

# *Confiabilidad estructural del edificio del hospital universitario San Ignacio, cuando es sometido a excitación sísmica*

## *Structural reliability of the San Ignacio medical facility, when affected by seismic excitation*

*Federico Núñez\*, Edgar Muñoz\*, Jorge Prieto\**

*\* Grupo de Estructuras, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., COLOMBIA  
edgar.munoz@javeriana.edu.co*

*Fecha de recepción: 15/04/2004  
Fecha de aceptación: 13/07/2004*

### *Resumen*

*El presente trabajo consiste en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica física del módulo B del Hospital Universitario San Ignacio, basada en técnicas de confiabilidad estructural. El estudio se basó en un análisis dinámico espectral del modelo estructural del edificio, variando las sollicitaciones (momento, cortante y fuerza axial) que se generan en el modelo, mediante treinta (30) espectros de respuesta con diferentes periodos de retorno. Se utilizó además el estudio de patología de los materiales, donde se realizaron ensayos destructivos y no destructivos, para estudiar la variación de la resistencia de los elementos principales que hacen parte de la estructura (columnas, vigas y capiteles). Mediante la comparación directa entre las curvas de las sollicitaciones y las resistencias, se evaluaron los índices probables de falla y se identificaron diversas deficiencias locales y globales de la estructura ante un evento sísmico. Estos resultados coinciden con un estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, lo que indica una situación apremiante que tiene la estructura.*

*Palabras clave: Espectro, confiabilidad, análisis estructural, cortante, momento, carga axial, periodo de retorno*

### *Abstract*

*Is work deals with the physic seismic vulnerability of the B module of the San Ignacio medical facility using the structural reliability technique. This study was based on a dynamic spectral model of the building, by varying actions (moment, shear and axial force) generated in the model and resorting to thirty (30) response spectra with different return period. It also resorted to the study of the pathology of materials, in which destructive and non-destructive assays were conducted to study the resistance variation of the main structural elements that are part of the structure (columns, beams, capitols). By comparing the actions and resistance curves, probable failure indexes where evaluated and different local and global failures where evaluated in the face of a seismic event. These results are similar to those obtained in a study (Amezquita, et al 2002) developed by the Civil Engineering Department of the Pontificia Universidad Javeriana, indicating a problematic situation in the structure.*

*Key Words: Spectra, reliability, structural analysis, shear, moment, axial load, return period*

## *1. Introducción*

*En Colombia donde no se cuenta con los recursos suficientes para reforzar apropiadamente todas las estructuras que lo necesitan, es necesario tener un criterio de selección para poder decidir cuáles estructuras y cómo se deben priorizar. Es por eso que la confiabilidad estructural ayuda a materializar ese criterio, de tal forma que se puede saber que partes de una estructura deben ser reforzadas y cuales no, para mantener su integridad ante una sollicitación sísmica, de la manera mas económica posible. El trabajo de confiabilidad estructural llevado a cabo en conjunto por la Universidad de Corea, la Universidad de Arizona (Jungwon y Achintya, 2000), así*

*como el trabajo de la Universidad de Arabia Saudita (Arafah et al., 2000), dio luces para desarrollar las mejores ideas en el planteamiento de este análisis estructural.*

*Teniendo en cuenta que la normativa colombiana no contempla la confiabilidad estructural como parámetro mínimo para las construcciones sismo resistentes, fue prioritario analizar que consecuencias conllevaría tener estos criterios de revisión.*

*En las estructuras diseñadas hasta la actualidad. El propósito de este estudio, fue analizar la situación actual de una estructura de primera necesidad para la capital de Colombia, a las luces de la metodología de*

confiabilidad estructural. Esta estructura construida en los años cincuenta, posee un sistema estructural de reticular celulado (columna-piso), el cual está compuesto por viguetas (losa aligerada) en dos direcciones conectadas a las columnas con capiteles aligerados. La estructura presenta deficiencias en el detallado estructural (zonas de confinamiento, cuantías mínimas de columnas, refuerzo a cortante, etc.), lo cual justifica un estudio detallado que determine la seguridad, el costo de diferentes alternativas de refuerzo y la respectiva decisión sobre su refuerzo o construcción nueva.

## 2. Metodología de Trabajo

### 2.1 Confiabilidad estructural

El índice de confiabilidad (ver Ecuación 1), representa la seguridad de los elementos estructurales, mediante el análisis estadístico de las funciones de resistencia y solicitaciones, variables no correlacionadas por su naturaleza de origen (Nowak, 2000). Tanto las funciones de resistencia y solicitaciones, se estudiaron con base en información probabilística, definiendo para cada uno de ellas la media y la desviación estándar.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{|\sigma_R^2 - \sigma_Q^2|}} \quad (1)$$

Para determinar el índice de falla ( $\beta$ ), se evalúa la media y la desviación estándar de la resistencia ( $\mu_R, \sigma_R$ ) y de las solicitaciones ( $\mu_Q, \sigma_Q$ ). El índice de confiabilidad de 1 hasta  $\infty$ , indica deficiencias estructurales. Valores altos de ( $\beta$ ) representan una capacidad adecuada de los elementos para soportar la variabilidad de las cargas, teniendo en cuenta la variabilidad intrínseca de su resistencia.

### 2.2 Función de Comportamiento

La función de comportamiento se define como la diferencia entre las funciones de la resistencia y las solicitaciones. (ver Ecuación 2).

$$Y = R - Q \quad (2)$$

Los estados que se presentaron en la estructura son los siguientes:

1.  $Y < 0$ . Se asume que la función de resistencia es insuficiente con relación a la función de las solicitaciones.
2.  $Y = 0$ . En este estado, la variabilidad de la resistencia es apenas la necesaria para que se resistan las variabilidades de la carga, con nivel de confiabilidad

cercano a cero, ya que se encuentra en el límite definido por la función. Por tanto esta condición se llama función de estado límite.

3.  $Y > 0$ . Si bien las variabilidades de la resistencia del elemento estructural están mejor para soportar las variabilidades de la carga, no se puede hablar de probabilidad de falla cero.

### 2.3 Variación de las cargas

Mediante un programa de generación de espectros (Prieto, 2003), se determinaron treinta (30) espectros de respuesta diferentes. Este programa se basó en la variación de algunos parámetros de la ecuación de atenuación definida por la geología, las distancias a las principales fallas geológicas de la región y los datos obtenidos para los eventos sísmicos registrados en los diferentes medidores localizados cercanos a la zona. El programa se utilizó introduciendo la ecuación de atenuación (Ambrasseys et al., 2000), definiendo la aceleración absoluta para diferentes periodos espectrales que varían desde cero hasta dos segundos. Además tiene en cuenta la frecuencia anual de excedencia para el evento sísmico definido por ese espectro de respuesta (i.e. el inverso matemático del periodo de retorno para ese evento sísmico definido por ese espectro de respuesta). Esta ecuación está definida como:

$$\text{Log}(S_a) = C_1 + C_2 + C_4 \text{Log}(r) + C_a P_a + C_s P_s + \sigma P \quad (3)$$

Donde  $C_1, C_2, C_4, C_a$  y  $C_s$  son parámetros de la ecuación para poder hallar las coordenadas espectrales, y donde  $P_a$  y  $P_s$  son parámetros que dependen del tipo de suelo (se determino que se comporta como roca), puede ser blando o duro.  $P$  es un valor constante y es la desviación estándar de  $\text{Log}(S_a)$  (logaritmo en base 10). El resultado de  $S_a$  está dado como un porcentaje de la aceleración de la gravedad para cada periodo de retorno. En la Figura 1 grafica se puede ver la variación de la aceleración de la gravedad en cada uno de los diferentes espectros usados:

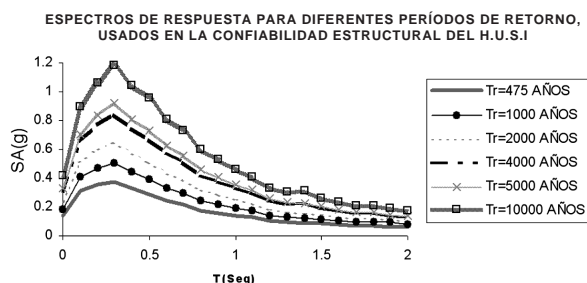


Figura 1. Espectros usados en el presente estudio

De cada espectro se evaluó su probabilidad de ocurrencia para realizar las respectivas combinaciones de carga mediante una simulación numérica y usando el método de Montecarlo. En la Figura 2 se puede observar el comportamiento de las probabilidades de ocurrencia de los diferentes eventos sísmicos utilizados, cuando se tiene en cuenta un evento certero, en este caso el de un periodo de retorno de 10000 años.

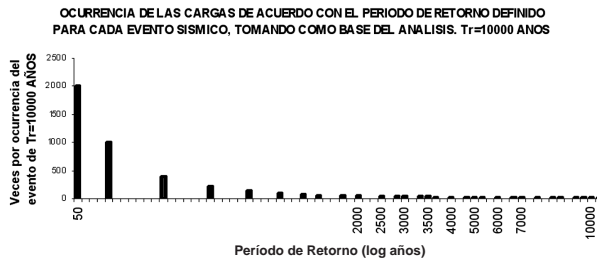


Figura 2. Ocurrencia de los eventos sísmicos en función de su periodo de retorno

#### 2.4 Variación de la resistencia

Para poder obtener los valores de resistencia a compresión del concreto ( $f'_c$ ) de los elementos de la estructura, se hicieron diversos ensayos destructivos y no destructivos (maquina universal y aparato de ultrasonido), que se pueden apreciar en la Figura 3. Las variaciones del  $f'_c$ , afecta directamente la función de densidad de la resistencia a cortante, flexión y fuerza axial de los elementos estructurales del edificio.

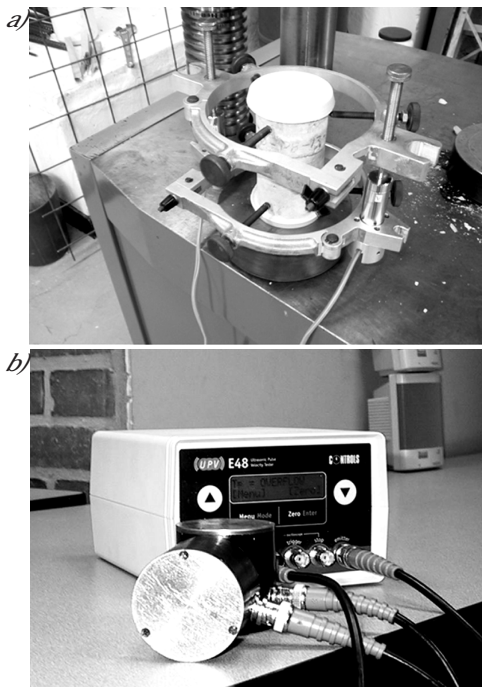


Figura 3. a) Colocación de la muestra obtenida como núcleo tomado directamente de la estructura, y lista para ser fallada en la maquina universal. b) Aparato ultrasonido utilizado.

La función que representa la variación de la resistencia a la compresión de todos los elementos de la estructura se presentan en la Figura 4.

VARIABILIDAD DE LA RESISTENCIA DEL  $f'_c$  DEL CONCRETO DE LA ESTRUCTURA DEL EDIFICIO DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO SAN IGNACIO. (LOS VALORES FUERON OBTENIDOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS DE RECUPERACION DE NUCLEOS)

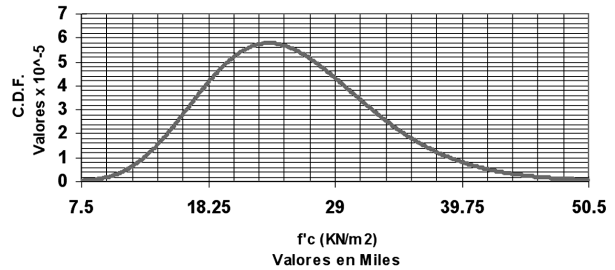


Figura 4. Variación de los valores de  $f'_c$  en la totalidad de la estructura del Hospital Universitario San Ignacio.

#### 2.5 Modelo estructural

Se desarrolló un modelo tridimensional en el programa de análisis estructural SAP-2000 y se hizo un análisis dinámico espectral, analizando diversas combinaciones de carga con los treinta (30) espectros de respuesta (ver Figura 5). Se considero en el modelo un diafragma rígido en cada piso y en su centro de masa se colocó la masa total que aporta el entrepiso, capiteles, columnas, vigas, fachada, acabados y un 20% de la carga viva.

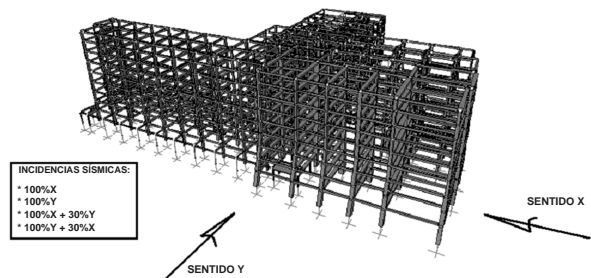


Figura 5. Modelo estructural en SAP2000

### 3. Resultados del análisis estructural

Mediante el desarrollo de macros y programación en una hoja electrónica, se creó toda la base de datos con los diferentes resultados para cada uno de los elementos principales seleccionados. Se estudió en detalle el comportamiento estadístico de las funciones de densidad de probabilidad (solicitaciones), con el objeto de evaluar el ajuste y la correspondiente función más adecuada en cada caso (Núñez, 2003). Las

funciones obtenidas después de los ajustes, se presentan en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Resultados del ajuste de datos de las fuerzas variables en las columnas

Fuerza Variable Ajustada	Función de Densidad de Probabilidad
Pmax (Resistencia axial)	Gamma
Pu (Acción axial)	Logística
Mmax (Resistencia a momento)	Weibull
Mu (Acción de momentos)	Log logística
Vres (Resistencia a cortante)	Gauss Inversa
Vu (Acción de cortante)	Log logística
Vplast (Cortante plastificador)	Pearson Tipo 5

Tabla 2. Resultados del ajuste de datos de las fuerzas variables en las vigas

Fuerza Variable Ajustada	Función de Densidad de Probabilidad
Mn(-) (Resistencia a momento neg.)	Gauss Inversa
Mu(-) (Acción de momento neg.)	Logística
Mn(+) (Resistencia a momento pos.)	Gauss Inversa
Mu(+) (Acción de momento pos.)	Logística
Vres (Resistencia a cortante)	Gauss Inversa
Vu (Acción de cortante)	Log logística

Los resultados obtenidos se estudiaron y evaluaron considerando los criterios de revisión estructural, como se observa en la Figura 6, donde se establece los rangos de deficiencia estructural, limbo asumido y seguridad estructural. El limbo asumido (Índice de confiabilidad entre 0 y 1), con el que se trabajó en este estudio, tuvo en cuenta una evaluación aproximada de los factores sociales y económicos de la zona. Sin embargo, para la rehabilitación y actualización de la estructura del hospital, usando las técnicas de confiabilidad estructural, es necesario hacer un estudio detallado de los límites óptimos, para que sirvan de base en la toma de decisiones.

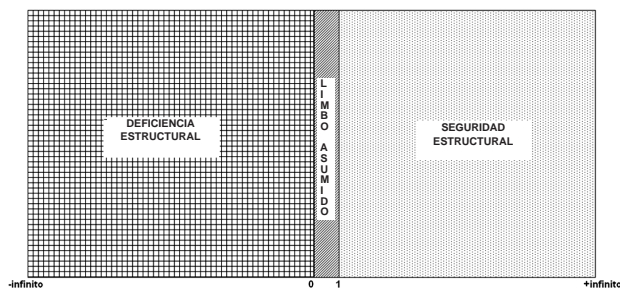


Figura 6. Límites de los índices de confiabilidad usados en este estudio

En las Figuras 7 y 8 se presentan los índices de confiabilidad de carga axial y cortante por piso para las columnas del pórtico del eje 1.7. Se observa que el problema fundamental es la capacidad a cortante de las columnas, lo que se debe a la falta de detallado estructural

sismorresistente, que no considera zonas de confinamiento adecuadas. Así mismo, con respecto a la carga axial las columnas se encuentran en un rango de seguridad estructural.

En las Figuras 9 y 10 se aprecian los índices de confiabilidad por carga axial y cortante de las columnas del pórtico del eje 1.0. En este pórtico sucede lo mismo que en el anterior, ya que se observan deficiencias a cortante de las columnas. Además se aprecia un índice negativo, al evaluar la carga axial de la columna en el piso 8, lo que indica que se encuentra en el rango de deficiencia estructural.

En la Figura 11 se observa un esquema del pórtico del eje 1.0, donde los índices de confiabilidad obtenidos en la evaluación a cortante de las vigas, son negativos, lo que representa deficiencia estructural. Esto indica una probable falla por punzonamiento entre las viguetas y los capiteles aligerados, debido al inadecuado detallado estructural entre los dos elementos de la estructura.

VARIACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CONFIABILIDAD A CARGA AXIAL, EN LOS NUEVE PISOS DEL MÓDULO 8 DEL H.U.S.I. (PÓRTICO 1.7)

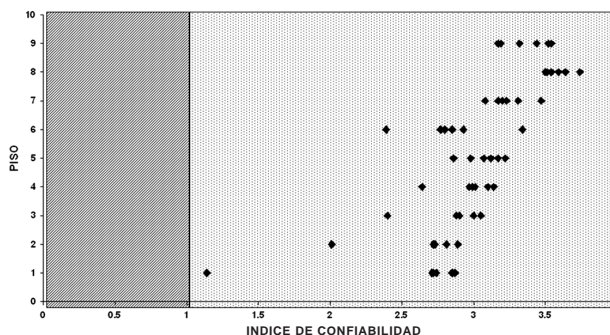


Figura 7. Índices de confiabilidad para el análisis de esfuerzo axial en el pórtico 1.7

ÍNDICE DE CONFIABILIDAD A CORTANTE EN X PARA LAS COLUMNAS DEL MÓDULO 8 DEL H.U.S.I. (PÓRTICO 1.7)

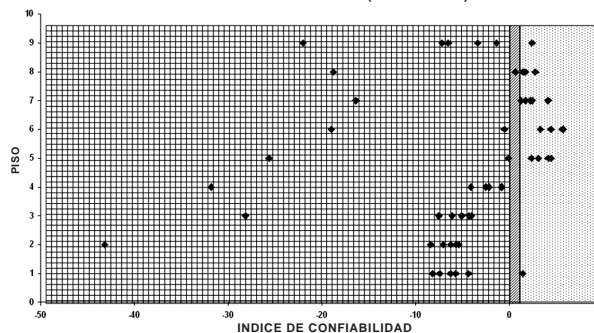


Figura 8. Índices de confiabilidad para el análisis de esfuerzo cortante en el sentido del primer modo de vibración de la estructura para el pórtico 1.7

## 4. Discusión de los resultados

Con relación a la capacidad de carga axial de las columnas (Ver Figuras 7 y 9), se concluye que se encuentran dentro de los límites de seguridad. Con respecto a la capacidad a cortante de las columnas y las vigas (Ver Figuras 8 y 10), se detectaron debilidades importantes las cuales deben ser objeto de estudio para su reforzamiento y actualización estructural. Lo anterior concuerda con el estudio realizado por la Pontificia Universidad Javeriana, basados en las especificaciones del FEMA-310 (1998).

Mediante análisis de confiabilidad se comprobó la existencia de problemas que pueden afectar la estabilidad de la estructura y de los elementos no estructurales ante la ocurrencia de un sismo. Con base en los análisis efectuados, pueden llegar a presentarse fallas por punzonamiento en las inmediaciones de los capiteles por la alta flexibilidad del sistema. Este tipo de falla es considerada frágil e inadmisibles durante la ocurrencia de un terremoto, teniendo en cuenta la experiencia internacional de edificaciones construidas con este sistema estructural y que han colapsado durante los terremotos, como ejemplo el sismo de ciudad de México del año 1985.

## 5. Conclusiones

El Módulo B del Hospital Universitario San Ignacio, es una estructura que no cumple con las especificaciones que exige la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismorresistentes (NSR98, lo cual se debe a que fue construido en los años 50, época que en Colombia no existían normas o requisitos sismorresistentes. Dicha deficiencia se detectó en diferentes partes de la estructura mediante técnicas de confiabilidad estructural. El sistema estructural del Hospital es poco competente para asegurar la estabilidad global y resistir la variabilidad de las cargas probables generadas por un sismo. En el estudio por confiabilidad de la formación de articulaciones plásticas de los elementos principales, se encontró que ninguna viga se plastifica antes que cualquier columna, lo que indica un mecanismo de colapso que inicia con la falla de las columnas, que implica un alto riesgo e insuficiente seguridad de toda la estructura.

De acuerdo con el estudio realizado y dada la alta importancia del Hospital, resulta de particular interés que se realice un estudio en el que se evalúen diversas alternativas de intervención entre las que se pueden mencionar: rigidización y/o reforzamiento, colocación

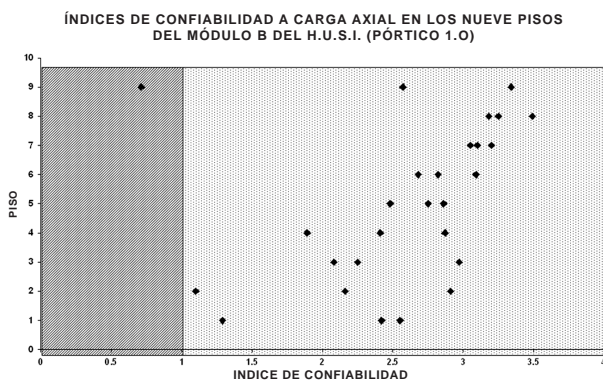


Figura 9. Índices de confiabilidad para el análisis de esfuerzo axial en el pórtico 1.0

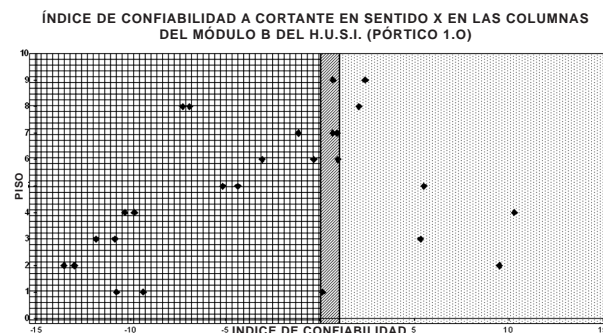


Figura 10. Índices de confiabilidad para el análisis de esfuerzo cortante en el sentido del primer modo de vibración de la estructura para el pórtico 1.0

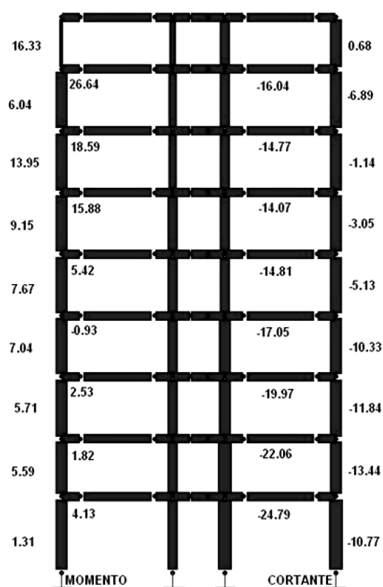


Figura 11. Comportamiento de los índices de confiabilidad ( $\beta$ ) para momento y cortante en vigas y columnas. Pórtico 1.0 del edificio del Hospital Universitario San Ignacio

de disipadores de energía, cambio en las propiedades dinámicas de los edificios, aislamiento en la base, etc., además de una evaluación de riesgo directamente relacionado con la confiabilidad, para tomar la decisión más adecuada desde el punto de vista beneficio – costo en la estructura.

## 6. Bibliografía

- Ambraseys N. N., Simpson K. A., Bommer J. J. (2000), "Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe". Departamento de Ingeniería Civil, Imperial College of Science and Technology and Medicine. Londres.
- Amezquita A., Muñoz E., Forero M. y Quinteros J. (2002), "Estudio de la vulnerabilidad sísmica estructural de las instalaciones del hospital universitario de San Ignacio adscrito a la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá D.C."
- Arafah A.M. (2000), "Reliability of Reinforced Concrete Beam Section as Affected by Their Reinforcement Ratio". King Saud University. Saudi Arabia.
- FEMA- 310 (1998), The federal emergency management agency- Handbook for the seismic evaluation of buildings-a prestandard, Estados Unidos.
- Jungwon H. y Achintya H. (2000), "Reliability Estimation of Buildings Subjected to Seismic Excitation". Yonsei University. Seoul, Korea , University of Arizona.
- Nowak A. (2000), "Reliability of Structures". Editorial Prentice Hall.
- Núñez F. (2003), "Confiabilidad del edificio del Hospital Universitario San Ignacio cuando es sometido a sollicitación sísmica". Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá, Colombia.
- Prieto J. (2003), "Programa de generación de espectros para diferentes periodos de retorno". Bogotá, Colombia

