

08-007

EXPERT SYSTEMS FOR ASSESSMENT OF RISKS: EXPOSURE TO HAND-ARM VIBRATIONS, A FUZZY LOGIC APPLICATION FOR EMERGING RISKS ASSESSMENT

Sanchez Lite, Alberto⁽¹⁾; Brocal Fernández, Francisco⁽²⁾; González Gaya, Cristina⁽³⁾; Fuentes Bargas, Jose Luis⁽⁴⁾; Sebastián Pérez, Miguel Angel⁽³⁾

⁽¹⁾Universidad de Valladolid, ⁽²⁾Universidad de Alicante, ⁽³⁾Universidad Nacional de Educación a Distancia, ⁽⁴⁾Universitat Politècnica de València

Technical and scientific literature present different methodologies, tools, studies and developments of the application of expert systems using neural networks and fuzzy logic for risk assessments. Nowadays, there is great interest not only in identifying and assessing risks, but also in the qualification of risk in terms of its definition as emerging. Within the risks in the workplace, exposure to vibrations in the hand-arm system can be considered as an emerging risk. This paper proposes a tool for the evaluation of the level of emerging risk from exposure to hand-arm vibrations in the workplace, using fuzzy logic

Keywords: *Safety; Assessment; Emerging Risks; Fuzzy Logic; Hand-Arm Vibrations*

SISTEMAS EXPERTOS PARA EVALUACION DE RIESGOS: EXPOSIÓN A VIBRACIONES EN SISTEMA MANO-BRAZO, APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA PARA EVALUAR RIESGOS EMERGENTES.

La bibliografía técnica y científica presenta distintas metodologías, herramientas, estudios y desarrollos de la aplicación de sistemas expertos basado en redes neuronales y lógica difusa para la evaluación de riesgos. Actualmente, existe un gran interés no solo por la identificación y evaluación del riesgo, sino también por la cualificación del riesgo en lo referente a su definición como emergente. Dentro de los riesgos en el puesto de trabajo, la exposición a vibraciones en el sistema mano-brazo puede ser considerada como riesgo emergente. El presente trabajo propone una herramienta para la evaluación del nivel como riesgo emergente en el puesto de trabajo del riesgo por exposición a vibraciones en el sistema mano-brazo, basado en lógica difusa.

Palabras clave: *Seguridad; Evaluación, Riesgos Emergentes; Lógica Difusa; Vibraciones Mano-Brazo*

Correspondencia: Alberto Sánchez Lite; asanchez@eii.uva.es

1. Introducción

Distintos autores definen qué se entiende y qué elementos contiene un sistema experto (SE) en ingeniería (Hayes-Roth, Waterman, y Lenat, 1983, Rolston, Gama y Ziskiend, 1990, Nebendahl, 1991, Taha, 2011). Tal y como resume Taha (2011) un sistema experto es capaz de realizar tareas complejas, de forma rápida y económica, y generalmente asociadas a la resolución de problemas en la toma de decisiones. Desde un punto de vista conceptual un sistema experto está formado por una base de conocimiento experto que se traduce en un conjunto de reglas que mediante un proceso de inferencia es capaz dar una respuesta correcta.

Liado (2005) describe en su trabajo de revisión distintos desarrollos de SE, contenidos en 26 áreas distintas de aplicación, basados en lógica difusa (Fuzzy) (Zadeh, 1988) como un enfoque para poder incluir dentro de un SE la incertidumbre en los procesos de clasificación y la toma de decisiones. En el campo de la seguridad industrial Amiri, Ardeshir, y Zarandi, (2017), Mure, Demichela y Piccinini, (2006), y Canning (2012), emplean la metodología Fuzzy dentro de un modelo de predicción de accidentes relacionado con el trabajo. Pinto, Nunes y Ribeiro (2011) describe 20 aplicaciones Fuzzy en ergonomía y seguridad, algunas de ellas centradas en el sector de la construcción y la gestión de proyectos, destacando el tratamiento de la incertidumbre que esta aproximación permite.

La exposición a vibración del sistema mano-brazo es un factor de gran interés en la prevención de riesgos en el puesto de trabajo, estando este riesgo identificado como riesgo nuevo y emergente. La evaluación que permite determinar el nivel de riesgo que la exposición a vibraciones tiene sobre la posibilidad de que el operario presente una lesión en el sistema mano-brazo está regulada por distintos estándares (Directiva 2002/44/CE, UNE-EN ISO 5349:2001, ANSI/ASA S2.70-2006-R2016), siendo la evaluación de su cualificación como riesgo nuevo y emergente (NER) un campo de investigación de actual interés.

2. Objetivos

Actualmente se aplican distintas metodologías para la evaluación de riesgos, tanto impuestas por legislación específica como para aquellos riesgos para los que no existe legislación, y se encuentran registradas en guías específicas. Para la evaluación de riesgos se emplean métodos especializados de análisis o métodos generales, pero no se dispone de suficientes metodologías de análisis que permitan la evaluación y cualificación del riesgo como riesgo nuevo y emergente (NER).

El presente trabajo muestra los primeros pasos en una línea de actuación actualmente abierta dentro de un programa de investigación centrado en el estudio de los riesgos nuevos y emergentes, que pretende cuantificar el nivel de riesgo nuevo y emergente para riesgos en el sector industrial.

El objetivo de esta comunicación es describir un método experto basado en lógica difusa para la evaluación de la cualificación como riesgo nuevo y emergente (NER) del riesgo por exposición a vibraciones mano-brazo. Junto a la descripción del método se presenta una aplicación práctica de la metodología experta desarrollada, evaluando el nivel de riesgo nuevo y emergentes (NER) para el uso de la herramienta amoladora de disco eléctrica en entornos industriales, utilizando los datos de niveles de vibración corresponden con 32 amoladoras de disco eléctricas distintas analizadas en la base de datos "Vibra" (INSHT, 2011).

3. Antecedentes: Propuesta inicial

Partiendo de la definición de riesgo nuevo y emergente (NER) dada por la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo (OSHA) como cualquier riesgo nuevo que va en aumento, Brocal, Sebastián, y González (2017) completan dicha definición de NER dentro de un marco teórico, proponiendo 6 códigos (C1 a C6) que pueden permitir la identificación del riesgo como nuevo riesgo o riesgo en aumento. De la aplicación de dicha codificación sería posible catalogar un riesgo como nuevo cuando: el riesgo era desconocido anteriormente y es causado por nuevos procesos, nuevas tecnologías, nuevos espacios de trabajo o cambios sociales u organizativos (C1), o existe un cambio en las percepciones sociales o públicas en lo referente al riesgo (C2), o los nuevos conocimientos científicos permiten identificar un riesgo existen como nuevo riesgo (C3), y como riesgo en aumento cuando: la cantidad de peligros que conducen al riesgo aumenta (C4), o la probabilidad de exposición que conduce al riesgo aumenta (nivel de exposición y/o la cantidad de personas expuestas aumenta (C5), o aumenta la gravedad de los efectos sobre la salud y/o la cantidad de personas afectadas (C6).

Como respuesta al aumento del nivel de exposición, e intentando cubrir la necesidad de considerar las cualidades nuevas y emergentes del riesgo por exposición a vibraciones mano-brazo (VMB), Brocal et al. (2017) generan una propuesta metodológica para evaluar el nivel de riesgo emergente (ERL) por exposición a vibraciones mano-brazo. Dicha propuesta es tomada como punto de partida en el trabajo presentado en esta comunicación, y se presenta en la figura 1. El análisis de las cualidades emergentes de este riesgo Brocal et al. (2017) lo relacionan con las condiciones marcadas como C2, C4, C5 y C6. Dicha propuesta, basada en la definición de riesgo emergente descrita anteriormente y los principios de matrices de riesgo (Baybutt, 2016), define 3 matrices (A, B y C) de doble entrada, cuyo resultado final clasifica el ERL en 9 niveles, siendo nivel 1 como ERL nada significativo y 9 como ERL completamente significativo (ver figura 1).

La matriz C determina el valor ERL obtenido mediante distintas combinaciones de los valores de las variables consecuencia y probabilidad. La consecuencia, relacionada con la condición C6, la gradúa en función del porcentaje de la población expuesta (POE) según las ocupaciones consideradas. Dicha graduación es la siguiente: consecuencias bajas (POE <50%), consecuencias medias (POE = 50%) y consecuencias altas (POE > 50%). La probabilidad se asocia a la condición C5, mediante la matriz B, considerando el nivel de riesgo en función de los distintos intervalos del parámetro valor de la exposición diaria en m/s^2 para un periodo de 8 horas $A(8)$ para VMB como aplicación del RD1311/2005, evaluado mediante el valor total equivalente de vibración en m/s^2 a_{hv} y el tiempo de exposición en horas T (ecuación 1), y la importancia relativa de trabajadores expuestos (número de trabajadores expuestos) mediante la matriz A.

$$A(8) = a_{hv} \cdot \sqrt{\frac{T}{8}} \quad (1)$$

La matriz A, asociada a la condición C4, combina las variables porcentaje relativo de sectores de fabricación (RPMS) y el número relativo de trabajadores expuestos (RNEW).

4. Modelo Fuzzy Experto Propuesto

Tomando como punto de partida el modelo inicial propuesto para evaluar el nivel de riesgo emergente a VMB descrito en el apartado anterior, teniendo en cuenta que su aplicación

está afectada por la propia incertidumbre de medida del nivel de vibración (Brocal, González, y Sebastián (2018), y la obtención de los datos estadísticos de las variables de entrada (Brocal et al., 2017), se propone extender dicha propuesta mediante un modelo Fuzzy. La utilización de esta metodología en matrices de riesgo ya ha sido utilizada con éxito por distintos autores (Markowski, y Mannan, 2008), aunque no en la evaluación y cualificación de un riesgo como NER.

La generación de un modelo Fuzzy requiere de los siguientes pasos (Mamdani y Assilian, 1975, Williams, 2009): determinar el conjunto difuso (“fuzificación”), definir el conjunto de reglas para relacionar las distintas entradas y salidas junto con la agregación de las salidas de las reglas, y el empleo de un método de inferencia que permita la decodificación (“defuzificación”).

El modelo fuzzy experto planteado (figura 1) comprende 30 funciones lógicas con 29 funciones de pertenencia trapezoidales (ecuación 2), 4 variables de entrada (3 funciones de pertenencia para cada una de las variables RNEW, RPMS, A(8) y Consecuencia), dos variables intermedias (correspondientes a las salidas al ser evaluadas las variables mediante las matrices A y B con 4 funciones de pertenencia para cada una de ellas), y una variable de salida (ERL) como nivel de riesgo emergente con 9 funciones de pertenencia.

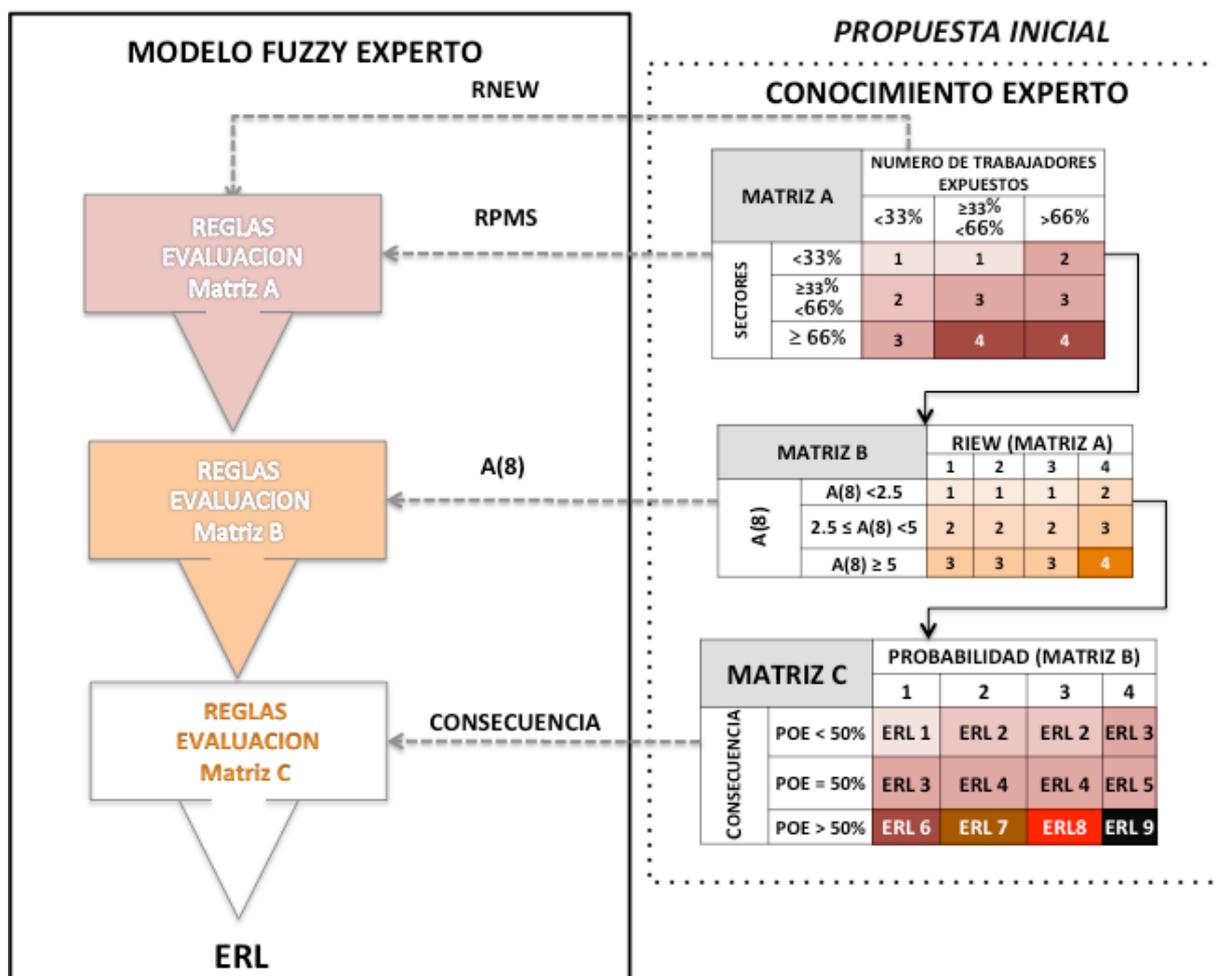
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x < a) \text{ ó } (x > d) \\ \frac{x - a}{b - a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{si } b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c} & \text{si } c \leq x \leq d \end{cases} \quad (2)$$

Estas variables se corresponden con el método propuesto inicial y descrito en el apartado anterior, respetando los límites de valoración sobre cada variable descrita anteriormente, pero permitiendo una pertenencia no booleana en cada intervalo. Como método de “fuzificación” se ha utilizado el max-min, y como método de “defuzificación” el método del centro de gravedad (ecuación 3).

$$z = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x) * x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \quad (3)$$

Figura 1: Modelo Fuzzy Experto Propuesto (izquierda) y Propuesta Inicial de partida Brocal et al. (2017) (derecha) para la evaluación del nivel de riesgo emergente (ERL) a VMB.

RPMS: porcentaje relativo de sectores de fabricación, RNEW: número relativo de trabajadores expuestos, RIEW: importancia relativa de trabajadores expuestos, POE: porcentaje de la población expuesta, A(8): valor de la exposición diaria en m/s^2 para un periodo de 8 horas para VMB como aplicación del RD1311/2005



5. Resultados

Para tener una primera aproximación del comportamiento del modelo experto propuesto se han utilizado los datos suministrado por Brocal et al (2017) en su estudio realizado para la determinación del ERL asociado a las VMB generadas por el uso de la amoladora de disco eléctrica en entornos industriales. Los datos de niveles de vibración corresponden con 32 herramientas analizadas en la base de datos "Vibra" (INSHT, 2011) (ver tabla 1).

Tabla 1. ERL a VMB: Resultados obtenidos método fuzzy experto y método de partida (adaptado de Brocal et al. 2017).

Marca	a hv (m/s ²)	A(8) (m/s ²) (T =2 h)	A(8) (m/s ²) (T=3 h)	ERL (T=2 h)	ERL (T=3 h)	ERL FUZZY (2h)	ERL FUZZY (3h)
ATLAS							
COPCO	7.8	3.90	4.78	7	7	7.15	7.77
ATLAS							
COPCO	6.08	3.04	3.72	7	7	6.85	6.89
BLACK & DECKER	6.33	3.17	3.88	7	7	6.89	7.08
BOSCH	6.07	3.04	3.72	7	7	6.85	6.85
BOSCH	6.55	3.28	4.01	7	7	6.85	7.34
BOSCH	8.96	4.48	5.49	7	8	7.77	7.77
BOSCH	7.4	3.70	4.53	7	7	6.85	7.77
BOSCH	5.4	2.70	3.31	7	7	6.85	6.85
BOSCH	6.6	3.30	4.04	7	7	6.85	7.27
BOSCH	5	2.50	3.06	7	7	6.85	6.85
BOSCH	11.1	5.55	6.80	8	8	7.77	7.77
BOSCH	18.2	9.10	11.15	8	8	7.77	7.77
BOSCH	10.84	5.42	6.64	8	8	7.77	7.77
BOSCH	8.36	4.18	5.12	7	8	7.27	7.77
BOSCH	9.9	4.95	6.06	7	8	7.77	7.77
BOSCH	9	4.50	5.51	7	8	7.77	7.77
BOSCH	5.89	2.95	3.61	7	7	6.85	6.85
BOSCH	7.44	3.72	4.56	7	7	6.85	7.77
DEWALT	9.11	4.56	5.58	7	8	7.77	7.77
DEWALT	13.69	6.85	8.38	8	8	7.77	7.77
DEWALT	7.3	3.65	4.47	7	7	6.85	7.7
FEIN	6.73	3.37	4.12	7	7	6.85	7.27
FEIN	11.07	5.54	6.78	8	8	7.77	7.77
HILTI	3.24	1.62	1.98	6	6	6.18	6.85
METABO	4.78	2.39	2.93	6	7	6.85	6.85
METABO	9.68	4.84	5.93	7	8	7.77	7.77
METABO	13.02	6.51	7.97	8	8	7.77	7.77
METABO	8.28	4.14	5.07	7	8	7.34	7.77
METABO	3.31	1.66	2.03	6	6	6.18	6.85
METABO	18.4	9.20	11.27	8	8	7.77	7.77
METABO	19.23	9.62	11.78	8	8	7.77	7.77
PROTOOL	4.22	2.11	2.58	6	7	6.85	6.85

Los valores de las variables RNEW, RPMS y Consecuencia fueron 59.0%, 34.8 % y 67.2 % respectivamente. Con los datos de dicho estudio, empleando el método fuzzy experto propuesto para el cálculo del ERL se han obtenido los resultados que muestran la tabla 1, tabla 2 y figura 2.

Figura 2: ERL a VMB método fuzzy experto: Box plot A (8) t = 2h y A(8)t =3h.



Tabla 2. ERL a VMB método fuzzy experto: Estadísticos descriptivos

Estadístico	ERL FUZZY (2h)	ERL FUZZY (3h)
No. de observaciones	32	32
Mínimo	6.18	6.85
Máximo	7.77	7.77
Frec. del mínimo	2.00	8.00
Frec. del máximo	13.00	18.00
Rango	1.59	0.92
1° Cuartil	6.85	6.88
Mediana	7.02	7.77
3° Cuartil	7.77	7.77
Media	7.22	7.44
Varianza (n-1)	0.26	0.17
Desviación típica (n-1)	0.51	0.41

Empleando el método fuzzy experto propuesto el valor máximo de ERL para 2h y 3h es inferior a 8 para todas las herramientas. El 50% de las herramientas para 2h obtiene un valor superior a 7, siendo este porcentaje mayor (72%) para 3h. Tanto para 2h como para 3h la mayoría de las herramientas presentan valores próximos o superiores a 7, obteniendo en el 13% de las herramientas para 2h y 18% para 3h los valores más próximos a 8 con un valor máximo de 7.77.

Si comparamos los resultados obtenidos para 2h y 3h con el método fuzzy experto propuesto en este estudio con los resultados obtenidos con el método de partida, se puede ver que si los valores obtenidos para una herramienta dada conducen al mismo valor de ERL (37.5% de los casos) para 2h y 3h para un método también lo hace para el otro, si bien los valores para el método fuzzy son algo menores.

Al aplicar el método fuzzy, tal y como ocurría con el método inicial, también se puede observar una cierta coherencia entre los niveles A(8) que no superan el límite de explosión (12.5% de los casos) y los valores ERL obtenidos (valores menor de 7), así como en los valores que se encuentra por encima del valor de explosión.

Los valores del ERL para 2 y 3 h, pueden considerarse “moderadamente significativos” para el 60% de los casos (porcentaje medio para los casos con $ERL > 7$), no encontrado valores como “muy significativos (casos con $ERL=8$). Como en el método de partida, no se ha calificado ninguna herramienta con un valor $ERL=9$.

6.- Conclusiones

Se ha desarrollado un método experto para la valoración de las cualidades emergentes del riesgo por exposición a vibraciones mano-brazo mediante la determinación del valor ERL. Dicho método se ha aplicado a un caso práctico, en el que se han obtenido valores ERL coherentes con los intervalos del parámetro A(8) definidos por el RD 1311/2005, y coherentes con los valores obtenidos con el método inicial utilizado como punto de partida.

El trabajo presentado en esta comunicación está permitiendo explorar una nueva vía para la cuantificación del nivel de riesgo nuevo y emergente del riesgo por exposición a vibraciones mano-brazo. El modelo presentado es una primera aproximación que extiende el planteamiento inicial descrito en el apartado 3, teniendo en cuenta la incorporación de la incertidumbre en las variables del modelo. Poder incorporar la incertidumbre en las variables del modelo es la principal ventaja del método experto presentado.

Actualmente se están evaluando los 2 modelos descritos en este trabajo, para poder determinar la contribución de cada una de las variables en el modelo, y definir cómo realizar la incorporación final de la incertidumbre al modelo.

Los resultados obtenidos parecen indicar que una aproximación fuzzy al planteamiento de matriz de riesgo inicial podría ser de utilidad para la caracterización de las cualidades nuevas y emergentes del riesgo por exposición a vibraciones mano-brazo, si bien es necesario seguir explorando su comportamiento con nuevos datos.

7. Bibliografía

- Amiri, M., Ardeshir, A., & Zarandi, M. H. F. (2017). Fuzzy probabilistic expert system for occupational hazard assessment in construction. *Safety Science*, 93, 16
- ASA S2.70-2006 (2016). American National Standard Guide for the Measurement and Evaluation of Human Exposure to Vibration Transmitted to the Hand standard by American National Standards of the Acoustical Society of America.
- Baybutt, P. (2016). Designing risk matrices to avoid risk ranking reversal errors. *Process Safety Progress*, 35(1), 41-46.
- Brocal, F., González, C., & Sebastián, M. A. (2018). Practical methodology for estimating occupational exposure to hand-arm vibrations according to CEN/TR 15350: 2013. *Safety Science*, 103, 197-206.
- Brocal, F., Sánchez, A., González, C., Fuentes, J. L., & Sebastián, M. A. (2017). Proposed methodology for the study of the level of emerging risk from exposure to hand-arm vibrations in manufacturing environments. *Procedia Manufacturing*, 13, 1373-1380.
- Brocal, F., Sebastián, M. A., & González, C. (2017). Theoretical framework for the new and emerging occupational risk modeling and its monitoring through technology lifecycle of industrial processes. *Safety Science*, 99, 178-186.
- Canning, J. (2012). Fuzzy methodology for prediction of occupational accident rate (Doctoral dissertation, Memorial University of Newfoundland).
- Directiva 2002/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos (vibraciones), de 25 de junio de 2002, D.O.C.E. núm. L177/13-19, de 6 de julio de 2002.
- Hayes-Roth, F., Waterman, D. A., & Lenat, D. B. (1983). Building expert systems. Teknowledge Series in Knowledge Engineering, Reading: Addison-Wesley, 1983, edited by Hayes-Roth, Frederick; Waterman, Donald A.; Lenat, Douglas B.
- INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo), (2011). Base de datos de vibraciones mecánicas (Valores de exposición).
- Liado, S. H. (2005). Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004. *Expert systems with applications*, 28(1), 93-103.
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
- Markowski, A. S., & Mannan, M. S. (2008). Fuzzy risk matrix. *Journal of hazardous materials*, 159(1), 152-157.
- Mure, S., Demichela, M., & Piccinini, N. (2006). Assessment of the risk of occupational accidents using a “fuzzy” approach. *Cognition, Technology & Work*, 8(2), 103-112.
- Nebendahl, D. (1991). *Sistemas Expertos. Parte 2*. Marcombo SA.

Pinto, A., Nunes, I. L., & Ribeiro, R. A. (2011). Occupational risk assessment in construction industry—Overview and reflection. *Safety science*, 49(5), 616-624.

REAL DECRETO 1311/2005 de 4 de noviembre sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas. BOE no 265 de 5 de noviembre de 2005

Rolston, D. W., Gama, A. P., & Ziskiend, I. T. (1990). *Principios de inteligencia artificial y sistemas expertos* (No. QA76. 76. E95 R75e). McGraw-Hill.

Taha, L. G. E. D. (2011). The role of expert systems in remote sensing applications. *International Journal of Computer Research*, 18(3/4), 385.

UNE-EN-ISO 5349-1:2002.Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 1: Requisitos generales. Abril 2002..

UNE-EN-ISO 5349-2:2002.Vibraciones mecánicas. Medición y evaluación de la exposición humana a las vibraciones transmitidas por la mano. Parte 2: Guía práctica para la medición en el lugar de trabajo. Abril 2002.

Williams, J. K. (2009). "Introduction to Fuzzy Logic." In *Artificial Intelligence Methods in the Environmental Sciences*, Dordrecht: Springer Netherlands, 127–51.

Zadeh, L. A. (1988). Fuzzy logic. *Computer* (Long. Beach. Calif). 21, 83–93.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad. Ministerio de Economía y Competitividad de España, título: "Análisis y evaluación tecnológica de requisitos para el diseño de un sistema normalizado de gestión de riesgos nuevos y emergentes (A2NERSYS)" con referencia DPI2016-79824-R