



Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones  
ISSN: 1409-2433  
mta.cimpa@ucr.ac.cr  
Universidad de Costa Rica  
Costa Rica

Aldama Ojeda, Alejandro; Gómez Soberón, Consuelo; Guillén López, Briseida  
Elaboración de una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica  
Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones, vol. 15, núm. 1, enero-junio, 2008, pp. 41-48  
Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45326937005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en [redalyc.org](http://redalyc.org)

# ELABORACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

ALEJANDRO ALDAMA OJEDA\*      CONSUELO GÓMEZ SOBERÓN †  
BRISEIDA GUILLÉN LÓPEZ‡

*Recibido/Received: 22 Feb 2006; Versión revisada/Revised version: 27 Jul 2007;  
Aceptado/Accepted: 31 Oct 2007*

---

## Resumen

En el presente trabajo se presenta una metodología para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras en un área específica. Mediante un método simplificado de inferencia se obtiene una estimación de las condiciones de las estructuras para recomendar una rehabilitación o bien un análisis detallado. El procedimiento se basa en la aplicación de diferentes esquemas de muestreo sobre la zona de estudio considerada como la población objetivo. La condición estimada para las estructuras en la muestra es comparada con la condición observada del censo de la población total, con la intención de mostrar que el procedimiento es económico y confiable. Adicionalmente se presenta un método para el cálculo y la asignación de un índice de Vulnerabilidad (IV).

Posteriormente este IV se utiliza para la construcción de mapas de vulnerabilidad. Se pretende además que los resultados aquí obtenidos contribuyan a la implementación de estudios futuros sobre riesgo sísmico.

**Palabras clave:** Vulnerabilidad sísmica, riesgo sísmico, inferencia, muestreo.

## Abstract

This work presents a methodology to assess the seismic vulnerability of a set of structures over a specific region. Using a simplified inference method we estimate the conditions of the structures in order to recommend either rehabilitation or a detailed analysis. The procedure is based on the implementation of different sampling schemes

---

\*Departamento de Sistemas, Universidad Autónoma Metropolitana—Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200, México D.F., México. E-Mail: [alao@correo.azc.uam.mx](mailto:alao@correo.azc.uam.mx)

†Departamento de Materiales, misma dirección que A. Aldama. E-Mail: [cgomez@correo.azc.uam.mx](mailto:cgomez@correo.azc.uam.mx)

‡Misma dirección que C. Gómez. E-Mail: [brissa@axtel.net](mailto:brissa@axtel.net).

to the region surveyed considered as the objective population. The estimated condition for sampled structures is compared with the condition observed in the objective population census, in order to show that the procedure is reliable and economic. In addition we present a method to evaluate and assign a vulnerability index (VI). Then this VI is used to design vulnerability maps. In addition we assume that the results yielded here will contribute to implement future seismic risk studies.

**Keywords:** Seismic vulnerability, seismic risk, inference, sampling.

**Mathematics Subject Classification:** 62D05.

## 1 Introducción

La mayor parte de las pérdidas tanto económicas como de vidas humanas ocasionadas por un terremoto, se deben a un comportamiento inadecuado de algunas estructuras al ser sometidas al movimiento del terreno en sí, ocasionando colapsos parciales e incluso totales. En regiones donde los terremotos son frecuentes, existen mayores posibilidades para identificar los fenómenos sísmicos y sus efectos sobre las estructuras. Sin embargo, sólo los edificios nuevos son construidos de acuerdo a reglamentaciones vigentes, los cuales representan un pequeño porcentaje del total de las estructuras existentes. Es por esto que resulta importante mejorar el comportamiento sísmico de las estructuras no construidas recientemente para así mitigar las pérdidas posibles.

La vulnerabilidad sísmica se define como el grado del daño ocasionado por un sismo de cierta intensidad. El interés principal de los estudios de vulnerabilidad es determinar los factores de riesgo sísmico, definidos en base a el grado de pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica. Existen dos formas de reducir el riesgo sísmico. Una de estas consiste en identificar las estructuras ubicadas en sitios de bajo riesgo, lo cual es posible para estructuras construidas en lugares donde es factible llevar a cabo una planificación urbana adecuada. La segunda de estas consiste en modificar la vulnerabilidad de las estructuras (Guillén 2005), mejorando las condiciones mediante tareas de reforzamiento y rehabilitación en base a la disponibilidad económica y el riesgo asumido.

El primer paso para estimar la vulnerabilidad sísmica es identificar los edificios con deficiencias estructurales dentro de un área urbana, desarrollando o implementando técnicas o procedimientos basados en modelos matemáticos, inspección visual de las estructuras o pruebas de laboratorio. La vulnerabilidad sísmica de las estructuras puede ser estudiada de acuerdo a la *vulnerabilidad observada*; esto es la vulnerabilidad obtenida a partir de la observación de los daños sufridos y mediante análisis estadísticos para algún tipo específico de estructuras. También es posible considerar la *vulnerabilidad calculada*, la cual se obtiene a partir de análisis cuantitativos mediante modelos estructurales o pruebas experimentales.

En este trabajo se presenta un procedimiento económico y confiable para construir mapas de índices de vulnerabilidad de un conjunto de estructuras en un área determinada. Se pretende minimizar costos y tiempo en el estudio de la vulnerabilidad sin reducir la confiabilidad. El procedimiento consiste en seleccionar muestras sobre una base de datos

de un sector de la llamada *Colonia Roma* en la Ciudad de México, la cual es considerada como la población objetivo. En esta región se localizan 67 manzanas con un total de 1439 estructuras (ver figura 1). Una cantidad considerable de estas han sufrido daños severos en sismos ocurridos en el pasado. Esta base de datos se generó en la Universidad Autónoma Metropolitana (Juárez et al 2003). Los resultados obtenidos en cada muestra son comparados con los de la población y la condición sísmica estimada se utiliza para generar mapas de vulnerabilidad.

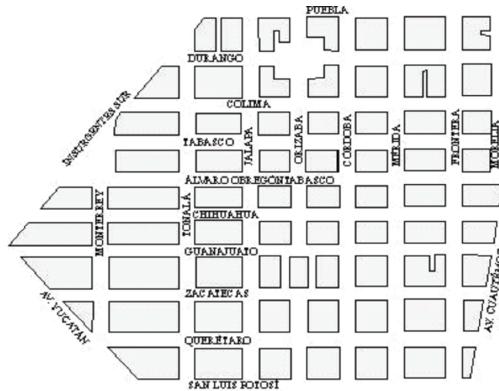


Figura 1: Zona de Estudio en la Colonia Roma.

## 2 Metodología

La metodología utilizada para la identificación y clasificación de daños en las estructuras se basó en la EMS (European Macroseismic Scale, Grüntal, G., 1998). Mediante la cual se registró información relacionada a la ubicación de las estructuras, así como a sus componentes estructurales y a la condición externa de cada estructura.

Se utilizó la asignación de la *vulnerabilidad sísmica*, mediante la cual se identifican las estructuras con grados de daño desfavorables. Para esto se consideran cinco clases de vulnerabilidad, como se muestra en la tabla 1, en donde la clase A es la mas alta y la F es casi nula.

Clase de vulnerabilidad	Vulnerabilidad
A	Muy Alta
B	Alta
C	Media
D	Baja
E	Muy Baja
F	Casi Nula

Tabla 1: Clases de Vulnerabilidad segun la EME. (Arellano et al., 2002).

Adicionalmente en la base de datos arriba mencionada se registraron valores correspondientes a los que se observaron en la muestra.

dientes a las variables presentadas en la tabla 2. Las variables que aparecen en negritas son las que se considera que ejercen una mayor influencia en la clase de vulnerabilidad.

Número de identificación	Número de niveles	Daños previos por sismos
Calle y número	Número de sotanos	Reparaciones anteriores
Entre (nombre de la calle)	<b>Tipo de Terreno</b>	<b>Seguridad de los elementos no estructurales</b>
Y (nombre de la calle)	<b>Uso principal</b>	Observaciones generales
Colonia	<b>Tipo de Cimentación</b>	<b>Clase de vulnerabilidad</b>
CP	<b>Material</b>	<b>Grado de Daño</b>
Delegación	<b>Tipología estructural</b>	Fotografía
<b>Ubicación</b>	<b>Sistema de Piso</b>	Manzana
Colindancias	<b>Regularidad en planta</b>	
<b>Año de Construcción</b>	<b>Regularidad vertical</b>	

Tabla 2: Variables en la Base de Datos.

## 2.1 Esquemas de muestreo

De la población objetivo arriba descrita se tomaron muestras de acuerdo a los tres esquemas de muestreo utilizados con mayor frecuencia. Estos son, muestreo aleatorio simple, muestreo sistemático y muestreo por conglomerados. Para cada uno de estos esquemas se tomaron muestras a los niveles de confianza del 80%, 85%, 90% y 95%, con la intención de determinar cual esquema y nivel de confianza resultaba ser el mas representativo de la población. Para cada una de estas muestras se calcularon las proporciones observadas en las muestras para cada una de las seis clases de vulnerabilidad (*A* a la *F*). Posteriormente se realizaron pruebas de significancia sobre las diferencias entre las proporciones observadas en cada muestra y las proporciones calculadas sobre el total de la población.

La determinación del tamaño de muestra para el muestreo aleatorio simple y para el muestreo sistemático se obtuvo en base a:

$$n_0 = \frac{0.25(Z_{\alpha/2})^2}{e^2} \quad (1)$$

donde  $e$  es el error máximo admisible, el cual usualmente se toma como  $e = 0.05$ , y  $Z_{\alpha/2}$  es el valor de la distribución normal estándar correspondiente al nivel del  $(1 - \alpha) \times 100\%$  de confianza (Lohr, 2000).

Para el muestreo por conglomerados cada manzana fue considerada como un conglomerado. Inicialmente se seleccionaron de manera sistemática una cantidad determinada de manzanas. Considerando que en la población se observa un promedio de aproximadamente 20 estructuras por manzana, se determinó el número de manzanas a elegir para cada nivel de confianza. Posteriormente se incluyeron en cada muestra todas las estructuras encontradas en cada manzana seleccionada.

## 2.2 Procedimiento de inferencia

La clase de vulnerabilidad para las estructuras no incluidas en las muestras se estimó mediante el siguiente procedimiento.

En base a las proporciones obtenidas por muestreo sistemático al 95% de confianza para cada clase de vulnerabilidad, se generaron números aleatorios entre 1 y 6, los cuales corresponden a cada una de las clases de vulnerabilidad de la  $A$  a la  $F$ . Estos números conforman los elementos de la matriz  $MV_{Nm \times Nmax} = (mv_{ij})$  donde  $i = 1, \dots, Nm$  con  $Nm$  el total de manzanas en la población y  $j = 1, \dots, Nmax$ , con  $Nmax$  la cantidad máxima de estructuras en una manzana. Se define además la matriz  $M = (m_{ij})$  también de orden  $Nm \times Nmax$ , en donde,

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si existe una estructura} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

De tal forma que los elementos del renglón correspondiente a la manzana con el número máximo de estructuras son todos igual a 1. En tanto que en los renglones restantes aparece un 1 en donde se localiza una estructura y un 0 en cada uno de los elementos restantes. Finalmente se calcula el producto elemento a elemento, llamado producto de Hadamard (Searle, 1982),  $MV \times M = \{mv_{ij}m_{ij}\}$ . Esta matriz resultante se utiliza para generar mapas de vulnerabilidad, los cuales contendrán una distribución espacial de las clases de vulnerabilidad similar a la de la población.

## 2.3 Índice de vulnerabilidad

Para el cálculo del índice de vulnerabilidad se consideraron los valores de las variables en negritas en la tabla 2, denotados por  $k_i$ . Adicionalmente, en base a un juicio experto a cada variable se le asignó un peso  $w_i$ ,  $i = 1, \dots, q$ , los cuales indican la influencia que cada una de estas tiene sobre la clase de vulnerabilidad. De donde el índice de vulnerabilidad se define como:

$$IV = \sum_{i=1}^n (k_i w_i) \quad (2)$$

donde  $q$  es el número de variables analizadas para cada estructura y  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . De la ecuación (2) se tiene que, si el índice de vulnerabilidad aumenta, la estructura es más vulnerable.

## 3 Resultados

Las diferencias entre las proporciones de las clases de vulnerabilidad en cada muestra y estas mismas proporciones en la población no resultaron ser significativas para niveles del 95% confianza. En tanto que para el 90% de confianza para el muestreo por conglomerados en la clase de vulnerabilidad  $C$  el valor del estadístico de prueba fue  $Z^* = -2.09882$  con un valor  $P = 0.0358323$  indicando que la diferencia es significativa. Para las clases de vulnerabilidad restantes no se encontraron diferencias significativas. Para un nivel del 85%

de confianza, la muestra obtenida mediante un muestreo por conglomerados, mostró que para la clase de vulnerabilidad  $B$  la diferencia resultó ser significativa ( $Z^* = -1.46924$ , valor  $P = 0.141767$ ). Para las clases restantes las diferencias no fueron significativas. Finalmente para un nivel de confianza del 80% la muestra obtenida por conglomerados observó diferencias significativas para las clases  $B$  ( $Z^* = -1.61906$ , valor  $P = 0.105433$ ),  $C$  ( $Z^* = 1.29074$ , valor  $P = 0.196792$ ),  $D$  ( $Z^* = -1.51979$ , valor  $P = 0.128562$ ) y  $F$  ( $Z^* = 1.41771$ , valor  $P = 0.156274$ ). Para la muestra aleatoria simple solo se observó significancia en la diferencia de la clase  $B$  ( $Z^* = 1.69851$ , valor  $P = 0.0894109$ ).

De lo anterior se tiene que para obtener muestras representativas se recomienda usar niveles de confianza por arriba del 85%. Muestras sistemáticas y aleatorias simples a un nivel del 80% de confianza se podrían sugerir en situaciones en las que se cuente con recursos limitados.

En base al procedimiento arriba descrito, se infirieron los valores de la clase de vulnerabilidad correspondiente a las estructuras de la población no incluidas en las muestras. En la figura 2 se exhibe la distribución por clases de vulnerabilidad para una sección de la población analizada. En el panel de la izquierda se presentan las clases de vulnerabilidad de seis manzanas obtenida del censo en la zona estudiada. En el panel de la derecha aparecen las clases de vulnerabilidad inferidas mediante esta metodología. Se observa que no se tiene la misma vulnerabilidad en ambas, pero son similares. Con base en resultados como este se podrían asignar presupuestos para refuerzo de estructuras entre otros aspectos.

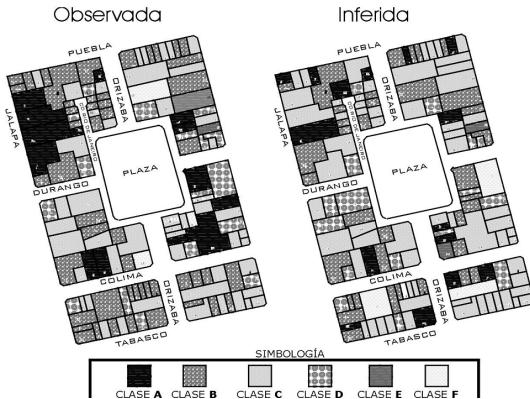


Figura 2: Mapa de vulnerabilidad inferida (izquierda) y vulnerabilidad observada (derecha).

Mediante el procedimiento descrito en 2.2 se calcularon los índices de vulnerabilidad inferidos. En la figura 3 se presenta los índices de vulnerabilidad calculados para una de las manzanas estudiadas. Los valores así obtenidos se podrían utilizar para estimar las características de las estructuras en poblaciones con valores similares a estos.

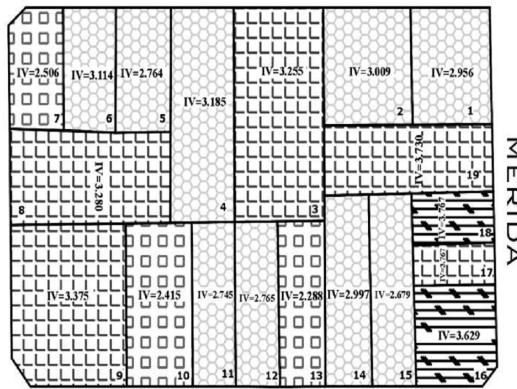


Figura 3: Manzana inferida con sus correspondientes IV.

## 4 Conclusiones

La metodología aquí presentada permite hacer recomendaciones acerca del esquema y tamaño de muestra apropiado para hacer inferencias acerca de la vulnerabilidad sísmica de un grupo de estructuras.

Los resultados obtenidos han mostrado que muestras obtenidas mediante esquemas de muestreo adecuados, proporcionan una representación significativa de las características de la población. Por tanto, esta metodología representa una opción económica y confiable para generar mapas de vulnerabilidad. Información que puede ser útil para la implementación de estudios sobre planificación urbana, o bien para determinar el monto de costos de reparación, así como para mitigar daños.

La estructuras de la Colonia Roma observan homogeneidad en sus características, ya que en esta zona sólo existen dos tipos de estructura. Es por esto que los esquemas de muestreo y niveles de confianza pueden diferir de los aquí propuestos para poblaciones no homogéneas.

## Referencias

- [1] Guillén, L. B. (2005) *Vulnerabilidad Sísmica de Estructuras por Muestreo Estadístico*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F.
- [2] Grünthal, G. (1998) “Escala macrosísmica europea 1998”, Monograph, Second edition in Spanish, Centro de Investigación y Mitigación de Desastres Naturales, Guatemala.
- [3] Juárez, H.; Gómez, A.; Arellano, E.; Sordo, E. (2004) “Seismic vulnerability assessment for Colonia Roma in Mexico City”, Proceedings, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada.
- [4] Lohr, S.L. (2000) *Muestreo: Diseño y Análisis*, First edition. International Thomson Editores, Arizona.

[5] Searle, S. R. (1982) *Matrix Algebra Useful for Statistics*, First edition. John Wiley & Sons, New York.