

## ÍNDICE DE RIESGO TECNOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN HOLÍSTICA DEL RIESGO EN ESCENARIOS PROPENSOS A ACCIDENTES MAYORES

### TECHNOLOGICAL RISK INDEX FOR THE HOLISTIC EVALUATION OF RISK IN SCENARIOS PRONE TO MAJOR ACCIDENTS

Lisette Concepción Maure<sup>1\*</sup>, Félix Abel Goya Valdívia<sup>2</sup>,  
Eusebio V. Ibarra-Hernández<sup>2</sup>, Belkís F. Guerra Valdés<sup>2</sup> y Marlene Dupín Fonseca<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Industrial. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup>Centro de Estudio de Química Aplicada (CEQA). Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní, Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Septiembre 25, 2017; Revisado: Octubre 9, 2017; Aceptado: Octubre 23, 2017

#### RESUMEN

La industrialización ha incrementado la generación de condiciones de riesgos asociados a la complejidad y dinámica de los procesos. El presente artículo tiene como objetivo definir un índice de riesgo tecnológico que permita la evaluación holística del riesgo en diferentes escenarios, como apoyo a la toma de decisiones en la planificación de acciones preventivas. Este índice considera la probabilidad de ocurrencia del evento, el riesgo físico eminente, y el agravamiento del impacto probable dada la vulnerabilidad territorial. En aquellos escenarios donde la información no esté disponible para determinar la vulnerabilidad, se sustituyen los datos numéricos por la opinión de expertos, y se aplica la lógica difusa compensatoria en el procesamiento de las expresiones lingüísticas, utilizando el software *Fuzzy tree studio*. El índice propuesto permite el análisis comparado entre áreas, instalaciones y territorios. La indización que se alcanza con esta metodología facilita la presentación de la información y el proceso de toma de decisiones.

**Palabras Clave:** agravamiento del impacto; índice de riesgos tecnológico; riesgo físico; vulnerabilidad física; vulnerabilidad social.

Copyright © 2018. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

\* Autor para la correspondencia: Lisette Concepción, Email: [lisette@uclv.cu](mailto:lisette@uclv.cu)

## **ABSTRACT**

Industrialization has increased the generation of risk conditions associated with processes' complexity and dynamics. This article aims to define a technological risk index that allows the holistic evaluation of risk in different scenarios, as support to the decision making of preventive actions planning. This index considers the probability of occurrence of the event, the eminent physical risk, and the aggravation of the probable impact given the territorial vulnerability. In those scenarios in which information is not available to determine vulnerability, the numerical data are replaced by experts' opinion, and diffuse compensatory logic is applied in the processing of linguistic expressions, using the *Fuzzy tree studio* software. The index proposed allows the comparative analysis among areas, facilities and territories. The indexation achieved with this methodology facilitates the presentation of information and the decision-making process.

**Keywords:** aggravation of impact; technological risk index; physical risk; physical vulnerability; social vulnerability.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La industria moderna se caracteriza por un continuo crecimiento de la potencia unitaria de sus instalaciones, con el objetivo de alcanzar mejores rendimientos. Independiente al desarrollo científico-técnico, el aumento del grado de complejidad de los procesos tecnológicos genera condiciones de riesgo en la sociedad y el medio natural que actúa como soporte de la misma (Ruíz, 2017).

El presente artículo aborda la evaluación de los riesgos tecnológicos en los procesos químicos industriales, donde es probable la ocurrencia de un accidente mayor (incendio, explosión, escape, derrame). Este se conceptualizó como la probabilidad de sufrir daños o pérdidas humanas, económicas y ambientales como consecuencia del funcionamiento deficiente o accidente de una tecnología aplicada en una actividad (Citma, 2012).

En el marco conceptual de una evaluación holística el riesgo, este constituye una función de un conjunto de factores de vulnerabilidad. Algunos de ellos caracterizan los peligros existentes en el proceso y otros las condiciones del contexto (Barbat y col., 2011; Bohórquez, 2013). La vulnerabilidad física determina la susceptibilidad de los elementos expuestos a sufrir daños, teniendo en cuenta las intensidades potenciales de los eventos desestabilizadores en un período de tiempo. La vulnerabilidad social depende de la falta de homeostasis y resiliencia del área afectada (Carreño y col., 2014). Para lograr que una instalación industrial opere de forma segura y continuada, es fundamental implantar un sistema que gestione el riesgo asociado a sus procesos. Este análisis obedece a la precisión con que sean determinadas las variables dinámicas que lo condicionan. Al respecto (Carreño y col., 2006) considera que es imprescindible que el riesgo sea medido y representado mediante modelos e índices, que tengan significado para la sociedad y para los agentes decisores.

Ibarra-Hernández y col., (2015) exponen diferentes herramientas utilizadas en el proceso de gestión de riesgos, para contestar las siguientes preguntas: ¿qué puede ir mal?, ¿cuáles son las causas?, ¿cuáles son las consecuencias? y ¿cuál es la probabilidad

de ocurrencia? Entre ellas destacan por su alta utilización: análisis de peligros y operabilidad (HAZOP), análisis modal de fallos y efectos (AMFE), análisis del árbol de eventos, análisis de peligros y puntos críticos de control (HACCP), lista de chequeo, índice de peligrosidad.

Los grandes avances computacionales han permitido el desarrollo de nuevos métodos multicriterios para el procesamiento de datos y simulación, ejemplo de ello es la lógica difusa compensatoria. Esta permite el uso de expresiones lingüísticas en lugar de datos numéricos, en ocasiones inexistentes o con grandes imprecisiones. A diferencia de otros métodos de gestión de riesgo, permite trasladar las valoraciones de los expertos a un modelo matemático que faciliten su evaluación, teniendo en cuenta la incertidumbre y subjetividad asociada.

En la actualidad se evidencia la falta de una valoración integral que permita desagregar el riesgo tecnológico en componentes de diferente índole, impidiendo la efectividad de su gestión (Cardona, 2001). De igual forma, existe la necesidad de asegurar la asignación eficiente y óptima de los recursos limitados para los procesos de evaluación y manejo de riesgos. Por ello, la evaluación minuciosa de los escenarios de riesgos basada en la priorización de los mismos, se ha tornado en un tema de urgente importancia.

El objetivo del presente artículo, es definir un índice de riesgo tecnológico que permita su evaluación holística en diferentes escenarios, como apoyo a la toma de decisiones en la planificación de acciones preventivas.

Como alternativa en la integración de los datos y modelación de la vulnerabilidad social se utilizan enfoques avanzados, con base en la lógica difusa compensatoria y en los sistemas de expertos que permitan trabajar con los valores cualitativos de los datos. Este tratamiento numérico proporciona una herramienta más flexible cuando la información no está disponible, preservando el marco conceptual de las metodologías existentes.

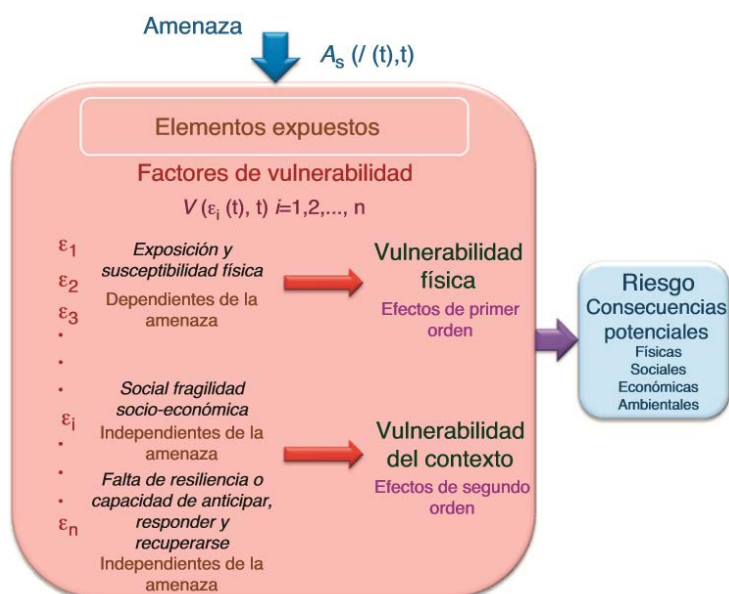
## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***2.1 Bases metodológicas para la evaluación holística del riesgo***

Las investigaciones sobre los riesgos, comúnmente consideran que su magnitud es consecuencia de la interacción de los siguientes factores:

- localización, volumen, probabilidad de ocurrencia de accidentes y características de peligrosidad de la actividad que se considera fuente de riesgo,
- características del área expuesta a un accidente potencial y condiciones del medio físico para propagar sus efectos,
- grado de vulnerabilidad de los posibles receptores del daño.

Una evaluación holística del riesgo debe tener en cuenta, por una parte, el daño físico esperado en las infraestructuras, el número de víctimas, las pérdidas económicas y medioambientales (efectos de primer orden). Por otra parte, las condiciones relacionadas con la fragilidad social y la falta de resiliencia de las comunidades que favorecen que se produzcan los daños (efectos de segundo orden). Este enfoque es esquematizado por (Carreño y col., 2014) como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Marco conceptual de un enfoque holístico para la evaluación del riesgo de desastres.  $I$  es la intensidad del evento,  $V$  es la vulnerabilidad y  $\epsilon_i$  son los factores de vulnerabilidad.

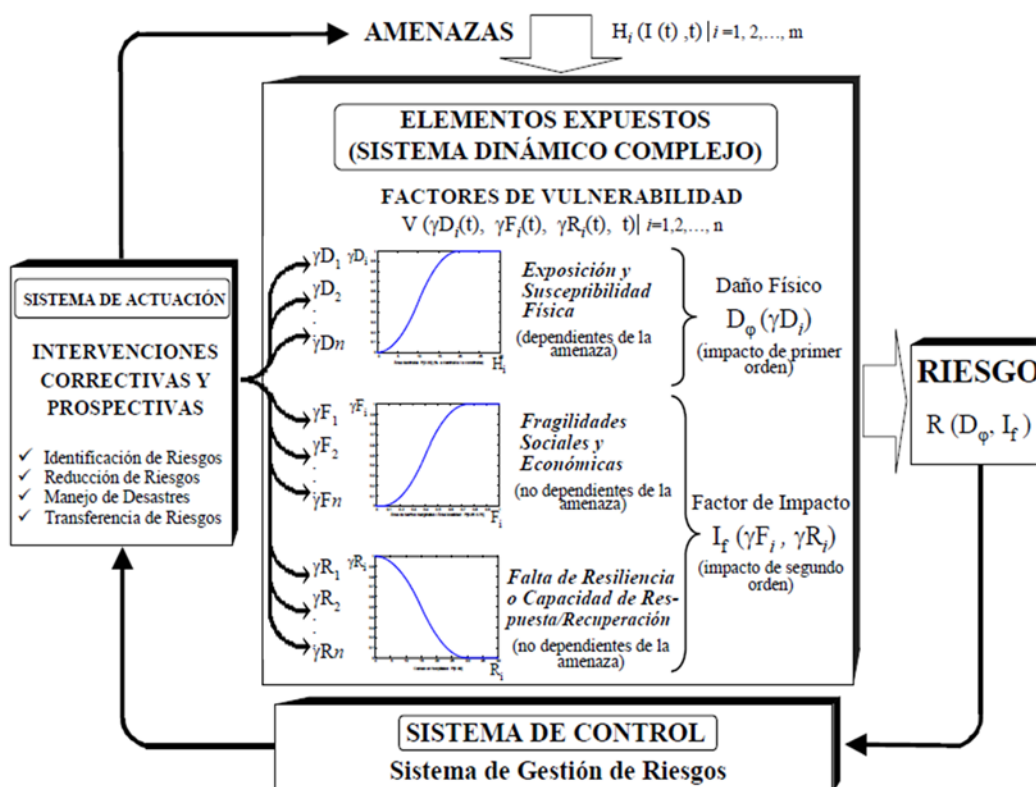
**Fuente:**(Carreño y col., 2014)

La gestión de riesgo tecnológico depende de su medición y del grado de precisión con que sean determinadas las variables que lo condicionan y su sinergia. La estructura analítica de los sistemas de indicadores para la evaluación holística del riesgo, más usados, toman como referente la ecuación (1), conocida en el ámbito de la evaluación de riesgos de desastres como la ecuación de Moncho (Marulanda et al., 2009). Esta permite calcular un índice de riesgo total, al evaluar el riesgo físico existente  $R_F$  afectado por un coeficiente  $F$ , que depende de las condiciones de vulnerabilidad social ante un evento catastrófico dado.

$$IR_T = R_F(1 + F) \quad (1)$$

En la ecuación original se considera la probabilidad de ocurrencia de un evento igual a uno y los descriptores utilizados alusivos a eventos catastróficos de origen natural. En otros estudios, son utilizadas escalas cualitativas para la evaluación de las variables (muy elevada, elevada, moderada, baja y muy baja), logrando de esta forma una mayor percepción del escenario probable.

Los descriptores de riesgo físico, de fragilidad y de falta de resiliencia utilizados en la evaluación holística del riesgo toman distintas unidades. Para estandarizar su valor bruto y transformarlo en valores commensurables, en estudios anteriores (Hurtado, 2000; Cardona, 2001), se ha optado por el uso de funciones de transformación. La figura 2 muestra las relaciones existentes entre las variables y el modelo de las funciones de transformación de las mismas.



**Figura 2.** Modelo de evaluación del riesgo a través de ecuaciones de transformación

**Fuente:** (Cardona, 2006)

Las funciones de transformación tienen como objetivo el cálculo de los factores de riesgo físico  $D_\phi$  y los factores agravantes del impacto  $I_f$ , a partir de sus correspondientes descriptores: daños físicos  $\gamma D_i$ , fragilidad social  $\gamma F_i$  y falta de resiliencia  $\gamma R_i$ . Los modelos funcionales en el eje de las abscisas representan el valor de los descriptores y en el eje de las ordenadas el valor de los factores en un rango entre 0 y 1

En esta evaluación, los descriptores son datos que se han obtenido a partir de estudios previos del riesgo. Es decir, toman un valor determinístico que no contempla la existencia de azar o incertidumbre.

## 2.2. Incertidumbre y subjetividad en las mediciones

La gestión de riesgos tecnológicos en muchas ocasiones se ve afectada por la no disponibilidad de información, en especial la relacionada con la evaluación de la vulnerabilidad social. Una posible solución a esta problemática es sustituir los datos necesarios por la opinión de expertos y procesar las variables cualitativas y las clasificaciones lingüísticas obtenidas en lugar de valores numéricos. En este sentido se propone la utilización de la lógica difusa compensatoria, cuya robustez ha sido demostrada en el manejo de la vaguedad e incertidumbre asociada a la información (Cabrerizo et al., 2008; Carrasco et al., 2011). Para soportar el modelado del indicador propuesto se utiliza el software *Fuzzy tree studio*.

### 2.3. Determinación de los pesos de los descriptores

El análisis del nivel de riesgo puede ser afectado por la ponderación de los descriptores. El otorgamiento de pesos varía en función del área analizada, evento probable o decisión de los expertos sobre la influencia de un descriptor  $i$  en la consecución de un evento. Para determinar los pesos se utiliza el proceso de jerarquías analíticas (Saaty, 1986), soportado en el *software Super Desicions*. La eficacia de esta metodología radica en cuantificar la prioridad relativa de cada alternativa a través de valoraciones del decisor y lograr una inconsistencia inferior a 0,1.

Dicho análisis es a su vez una contribución a las herramientas de gestión de riesgo existente (HAZOP, AMFE, HACCP), donde los expertos otorgan los valores del descriptor sin un peso desglosado para el análisis. El proceso de jerarquías analíticas permite analizar la relación entre los descriptores del riesgo, ponderar y compensar las variables que van a influir de manera positiva o negativa (impacto) sobre la actividad objeto de decisión. Así como, apreciar la influencia de un evento peligroso a desencadenarse y los controles existentes para sus detección, mitigación o soporte.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En base a la ecuación Moncho descrita en la sección 2, se propone un índice de riesgo tecnológico alternativo para evaluar eventos de origen antrópico; así como los métodos numéricos para determinar las variables implicadas.

### 3.1 Índice de Riesgo Tecnológico para la evaluación holística del riesgo

El Índice de Riesgo Tecnológico (*IRT*) presente en un área  $i$  se expresa como la sumatoria para cada evento posible  $e$  (incendio, explosión, escape, derrame), de la probabilidad de ocurrencia del evento  $p_e$  por la vulnerabilidad física del área en estudio  $VF_e$ ; afectado por un coeficiente de agravamiento del impacto  $Ca_i$ , que caracteriza la vulnerabilidad social; como se muestra en la ecuación (2):

$$IRT_i = (1 + Ca_i) \sum (p_{ei} * VF_{ei}) \quad (2)$$

$$IRT_i = (1 + Ca_i) \left[ (p_{incendio\ i} * VF_{incendio\ i}) + (p_{explosión\ i} * VF_{explosión\ i}) + (p_{escape\ i} * VF_{escape\ i}) + (p_{derrame\ i} * VF_{derrame\ i}) \right]$$

La vulnerabilidad física ante un evento considera como descriptores el número de fallecidos, personas lesionadas, daños internos mayores, daños externos mayores y daños medioambientales. Esta es calculada mediante la ecuación (3):

$$V_{F_{ei}} = \sum_{n=1}^5 W_{XV_{F_{ne}}} * X_{V_{F_{ne}}} \quad (3)$$

donde  $X_{V_{F_{ne}}}$  son los descriptores de vulnerabilidad física  $n$  ante cada evento  $yW_{XV_{F_{ne}}}$  los pesos de dichos factores.

La determinación de los pesos es resultado de la evaluación del criterio de los expertos a través del Proceso de Jerarquías Analíticas, soportado en el *software Super Desicions*. La Tabla 1 muestra los pesos de los factores de vulnerabilidad física otorgados por investigadores del Centro de Estudios de Química Aplicada de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas a los diferentes eventos de origen antrópico.

**Tabla 1.** Pesos de los factores de vulnerabilidad física ante eventos de origen antrópico

| <i>Factores\ Eventos</i> | <i>Incendio</i> | <i>Explosión</i> | <i>Escape</i> | <i>Derrame</i> |
|--------------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------|
| número de fallecidos     | 0,50            | 0,47             | 0,47          | 0,37           |
| personas lesionadas      | 0,26            | 0,27             | 0,29          | 0,30           |
| daños internos mayores   | 0,12            | 0,14             | 0,05          | 0,08           |
| daños externos mayores   | 0,07            | 0,08             | 0,05          | 0,06           |
| daños medioambientales   | 0,06            | 0,04             | 0,14          | 0,19           |

### 3.2. Proceso de determinación del coeficiente de agravamiento del impacto $C_{ai}$

El coeficiente de agravamiento se estima como la suma ponderada de un conjunto de agravantes asociados a la falta de homeostasis,  $F_{FHi}$  y falta de resiliencia,  $F_{FRi}$  del contexto expuesto, como se aprecia en la ecuación (4):

$$C_{ai} = \sum_{i=1}^m (w_{XFHi} * X_{FHi}) + \sum_{j=1}^n (w_{XFRj} * X_{FRj}) \quad (4)$$

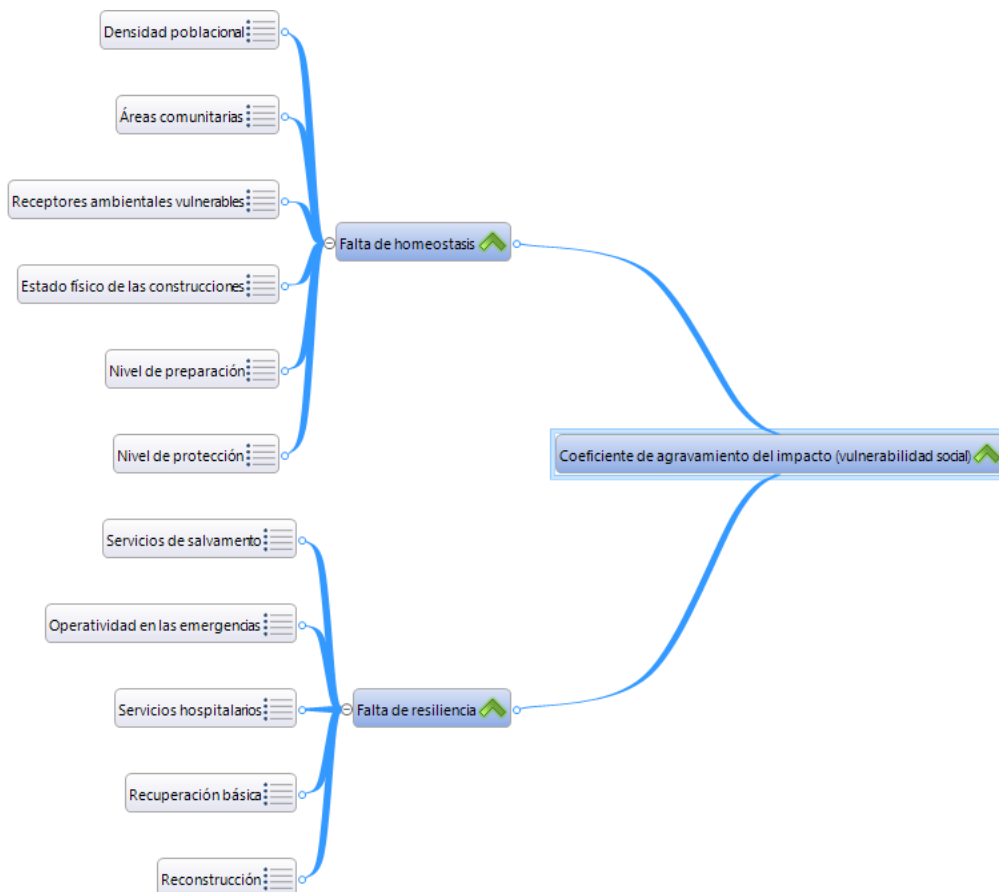
donde  $w_{XFHi}$  y  $w_{XFRj}$  son los pesos de cada uno de los descriptores  $X_{FHi}$  y  $X_{FRj}$ .

Para la evaluación de los descriptores se propone un método alternativo a recurrir en aquellos escenarios donde la información requerida para la evaluación del indicador no esté disponible. Esta propuesta utiliza la opinión de los expertos en lugar de valores numéricos, considerando la incertidumbre y la subjetividad asociada. Es decir, la evaluación utiliza una única escala formada por un conjunto de seis términos o etiquetas lingüísticas, estas son: nulo, muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto, máximo.

La figura 3 muestra el diseño del árbol difuso a evaluar para la estimación del coeficiente de agravamiento. Los descriptores incluidos fueron considerados como los más significativos para cada categoría. Estos pueden ser modificados de acuerdo con las características del área o consideraciones de los evaluadores.

La modelación del árbol difuso que describe la relación existente entre los descriptores y la asociación de datos (variables difusas, etiquetas lingüísticas, o números continuos) se realiza en el software *Fuzzy tree studio*. Así como la evaluación de los predicados a través de la lógica difusa compensatoria, lo cual permite al agente decisor despreocuparse por el trasfondo matemático y centrar su atención en la formulación verbal del modelo decisional. Al igual que en el indicador original, los pesos son asignados mediante la aplicación del proceso de jerarquías analíticas.

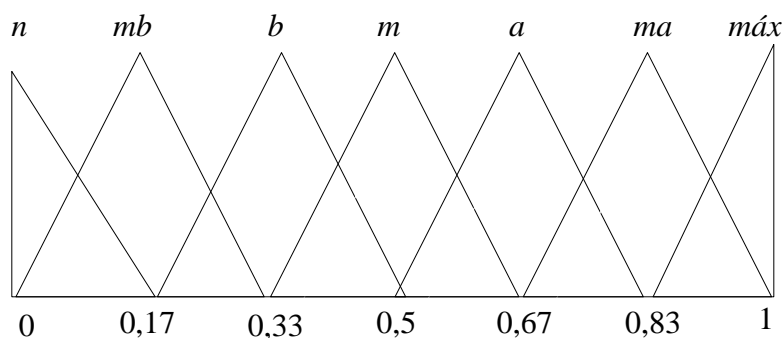
En un estudio práctico de un escenario de riesgo probable, para obtener el valor del agravamiento de impacto en el área de afectación dada la vulnerabilidad existente, los expertos deben evaluar cada descriptor a través de etiquetas lingüísticas. Como resultado de la evaluación se obtiene un valor numérico del coeficiente de agravamiento del impacto  $C_{ai}$  entre 0 y 1. Este puede ser sustituido en la ecuación 2 para determinar el índice de riesgo tecnológico existente en un área.



**Figura 3.** Descriptores de la vulnerabilidad social. Estimación del coeficiente de agravamiento

Si se desea establecer una semántica al valor numérico del  $Cai$  obtenido, se propone una función de pertenencia ( $m_A(x)$ ) de tipo triangular, formulada analíticamente a partir de la ecuación 5 (Porcel, 2005; Cabrerizo et al., 2008). La escala utilizada para la clasificación es: nulo; muy bajo; bajo; medio; alto; muy alto, máximo. Los términos se representan mediante números difusos triangulares con parámetros  $a_1$ ,  $a_2$ , y  $a_3$ , según se muestra en la figura 4.

$$m_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } Cai \leq a_1 \\ (Cai - a_1)/(a_2 - a_1) & \text{si } a_1 \leq Cai \leq a_2 \\ (a_3 - Cai)/(a_3 - a_2) & \text{si } a_2 \leq Cai \leq a_3 \\ 0 & \text{si } Cai \geq a_3 \end{cases} \quad (5)$$



**Figura 4.** Escala utilizada para la evaluación de indicadores cualitativos

**Fuente:** Porcel (2005)



Con respecto al análisis antes mencionado, si el valor del coeficiente de agravamiento obtenido en el software *Fuzzy tree studio* toma valor 0,7 al ser evaluado en la escala propuesta por (Porcel, 2005) se considera como alto, con un grado de pertenencia al conjunto de 0,82.

El índice de riesgo tecnológico propuesto puede ser aplicado en un área de riesgo dentro de una institución, emplazamiento, empresa o territorio, permitiendo el análisis comparativo entre ellos. Este análisis contribuye a la gestión holística del riesgo al integrar múltiples factores que afectan al nivel de riesgo en una sola puntuación numérica, considerando la probabilidad de ocurrencia, las consecuencias y la vulnerabilidad social existente. La indización indica aquellas áreas donde existe un mayor nivel de riesgo ante la ocurrencia de un accidente mayor.

#### **4. CONCLUSIONES**

1. El índice de riesgo tecnológico propuesto considera el efecto del riesgo físico existente dada la ocurrencia de un evento desestabilizador, así como el agravamiento del impacto por las condiciones socioeconómicas y la falta de resiliencia del área implicada. Aporta un sustento científico al enfoque basado en riesgos, y al desarrollo de una cultura proactiva de prevención, mejora y protección.
2. La presente metodología desarrolla alternativas basadas en la integración de los datos y en la modelación de la vulnerabilidad social, utilizando la lógica difusa compensatoria y el método multicriterio de jerarquías analíticas. En aquellos escenarios donde la información no esté disponible permite la apreciación del conocimiento de los expertos del proceso, aportando una mayor flexibilidad al estudio.
3. La indización de las áreas e instalaciones tecnológicas, así como los territorios donde están situadas, en función del nivel de riesgo existente ante la ocurrencia de accidentes tecnológicos graves, facilita la presentación de la información, la documentación de los procesos implicados en la gestión de riesgos y la toma de decisiones en la planificación de acciones preventivas.

#### **REFERENCIAS**

- Barbat, A.H., Carreño, M.L., Cardona, O.D., Marulanda, M.C., Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas., *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 27, 2011, pp.3-27.
- Bohórquez, T., Evaluación de la vulnerabilidad social ante amenazas naturales. Un aporte de método., *Investigaciones geográficas*, Vol.81, 2013, pp. 79-93.
- Cabrerizo, F.J., Alonso, S., Herrera-Viedma, F., A consensus model for group decision making problems with unbalanced fuzzy linguistic information., *International Journal of Information Technology & Decision Making*, Vol. 2, 2008, pp. 2-5.
- Cardona, O.D., Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos., Tesis en opción del Grado Científico de Doctor en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural, Universidad Politécnica de Catalunya, Capítulo 3, 2001, pp 22-29.

- Cardona, O.D., Midiendo lo inmedible. Indicadores de vulnerabilidad y riesgo., Boletín Ambiental, Instituto de estudios ambientales IDE, 2006, pp. 4-5.
- Carrasco, R.A., Villar, P., Hornos, M., A linguistic multi-criteria decision making model applied to the integration of education questionnaires., International Journal of Computational Intelligence Systems, Vol. 4, No. 5, 2011, pp. 946-959.
- Carreño, M.L., Cardona, O.D., Marulanda, M.C. & Barbat, A.H., Indicadores para medir el desempeño de la gestión de riesgo., Revista Internacional de Ingeniería y Estructura, Vol, 11, 2006, pp. 25-44.
- Carreño, M. L., Barbat, A. H., Cardona, O.D., Métodos numéricos para la evaluación holística del riesgo sísmico utilizando la teoría de conjuntos difusos., Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 30, 2014, pp. 25-34.
- Citma., Lineamientos metodológicos para la determinación de los riesgos a nivel territorial de las instalaciones industriales y de servicios que manejan sustancias químicas peligrosas., 2012, pp. 10-15.
- Hurtado, J. E., Holistic seismic risk estimation of Metropolitan Center., Proceedings of 12th Work Conference of Earthquake Engineering Auckland, Nueva Zelanda, 2000, pp. 30-38.
- Ibarra-Hernández, E.V., Goya-Valdivia, F.A., Guerra-Valdés, B.F., Dupin-Fonseca, M., Caracterización y usos de las técnicas cualitativas de identificación y valoración de peligro en los procesos químicos industriales., Centro Azúcar, Vol. 42 No. 1, 2015, pp. 26-36.
- Marulanda, M.C, Cardona, O.D., Barbat, H.C., Robustness of the holistic seismic risk evaluation in urban centers using the USRi., Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Vol. 49, 2009, pp. 501-516.
- Porcel, C., Sistemas de acceso a la información basados en información lingüística difusa y técnicas de filtrado., Tesis presentada en opción al grado Científico de Doctor en Informática, Universidad de Granada, España, 2005, pp. 32-58.
- Ruíz, N., Asociaciones público-privadas en la reducción de riesgo de desastres. El caso de la industria química de Coatzacoalcos, México., Gestión y Política Pública, Vol. 26, No. 1, 2017, pp. 105-138.
- Saaty, T.L., Axiomatic foundations of the analytic hierarchy process., Management Science, Vol. 32, No. 7, 1986, pp. 841-855.