, c_1 \times k, b_1 \times k, a_1 \times k) \text{ si } k < 0 \quad (7)$$

4. Procedimientos difusos de evaluación de riesgos

La incertidumbre y subjetividad inherentes a los actuales proyectos de construcción, ha supuesto la imposibilidad de la aplicación de muchos métodos de evaluación de riesgo, que se han utilizado tradicionalmente como análisis de árbol de fallos (FTA), análisis de árbol de sucesos (ETA), tabla de probabilidad e impacto, análisis de sensibilidad, estimación de la confiabilidad, modo de fallo y análisis de efecto (Ahmed and Amornsawadwatana, 2007) debido a la necesidad de datos de alta calidad.

Recientemente, se han propuesto varios procedimientos de evaluación de riesgos basados en valoraciones lingüísticas en vez de números exactos aplicando los principios de la Teoría de los Conjuntos Difusos (Zadeh, 1965). Algunas de estas propuestas se han inspirado en los métodos de evaluación de riesgos clásicos, como ETA y FTA: Fujino (1994) demuestra la aplicabilidad de la metodología FTA difusa en algunos casos de accidentes de construcción en Japón; Huang (2001) propone un procedimiento formal ETA difuso para integrar errores humanos y de equipos; Cho (2002) propone una metodología de ETA difusa caracterizada por el uso de nuevas formas de funciones de pertenencia.

Sin embargo, no todas las propuestas se han centrado en integrar metodologías clásicas y Lógica Difusa sino que se han propuesto metodologías nuevas. Carr y Tah (2001) definen un modelo formal basado en una estructura jerárquica de riesgos. Las descripciones de los riesgos y sus consecuencias se definen mediante variables lingüísticas y la relación entre la probabilidad de ocurrencia (L), la gravedad (V) y el efecto de un factor de riesgo (E) está representada por reglas, como "Si L y V, entonces, E". Zeng et al (2007) proponen un modelo difuso de la metodología de jerarquía analítica. El AHP se utiliza para estructurar y priorizar los riesgos teniendo en cuenta tres parámetros fundamentales de riesgo: probabilidad de riesgo (RL), la gravedad de riesgo (RS) y el índice de factor (FI), definidos todos ellos en términos de variables lingüísticas que se transforman en números difusos trapezoidales. Las relaciones entre los parámetros de entrada FI, RL, RS y salida definido como riesgo de magnitud (RM) se presentan en forma de reglas de "si...entonces". Dikmen et al (2007) proponen una metodología para la clasificación de riesgos para proyectos internacionales. Una vez que los riesgos han sido identificados y analizados usando diagramas de influencia, se evalúan en términos lingüísticos. Las relaciones entre los riesgos y su factor de influencia son establecidas mediante "reglas de agregación" de la forma "si...entonces". Finalmente la agregación de reglas difusas se lleva a cabo mediante operaciones difusas. Wang (2007) propone una metodología de evaluación de riesgo que permite a expertos evaluar los factores de riesgo, en términos de probabilidad y consecuencias, usando términos lingüísticos. También se proporcionan dos algoritmos alternativos para agregar las evaluaciones de los múltiples factores de riesgo, uno de los cuales ofrece una evaluación rápida y otro conduce a una evaluación exacta. Zhang y Zou (2007) proponen una metodología basada en el AHP en la que los expertos definen el peso de los riesgos y factores de riesgo definiendo matrices difusas de factores de riesgo. A continuación, la agregación de dichas matrices define un vector de condiciones de riesgo del proyecto.

La mayoría de las metodologías propuestas basadas en la comparación de binaria de los parámetros de entrada no tiene en cuenta la coherencia de los juicios de valor emitidos por los expertos. El método que aquí se propone presenta como diferencia más significativa con otros métodos de evaluación de riesgo difusa el uso de un algoritmo para manejar las inconsistencias en la relación de preferencia difusa cuando hay comparaciones binarias.

5. Metodología propuesta para el análisis de riesgos

En esta sección, se propone un modelo de evaluación de riesgos, basado en la Lógica Difusa, especialmente aplicable en aquellos problemas caracterizados por la incertidumbre y subjetividad en las valoraciones.

El modelo propuesto, mostrado en la Figura 1 se ha estructurado en tres etapas: (1) pasos preliminares, (2) definición de la función factor de riesgo y medición de variables y, (3) definición del factor de riesgo. Los detalles se describen en las secciones siguientes.

5.1 Pasos preliminares

Antes de comenzar con el análisis de riesgos propiamente dicho, es necesaria la formación del equipo de trabajo responsable de la implementación del modelo así como la identificación de los posibles riesgos.

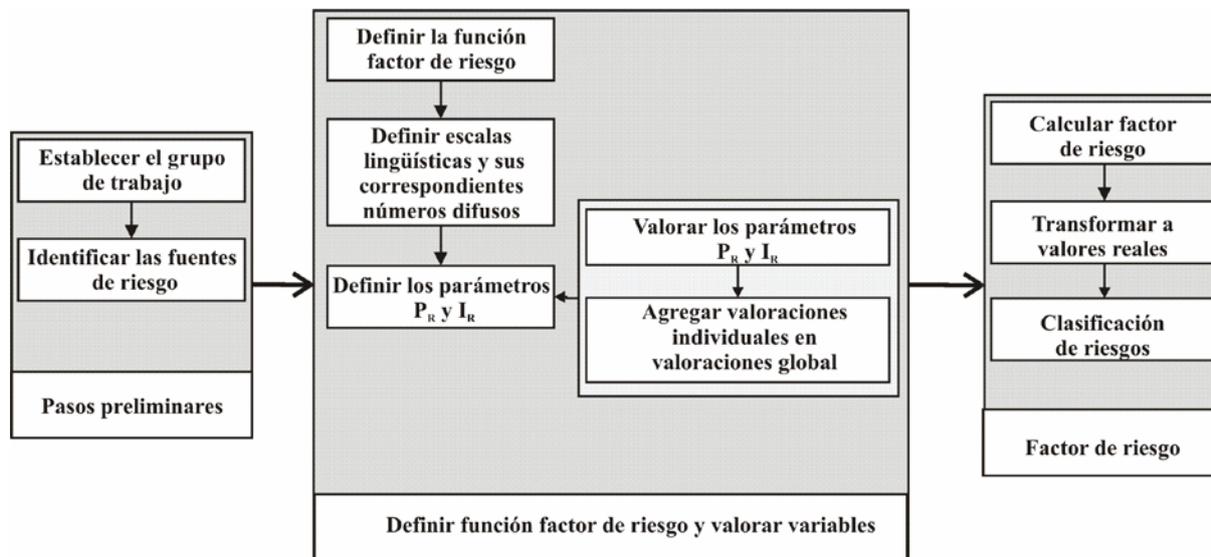
5.1.1 Establecer el equipo de trabajo

Los miembros del equipo de trabajo deben ser cuidadosamente seleccionados de entre aquellos que posean un alto grado de conocimiento y experiencia en proyectos similares. En dicho equipo se deberán integrar miembros de todas las partes interesadas en el proyecto:

directores de proyecto, los miembros del equipo de ingeniería, cliente, expertos externos en riesgos, incluso los posibles usuarios finales.

Los miembros del equipo llevarán a cabo la identificación de riesgos, contando siempre con las aportaciones del resto del personal que participa en el proyecto, así como la valoración de los parámetros que definen la función factor de riesgo.

Figura 1: Esquema de la metodología de análisis de riesgos



5.1.2 Identificar riesgos

La identificación de riesgos es una tarea fundamental en la gestión de riesgos del proyecto ya que supone conocer qué es lo que podría ir mal en el desarrollo del proyecto en cualquier momento. La identificación de riesgos es un proceso iterativo dado que los riesgos pueden evolucionar o pueden aparecer nuevos riesgos conforme progresa el proyecto a través de su ciclo de vida. La frecuencia de dichas iteraciones y quiénes participan en cada ciclo dependerá de las características del proyecto.

Los expertos que conforman el equipo de trabajo, aunque tienen métodos intuitivos para reconocer situaciones de riesgo, disponen de algunas herramientas de identificación como: lista de comprobación, diagramas de influencia, diagramas causa-efecto, análisis modal de fallo-efecto, análisis funcional de operatividad, análisis árbol de fallos, análisis árbol de sucesos o tormenta de ideas (Ahmed & Amornsawadwatana, 2007).

Esta etapa es crucial en el análisis de riesgos pues todos aquellos riesgos que no sean identificados no podrán ser tratados y por lo tanto no habrá propuesta de acciones correctoras

5.2 Definir la función factor de riesgo y valorar las variables.

Una vez que se identifican los riesgos del proyecto, es necesario valorar los parámetros que se utilizan para estimar el factor de riesgo asociado a cada uno de ellos. Estas evaluaciones pueden realizarse mediante términos lingüísticos que deberán ser transformados a números difusos para poder operar matemáticamente con ellos.

5.2.1. Definir la función factor de riesgo

En una formulación simple, el factor de riesgo es función de la probabilidad del riesgo y el impacto del mismo (Chia, 2006). La probabilidad del riesgo es la probabilidad de que el riesgo ocurra y el impacto del riesgo es el efecto que sobre los objetivos del proyecto (coste, plazo, calidad técnica) tiene la presencia del riesgo.

Esta relación se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$F_R = I_R \times P_R \quad (8)$$

donde F_R = Factor de riesgo, P_R = probabilidad del riesgo e I_R = impacto del riesgo.

5.2.2 Definir las escalas lingüísticas de valoración y sus números difusos asociados

Con frecuencia, puede ser extremadamente difícil valorar la probabilidad y el impacto de un riesgo identificado en un proyecto debido a la incertidumbre sobre la información de que se dispone para realizar dichas valoraciones. En estos casos, cuando los miembros del equipo de trabajo tienen información inexacta acerca de los riesgos del proyecto, las valoraciones no pueden ser exactas sino aproximadas. En estas circunstancias, las valoraciones de los miembros del equipo se pueden expresar mediante términos lingüísticos en lugar de números reales.

Una cuestión importante a la hora de abordar este tipo de valoraciones es la definición de los términos lingüísticos que se utilizarán y que evidentemente dependerán de la naturaleza del problema. Los términos lingüísticos que generalmente se utilizan para valorar los parámetros de un problema de evaluación de riesgo son los siguientes:

- Para evaluar la probabilidad del riesgo se define una escala de tres puntos: probabilidad alta (H), media (M) y baja (L).
- Para evaluar el impacto del riesgo se define una escala de cinco puntos: crítico (C), grave (S), moderado (Mo), menor (Mi) y despreciable (N).

Los términos lingüísticos deben transformarse en números difusos utilizando una adecuada escala de conversión ya que esta conversión no solo depende del concepto sino también el contexto en el que se utiliza. Incluso en contextos similares, números difusos que representan el mismo concepto pueden variar considerablemente.

Cuando se trabaja con números difusos, la mayor o menor simplicidad en la forma de las funciones de pertenencia que los definen se traduce en una mayor o menor complejidad en los cálculos. Por otra parte, números difusos cuyas funciones de pertenencia presentan formas sencillas a menudo tienen una interpretación más intuitiva y natural.

Por estas razones y en aras de la simplicidad, los números difusos trapezoidales o triangulares son los más comunes en las aplicaciones actuales. Como se señala en un estudio de investigación (Mayor y Trillas, 1986), la precisión en la forma de las funciones de pertenencia a menudo no es importante debido a la naturaleza cuantitativa de los problemas con los predicados vagos. Normalmente es suficiente utilizar una representación trapezoidal o triangular, definidas con no más de cuatro/tres parámetros.

A partir del trabajo de Chen (Chen & Hwang, 1992) que propone un sistema de aproximación numérica para convertir sistemáticamente los términos lingüísticos en sus correspondientes números difusos, se propone la conversión de los términos lingüísticos definidos anteriormente a números difusos recogida en la Tabla 1 y Figura 2.

5.2.3 Valorar los parámetros P_R e I_R

Esta etapa se divide en dos partes: valoraciones individuales de los parámetros de riesgo y agregación de dichas valoraciones en una valoración global.

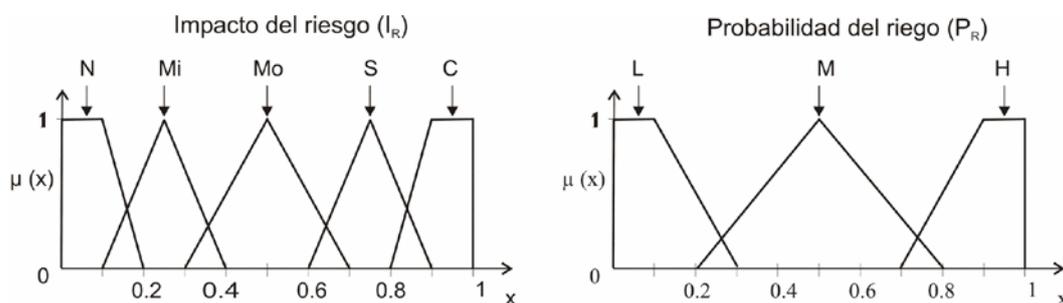
5.2.3.1 Valoraciones individuales

Utilizando las escalas lingüísticas definidas en la Tabla 1 cada uno de los miembros del equipo de trabajo realizará las valoraciones lingüísticas de los parámetros P_R e I_R de cada uno de los riesgos identificados. Realizadas estas valoraciones lingüísticas se transformarán a sus correspondientes números difusos P_{Ri}^m e I_{Ri}^m donde i es el número de riesgos identificados y m el número de miembros del equipo de trabajo.

Tabla 1: Variables lingüísticas de impacto y probabilidad de riesgo

| Valores lingüísticos de I_R | Interpretación general | Número difuso |
|-------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Crítico (C) | Implica un impacto muy alto | (0.8, 0.9, 1, 1) |
| Grave (S) | Implica un gran impacto | (0.6, 0.75, 0.75, 0.9) |
| Moderado (Mo) | Implica un impacto moderado | (0.3, 0.5, 0.5, 0.7) |
| Menor (Mi) | Implica un impacto pequeño | (0.1, 0.25, 0.25, 0.4) |
| Despreciable (N) | No hay impacto apreciable | (0, 0, 0.1, 0.2) |
| Valores lingüísticos de P_R | | |
| Alta (H) | Probabilidad de que ocurra alta | (0.7, 0.9, 1, 1) |
| Media (M) | Probabilidad de que ocurra media | (0.2, 0.5, 0.5, 0.8) |
| Baja (L) | Probabilidad de que ocurra baja | (0, 0, 0.1, 0.3) |

Figura 2: Funciones de pertenencia de I_R y P_R



5.2.3.2 Valoraciones globales

Las valoraciones individuales de cada uno de miembros del grupo de trabajo son agregadas en un número difuso global utilizando la media aritmética difusa como se define en las siguientes ecuaciones:

$$P_{Ri} = \frac{1}{m} \times \sum_{n=1}^m P_{Ri}^n = \frac{1}{m} \times (P_{Ri}^1 \oplus P_{Ri}^2 \oplus \dots \oplus P_{Ri}^m) \quad (9)$$

$$I_{Ri} = \frac{1}{m} \times \sum_{n=1}^m I_{Ri}^n = \frac{1}{m} \times (I_{Ri}^1 \oplus I_{Ri}^2 \oplus \dots \oplus I_{Ri}^m) \quad (10)$$

donde i es cada uno de los riesgos identificados, m el número de miembros del grupo de trabajo, x es la multiplicación por un escalar definida en la Ecuación (6) y \oplus es la suma difusa definida en la Ecuación (2).

5.3 Cálculo del factor de riesgo

En este paso, una vez convertidas las valoraciones lingüísticas a números difusos se determina el factor global de cada uno de los riesgos R_i .

5.3.1 Valoración difusa del factor de riesgo

Una vez que los parámetros de I_R y P_R están expresados en forma de números difusos, el factor de riesgo de cada riesgo se define como se indica en la ecuación

$$F_{Ri} = I_{Ri} \otimes P_{Ri} \quad (11)$$

donde i es cada uno de los riesgos identificados y \otimes representa la multiplicación difusa usando las operaciones aritméticas de α -cortes descrita en la Ecuación (4).

5.3.2. Transformación a valores reales

Defuzzificar es la operación de transformar un número difuso en un número real. Existen varios métodos propuestos para el proceso de transformación de entre los cuales se ha seleccionado el método del centroide (Yager, 1980) definido como se indica en la siguiente ecuación:

$$(F_{Ri})_T = \frac{\int_0^1 x F_{Ri}(x) d(x)}{\int_0^1 F_{Ri}(x) d(x)} \quad (12)$$

5.3.3. Clasificación de riesgos

El último paso del procedimiento de evaluación de riesgos es la clasificación de riesgos en función de su factor de impacto del riesgo en categorías. Las categorías definidas y los riesgos incluidos en ellas son:

- Si $(F_{Ri})_T \in [0, 0.2)$ entonces el riesgo R_i pertenece a la clase I y se clasifica como Despreciable.
- Si $(F_{Ri})_T \in [0.2, 0.5)$ entonces el riesgo R_i pertenece a la clase II y se clasifica como Aceptable.
- Si $(F_{Ri})_T \in [0.5, 0.8)$ entonces el riesgo R_i pertenece a la clase III y se clasifica como No Aceptable.
- Si $(F_{Ri})_T \in [0.8, 1]$ entonces el riesgo R_i pertenece a la clase IV y se clasifica como Intolerable.

6. Ejemplo numérico

Se presenta el caso del proyecto de rehabilitación de un edificio para demostrar la aplicabilidad del método propuesto. De acuerdo con los requisitos del proyecto, el plazo de ejecución es factor clave en el éxito del proyecto, por lo que el análisis de riesgos se centrará en todas aquellas fuentes de riesgo que pueden provocar el retraso de la finalización del proyecto, tales como, la falta de suministro de calidad, cambios en el diseño, la falta de recursos, etc.

Este tipo de riesgos es difícil de medir debido a la falta de información y de las incertidumbres asociada a los mismos, lo que significa que no hay datos prácticos ni información suficiente para aplicar un análisis de riesgos tradicional siendo necesario, por tanto, la aplicación de un método de riesgos basado en la Lógica Difusa.

La aplicación del método se condensa en los siguientes pasos:

1. Definir el grupo de trabajo. Cuatro expertos con gran experiencia en proyectos de rehabilitación de edificios son seleccionados para formar el grupo de trabajo: un ingeniero, un arquitecto, un arqueólogo y un director de proyectos.

2. Identificar las fuentes de riesgo. En base a su experiencia y cualificación, los miembros del equipo de trabajo identifican riesgos de diversa naturaleza relativos a la ingeniería, a la ejecución, a los proveedores o al propio proceso de gestión de riesgos. Dichos riesgos se muestran en la primera columna de la Tabla 2.
3. Valorar los parámetros que definen en factor de riesgo. Utilizando las escalas de valoración de la Tabla 1 cada miembro del grupo de trabajo valora lingüísticamente los parámetros P_R e I_R , como se recoge en la Tabla 2.
4. Agregar valoraciones. Utilizando las Ecuaciones (9) y (10) se agregan las opiniones de cada experto en una valoración global de los parámetros P_R e I_R correspondientes a cada riesgo como se recoge en la Tabla 2.

Tabla 2. Valoraciones lingüísticas de I_R y P_R y agregación de valoraciones

| Riesgos | I_R | | | | P_R | | | |
|--------------------------|--------------------------------|----|----|----|------------------------------|----|----|----|
| | E1 | E2 | E3 | E4 | E1 | E2 | E3 | E4 |
| Proceso inadecuado | Mi | N | Mo | S | L | L | M | M |
| Ag. | (0.250, 0.375, 0.400, 0.500) | | | | (0.100, 0.250, 0.300, 0.500) | | | |
| Falta de recursos | N | Mo | Mo | Mi | M | L | H | M |
| Ag. | (0.175, 0.3125, 0.3375, 0.500) | | | | (0.275, 0.475, 0.525, 0.700) | | | |
| Inexperiencia en gestión | Mo | S | Mo | S | M | M | L | M |
| Ag. | (0.450, 0.625, 0.625, 0.800) | | | | (0.150, 0.375, 0.400, 0.650) | | | |
| Falta de motivación | Mo | Mi | Mo | S | M | H | H | H |
| Ag. | (0.325, 0.500, 0.500, 0.675) | | | | (0.575, 0.800, 0.875, 0.950) | | | |
| Errores de diseño | C | C | S | S | M | H | M | H |
| Ag. | (0.70, 0.825, 0.875, 0.95) | | | | (0.450, 0.700, 0.750, 0.900) | | | |
| Cambios en el diseño | S | C | S | S | H | H | H | M |
| Ag. | (0.65, 0.7875, 0.8125, 0.925) | | | | (0.575, 0.800, 0.875, 0.950) | | | |
| Errores de construcción | S | Mo | S | C | M | H | M | M |
| Ag. | (0.575, 0.725, 0.8125, 0.875) | | | | (0.325, 0.600, 0.625, 0.850) | | | |
| Baja productividad | Mo | S | S | Mo | L | L | M | M |
| Ag. | (0.450, 0.625, 0.625, 0.800) | | | | (0.100, 0.250, 0.300, 0.500) | | | |
| Falta de experiencia | S | Mo | S | S | H | M | L | M |
| Ag. | (0.525, 0.6875, 0.6875, 0.85) | | | | (0.275, 0.500, 0.525, 0.700) | | | |
| Accidentes | C | C | C | S | L | M | L | L |
| Ag. | (0.75, 0.8625, 0.9375, 0.975) | | | | (0.050, 0.125, 0.200, 0.350) | | | |
| Problemas técnicos | Mo | Mi | N | Mi | M | H | M | H |
| Ag. | (0.125, 0.250, 0.275, 0.425) | | | | (0.450, 0.700, 0.750, 0.900) | | | |
| Retrasos en suministros | S | Mo | S | Mo | L | H | M | H |
| Ag. | (0.45, 0.625, 0.625, 0.8) | | | | (0.400, 0.575, 0.65, 0.75) | | | |
| Baja calidad | S | S | Mo | Mo | L | M | M | L |
| Ag. | (0.45, 0.625, 0.625, 0.8) | | | | (0.100, 0.250, 0.300, 0.500) | | | |

5. Calcular el factor de riesgo asociado a cada uno de los riesgos. Utilizando la Ecuación (12) se calcula el factor de riesgo de cada una de los riesgos identificados como se recoge en la Tabla 3.

6. Clasificar los riesgos. A partir de los rangos de clasificación mostrados anteriormente (Clase I – Despreciable, Clase II – Aceptable, Clase III – No Aceptable y Clase IV – Intolerable) se asigna una categoría a cada riesgo como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores del factor de riesgo F_R , F_{RT} y clasificación del riesgo

| Riesgos | F_R | F_{RT} | Clase |
|--------------------------|------------------------------|----------|-------|
| Proceso inadecuado | (0.025, 0.094, 0.120, 0.250) | 0.1194 | I |
| Falta de recursos | (0.048, 0.148, 0.177, 0.350) | 0.1776 | I |
| Inexperiencia en gestión | (0.068, 0.234, 0.250, 0.520) | 0.2632 | II |
| Falta de motivación | (0.187, 0.400, 0.437, 0.641) | 0.4168 | II |
| Errores de diseño | (0.315, 0.578, 0.656, 0.855) | 0.6039 | III |
| Cambios en el diseño | (0.374, 0.630, 0.711, 0.879) | 0.6524 | III |
| Errores de construcción | (0.187, 0.435, 0.508, 0.744) | 0.4689 | III |
| Baja productividad | (0.045, 0.156, 0.188, 0.400) | 0.1925 | I |
| Falta de experiencia | (0.144, 0.343, 0.361, 0.595) | 0.3594 | II |
| Accidentes | (0.038, 0.107, 0.188, 0.341) | 0.1647 | I |
| Problemas técnicos | (0.056, 0.175, 0.207, 0.383) | 0.2024 | II |
| Retrasos en suministros | (0.180, 0.359, 0.407, 0.600) | 0.3857 | II |
| Baja calidad | (0.045, 0.156, 0.188, 0.400) | 0.1925 | I |

6.1 Resultados

El coste del proceso de respuestas ante el riesgo, es decir, el desarrollo de acciones para reducir las amenazas a los objetivos del proyecto es muy alto. Por esta razón, la asignación de prioridades de actuación sobre los riesgos es crucial. Una mejora en la ejecución de los proyectos es posible cuando las acciones de las respuestas de riesgo del plan se centran en los riesgos de alta prioridad.

Sin olvidar que todos los riesgos identificados pueden afectar al desarrollo del proyecto, la aplicación de la metodología propuesta para la evaluación de riesgos nos permite afirmar que de entre los 13 riesgos identificados, las acciones del plan de respuesta ante riesgos de este proyecto deben centrarse en los siguientes riesgos: Errores de diseño, Cambios en el diseño y Errores de construcción.

7. Conclusiones

La gestión de riesgos del proyecto es una tarea crítica y necesaria del director de proyecto y su equipo. Se debe entender la gestión de riesgos como la comprensión de todos los factores que contribuyen al incumplimiento de los objetivos del proyecto, que a menudo son los mismos independientemente de la naturaleza del proyecto. El primer paso en la evaluación de riesgos es la identificación de riesgos. Una vez identificados los riesgos, se puede iniciar el análisis de riesgos cuyo objetivo es identificar las consecuencias que sobre los objetivos del proyecto tendría el riesgo, si se presentara, a partir de la probabilidad de que se presente y su impacto. La clasificación de los riesgos es necesaria porque sería difícil, si no imposible, proporcionar un plan de actuación sobre cada uno de los posibles riesgos en cada momento del desarrollo del proyecto. A partir del valor de factor de riesgo asignado a cada riesgo, el director del proyecto debe desarrollar un plan de actuación sobre aquellos riesgos que mayor factor de riesgo presenten.

En muchos casos, la aplicación de metodologías de evaluación de riesgos clásica no puede dar resultados satisfactorios debido a que los datos disponibles sobre los riesgos son incompletos o con un alto nivel de incertidumbre. Por lo tanto, resulta esencial proponer metodologías para evaluar los riesgos bajo estas condiciones de imprecisión e incertidumbre en las que no se pueden aplicar eficientemente los métodos clásicos.

Este artículo presenta una nueva metodología para el análisis de riesgo del proyecto de construcción que se desarrollan en situaciones complicadas en las que la información para evaluar los riesgos es no cuantificable, incompletos o no disponible.

La metodología propuesta permite al director del proyecto y su equipo a hacer sus juicios de valoración mediante términos lingüísticos en lugar de números reales. Dado que los términos lingüísticos no son matemáticamente operables, cada término lingüístico está asociado con un número difuso trapezoidal, que representa el significado de cada término verbal.

Finalmente, hay que destacar que la metodología propuesta proporciona un mecanismo sencillo y eficaz para la modelización de problemas de evaluación de riesgo que implican las evaluaciones subjetivas de los miembros del grupo trabajo. La metodología desarrollada es aplicable para cualquier problema de evaluación de riesgos en general, donde se requiere una clasificación de riesgos.

Referencias

Ahmed, A., Kayis, B., Amornsawadwatana, S., (2007). A review of techniques for risk management in projects. *Benchmarking*, Vol. 14, pp 22-36.

Carr, V., Tah, J.H.M., (2001). A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis: construction project risk management system. *Advances in engineering software* 32, 847-857.

Chapman, C.B., Ward, S.C., (1997). *Project risk management: Processes, Techniques and Insights*. Wiley.

Chen, S.J., Hwang, C.L., (1992). "Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications". Springer-Verlag.

Chia, S.E., (2006). "Risk assessment framework for Project Management". IEEE

Cho, H.M., Choia, H.H., Kimb, Y.K., 2002. A risk assessment methodology for incorporating uncertainties using fuzzy concepts. *Reliability Engineering and System Safety* 78, 173–183.

Dubois, D., Prade, H. (1978). Operations on fuzzy numbers, *International Journal of Systems Science* 9 (6) 613–626.

Dikmen, I., Birgonul, M., Han, S., (2007). Using fuzzy risk assessment to rate cost overrun risk in international construction projects. *International Journal of Project Management* 25, 494-505.

Fujino, T., (1994). The development of a method for investigation construction site accidents using fuzzy fault tree analysis. PhD Thesis. The Ohio State University, USA.

Goguen, J.A. (1967). L-fuzzy sets. *Mathematical Analysis and Applications*, 18, 145-174.

Goguen, J.A. (1969). The logic of inexact concepts. *Synthese*, 19, 325-373.

Huang, D., Chen, T., Wang, M.J.J., (2001). A fuzzy set approach for event tree analysis. *Fuzzy Sets and Systems* 118, 153–65.

Institute of Risk Management, (2002). *A risk management*. Standard Institute of Risk Management.

Institution of Civil Engineers, (2002). Risk Analysis and Management for Projects (RAMP). Institution of Civil Engineers and Faculty and Institute of Actuaries. Thomas Telford, London.

J.K. Klir, B. Yuan, Fuzzy sets and fuzzy logic. Theory and applications, Prentice Hall, New Jersey, 1995.

Project Management Institute, (2008). A guide to the project management body of knowledge. Project Management Institute Standards Committee.

Seyedhoseini, S. M., Noori, S. Hatefi, M. A., (2009). An Integrated Methodology for Assessment and Selection of the Project Risk Response Actions, *Risk Analysis*, Vol. 29, pp 752-763

Tah J., H. M., Carr V., (2000). Information modelling for a construction project risk management system. *Engineering, Construction and Architectural Management* Vol. 2, pp 107-119.

Wang, Y.M., Elhag T.M-S., (2007). A fuzzy group decision making approach for bridge risk assessment. *Computers & Industrial Engineering* 53, 137-148

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

Zadeh, L. A., (1975). "The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning". Part I, *Information Science* Vol. 8, pp 199-249; Part II, *Information Science* Vol. 8, pp 301-357; Part III, *Information Science* Vol. 9, pp 43-80.

Zhang, G., Zou, P.X.W., (2007). Fuzzy analytical hierarchy process risk assessment approach for joint venture construction projects in China. *Journal of Construction Engineering and Management* 133, 771-779

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* 27, 589-600.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Ana Nieto-Morote.

Departamento de Electrónica, Tecnología de computadoras y Proyectos

Dr Fleming s/n. 30202 Cartagena

Phone: + 34 968 326551

Fax: + + 34 968 326400

E-mail: ana.nieto@upct.es