

Aplicación de los conjuntos difusos en la evaluación de los parámetros de la vulnerabilidad sísmica de puentes

Esperanza Maldonado

Universidad Industrial de Santander
Escuela de Ingeniería Civil
Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Colombia
Tel./ Fax: 57-76-320 744
e-mail: emaldona@uis.edu.co

Joan Ramon Casas

Universidad Politécnica de Cataluña
ETSI de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Ingeniería de la Construcción
Gran Capitán, s/n, Barcelona, España
Tel/Fax: 34-93-401 65 13
e-mail: joan.ramon.casas@upc.es

José Antonio Canas

Instituto Geográfico Nacional
General Ibáñez Íbero
28003 Madrid, España
Tel.: 34-91-597 70 00, Fax: 34-91-597 97 53
e-mail: jacanas@mfom.es

Resumen

La determinación de la vulnerabilidad sísmica del inventario de puentes de una ciudad es una necesidad cada vez más latente. Día a día, los programas de atención posterremotos obligan a contar con una buena planificación de los elementos que involucra su desarrollo; siendo los sistemas de transporte de carreteras un aspecto importante a considerar, y dentro de éstos, los elementos de mayor prioridad son los puentes. A causa de lo anterior, los estudios de vulnerabilidad sísmica de puentes son un tema de interés cada vez mayor. Como una primera aproximación al desarrollo del análisis de vulnerabilidad sísmica de puentes, se ha llevado a cabo el estudio de la evaluación de los parámetros que determinan su vulnerabilidad sísmica mediante la teoría de los “Conjuntos difusos”.

FUZZY SETS APPLICATION TO ASSESS THE PARAMETERS OF THE BRIDGE SEISMIC VULNERABILITY

Summary

Determining the seismic vulnerability of the bridge inventory of a city is quite a mandatory need. Day by day the programs of attention post-earthquake force to have the planning of the elements that involve their development. Therefore, the highway systems are an important aspect to consider and the bridges are important elements to be accounted inside the transportation systems. Therefore, the seismic vulnerability studies of bridges are currently a topic of great interest. As a first approach to develop seismic vulnerability studies of bridges, we have carried out this study about the assessment of the parameters that let the determination of the seismic vulnerability using “Fuzzy sets”.

INTRODUCCIÓN

Un considerable número de puentes, diseñados y construidos en tiempos cuando los requerimientos sísmicos no existían o no eran los adecuados, ha demostrado su gran vulnerabilidad sísmica ante recientes sismos como los de Loma Prieta de 1989, Northridge de 1994, Kobe de 1995 y los de Kocaeli y Taiwan en 1999. Evitar el colapso de los puentes y reducir el riesgo de grandes daños causados por posibles sismos futuros es necesario para una buena planificación de los recursos financieros disponibles para estos casos. Por ello, los puentes más necesitados de refuerzo deben ser identificados, tomando en cuenta sus deficiencias sísmicas estructurales.

Hoy en día ya existen algunos métodos de evaluación que han desarrollado sistemas de clasificación sísmica. No obstante, muchos de ellos corresponden a casos extremos de la acción sísmica en un área determinada, donde hay la mínima información necesaria. Desafortunadamente, es muy frecuente la no existencia de información suficiente para todos los puentes. Ante las deficiencias en la obtención de la información, la utilización de opiniones de expertos es una buena solución. Esta información es sin embargo sujeta e incierta, por ello una de las mejores técnicas existentes en la actualidad para tratar este tipo de información es la técnica de los conjuntos difusos.

El objetivo de este trabajo es evaluar el grado de vulnerabilidad de cada uno de los parámetros que definen la vulnerabilidad sísmica de los puentes mediante la opinión de expertos y por medio de la aplicación de los conjuntos difusos y, a su vez, determinar la importancia de cada parámetro en la evaluación de la vulnerabilidad total del puente para poder incorporar en un modelo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes.

PARÁMETROS QUE DEFINEN LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LOS PUENTES

La identificación de los parámetros más influyentes en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un puente, se efectuó en base a cuatro estudios realizados: 1) estudios sobre comportamiento sísmico de puentes,^{1,2} 2) metodologías existentes de evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes,³ 3) experiencias posterremoto y 4) opiniones de expertos. Con los puntos 1, 2 y 3 se determinaron los parámetros más prevalecientes en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de puentes y con el punto 4, opiniones de expertos, se corroboró y complementó el trabajo realizado hasta el momento.

A continuación, se expone cada uno de los cuatro estudios realizados para la definición de los parámetros que determinan la vulnerabilidad sísmica de puentes en el modelo propuesto.

Estudios sobre comportamiento sísmico de puentes

En los estudios de comportamiento sísmico de puentes presentados en los trabajos de las referencias 1 y 2 se estudian las características estructurales de los puentes que definen su respuesta ante la acción sísmica. En este apartado sólo se describen las conclusiones de los aspectos que son de interés del presente trabajo. Para plasmar estas conclusiones, se trabajó una pequeña pero representativa muestra de puentes, la cual sirvió para definir algunos de los parámetros que influyen en la respuesta dinámica de la estructura y que, por lo tanto, van a jugar un papel importante en el momento que se presente el daño en la estructura.

La muestra de puentes de los que se sacaron algunos parámetros está compuesta de seis puentes, cuatro corresponden a estructuras que en el momento de realizar su estudio estaban muy próximas a su construcción y dos estructuras ya existentes. Por ello, sobre las estructuras proyectadas pero sin construir se pudo realizar un análisis más completo, de tal manera que las conclusiones sirvieran para las decisiones finales en su proyecto y

construcción. En las estructuras existentes se evaluó el comportamiento de la estructura realizando análisis dinámicos que permitieron observar la influencia en la respuesta dinámica de sus elementos como, por ejemplo, las pilas, apoyos y juntas.

Los parámetros con un mayor grado de influencia respecto a la respuesta sísmica fueron los siguientes: existencia de articulaciones internas, tipo de pila, tipo de cimentación, sistema de apoyo de superestructura a subestructura, forma de la superestructura y regularidad longitudinal del puente.

Metodologías existentes de evaluación sísmica de puentes

De las diferentes metodologías existentes de evaluación sísmica que involucran modelos de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes, se escogieron cinco,^{4,5,6,7,8} realizándose un estudio comparativo entre los distintos parámetros considerados en sus modelo.

Luego, se eligieron algunos parámetros considerados en más de un modelo, siendo éstos: tipo de estribo, tipo de superestructura, tipo de subestructura, ángulo de esviaje, tipo de cimentación en pilas y estribos, historia de mejoramiento sísmico del puente, año de proyecto, armadura de las pilas, longitud de apoyos, existencia de articulaciones internas, irregularidad en geometría y rigidez, condición de sitio, potencial de licuefacción y tipo de apoyos.

Experiencias posterremoto

De lo aprendido de sismos pasados, en lo referente a puentes, se pueden extraer las características que los hicieron vulnerables frente a la acción sísmica. Para ello, se escogieron cuatro sismos los cuales causaron daños significativos en los puentes. Los sismos analizados son: el de San Fernando en 1971, Loma Prieta en 1989, Northridge en 1994 y Kobe en 1995.

Al comparar los daños causados en los puentes por cada uno de los cuatro sismos anteriores, se determinan las características (parámetros) que hicieron que estas estructuras fuesen más vulnerables frente a la acción del sismo: refuerzo en pilas, especificaciones del proyecto, tipo de estribo, forma de la superestructura (ángulo de esviaje), detalle de uniones, existencia de articulaciones internas, longitud de apoyos y tipo de pilas.

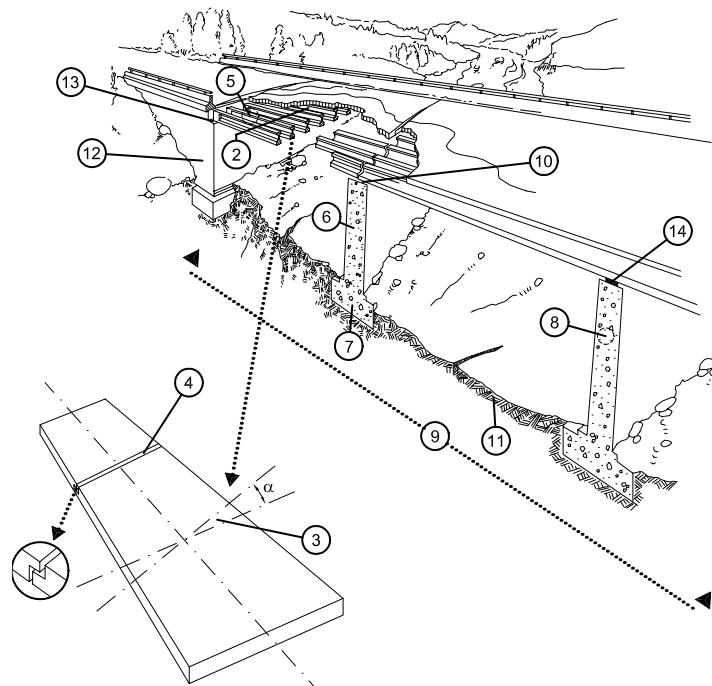
Opinión de expertos

Basados en los tres puntos citados anteriormente se realizó una primera selección de diecisiete (17) parámetros (año de proyecto y construcción del puente, tipo de superestructura, forma de la superestructura, existencia de articulaciones internas, material de la superestructura, tipo de pila, tipo de cimentación, material de las pilas, irregularidad longitudinal en geometría y rigidez, longitud de apoyo en pilas, tipo de suelo, tipo de estribo, longitud de apoyo en estribos, tipo de aparato de apoyo, estado de conservación del puente, procedimiento constructivo de la superestructura y procedimiento constructivo de las pilas). Luego se pidió la opinión a cincuenta (50) expertos acerca de su consideración, grado de vulnerabilidad y valor de importancia. De los cincuenta (50) expertos se recibieron veinticinco respuestas (25) y, con sus aportaciones, se redefinieron los parámetros a considerar, quedando finalmente diecinueve (19) parámetros.

Los expertos en sus opiniones, consideraron que otros parámetros podrían ser importantes en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes. Estos fueron analizados y reconsiderados en los ya propuestos, ya que muchos podían involucrarse en las categorías formuladas para cada parámetro, considerándose algunos de ellos como nuevos parámetros.

Basados en los cuatro estudios realizados, anteriormente resumidos, se seleccionaron los siguientes parámetros (Figura 1):

- K₁** año de proyecto y construcción del puente
K₂ tipo de superestructura
K₃ forma de la superestructura
K₄ existencia de articulaciones internas
K₅ material de la superestructura
K₆ tipo de pila
K₇ tipo de cimentación
K₈ material de las pilas
K₉ irregularidad longitudinal en geometría o rigidez
K₁₀ longitud de apoyo en pilas
K₁₁ tipo de suelo
K₁₂ tipo de estribo
K₁₃ longitud de apoyo en estribos
K₁₄ tipo de aparato de apoyo
K₁₅ estado de conservación del puente
K₁₆ procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón)
K₁₇ procedimiento constructivo de las pilas (hormigón)
K₁₈ potencial de licuefacción
K₁₉ elementos no estructurales



- | | |
|--|---|
| 1. Año de diseño y construcción del puente | 11. Tipo de suelo |
| 2. Tipo de superestructura | 12. Tipo de estribo |
| 3. Forma de superestructura | 13. Longitud de apoyo en estribos |
| 4. Existencia de articulaciones Internas | 14. Tipo de aparato de apoyo |
| 5. Material de superestructura | 15. Estado de conservación del puente |
| 6. Tipo de pila | 16. Procedimiento constructivo de la superestructura (hormigón) |
| 7. Tipo de cimentación | 17. Procedimiento constructivo de las pilas (hormigón) |
| 8. Material de las pilas | 18. Potencial de licuefacción |
| 9. Irregularidad longitudinal en geometría o rigidez | 19. Elementos no estructurales |
| 10. Longitud de apoyo en pilas | |

Figura 1. Parámetros del modelo

DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE CADA PARÁMETRO

Siguiendo el mismo procedimiento realizado para la selección de estos parámetros, de cada uno de ellos se consideraron tres o cuatro condiciones de calidad. Es así como, basados en el estudio del comportamiento sísmico de puentes, en las experiencias posterremoto y en la comparación de metodologías existentes de evaluación sísmica que involucran modelos de vulnerabilidad, se efectuó una primera subdivisión de cada uno de los parámetros identificados. Luego, cada parámetro se dividió en tres o cuatro condiciones de calidad (**A**, **B**, **C**, **D**). Por ejemplo para el parámetro que estudia la influencia del terreno sobre el cual se encuentra cimentado el puente, las divisiones impuestas fueron: **A**: roca, **B**: suelo granular denso o arcillas preconsolidadas rígidas, **C**: arenas de densidad media (limosas), **D**: arcillas medias a blandas. Para el parámetro que evalúa la influencia del tipo de superestructura las condiciones de calidad establecidas fueron: **A**: puentes suspendidos, atirantados y puentes de un único vano cuyo sistema corresponde a losa, vigas y sistemas de tablero en losa, vigas T, vigas cajón, vigas canal (artesa), vigas en celosía, pórtico o arco, **B**: puentes de dos o más vanos con superestructura en sistema pórtico o arco, **C**: puentes de dos o más vanos con superestructura continua construida en sistema de losa, vigas y tablero en losa, vigas T, vigas cajón, vigas canal (artesa) o viga en armadura, **D**: puentes de dos o más vanos construidos en vigas simplemente apoyadas. Otros tipos de puentes tratan las referencias.^{9,10}

REALIZACIÓN DE ENCUESTAS A LOS EXPERTOS

Una vez identificados los diferentes parámetros que pueden influir en la vulnerabilidad de los puentes y los distintos aspectos a considerar dentro de cada parámetro, se continuó con la determinación de la calificación de cada parámetro. Para este fin se consideró la opinión de expertos en el tema.

Las opiniones fueron recopiladas mediante la realización de dos encuestas. La primera tenía como finalidad obtener las calificaciones de los parámetros y, la segunda, la determinación del valor de importancia de cada parámetro dentro de la determinación de la vulnerabilidad total del puente. Para las calificaciones de los parámetros, cada uno de ellos se dividió en tres o cuatro condiciones de calidad y, de cada uno de ellos, se preguntó el grado de vulnerabilidad que se creía era el más conveniente.

Con la finalidad de obtener información fiable en las respuestas de las encuestas, se buscaron ingenieros expertos en los temas de puentes y vulnerabilidad sísmica. No siendo tarea fácil, se decidió ampliar el ámbito de expertos fuera de España, enviando las encuestas a algunos países de América como Colombia, México, Ecuador y Venezuela.

La elección de una muestra de expertos fue una tarea laboriosa y delicada, ya que se pretendía que los especialistas contaran con un buen conocimiento del tema, una adecuada experiencia en el campo de trabajo y disponibilidad en el momento de responder las encuestas. La muestra total estuvo formada por cincuenta (50) expertos, el número de encuestas enviadas a cada uno de los cinco países fueron diferentes, dado que la base de datos de los expertos con la que se contaba en el momento de enviar las encuestas no era homogénea en cantidad de expertos por país.

Las encuestas fueron pensadas y elaboradas buscando que fueran breves, concisas y claras. Se construyeron en forma de tablas para facilitar la forma de respuesta y, al mismo tiempo, para organizar la información de tal manera que el encuestado no perdiera el sentido de la pregunta.

Las encuestas fueron, como se ha citado, dos: la primera tenía como finalidad el comparar el grado de vulnerabilidad (“*nada*”, “*poco*”, “*medianamente*”, “*muy*” y “*absolutamente*” vulnerable) de cada una de las clasificaciones (**A**, **B**, **C**, **D**) para un determinado parámetro K_i y asignar a cada división un grado de vulnerabilidad; la segunda, tenía como propósito el conocer la importancia relativa que existe entre los diferentes parámetros. En las Figuras

2 y 3 se presenta el modelo de la primera y segunda encuesta para el primer parámetro.

PRIMERA ENCUESTA											
Propósito del cuestionario											
El propósito de este cuestionario es comparar el grado de vulnerabilidad de cada una de las clasificaciones A , B , C y D dentro del parámetro K_i respectivo.											
Instrucciones de llenado											
A continuación se presenta una tabla que contiene los parámetros K_i que se cree que influyen en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de un puente, y sus correspondientes clasificaciones A , B , C y D . Cada una de estas clasificaciones deberá ser llenada de acuerdo a la siguiente escala de valores dado el grado de vulnerabilidad que considere para cada clasificación:											
<table border="1"> <tr><td>NADA vulnerable</td><td>0</td></tr> <tr><td>POCO vulnerable</td><td>3</td></tr> <tr><td>MEDIANAMENTE vulnerable</td><td>5</td></tr> <tr><td>MUY vulnerable</td><td>7</td></tr> <tr><td>ABSOLUTAMENTE vulnerable</td><td>9</td></tr> </table>		NADA vulnerable	0	POCO vulnerable	3	MEDIANAMENTE vulnerable	5	MUY vulnerable	7	ABSOLUTAMENTE vulnerable	9
NADA vulnerable	0										
POCO vulnerable	3										
MEDIANAMENTE vulnerable	5										
MUY vulnerable	7										
ABSOLUTAMENTE vulnerable	9										
K₁ = AÑO DE PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE											
A	después de 1995										
B	entre 1975 y 1994										
C	entre 1968 y 1974										
D	antes de 1968										

Figura 2. Modelo de la primera encuesta para el parámetro K₁

SEGUNDA ENCUESTA						
Propósito del cuestionario						
La finalidad de este cuestionario es conocer la importancia relativa que existen entre los parámetros K_i .						
Instrucciones de llenado						
A continuación se presenta una tabla con los diecisiete parámetros solamente. Se deberá llenar cada fila con el valor que crea conveniente de acuerdo a la importancia que considere tiene el parámetro en comparación con los restantes. La escala de calificación es de 0 a 10 , pudiéndose llegar a parámetros que considere igualmente importantes y por lo tanto tendrán la misma calificación.						
<table border="1"> <tr><td>NADA importante</td><td>0</td></tr> <tr><td>MÁXIMA importancia</td><td>10</td></tr> </table>			NADA importante	0	MÁXIMA importancia	10
NADA importante	0					
MÁXIMA importancia	10					
<i>i</i>	PARÁMETRO	CALIFICACIÓN				
1	Año de Proyecto y construcción					

Figura 3. Modelo de la segunda encuesta para el parámetro K₁

La buena aceptación de las encuestas por parte de los expertos se reflejó en el número de las recibidas y en las valiosas aportaciones que muchos de los especialistas adjuntaron como observaciones.

Durante algunos meses se estuvo a la espera de la respuesta y una vez recibidas las mínimas deseadas, se dio paso al procesado de los datos recibidos. Los datos una vez adquiridos se tomaron en su totalidad como aceptables, dada la fiabilidad de las respuestas por parte de los expertos. De esta manera, se utilizaron todas las respuestas para construir las funciones de pertenencia necesarias para el desarrollo del modelo.

De los cincuenta expertos a los que se les envió las encuestas, correspondientes a cinco países, se obtuvo una buena cantidad de respuestas. Veinticinco expertos (50 %) enviaron sus opiniones. El visto bueno de las encuestas fue aceptable en todos los países, pero dado el mayor número de encuestas enviadas a Colombia, fue de este país de donde se obtuvo la mayor cantidad de respuestas (Figura 4).

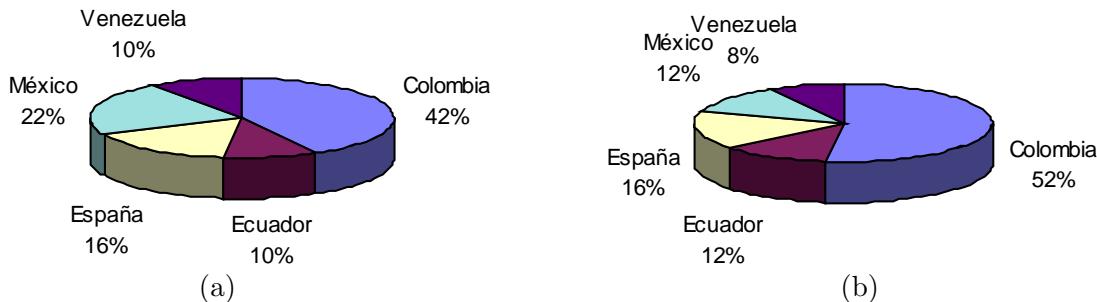


Figura 4. Muestra de expertos. a) Distribución de la muestra total de expertos a los que se enviaron encuestas. b) Distribución muestra de opiniones de expertos recibidas

TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN POR CONJUNTOS DIFUSOS

Dado que no se contaba con información de daños en puentes ocurridos en sismos pasados, fue necesario recurrir a la opinión de expertos para obtener los datos necesarios para definir los grados de vulnerabilidad y los valores de importancia. Luego, al provenir la información de opiniones, esta contiene sujetividad, imprecisiones e incertidumbres; razón por la cual una buena alternativa de manejar la información es mediante la teoría de conjuntos difusos.

¿Qué son los conjuntos difusos?

El concepto de conjunto difuso lo introduce Zadeh en 1965¹¹ como un intento de vencer la severidad de la teoría clásica de conjuntos y poder reunir proposiciones que, por la naturaleza de lo que representan contienen incertidumbre, imprecisión, ambigüedad, generalidad, errores, aproximaciones, borrosidad. La teoría difusa es una teoría matemática, que se llama difusa porque recoge un aspecto de incertidumbre. Lo difuso es la ambigüedad que puede ser encontrada en la definición de un concepto o en el significado de una palabra. Por ejemplo, la incertidumbre en las expresiones como: “puente levemente dañado”, “grieta considerable”, “estructura funcionalmente obsoleta”, “alta seguridad” o “estructura poco vulnerable”.

Tomando un ejemplo expuesto por Terano *et al.*,¹² en el que se estudia la ambigüedad del significado de “viejo”, en términos de la expresión de cantidad, con un rango de edad variando entre 20 y 80 años, el grado en el cual la edad x (años) puede ser llamada “vieja” es μ ; esto es, a la edad x le corresponde el grado μ que está entre 0 y 1 ($0 \leq \mu \leq 1$). Si el

eje horizontal es x y el eje vertical es μ , la gráfica se dibuja como en la Figura 5 y en ella se expresa la ambigüedad de “viejo” en términos de cantidad.

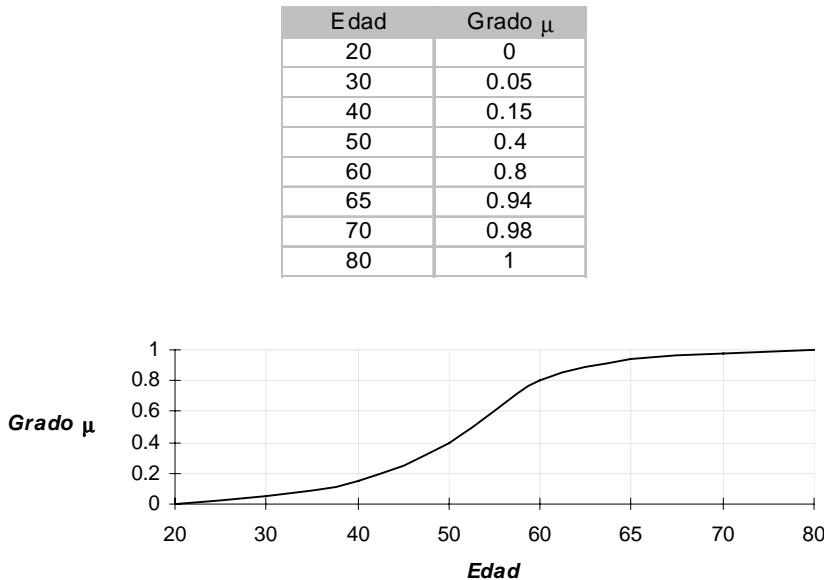


Figura 5. Grado de “viejo”

La cantidad en el eje horizontal de la Figura 5 es la edad transcurrida en años, es decir, es la cuantificación de la palabra y el eje vertical muestra el grado en el que una persona puede ser etiquetada como “vieja”. En otras palabras, es la cuantificación del grado de ambigüedad. Esta clase de representación de una palabra se denomina *cuantificación del significado* (*quantification of meaning*). El gráfico suele ser llamado, algunas veces, el *significado cuantificado* (*quantified meaning*), es decir, que el significado de la palabra se cuantifica sobre un rango específico; para la edad, en el caso del ejemplo, este rango es de 20 a 80 años.

Hablando en términos más simples, la “*teoría de conjuntos difusos*” parte de la teoría clásica de conjuntos, añadiendo una función de pertenencia al conjunto μ generalmente definida como un número natural entre 0 y 1. Así, se introduce el concepto de conjunto difuso asociado a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra, adjetivo o etiqueta lingüística A . Para cada conjunto difuso se define una función de pertenencia o inclusión $\mu_A(x)$, que representa el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A .

Los conjuntos difusos permiten reunir objetos o sucesos por el valor de una cierta magnitud. Por ejemplo, las personas pueden ser reunidas por su edad. Así, si definimos el conjunto clásico de personas viejas como las que tienen más de 70 años, resulta que alguna de 69 años no sería vieja, pero otra de 71 si que lo sería, siendo la diferencia entre ellas de tan solo dos años. Por lo tanto, una descripción del conjunto de las personas viejas en términos de conjuntos difusos parece más adecuada en este tipo de casos.

La teoría de los conjuntos difusos trabaja con la cuantificación de los significados de las palabras en gráficas, dentro del marco de trabajo de la teoría de conjuntos. Es un intento de expresar “*alto*” o “*viejo*” por medio del concepto de conjuntos. Desde un punto de vista práctico, el concepto de conjunto no es necesario para la cuantificación de la ambigüedad, pero es posible aumentar el rango de utilidad trabajando dentro del marco de trabajo de la teoría de conjuntos. Esto se debe a que la teoría de conjuntos es un concepto muy básico y está relacionada con todos los campos de las matemáticas contemporáneas.

Representación de los conjuntos difusos

Si X es una colección de objetos, denotados generalmente por x , $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, luego un subconjunto difuso A en X es un conjunto de pares ordenados

$$A = \{\mu_A(x)|x, x \in X\} \quad (1)$$

donde $\mu_A(x)$ es llamada la *función de pertenencia* o *grado de pertenencia* (también *grado de compatibilidad* o *grado de verdad*) de x en A , es decir, $\mu_A(x)$ define el grado en el cual el elemento x del conjunto X está incluido en el subconjunto A . Es así como la función de pertenencia es la que define el conjunto difuso.

El rango de la función de pertenencia puede ser un subconjunto de números reales no negativos, aunque sea de práctica general que la función de pertenencia esté definida entre **0** y **1** como $\mu_A(x): X \rightarrow [1, 0]$.

El grado de inclusión, algunas veces, se denomina *la magnitud (extend)* o *el grado (grade)*. Por ejemplo, el grado de pertenencia del elemento x en el subconjunto A se expresa mediante

$$\mu_A(x_1) = 1; \quad \mu_A(x_2) = 0,8; \quad \mu_A(x_3) = 0,3; \quad \mu_A(x_4) = 0$$

donde μ es la función de pertenencia, proporcionando el grado de pertenencia, un valor que varía de **0** hasta **1**. El subíndice de μ , A , expresa que μ_A es la función de pertenencia de A .

Definición de función de pertenencia

La teoría de los conjuntos difusos define el grado en el cual el elemento x del conjunto X está incluido en el subconjunto A mediante la llamada *función de pertenencia (membership function)* $\mu_A(x)$. Dicha función es un conjunto de números ordenados si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. Como se ha mencionado anteriormente, repetidas veces, el valor $\mu_A(x)$ indica el grado en que el valor x de la variable X está incluido en el concepto representado por la etiqueta A .

Tomando un ejemplo propuesto por Klir y Folger,¹³ para explicar el concepto de conjunto difuso, tenemos una posible función de pertenencia para el conjunto difuso de números reales cercanos a **0**, expresada como

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + 10x^2} \quad (2)$$

La representación gráfica de esta función se muestra en la Figura 6. Usando esta función, se puede determinar el grado de pertenencia de cada número real al conjunto difuso, lo que significa el grado en el cual esos números están cerca de 0. Por ejemplo, el número 3 tiene asignado un grado de 0,01; el número 1 tiene un grado de 0,09; el número 0,25 un grado de 0,62 y el número 0 un grado de 1.

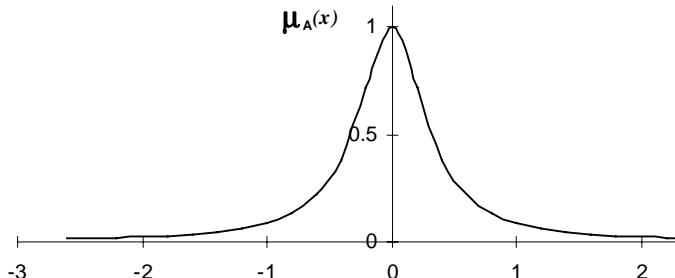


Figura 6. Posible función de pertenencia del conjunto difuso de números reales cercanos a 0

Concepto de variable lingüística

Se denomina variable lingüística a aquella que puede tomar por valor términos del lenguaje natural, como *edad*, *peso*, *altura*, *daño*, *capacidad*, *vulnerabilidad* ... *nada*, *poco*, *mucho*, *positivo*, *negativo*, *bueno*, *malo*, etc., las cuales a su vez son las que hacen el papel de etiquetas en un conjunto difuso.

Aun cuando la finalidad primordial de este concepto es expresar de manera formal el hecho de que puedan asignarse como valor de una variable palabras tomadas del lenguaje natural, no obstante, a una variable lingüística podrán asignarse valores numéricos. Así, en una expresión como el *daño estructural es severo*, la variable *daño estructural* debe ser entendida como una variable lingüística, pues se le asigna como valor el conjunto difuso severo, pero, además, esta variable puede también tomar valores numéricos como el *índice de daño es mayor de 1*.

De una manera más formal, una variable lingüística se define mediante A , $T(A)$, U , G y M , siendo A el nombre de la variable, $T(A)$ el conjunto de términos que reciben los valores x que puede tomar A , valores que a su vez son conjuntos difusos en U . El conjunto de valores numéricos que puede tomar para una variable discreta, o el rango de valores posibles para una continua, es lo que se conoce como el universo de discurso de la variable x y se nombra como U . Finalmente, G es una regla sintáctica para la generación de los nombres de los valores de x y M es una regla semántica para asociar un significado a cada valor.

Por medio del siguiente ejemplo se puede entender mejor el sentido de estos términos formales: *vulnerabilidad* puede considerarse como una variable lingüística, de modo que $A = \text{vulnerabilidad}$. T (*vulnerabilidad*) es el conjunto de todos los términos que pueden hacer referencia a la vulnerabilidad, como *nada*, *poco*, *medianamente*, *muy* y *absolutamente*. El universo de discurso U de esta variable va, en general, desde el cero absoluto al infinito, pero en aplicaciones normales, puede restringirse al rango de índices de vulnerabilidad que pueden presentarse en ella.

Variables lingüísticas utilizadas

En el algoritmo de desarrollo para el cálculo del índice de vulnerabilidad mediante la utilización de opiniones de expertos fue necesario definir adecuadamente las variables lingüísticas para describir los diferentes grados de vulnerabilidad.

Investigaciones sobre evaluación del daño de estructuras o evaluación del estado de estructuras afectadas por el sismo,^{14,15} en las cuales el uso de la forma lingüística se maneja mediante teoría difusa, han servido de base para la definición de las variables utilizadas en este estudio.

Estas variables lingüísticas han sido utilizadas para calificar cada una de las condiciones de calidad impuestas a cada parámetro. A su vez, se han empleado también para asociarle a cada función de pertenencia del índice de vulnerabilidad calculado un cierto grado de vulnerabilidad.

Así pues, las variables lingüísticas naturales seleccionadas para calificar los grados de vulnerabilidad son “*nada*”, “*poco*”, “*medianamente*”, “*muy*” y “*absolutamente*” vulnerable. Cada variable requirió la asignación de un valor numérico, escogiéndose arbitrariamente una escala comprendida entre **0** y **9** para identificar cada grado de vulnerabilidad.

Los valores numéricos asignados a cada variable para la materialización de las encuestas fueron:

- 0 **NADA** vulnerable
- 3 **POCO** vulnerable
- 5 **MEDIANAMENTE** vulnerable
- 7 **MUY** vulnerable
- 9 **ABSOLUTAMENTE** vulnerable

Posteriormente, los valores citados se representaron por medio de conjuntos difusos compuestos de valores numéricos. En esta investigación, los conjuntos difusos que representan las variables relativas al grado de vulnerabilidad se asumen como:

$$\text{nada} = \{1|0, 0|0\}$$

$$\text{poco} = \{0|0, 1|3, 0|5\}$$

$$\text{medianamente} = \{0|3, 1|5, 0|7\}$$

$$\text{muy} = \{0|5, 1|7, 0|9\}$$

$$\text{absolutamente} = \{0|7, 1|9\}$$

siendo de la forma

$$y = \{\mu(x)|x\} \quad (3)$$

donde $\mu(x)$ denota el grado de pertenencia de x , definiendo x como el universo de la vulnerabilidad del puente en los conjuntos difusos.

Para la definición de las funciones de pertenencia de las variables que definen el grado de vulnerabilidad del puente se toma solamente el universo formado por los valores **0**, **3**, **5**, **7** y **9**. El involucrar más elementos en el universo ayudaría a representar mejor la cantidad de interés, no obstante, también involucraría una mayor manipulación aritmética en los cálculos. Por ello, se eligió tomar el conjunto difuso con sólo los cinco elementos citados.

La representación gráfica de las funciones de pertenencia de las variables lingüísticas utilizadas en este estudio está mostrada en la Figura 7.

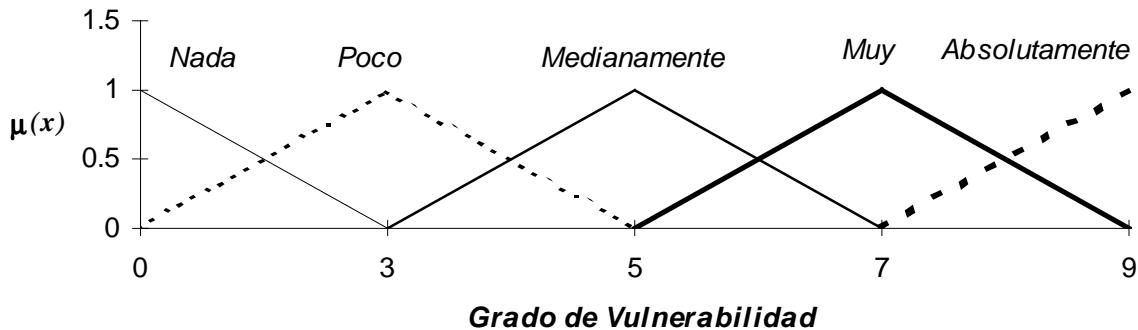


Figura 7. Funciones de pertenencia de las variables lingüísticas “nada”, “poco”, “medianamente”, “muy” y “absolutamente” vulnerable

Construcción de las funciones de pertenencia

Para la construcción de las funciones de pertenencia se aprovechó la información de las respuestas de las encuestas obtenidas de 25 expertos de cinco países: España, Colombia, Ecuador, Venezuela y México. Los valores de pertenencia se calcularon en base al número de respuestas favorables de cada clasificación particular.¹⁶

Dada la sujetividad y ambigüedad de las opiniones de los expertos, muchas de las respuestas estuvieron encasilladas en los grados de vulnerabilidad de “poco” a “medianamente” vulnerable. De ahí, las funciones de pertenencia construidas inicialmente se corrigieron de acuerdo con la forma de cálculo de un índice de vulnerabilidad sísmica expuesto posteriormente. Esta corrección involucra, a su vez, la comparación de las opiniones de los especialistas con las respuestas esperadas, de acuerdo a los estudios de comportamiento

sísmico de los elementos de un puente, en cuanto al grado de vulnerabilidad de las condiciones de calidad de los parámetros. Esta comparación no se pudo realizar con todos los parámetros, pero si con los de mayor importancia en la definición de la vulnerabilidad sísmica. De esta forma, estos valores se replantearon para la construcción de las funciones de pertenencia.

Al mismo tiempo, las funciones se fueron corrigiendo en la medida que se utilizaban en el cálculo del índice de vulnerabilidad, bien de puentes reales o hipotéticos.

Corregidas las funciones de pertenencia de las calificaciones, éstas se incorporaron dentro del algoritmo para el cálculo del índice de vulnerabilidad sísmica de puentes. Como ejemplo, a continuación se presentan las funciones de pertenencia para las clasificaciones de uno de los diecinueve parámetros, el K_2 denominado “*tipo de superestructura*”.

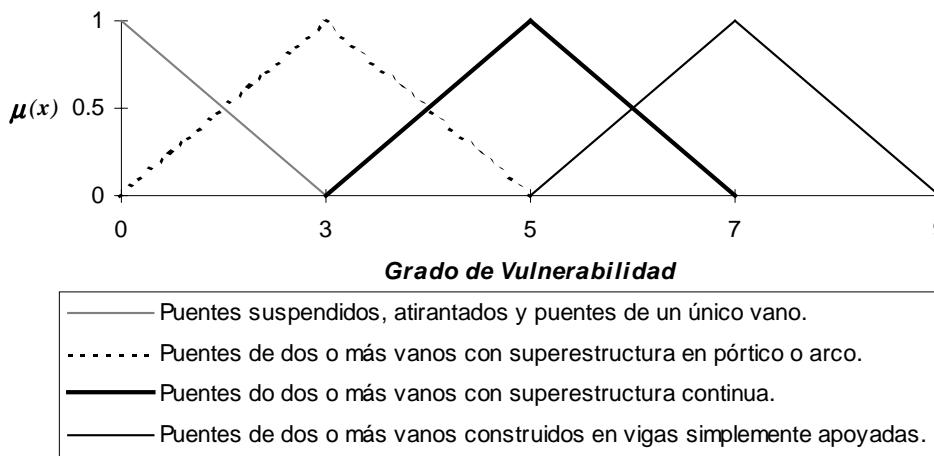


Figura 8. Función de pertenencia del grado de vulnerabilidad del parámetro “*tipo de superestructura*”

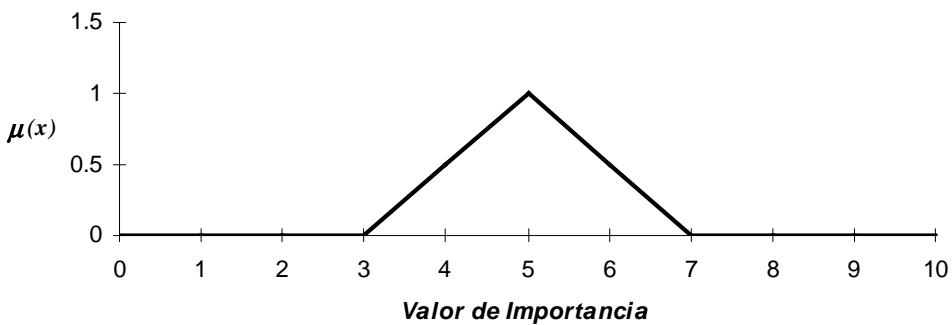


Figura 9. Función de pertenencia del valor de importancia para el parámetro “*tipo de superestructura*”

De esta manera construidas y corregidas las funciones de pertenencia se llegó a la definición de los grados de vulnerabilidad de las condiciones de calidad de los parámetros que influyen en la vulnerabilidad sísmica de los puentes y de sus valores de importancia, a partir de las opiniones de expertos y mediante la utilización de “*conjuntos difusos*”.

MODELO DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES

Una vez procesada la información como conjuntos difusos, las aritméticas difusas fueron empleadas para relacionar las calificaciones de cada parámetro y sus respectivos valores de importancia por medio del “*peso promedio*”. Y de esta manera esta expresión fue utilizada como un “índice de vulnerabilidad sísmica de puentes”, con el cual se puede evaluar la vulnerabilidad sísmica de puentes y que se expresa como^{9,10,17}

$$IV_j = \frac{\sum_{i=1}^{19} W_i K_i}{\sum_{i=1}^{19} W_i} \quad (4)$$

donde IV_j es el índice de vulnerabilidad sísmica del puente j , K_i es una medida del grado de vulnerabilidad de la categoría del parámetro i . Los valores W_i son una medida de la opinión de la importancia asociada con el parámetro i con respecto a los demás parámetros.

Para la aplicación del índice de vulnerabilidad, es necesario contar con el inventario de la muestra de puentes. Este inventario se realiza mediante el “*formulario de levantamiento de la vulnerabilidad sísmica de puentes*”. El formulario contiene todos los parámetros necesarios para la determinación del índice de vulnerabilidad del puente respectivo. Tan sólo se requiere que el evaluador asigne a cada parámetro su respectiva calificación. Una vez obtenidas todas las calificaciones (**A**, **B**, **C** y **D**) de cada uno de los diecinueve parámetros analizados del puente, se procede a incorporar estos datos al programa **INDICE**, mediante el cual cada una de las funciones de pertenencia de los parámetros se acumulan ponderadamente, dando mayor peso a los parámetros que se consideran más decisivos en la determinación del “índice de vulnerabilidad” IV .

PROGRAMA INDICE PARA LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES

Construidas las funciones de pertenencia para cada una de las tres o cuatro clasificaciones de cada uno de los parámetros y determinadas las funciones de pertenencia de los valores de importancia, se calculó el “índice de vulnerabilidad” utilizando la expresión de peso promedio difuso de la ecuación (4).

El cálculo de este índice involucra una serie de operaciones aritméticas con conjuntos difusos como la suma, el producto y la división. A su vez, en la transformación de los conjuntos difusos a una variable lingüística se incorpora el cálculo de la distancia mínima entre conjuntos difusos, todo ello sin obviar el control que se debe realizar a cada operación aritmética para que cumplan con la propiedad de convexidad y normalización. El programa **INDICE** se elaboró con el fin de incorporar todas las operaciones necesarias para el cálculo del peso promedio difuso definiendo el índice de vulnerabilidad. Las funciones de pertenencia, ya construidas, se convierten en la base de datos del programa y con la respuesta al formulario de levantamiento del puente, se escogen las funciones respectivas y se realiza el cálculo del índice.

El programa **INDICE** se estructura en tres módulos básicos y una base de datos (Figura 10). Los tres módulos son: 1) Inicialización del análisis, 2) Evaluación del índice de vulnerabilidad y 3) Análisis de los resultados. Estos módulos se alimentan a partir de la base de datos que contiene los datos de los puentes y las funciones de pertenencia requeridas para el cálculo del índice de vulnerabilidad. A continuación, se expone brevemente el algoritmo desarrollado a partir de estos tres módulos:

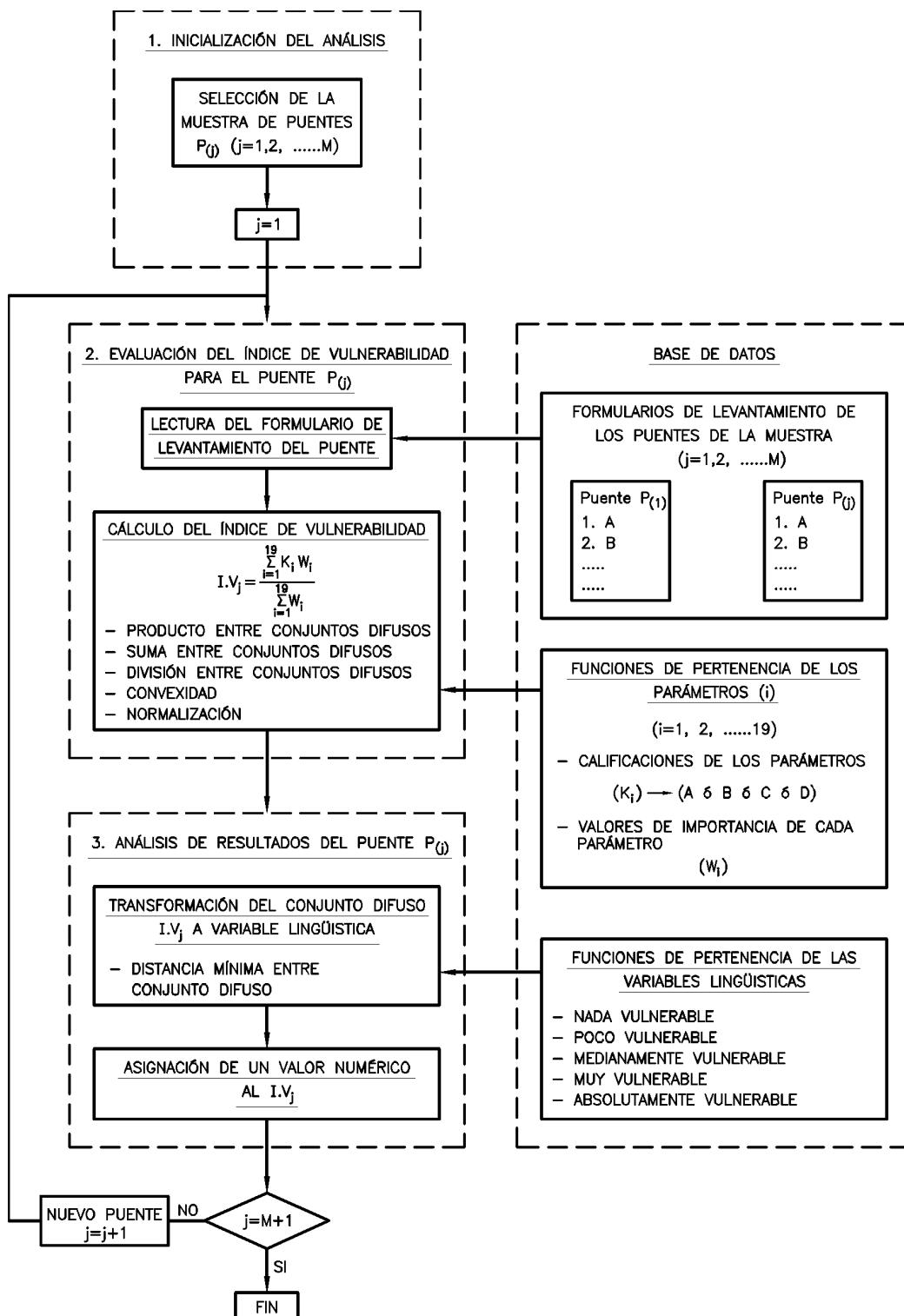


Figura 10. Algoritmo del programa INDICE

1) Inicialización del análisis

En este módulo se define la muestra de puentes a trabajar.

2) Evaluación del índice de vulnerabilidad para el puente $P(j)$

El cálculo del índice de vulnerabilidad está incorporado en este módulo. Aquí se lee el formulario de levantamiento del puente $P(j)$, se hacen las respectivas operaciones aritméticas difusas necesarias para calcular el índice de vulnerabilidad. Efectuada cada operación, el programa **INDICE** controla que se cumplan las propiedades de convexidad y normalización. En caso de no cumplirse, corrige la función antes de continuar con los siguientes cálculos.

Este módulo está alimentado a partir de la base de datos que contiene los resultados del formulario de levantamiento de cada puente de la muestra, las funciones de pertenencia de cada una de las calificaciones de los diecinueve parámetros y las funciones de pertenencia de sus pesos.

En el momento que **INDICE** lee los datos del puente $P(j)$, selecciona las funciones de pertenencia respectivas a las calificaciones asignadas a cada parámetro.

3) Análisis de resultados del puente $P(j)$

Una vez se ha calculado el índice de vulnerabilidad sísmica del puente $P(j)$ mediante la ecuación (1), éste corresponde a un conjunto difuso y se expresa mediante una función de pertenencia. Razón por la cual es interesante y necesario interpretar el resultado obtenido para que así sea de fácil manejo y uso posterior. Este proceso dentro de la teoría de los conjuntos difusos se llama desfusificación. El programa **INDICE** tiene dos opciones para realizar este proceso; una es transformar el conjunto difuso en una variable lingüística natural como “*nada*”, “*poco*”, “*medianamente*”, “*muy*” y “*absolutamente*” vulnerable. Esto se efectúa por medio de la mínima distancia entre el conjunto difuso de índice de vulnerabilidad y los conjuntos difusos de grados de vulnerabilidad. La segunda opción del programa **INDICE**, es asignarle un valor numérico al conjunto difuso calculado. Esto lo hace el programa escogiendo el valor máximo de la función de pertenencia, es decir, el valor de abscisa que le corresponde una ordenada de valor 1.

Este módulo requiere la base de datos, que contiene las funciones de pertenencia de los diferentes grados de vulnerabilidad (“*nada*”, “*poco*”, “*medianamente*”, “*muy*” y “*absolutamente*” vulnerable).

Base de datos

En lo referente a la base de datos, el programa **INDICE** necesita las respuestas de los formularios de levantamiento de cada uno de los puentes de la muestra. A su vez, el programa **INDICE** requiere leer las funciones de pertenencia tanto de las calificaciones de los parámetros como de sus valores de importancia. Las funciones de pertenencia de los pesos o valores de importancia permanecen constantes a lo largo del cálculo del índice de vulnerabilidad de varios puentes. Las funciones de pertenencia de las calificaciones de los parámetros varían según la respuesta del formulario del puente en cuestión.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Como ejemplo se presenta la aplicación del método al puente McBean Parkway Overcrossing localizado en la ciudad de Newhall al Noroeste de Los Angeles y alrededor de 16 km del epicentro del sismo de Northridge. Diseñado en 1967, cuenta con una longitud de 86,2 m, siendo la superestructura en sección mixta hormigón-acero (Figura 11).

Hecho el inventario por medio de levantamientos existentes del puente se procedió al análisis de su vulnerabilidad resultando *poco vulnerable* con *índice de vulnerabilidad* igual a 3,55 y con una función de pertenencia como se muestra en la Figura 12.

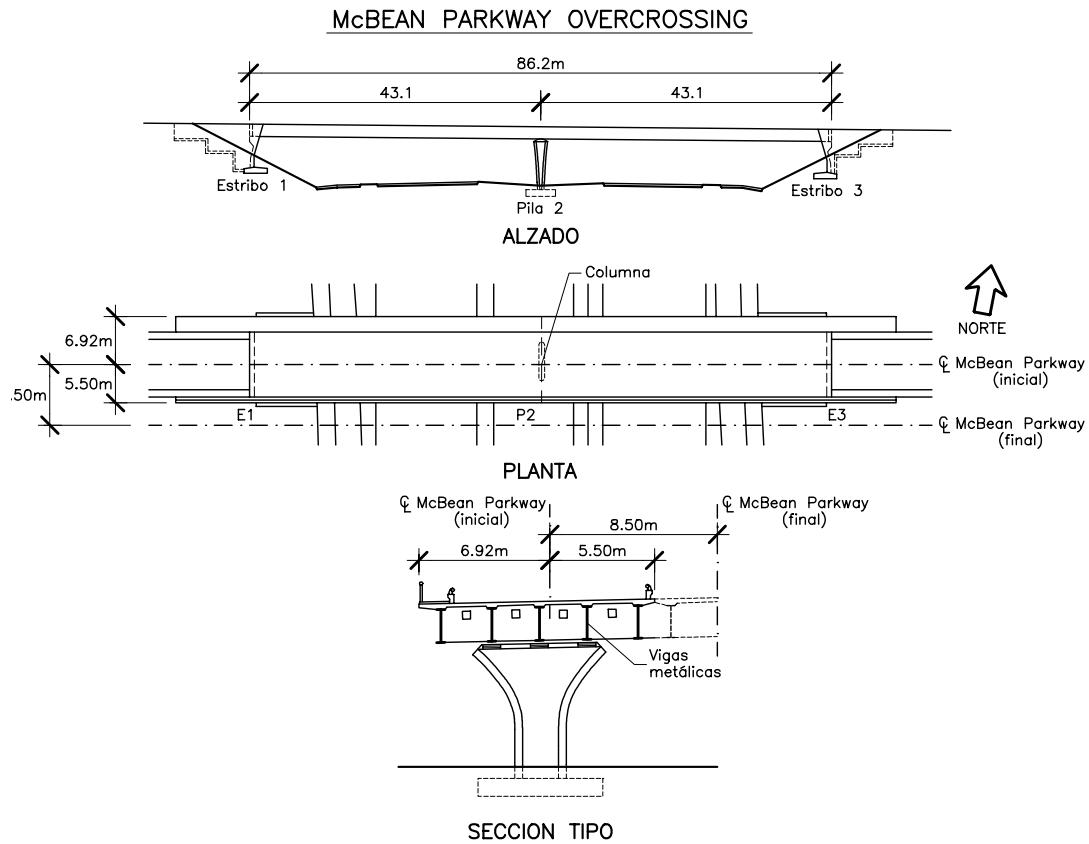


Figura 11. McBean Parkway Overcrossing

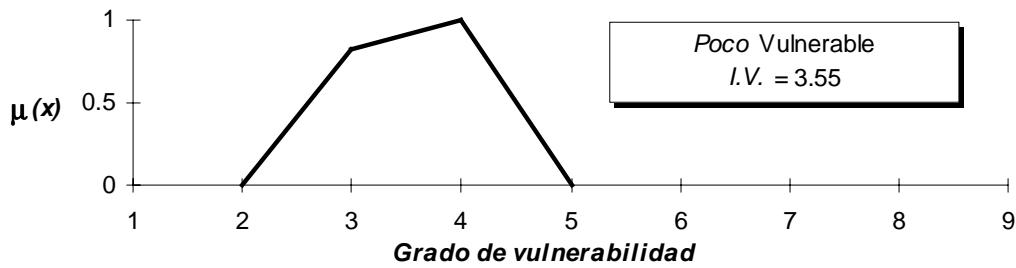


Figura 12. Función de pertenencia del grado de vulnerabilidad para el puente McBean Parkway Overcrossing

Este grado de vulnerabilidad calculado se corrobora con el daño presentado durante el sismo de Northridge, en el cual el puente sufrió un nivel de daño clasificado como *menor*.¹⁸

CONCLUSIONES

El presente estudio ha servido para definir el grado de vulnerabilidad y el valor de importancia de cada uno de los parámetros más influyentes en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes a partir de opiniones de expertos y mediante la utilización de la teoría de los conjuntos difusos. Es así, como las condiciones de cada parámetro se clasifican de **A** a **D**, siendo **A** la menos vulnerable y **D** la de mayor vulnerabilidad. A su vez, con base en la opinión de expertos, se determinó el grado de importancia de cada uno de los parámetros, resultando los más importantes el año de especificación de diseño, la forma de la superestructura, las longitudes de apoyo, condición de sitio y estado de conservación del puente; y los de menor importancia, el sistema constructivo de la superestructura y de las pilas.

La determinación del grado de vulnerabilidad y del valor de importancia de estos parámetros es la base para proponer un modelo de análisis de vulnerabilidad sísmica de puentes a gran escala.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) proyectos AMB98-0558 y TAP1999-1079-C03-01, por la Dirección General de Enseñanza Superior proyecto PB96-0139-C04-03 y por la colaboración de la Universidad Industrial de Santander (Colombia).

REFERENCIAS

- 1 E. Maldonado, J.R. Casas y J.A. Canas, "Comportamiento sísmico de puentes regulares", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. **3**, N° 1, pp. 1–18, (1998).
- 2 E. Maldonado, J.R. Casas, J.A. Canas y L.G. Pujades, "Respuesta de puentes frente a acciones sísmicas", Monografía CIMNE IS-27, Barcelona, (1998).
- 3 E. Maldonado, J.R. Casas y J.A. Canas, "Estudio de parámetros en la vulnerabilidad sísmica de puentes", Monografía CIMNE IS-28, Barcelona, (1998).
- 4 A.A. Kiremidjian y N. Basöz, "Evaluation of bridge damage data from recent earthquakes", Bulletin NCEER, Vol. **11**, N° 2, pp. 1–7, (1997).
5. S. Ren y M.P. Gaus, "GIS tool for regional bridge seismic risk assessment", Reporte técnico del Departamento de Ingeniería Civil GIS-2, Departamento de Ingeniería Civil, State University of New York at Buffalo, Buffalo, pp. 2–22, (1996).
- 6 M. Dicleli y M. Bruneau, "Quantitative approach to rapid seismic evaluation of slab-on-girder steel highway bridges", *Journal of Structural Engineering*, US, ASCE, Vol. **122**, N° 10, pp. 1160–1168, (1996).
- 7 S. Pezeshk, M. Chang, K.C. Yiak y H.T. Kung, "Seismic vulnerability evaluation of bridges in Memphis Shelby County, Tennessee", *Earthquake Spectra*, Vol. **9**, N° 4, pp. 803–816, (1993).
- 8 ATC-6-2, "Seismic retrofitting guidelines for highway bridges", Applied Technology Council, (1983).
- 9 E. Maldonado, J.R. Casas y J.A. Canas, "Modelo de vulnerabilidad sísmica de puentes basado en conjuntos difusos", Monografía CIMNE IS-40, Barcelona, (2000).
- 10 E. Maldonado, "Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en puentes", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, (2000).

- 11 G. Klir y T.A. Folger, “*Fuzzy sets, uncertainty and information*”, Prentice Hall, New Jersey, (1988).
- 12 T. Terano, K. Asai y M. Sugeno, “*Fuzzy systems theory and its applications*”, Academic Press, Inc., (1992).
- 13 L. Zadeh, “Fuzzy sets”, *Information and Control*, Vol. **8**, pp. 338–353, (1965).
- 14 C. Souflis y D.A. Grivas, “Fuzzy set approach to linguistic seismic load and damage assessments”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. **112**, N° 6, pp. 605–518, (1986).
- 15 J.T.P. Yao, “Damage assessment of existing structures”, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. **106**, (EM4), pp. 785–799, (1980).
- 16 A.B. Tee, M.D. Bowman y K.C. Sinha, “A fuzzy mathematical approach for bridge condition evaluation”, *Civil Engineering System*, Vol. **5**, pp. 17–24, (1988).
- 17 E. Maldonado, J.R. Casas, J.A. Canas, “Utilización de los conjuntos difusos en modelos de vulnerabilidad sismica”, Monografía CIMNE IS-39, Barcelona, (2000).
- 18 A. Astaneh-Als, B. Bolt, K.M. McMullin, R.R. Donikian, D. Modjtahedi y S. Cho, “Seismic performance of steel bridges during the Northridge earthquake”, Department of Civil Engineering College of Engineering University of California at Berkeley, UCB/CE-STEEL-94/01, (1994b).