

# Aplicación de un modelo de predicción de vulnerabilidad en edificios históricos del conjunto histórico de Sevilla

Cristina Gómez, Andrés J. Prieto, Rocío Ortiz

**Resumen**—En este artículo se analizan los resultados obtenidos utilizando la lógica difusa aplicada al patrimonio. Se plantea un modelo de predicción de la vulnerabilidad basado en lógica difusa aplicado a los edificios estudiados en el centro histórico de Sevilla. Mediante el programa de lógica difusa se obtienen los datos de vulnerabilidad y posteriormente pueden ser comparados con los resultados obtenidos con otra metodología de análisis de vulnerabilidad basada en matrices de Leopold de valoración de daños.

**Palabras Claves**— Vulnerabilidad, lógica difusa, patrimonio, conservación preventiva.



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

EL objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de predicción de vulnerabilidad en edificios históricos del conjunto histórico de Sevilla. Para ellos se parte de los estudios sobre predicción de vida útil con la utilización de lógica difusa y se aplica al estudio de la vulnerabilidad en los edificios históricos de Sevilla. La primera etapa del proyecto se ha llevado a cabo como un proyecto de colaboración entre la Universidad Pablo de Olavide y la Universidad de Sevilla dentro del proyecto Art-risk.

El primer objetivo ha sido el diseño y puesta en funcionamiento de un nuevo modelo basado en una nueva metodología sustentada en la teoría de conjuntos difusos, capaz de predecir la vulnerabilidad intrínseca de los edificios patrimoniales estudiados [1]. Una vez obtenidos los resultados del índice de vulnerabilidad fueron analizados los resultados. Este índice de vulnerabilidad indica el estado de conservación actual del edificio y permite establecer un orden de prioridad a la hora de intervenir y restaurar el patrimonio histórico. Esta metodología ayuda a la toma de decisiones mediante un criterio objetivo de priorización ya que tiene en cuenta el estado actual de conservación del edificio y permite establecer plazos para su intervención. Teniendo en cuenta la situación actual de crisis se trata de una metodología económica para la evaluación y el diagnóstico del patrimonio y ayuda a establecer criterios para la conservación preventiva.

## 2. METODOLOGÍA

En primer lugar, es necesario definir en qué edificios se van a estudiar. Para desarrollar la predicción de la vulnerabilidad se tomaron como objeto de estudio 30 iglesias gótico-mudéjares, barrocas y neoclásicas del conjunto histórico de Sevilla. Estas iglesias coinciden con las estudiadas por Ortiz [2] y son las siguientes: El Salvador, La Anunciación, La Magdalena, La O, Omnium Sanctorum, San Esteban, San Gil, San Idelfonso, San Isidoro, San José, San Juan de la Palma, San Julián, San Lorenzo, San Mar-

cos, San Martín, San Nicolás, San Pedro, Santa Ana, Santa Catalina, Santa Cruz, Santa Inés, Santa Isabel, Santa Marina, Santa María la Blanca, San Román, San Vicente, Santiago, San Bartolomé, San Andrés y Sagrario.

A continuación, fue necesario establecer las variables que influyen en la vulnerabilidad. Para establecer dichas variables se recurrió a la opinión de ocho expertos mediante una serie de encuestas [3] y [4]. Estos cuestionarios se realizaron dentro del trabajo de Ortiz [2] y siguiendo la metodología DELPHI [5] consistente en seleccionar un grupo de expertos a los que se les pregunta su opinión sobre acontecimientos futuros, en este caso relacionados con la vulnerabilidad de un edificio [2]. Las variables empleadas en este estudio han sido las variables de entrada del modelo, las cuales fueron anteriormente validadas por el conjunto de expertos que han participado durante la fase de diseño del modelo. Dichas variables son: V1. Características físico-químicas, V2. Textura, V3. Resistencia al fuego, V4. Estética, V5. Catalogación y Nivel de Protección, V6. Nivel de uso, V7. Cubierta, V8. Revestimientos, V9. Instalación de saneamiento, V10. Cimentación, V11. Estructura, V12. Simplicidad de la solución constructiva.

### 2.1. Análisis de las encuestas

Una vez obtenidos los resultados de las encuestas se procedió a crear las reglas de inferencia difusas. Para ello se establecen cinco posibles valoraciones de las variables de entrada, de forma que el máximo valor (1) corresponde a muy bien y el mínimo valor (5) a muy mal. Quedaría de la siguiente forma: Muy bien *mb* (1), Bien *b* (2), Regular *r* (3), Mal *m* (4), Muy mal *mm* (5).

Con este criterio, ya se pueden crear las funciones de pertenencia que se emplearán en el software Xfuzzy 3.0 [6].

## 2.2. Reglas de inferencia difusa

Para definir un sistema de inferencia difusa se han de llevar a cabo cuatro etapas: la primera la Fusificación, la segunda la estructura jerárquica, la tercera es la base de conocimiento y la cuarta y última etapa la Desfusificación. Una vez conocida la opinión de los expertos sobre cada variable se puede definir exactamente cada regla. Para ello, es necesario conocer las funciones de pertenencia de cada factor, es decir las relaciones que existen jerárquicamente entre las distintas variables para poder establecer las reglas difusas. Se establecen las funciones de pertenencia para cada factor, dando lugar a las reglas difusas. Estas reglas a su vez estaban relacionadas jerárquicamente entre los conjuntos difusos del modelo dando lugar a la salida o índice de vulnerabilidad, a través del proceso de desfusificación [1]. Las reglas A engloban las variables de entrada del sistema y las reglas B aparecen como resultado de las reglas A, y son por tanto dependientes jerárquicamente de ellas (Tabla 1).

- **REGLAS A.** Son las reglas que se aplican directamente sobre las 12 primeras variables de entrada y que tienen como consecuencia la agrupación que se plantea en la tabla 1 dando lugar a las reglas de segundo nivel como son: calidad de los materiales *cm*, factor antrópico *fa*, sistema constructivo *sc*, sistema estructural *se*. Estas reglas se agrupan según los comentarios de los expertos y las encuestas que se realizaron.
- **REGLAS B.** Son sub-reglas que aparecen como resultado de las anteriores. No afectan a todas las variables. Se trata de una regla dentro de otra. Aparece la variable lingüística construcción *con*.
- **REGLA C.** A través de esta regla se obtiene el índice de vulnerabilidad. Se aplica a las variables lingüísticas calidad de los materiales *cm*, factor antrópico *fa* y construcción *con*.

Tabla 1.

Estructura jerárquica del sistema de predicción de vulnerabilidad de los edificios históricos estudiados del conjunto histórico de Sevilla

v1	Caract. Físico-químicas	CALIDAD DE LOS MATERIALES ( <i>cm</i> )	INDICE DE VULNERABILIDAD ( <i>iv</i> )
v2	Textura		
v3	Resistencia al fuego		
v4	Estética	FACTOR ANTRÓPICO ( <i>fa</i> )	
v5	Catalogación y N. De Protección		
v6	Nivel de uso		
v7.Cubierta - v8.Revestimientos - v9.Instalaciones de Saneamientos		SISTEMA CONSTRUCTIVO ( <i>sc</i> )	
		CONSTRUCCIÓN ( <i>con</i> )	
v10	Cimentación		
v11	Estructura		
v12	Simpl. solución constructiva		

REGLA A →      REGLA B →      REGLA C

## 2.3. Fusificación

Se definen las doce variables de entrada que serán las establecidas por Ortiz [2] pero en orden y agrupación diferente. Las variables de entrada o fusificación son las

que aparecen en la tabla 1. Esto se conoce como estructura jerárquica del sistema de predicción de vulnerabilidad mediante lógica difusa.

## 2.4. Desfusificación

La desfusificación es el proceso final. Es el mecanismo con el cual se pueden extraer los valores del índice de vulnerabilidad para los diferentes casos estudiados (30 iglesias del conjunto histórico de Sevilla). Posteriormente se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos del índice de vulnerabilidad para estas iglesias con los índices de vulnerabilidad obtenidos por la metodología de Ortiz [2] basada en matrices de valoración de daños. Mediante esta comparación se trata de realizar la validación de esta metodología. A partir de las reglas difusas introducidas en el programa Xfuzzy 3.0 [6] se introducirán los datos de cada una de las variables obtenidos de las matrices de valoración de daños para cada uno de los edificios procedentes de la tesis de Ortiz [2].

## 3. RESULTADOS

Para llevar a cabo las hipótesis se empleó el programa de cálculo Xfuzzy3.0 [6] y [7]. Una vez establecidas las reglas de inferencia y la estructura jerárquica en el programa, es necesario definir las hipótesis a plantear para comprobar el modelo de predicción. Para llevar a cabo la comprobación del sistema se emplearon los datos procedentes del estudio de Ortiz [2] extraídos de la matriz de Leopold empleada para el análisis de la vulnerabilidad expandida, para ello, se toman los datos relativos a las 12 variables (V1. características físico-químicas, V2. textura, V3. resistencia al fuego, V4. estética, V5. catalogación y nivel de protección, V6. nivel de uso-V7. Cubierta, V8. revestimientos, V9. instalación de saneamiento unidos en sistema constructivo, V10. cimentación, V11. estructura y V12. simplicidad de la solución constructiva) de las 30 iglesias estudiadas. Posteriormente, el resultado obtenido mediante el programa informático Xfuzzy 3.0 [6] se relaciona con los índices de vulnerabilidad expandidos de las 30 iglesias del estudio de Ortiz [2].

Tras realizar las hipótesis y una revisión del programa, los resultados del índice de vulnerabilidad obtenidos con el programa se compararon con los datos de Ortiz [2] tal y como se muestra en la tabla 2. De todo ello se pudo obtener dos datos muy importantes: la iglesia con un mayor índice de vulnerabilidad (Sagrario) y la de menor índice de vulnerabilidad (La O) coinciden, si bien es en un orden de magnitud diferente. Estas iglesias aparecen en verde en la tabla 2. El resultado del índice de vulnerabilidad obtenido con el programa es entre un 1 y 4% mayor que el obtenido por Ortiz [2]. El resto de las iglesias guarda cierta relación en los resultados obtenidos para el índice de vulnerabilidad excepto en dos casos que aparecen en rojo en la tabla 2. Se trata de las iglesias de El Salvador y San Juan de la Palma, estos resultados que se han desviado serán objeto de análisis futuro.

Tabla 2.

Comparación de los resultados de vulnerabilidad obtenidos por Ortiz [2] y los obtenidos por este trabajo utilizando lógica difusa.

Datos procedentes de la Tesis de Ortiz [2]	VI EXPANDIDO	Datos obtenidos en este trabajo	
IGLESIA			
LA O	9	LA O	37
SAN ROMAN	11	SAN NICOLAS	44
SANTA INES	14	SANTA MARIA	44
SAN LORENZO	16	SAN GIL	44
SAN MARCOS	16	SANTIAGO	47
SAN BARTOLOME	17	SAN JUAN DE LA PALMA	48
EL SALVADOR	20	SAN BARTOLOME	48
SAN PEDRO	20	SAN ANDRES	48
SAN ESTEBAN	21	SAN ISIDORO	50
SANTA ISABEL	21	SAN MARTIN	50
SAN ANDRES	23	SAN ROMAN	51
SAN GIL	23	SAN JOSE	51
SAN JOSE	24	SAN VICENTE	51
SAN VICENTE	24	SANTA CRUZ	51
SAN NICOLAS	25	SANTA INES	52
SANTA MARIA LA BLANCA	25	SAN LORENZO	52
SANTA MARINA	26	SAN MARCOS	52
SANTIAGO	26	SAN PEDRO	52
SAN ILDEFONSO	25	SAN ESTEBAN	52
SAN ISIDORO	28	SANTA ISABEL	52
SAN MARTIN	28	SANTA MARINA	52
SAN JULIAN	29	SAN ILDEFONSO	52
SAN JUAN DE LA PALMA	30	SAN JULIAN	52
SANTA CATALINA	32	SALVADOR	53
SANTA ANA	34	SANTA CATALINA	53
OMNIUM SANCTORUM	36	SANTA ANA	53
SANTA CRUZ	36	MAGDALENA	57
ANUNCIACION	43	OMNIUM SANCTORUM	60
MAGDALENA	46	SANCTORUM	60
SAGRARIO	60	ANUNCIACION	62
		SAGRARIO	66

#### 4. CONCLUSIONES

En cuanto a metodología, la lógica difusa es válida para conocer la vulnerabilidad de un edificio ya que se obtienen resultados coherentes y se disponen de los datos necesarios para poder validar las hipótesis con el programa Xfuzzy 3.0. Para este tipo de estudio es necesario un análisis previo de las variables y reglas de inferencia con un grupo de expertos ya que las reglas de inferencia que se plantean provienen del conocimiento de los expertos por lo que es importante la selección de los expertos y la elaboración del cuestionario.

En cuanto al programa Xfuzzy 3.0, la utilización de este tipo de programa de lógica difusa aplicado a la vulnerabilidad de edificios permite obtener una graduación de mayor a menor. Las simulaciones dentro del programa se realizan introduciendo las hipótesis de cada iglesia y obteniendo como resultado el índice de vulnerabilidad de cada iglesia.

Tras realizar numerosas hipótesis con el programa se llega a la conclusión de que la metodología planteada funciona correctamente y los datos guardan relación con los obtenidos por el método de la matriz de daños. Las iglesias con mayor índice de vulnerabilidad son Sagrario, Magdalena, Anunciación, Omnium Sanctorum, Santa Catalina y Santa Ana, y coinciden en ambas metodologías. También en ambas metodologías la Iglesia con menor índice de vulnerabilidad (La O) coincide.

Como conclusión general, esta metodología mediante lógica difusa abre un nuevo enfoque al cálculo de vulnerabilidad en edificios históricos.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Juan Manuel Macías Bernal por sus consejos y asesoramiento durante todo el trabajo.

Este trabajo ha sido desarrollado basado en la metodología de dos proyectos: RIVUPH, proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía (code HUM-6775), y Art-Risk, proyecto RETOS del Ministerio de Economía y competitividad (code BIA2015-64878-R-MINELO/FEDER/UE)

#### REFERENCIAS

- [1] J.M. Macías Bernal, Modelo de predicción de la vida útil de un edificio: una aplicación de la lógica difusa, Departamento de construcciones arquitectónicas II, Universidad de Sevilla, [2012]. Tesis Doctoral.
- [2] R. Ortiz Calderón, Análisis de vulnerabilidad y riesgos en edificios singulares de Sevilla, Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, [2014]. Tesis Doctoral.
- [3] RIVUPH. Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía HUM-6775 de riesgos y vulnerabilidad en el Patrimonio Histórico.
- [4] Encuesta ECOMIMESIS, Informe Vulnerability, 2015. Proyecto de Excelencia RIVUPH de la Junta de Andalucía (códigoHUM-6775).
- [5] T.J.Gordon. The Delphi Method, Futures Research Methodology Version 1.0. Sec 5<sup>a</sup>, The Millennium Project. American Council for the United Nations University, Jerome C. Glenn, Editor Washington, 1994.
- [6] Xfuzzy 3.0 software. CNM Centro Nacional de Microelectrónica e IMSE Instituto de Microelectrónica de Sevilla
- [7] Página web del Instituto de Microelectrónica de Sevilla <http://www.imse.cnm.es/> [visitado 21-03-2016].
- [8] Página web de Xfuzzy 3.0 <http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/Fleb/Fleb.htm> [visitado 21-03-2016].



**Cristina Gómez Fernández** recibió el título de Arquitecto por la Universidad de Sevilla en 2014 y el título de Máster en Diagnóstico del Estado de Conservación del Patrimonio Histórico en la Universidad de Pablo de Olavide en 2016. Actualmente trabaja como arquitecta en Inglaterra participando en varios proyectos de edificios catalogados.  
Correo: gomezfernandezcristina@gmail.com