

ESTIMACIÓN DEL DAÑO SÍSMICO EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD SIMULADAS

Esperanza Maldonado Rondón¹
Iván Darío Gómez Araujo²
Gustavo Chío Cho³

Recibido: 06/07/2007

Aceptado: 12/12/2008

RESUMEN

En el presente trabajo se aplica un modelo de evaluación del nivel de daño que pueden alcanzar las edificaciones de mampostería de una ciudad ante un determinado evento sísmico, el cual fue construido para condiciones propias de nuestro país. El modelo se basa en la aplicación de funciones de vulnerabilidad o matrices de probabilidad de daño, elaboradas a partir de técnicas de simulación. Las funciones están propuestas para valores de aceleración máxima desde 0,02 g a 0,25 g, y su utilización se recomienda a gran escala. El modelo fue aplicado a una población ubicada al nororiente colombiano, dentro del área metropolitana de Bucaramanga. Para su aplicación fue necesario realizar levantamiento en campo de la información básica de las edificaciones de la zona de estudio. En la construcción de las funciones y matrices se utilizó el estudio de amenaza sísmica existente. Con la información disponible, se aplicó el modelo implementando herramientas computacionales, y con ellas se elaboraron los mapas de daños para diferentes eventos sísmicos. Los resultados demostraron la aplicabilidad y sencillez del modelo, dado que para estimación de la vulnerabilidad de las edificaciones se requiere información general de las edificaciones, la cual es de fácil recolección en campo, y para la estimación del daño ante una acción determinada se utilizan directamente las funciones propuestas.

Palabras clave: funciones de vulnerabilidad sísmica, matrices de probabilidad de daño, mampostería, daño sísmico.

-
- 1 Doctora en Ingeniería de caminos, canales y puertos, Profesora titular de la Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación INME, Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Colombia. Tel. / Fax 57-76-320 744. e-mail: emaldona@uis.edu.co
 - 2 Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación INME, Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Colombia. e-mail: igomez19@hotmail.com
 - 3 Doctor en Ingeniería de caminos, canales y puertos, Profesor asociado Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación INME, Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Colombia. Tel. / Fax 57-76-320 744. e-mail: gChioch@uis.edu.co

ASSESSMENT SEISMIC DAMAGE OF MASONRY BUILDINGS BASED ON SIMULATE VULNERABILITY FUNCTIONS

ABSTRACT

The aim of this paper is to describe the application of an assessment model damage that masonry building within a city might suffer when a certain seismic event occurs. This model was generated to meet the specific conditions of our country. The model is based on the application of seismic vulnerability functions or seismic damage probability matrices elaborated by means of simulation techniques. These functions and matrices are proposed for maximum acceleration values ranging between 0.02g to 0.25g and they are recommended for large scale use. The model was applied in a big town located on northwest Colombian, near Bucaramanga. For its application it was necessary to collect basic data of the target buildings. This model was proposed based on a previous seismic hazard study. With the collected information the model was applied using computer tools and damage maps for different seismic events were constructed. The results showed the easy applicability of the model, so that the experience gained proves that can it be applied in Colombian cities.

Keywords: Seismic vulnerability function, damage probability matrix, masonry, seismic damage.

I. INTRODUCCIÓN

En el territorio colombiano muchas de sus poblaciones se han desarrollado a través de edificaciones de baja altura en el sistema estructural de muros en mampostería, sea confinada, sin confinar, reforzada o no reforzada. A su vez, algunas de estas edificaciones se han construido sin parámetros sismorresistentes, a pesar de encontrarse ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta. Asimismo, ciertos desarrollos urbanos dentro de las ciudades se han desplegado desordenadamente sin planificación, pues han nacido y crecido atendiendo las necesidades básicas de vivienda económica de sus habitantes. Por todo lo anterior es fundamental desarrollar estudios de vulnerabilidad sísmica de estas zonas, que permitan visualizar y cuantificar el nivel de riesgo al que se encuentran expuestas. Luego, ante la necesidad de estos estudios es importante aplicar metodologías que tomen en consideración las características propias del desarrollo de estas poblaciones, y para ello es importante construir o aplicar modelos propios.

Dentro de este contexto se encuentra la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana donde las edificaciones que predominan son de, máximo, tres niveles en mampostería no siempre confinada (Maldonado y Chío, 2007). En el interior del área metropolitana se halla la población de Floridablanca la cual cuenta con desarrollos urbanos, algunos subnormales, ubicados en zonas de alta pendiente, los cuales son preocupación de las entidades gubernamentales del municipio. Luego, dado el interés en conocer el nivel de daños que puede alcanzar esta zona ante los eventos sísmicos propuestos en el estudio de zonificación sismo geotécnica indicativa de la ciudad de Bucaramanga (Ingeominas y CDMB, 2002).

Para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de Floridablanca no se contaba con registros de datos reales ni con información experimental; por ello se tomó la decisión de usar técnicas basadas

en opinión de expertos, combinadas con procesos analíticos, y para ello se utilizó la metodología sugerida por Maldonado *et al.* (2007), la cual propone aplicar funciones de vulnerabilidad sísmica o matrices de probabilidad de daño a partir de un calificativo de la edificación, llamado índice de vulnerabilidad. Las funciones fueron aplicadas para los dos escenarios sísmicos más probables, y los resultados demostraron la aplicabilidad del modelo utilizado.

2. METODOLOGÍA UTILIZADA

El nivel de daño que pueden alcanzar las edificaciones del área de estudio, sometida a una determinada acción sísmica se puede obtener mediante dos procedimientos: el primero, por medio de las denominadas matrices de probabilidad de daño, y el segundo a través de las funciones de vulnerabilidad. Los principales métodos utilizados para la generación de las matrices de probabilidad de daño o funciones de vulnerabilidad difieren básicamente en los datos de entrada y en la forma como se obtienen las probabilidades asociadas a cada estado de daño; luego, estos pueden ser métodos basados en observaciones de campo, experimentales, basados en la opinión de expertos y métodos analíticos. Dependiendo de la información con la que se cuente se podrá utilizar uno u otro método, o se podrán combinar. En el caso de aplicación a ciudades colombianas como Floridablanca en el área metropolitana de Bucaramanga, se han construido funciones y matrices basadas en opinión de expertos y en técnicas de simulación (Maldonado *et al.*, 2007). Estas funciones fueron construidas a partir de la simulación de las características de edificaciones que definen su respuesta ante una acción sísmica, y mediante la estimación de vulnerabilidad dada por expertos a cada uno de los parámetros del modelo (Maldonado *et al.* 2008), realizando el siguiente procedimiento:

- a) Generación aleatoria de los parámetros que intervienen en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de mampostería, los cuales son considerados como los de mayor influencia en la respuesta sísmica de las edificaciones de mampostería.
- b) Cuantificación de la vulnerabilidad a través del índice de vulnerabilidad (Maldonado *et al.*, 2007, UIS-Alcaldía Floridablanca, 2006) el cual relaciona el grado de vulnerabilidad y los valores de importancia de los parámetros; este índice se basa en el método propuesto por Benedetti y Petrini (1984). Los valores de grado de vulnerabilidad y de importancia son definidos a partir de opiniones de expertos.
- c) Determinación del cortante de piso que actúa en cada nivel (FHE), que se utiliza como sollicitación lateral del piso en el caso de edificios con flexibilidad despreciable del diafragma.
- d) Cálculo del índice global de daño para cada nivel, ante diferentes sollicitudes sísmicas, utilizando el modelo de Abrams (Abrams, 1992).
- e) Relación de los valores del índice de vulnerabilidad con el índice de daño para cada acción sísmica definida.

Las funciones fueron construidas para valores de aceleración de 0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 y 0.25g. En la figura 1 se presentan las funciones para las diferentes acciones sísmicas.

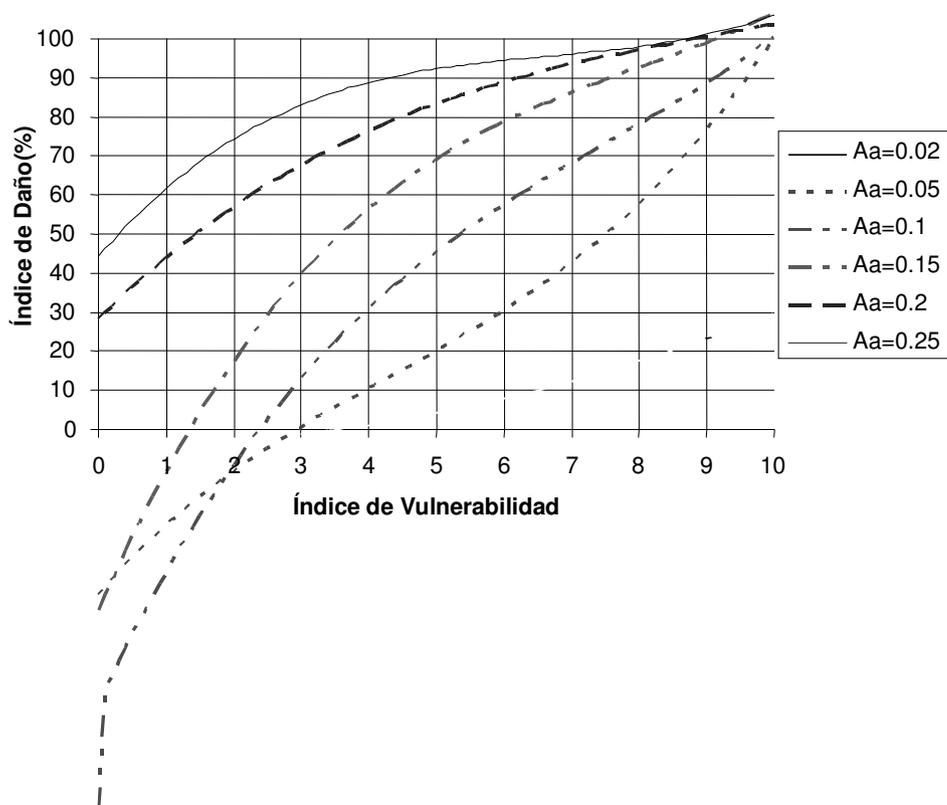


Figura 1. Funciones de vulnerabilidad calculadas (Maldonado *et al.* 2006).

Las funciones corresponden a una polinomial, ver ecuación 1.

$$D(\%) = a_1V^3 + a_2V^2 + a_3V + b \quad (1)$$

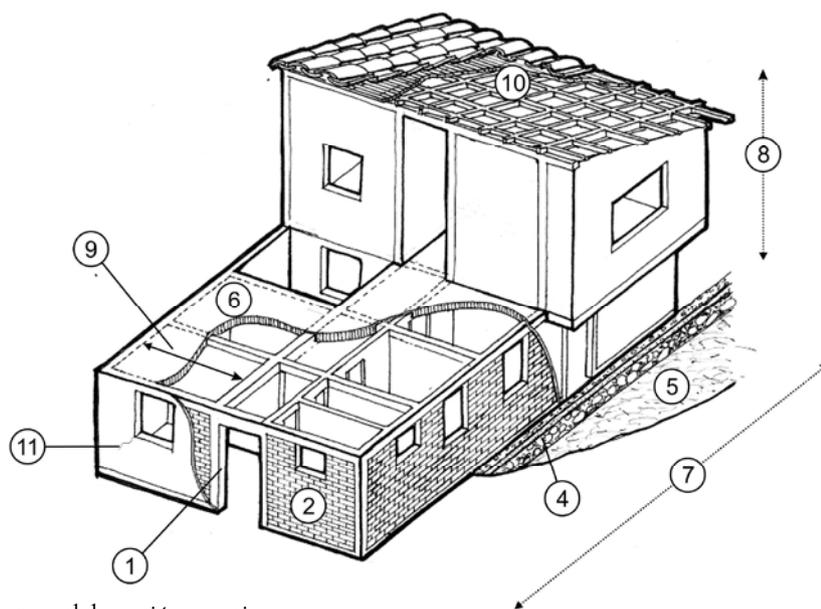
Siendo, los valores de las constantes a_1 , a_2 , a_3 , y b los presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de las funciones ajustadas.

	a_1	a_2	a_3	b
$A_a = 0,25$	0,1398	- 2,7835	20,0326	44,25
$A_a = 0,2$	0,0538	- 1,5046	17,2410	28,03
$A_a = 0,15$	0,1708	- 4,1237	39,4230	-46,32
$A_a = 0,1$	0,3623	- 6,9759	54,4834	-97,25
$A_a = 0,05$	0,1809	- 2,3552	19,7226	-42,25
$A_a = 0,02$	0	0,3427	- 0,0653	-3,834

Fuente: elaboración propia

Para la definición del nivel de daño de la edificación, a partir de las funciones o matrices, es necesario estimar un índice de vulnerabilidad el cual se base en la calificación de 11 parámetros (ver figura 2). El concepto de este índice fue introducido por Benedetti y Petrini (1984) en Italia, y posteriormente se ha incorporado en la estimación de la vulnerabilidad en otras ciudades como Barcelona, España (Yépez, 1996 y Mena, 2002), en Cuenca, Ecuador (Jiménez, 2002) y en Mérida, Venezuela (Castillo, 2005).



Fuente: elaboración propia

- (1) Sistema estructural,
- (2) Calidad del sistema resistente,
- (3) Resistencia estructural,
- (4) Posición de la cimentación,
- (5) Suelo y pendiente del terreno,
- (6) Diafragmas horizontales,
- (7) Configuración en planta,
- (8) Configuración en elevación,
- (9) Distancia máxima entre los muros
- (10) Tipo de cubierta,
- (11) Estado de conservación.

Figura 2. Parámetros en la estimación del índice de vulnerabilidad sísmica.

En la estimación de este índice de vulnerabilidad se requiere realizar el inventario de las edificaciones de mampostería que se desea evaluar. Este inventario se realiza mediante un formulario, el cual contiene las características necesarias para evaluar los once parámetros necesarios para la determinación del índice de vulnerabilidad de la edificación. En la figura 3 se ilustra parte del formulario que hace referencia a las preguntas correspondientes a los dos primeros parámetros.

  EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD		
K1 = Sistema Resistente		
A	Mampostería confinada o reforzada	
B	Mampostería parcialmente confinada	
C	Mampostería sin confinamiento	
K2 = Calidad del Sistema Resistente		
K2.1 Calidad de la Mampostería		
A	Buena calidad	
B	Baja calidad	
K2.2 Homogeneidad de las Piezas		
A	Homogéneo	
B	No muy homogéneo	
C	No homogéneo	
K2.3 Ligamento		
A	Buen ligamento	
B	Mal ligamento	

Fuente: elaboración propia

Figura 3. Formulario para la estimación del índice de vulnerabilidad de una edificación de mampostería.

Recopilada la información se utiliza el programa **IVEM** (UIS-Alcaldía de Floridablanca, 2006) para el estimativo del índice de vulnerabilidad por edificación. Luego, a partir de la acción sísmica, se selecciona la función de vulnerabilidad a utilizar, y con base en el índice de vulnerabilidad de

la edificación se determina el nivel de daño que puede alcanzar.

3. ZONA DE ESTUDIO

La población de Floridablanca junto con Girón, Piedecuesta y Bucaramanga conforma el Área Metropolitana de Bucaramanga, la cual se encuentra ubicada en el departamento de Santander localizado al nororiente colombiano.

La zona de estudio comprende un total de 78 barrios, con aproximadamente 768 manzanas y 12104 predios, conformada por las comunas Caldas-Reposo con un 60% de los predios, Valencia-Santana con un 20%, La Cumbre-El Carmen con un 15%, y el otro 5% distribuido en otras comunas. En la figura 4 se presenta la población de Floridablanca y dentro de ella se resalta la zona estudiada.

A su vez, la zona de estudio dentro de la población de Floridablanca está asentada al noroeste, adjunto al macizo Santandereano. De acuerdo con el mapa topográfico realizado en del año 2005 (Alcaldía de Floridablanca, 2006 a), la zona se caracteriza por las altas pendientes, en valores que van desde 20% hasta 100%. A su vez, sus edificaciones están cimentadas en un 30% sobre terreno de alta pendiente.

De acuerdo con el mapa de zonificación geotécnico, a escala 1:25.000, presentado en el estudio de microzonificación sísmica indicativa de Bucaramanga (Ingeominas-CDMB, 2002), en la zona de estudio se encuentran rocas sedimentarias con pendientes moderadas a fuertes, rocas ígneas y metamórficas fracturadas afectadas por fallas geológicas, miembros de órganos gravosos afectados por procesos erosivos y limosos en laderas susceptibles a deslizamientos, además de valles aluviales afectados por procesos de erosión y depósitos de coluviones.



Fuente: Ingeominas - CDMB, 2002

Figura 4. Zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra influenciada por varios sistema de fallas, (ver figura 4), dentro de las cuales se encuentra la de Bucaramanga-Santa Marta, que es una las mayores fuentes de actividad sísmica de la región (Rey y Beltrán, 2002; Ingeominas-CDMB, 2002).

De acuerdo con el mapa sismogeotécnico, también resultado del estudio de microzonificación sísmica indicativa de Bucaramanga (Ingeominas-CDMB, 2002), se presentan en el área de estudio tres zonas de respuesta dinámica diferente.

En lo referente a aspectos socioeconómicos, según la información suministrada por la Alcaldía de Floridablanca y la levantada por el grupo de investigación, la zona se encuentra compuesta por

4 estratos socioeconómicos (estratos 1, 2, 3 y 4) (Alcaldía de Floridablanca, 2006 b), con predominio de los estratos 1, 2 y 3. El estrato 1 se presenta en un 14%, estrato 2 en un 83% y estrato 3 en un 3% (Olarte, 2006). Además, el 62% de viviendas están ubicadas sobre carreteras pavimentadas, el 37% sobre calles peatonales y un 25% sobre vías sin pavimento. El número de personas por vivienda en general es de 3 a 5 (Olarte, 2006).

4. TRABAJO DE CAMPO

Con el fin de evaluar algunos parámetros del índice de vulnerabilidad, información con la cual no se contaba, se procedió a realizar un inventario de las edificaciones en dos fases. En la primera se

llevó a cabo una evaluación de las características generales de las edificaciones, y en la segunda fase se realizó un levantamiento detallado de una muestra representativa de las edificaciones del municipio.

FASE I

En esta primera fase se realizó el inventario de todos los predios de la zona de estudio, con un resultado de 12104 predios. Allí se identificaron características como tipo de usos de la edificación, material de construcción, proceso constructivo, organización del sistema resistente, estado de conservación, calidad del sistema resistente, elementos

no estructurales, tipo diafragma horizontal, tipo de cubierta, número de pisos, posición de la cimentación y entorno.

En el levantamiento de las edificaciones se emplearon un total de 5 encuestadores y un coordinador de las labores de campo, todos ellos estudiantes de último semestre de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

Para el desarrollo de la primera fase del trabajo de campo se elaboró un formulario el cual se estructuró en dos partes: una correspondiente a la definición del tipo de uso de la edificación, y la segunda relacionada con las características necesarias para definir su vulnerabilidad. En la figura 5 se ilustra la segunda parte del formulario.



I. Organización del sistema resistente
Presenta vigas y columnas de confinamiento en todas las plantas
-Vigas de confinamiento sin columnas; o -Columnas sin vigas de confinamiento; o -Vigas y columnas de confinamiento pero no en todas las plantas.
No posee confinamiento en ninguna de las plantas
II. Estado de conservación
Muros en buena condición, sin fisuras visibles
Muros que presentan fisuras no extendidas
Muros con fisuras de tamaño medio entre 2 a 3 mm
Muros que presenten un fuerte deterioro de sus materiales constituyentes o fisuras de más de 3 mm de ancho
III. Calidad del sistema resistente
HOMOGENEIDAD
-Todas las unidades de mampostería dentro del muro son del mismo tipo, y -posee dimensiones constantes y correcta colocación.
-Existen dos tipos de unidades mampostería dentro del muro, o -Menos del 50% de las unidades tienen dimensiones diferentes o Incorrecta colocación.
-Existen tres tipos de unidades o más dentro de los muros, o -Más del 50% de las unidades del muro tiene dimensiones diferentes o Incorrecta colocación.

LIGAMENTO
Presencia de buen ligamento
El mortero evidencia separación con las piezas de mampostería
No existen juntas con mortero verticales u horizontales en algunas zonas del muro
IV. Elementos no estructurales
Ausencia de elementos no estructurales
-Existen estructuras en la parte superior de pequeña dimensión y de peso modesto -Edificación con balcones salidos menos de 1m
-Existen estructuras en la parte superior de peso significativo. -Edificación con balcones salidos más de 1m.
V. Diafragma horizontal
Losa maciza (Espesor entre 0.1m y 0.20m)
Losa aligerada (Espesor mayor de 0.20m)
Losa prefabricada (Sección tipo T)
Sin diafragma
VI. Tipo de cubierta
Losa de concreto
Liviana, con zinc o eternit
Pesada con teja de barro
VII. Datos numéricos
Número de pisos
Altura 1er piso (m)
VIII. Cimentación
La fundación está ubicada a una misma cota
La diferencia máxima de las cotas de fundación es inferior a un 1m
La diferencia máxima de las cotas de fundación es superior a un 1m
IX. Entorno
Presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén
Ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén

Fuente: elaboración propia

Figura 5. Formulario de levantamiento de la información de las edificaciones (segunda parte).

FASE II

Una segunda toma de datos en campo fue necesaria para completar la estimación de la vulnerabilidad. Para ello se tomó una muestra de 100 casas.

El formulario de levantamiento detallado se encuentra dividido en dos partes: en la primera se determinan las características generales de la edificación, y en la segunda parte se obtiene información gráfica de la configuración estructural

utilizada en las edificaciones. En la figura 6 se presenta la primera parte del formulario de la segunda fase de trabajo de campo.

		LEVANTAMIENTO DETALLADO DE INFORMACIÓN DE CAMPO
TIPO DE EDIFICACIÓN		Marque(X)
Mampostería de ladrillo o bloque		
Mampostería de tapia o adobe		
DATOS		Valor numérico
Número de personas que habitan la edificación	Día	
	Noche	
	Total	
Altura promedio de los pisos		
Longitud en planta en la dirección principal de mayor longitud		
Longitud en planta en la dirección principal de menor longitud		
Espesor de la placa		
Máximo espaciamiento de muros transversales o divisorios		
Máximo espesor de muros		
Mínimo espesor de muros		

Fuente: elaboración propia

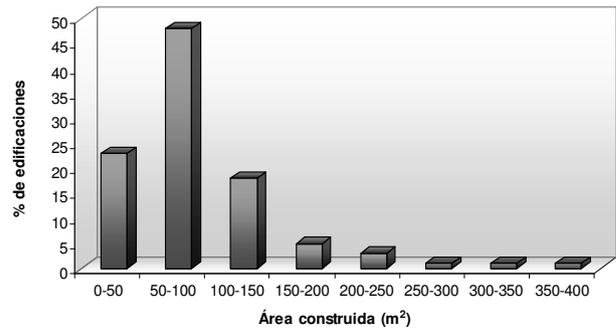
Figura 6. Primera parte del formulario de levantamiento de la información de las edificaciones en la segunda fase.

En la realización de la segunda fase se contó con el aporte de estudiantes que a partir de su trabajo de grado facilitaron el levantamiento y análisis de información (Padilla y Trujillo, 2007, Consuegra y Niño, 2007 y Percovich y Alfonso, 2006).

5. CARACTERÍSTICAS DE LAS EDIFICACIONES DE LA ZONA

De acuerdo con el inventario de los 12104 predios, se identificaron las siguientes características:

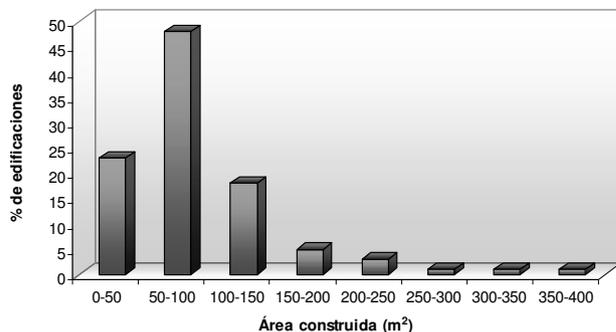
La zona es predominantemente residencial, con presencia de pequeños negocios, desarrollada en edificaciones construidas, en su mayoría, en áreas entre un rango de 50 y 100 m² (ver figura 7).



Fuente: elaboración propia

Figura 7. Clasificación de las edificaciones en función del tipo de cubierta utilizado en ellas.

La mayoría de las edificaciones se encuentran construidas en sistema de muro de mampostería (ver figura 8). En muchas edificaciones no existe conexión entre los diafragmas y los elementos verticales, esto impide que se presente un diafragma rígido que permite trabajar al sistema como un todo y produce que la losa se deslice (pérdida de apoyo de la losa o fallo de la unión losa muros) en caso de un sismo.

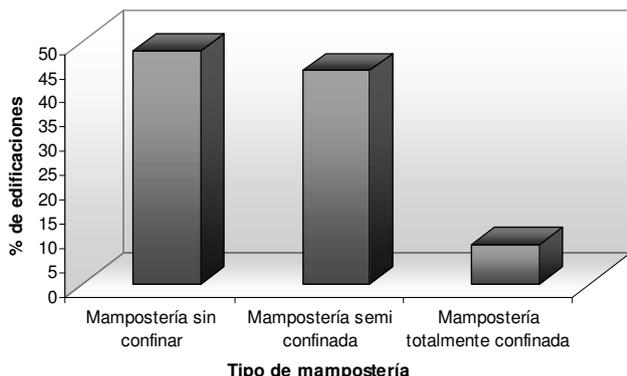


Fuente: elaboración propia

Figura 8. Clasificación de las edificaciones de acuerdo al material constructivo.

Aproximadamente la mitad de las viviendas de mampostería no están confinadas (48%) y la

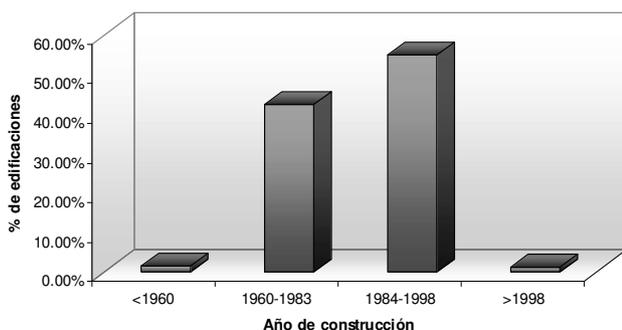
otra mitad presentan confinamiento en algunos muros de la estructura (44%) (ver figura 9). Asimismo, las pocas casas que se encuentran confinadas presentan excesiva separación entre columnas o vigas de confinamiento, lo que ocasiona que el confinamiento no sea efectivo.



Fuente: elaboración propia

Figura 9. Distribución de predios según el grado de confinamiento de la mampostería

Según la información facilitada por el señor Jorge Sánchez, técnico topógrafo del Banco Inmobiliario de Floridablanca, quien suministró verbalmente el año de construcción de los diferentes barrios de la zona de estudio, el 1.5% de las viviendas fueron construidas antes de 1960, 42.4% entre 1960-1983, 54.7% entre 1984-1998 y el 1.4% fueron construidas después de 1998 (ver figura 10).

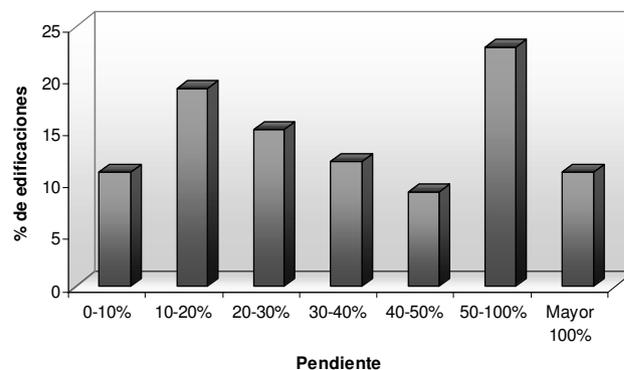


Fuente: elaboración propia

Figura 10. Clasificación de las edificaciones en función del año de construcción.

Al corresponder las edificaciones al sistema estructural de muros en mampostería, la gran mayoría son de baja altura, aun cuando el desarrollo en elevación sobre las altas pendientes hace que las edificaciones tengan un número variable de niveles dentro de ellas. Es así como se encuentran algunas edificaciones donde una fachada muestra dos niveles y la posterior tres y hasta cuatro pisos. A su vez, un patrón de desarrollo en la zona es la construcción progresiva de pisos sin las consideraciones previas del incremento de las cargas que conlleven a reforzar la edificación en los primeros niveles.

La zona de estudio presenta más de un 30% de los predios cimentados en alta pendiente (pendientes mayores al 50%) (ver figura 11). Un 31% del total de las edificaciones estudiadas tienen diferencias mayores a 1m en las cotas de la cimentación.



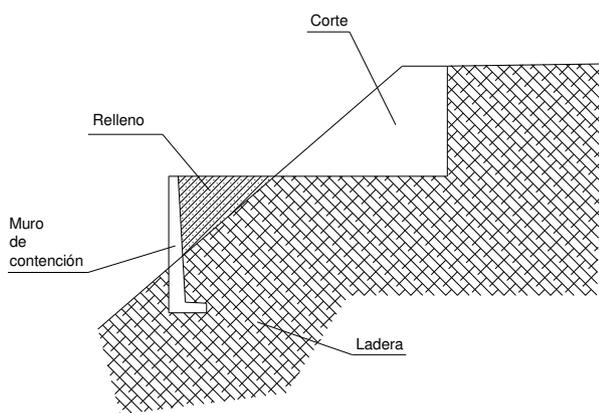
Fuente: elaboración propia

Figura 11. Distribución de predios por pendientes

Los habitantes del sector optan por dos métodos principales para la cimentación de sus viviendas: terraceo, o por disposición de elementos verticales que se extienden hasta la ladera para soportar la estructura.

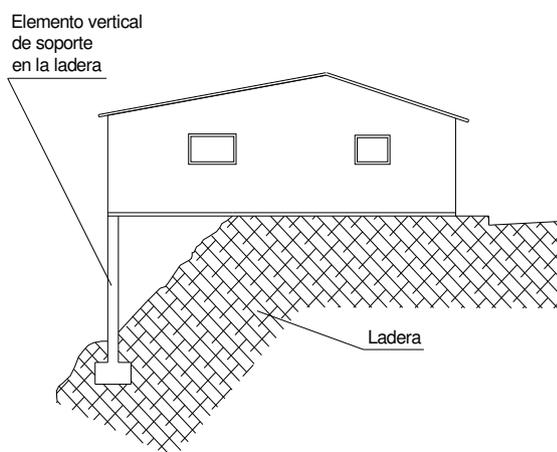
El método de terraceo consiste en realizar cortes y rellenos al talud, para lograr terrenos planos o terrazas en los cuales fundar la estructura de su vivienda. En general, las construcciones que emplean este

método lo hacen con excavación a mano, con picas y barras (ver figura 12). El otro método es el de la disposición de elementos verticales que interceptan la base del talud, este método puede resultar más crítico, debido a la esbeltez de los elementos verticales y a la cimentación sobre elementos inclinados (ver figura 13). Es tipo de cimentación es muy frecuente en otros sectores del área metropolitana de Bucaramanga, como el sector de Morrорrico ubicado en el costado oriental de la ciudad de Bucaramanga (Ardila y Méndez, 2003).



Fuente: elaboración propia

Figura 12. Terrazo para la construcción de viviendas



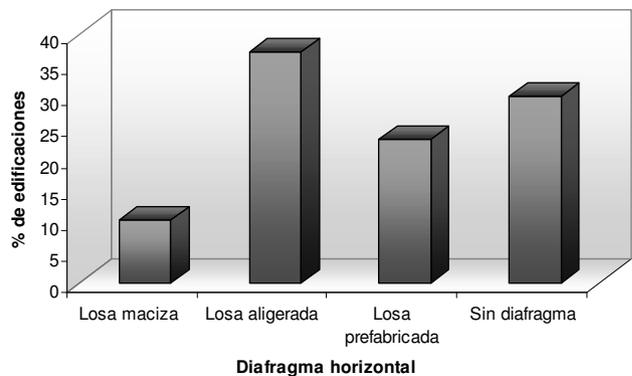
Fuente: elaboración propia

Figura 13. Vivienda a media ladera soportada en elementos esbeltos

Cuando la pendiente es muy elevada es frecuente la utilización de elementos esbeltos, los cuales dado el sistema de apoyo de las columnas y el tipo de suelo sobre el que se apoyan presentan asentamientos diferenciales los cuales contribuyen en el daño de las edificaciones.

En las zonas de más alta pendiente las casas son construidas soportando grandes empujes de tierra. Adicionalmente los terrenos presentan un nivel freático elevado; por lo tanto, el deterioro de las unidades de mampostería es más rápido debido a la acción del agua.

Es común encontrar que las placas de entrepiso se encuentran aligeradas, y no precisamente con materiales livianos, pues es común ver el ladrillo como elemento de aligeramiento. En la figura 14 se ilustran los tipos de entrepiso y las cantidades en que se presentan.

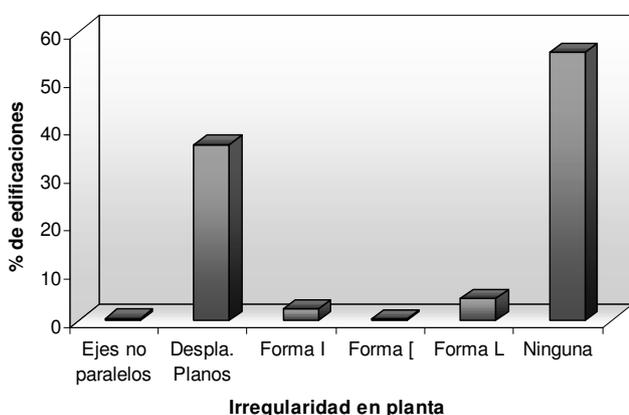


Fuente: elaboración propia

Figura 14. Clasificación de las edificaciones dependiendo del tipo de diafragma horizontal.

Al ser la mayoría de los predios de forma alargada, la diferencia entre las longitudes de los muros en una dirección con respecto a la otra es apreciable. Generalmente, los muros laterales representan los elementos principales (aquellos que se encuentran soportando las cargas verticales), y los muros en la otra dirección sirven como divisiones o fachadas las cuales, en algunos casos, cuentan con grandes aberturas. Otra irregularidad que se presenta en la zona son los denominados despla-

zamientos de los planos de acción, NSR-98. Este tipo de irregularidad se puede dar en dos formas, siendo la más común la presencia de fachadas sobre voladizos. Estos elementos no contribuyen a la resistencia sísmica de la estructura y pasan a convertirse en un elemento de gran peso que puede ocasionar una falla localizada. El otro tipo de discontinuidad es la aparición o desaparición de los elementos de confinamiento en las plantas superiores. Los tipos de irregularidades predominantes existentes en la zona se ilustran en la figura 15.

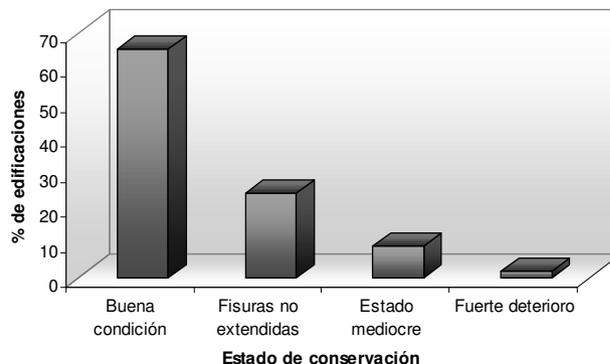


Fuente: elaboración propia

Figura 15. Distribución de predios según la irregularidad en planta.

Existe una tendencia generalizada a no dejar el espaciamiento adecuado entre edificaciones adyacentes. Lo anterior, en algunas ocasiones, incrementa los niveles de daño en caso que las edificaciones tengan varios pisos y las placas de entrepiso no se encuentren a la misma altura, formándose mecanismos de colapso locales debido a los altos niveles de cortante que la placa puede llegar a aplicar sobre los muros de la casa adyacente.

Los muros de las viviendas de la zona de estudio presentan, en su mayoría, un buen estado de conservación; sólo un pequeño número de estructuras (10% del total), cuenta con materiales de baja calidad o deteriorados (ver figura 16).



Fuente: elaboración propia

Figura 16. Distribución de predios según el estado de conservación.

En lo referente a la construcción de las edificaciones, la colocación de la mampostería se presenta las siguientes características: se utilizan de varios tipos de mampostería, lo que conlleva a estructuras no muy homogéneas y se observan zonas de los muros donde no existe mortero o zonas donde el mortero tiene un espesor menor a 0.7 cm o mayor a 1.3 cm.

6. ESCENARIOS SÍSMICOS

El estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga (Ingeominas-CDMB, 2002) define dos escenarios sísmicos controlados por la posible ocurrencia de un sismo a lo largo de las Fallas Bucaramanga-Santa Marta y a la Falla frontal. En ambos casos, el nivel de amenaza corresponde a una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, es decir, un periodo de retorno de 475 años.

El valor de aceleración máxima del terreno reportada en el estudio para la fuente sismogénica Bucaramanga-Santa Marta es de 0.16g y de 0.21g para la fuente sísmica falla Frontal de los Llanos orientales. Estos dos escenarios se han tomado como insumo al evaluar los niveles de daño de las edificaciones.

De acuerdo con el modelo de estimación de daño se cuenta con 6 funciones de vulnerabilidad definidas para valores de A_a entre 0.02g y 0.25g, para el caso de estudio se seleccionan dos de ellas las cuales se relacionan directamente con los escenarios asociados a la Falla Bucaramanga - Santa Marta y la Falla Frontal, ver la tabla 2.

Tabla 2. Selección de las funciones de vulnerabilidad en función del escenario sísmico más probable.

Función de Vulnerabilidad	Aceleración Pico Efectiva (A_a)	Escenario Probable
1	0.02g	
2	0.05g	
3	0.10g	
4	0.15g	Falla Bucaramanga-Santa Marta
5	0.20g	
6	0.25g	Falla Frontal

Fuente: elaboración propia

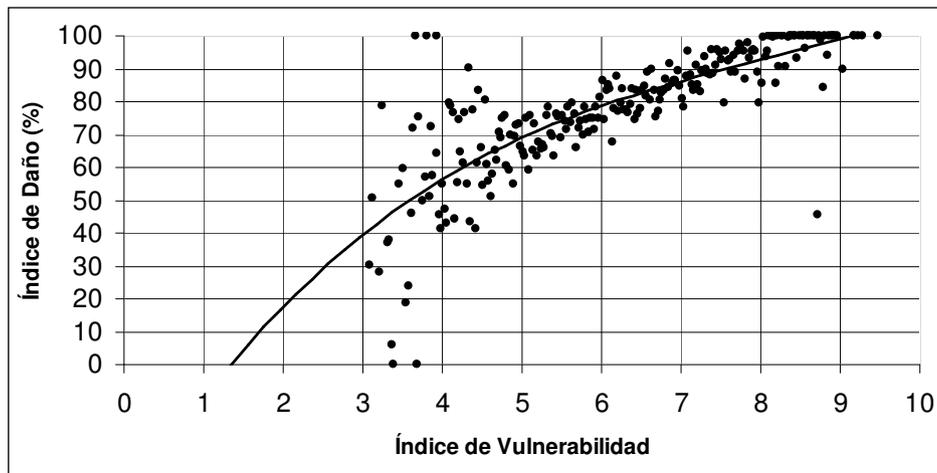
7. EVALUACIÓN DEL DAÑO

Para la evaluación de los niveles de daño de las edificaciones de Floridablanca ante los dos posibles eventos sísmicos se contó con las funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño para una aceleración máxima de 0,15 y 0,20 g, ver figuras 17 y 18 y tablas 3 y 4.

Tabla 3. Matriz de probabilidad de daño para A_a igual a 0,16g

P(D/ $V, A_a=0,16$)	Rango de Daño				
	0-5	6-20	21-45	46-80	81-100
3-5	11,89%	8,11%	15,00%	16,89%	48,11%
5-7	5,70%	5,25%	10,48%	12,92%	65,65%
7-10	2,35%	1,33%	2,82%	8,31%	85,18%

Fuente: elaboración propia



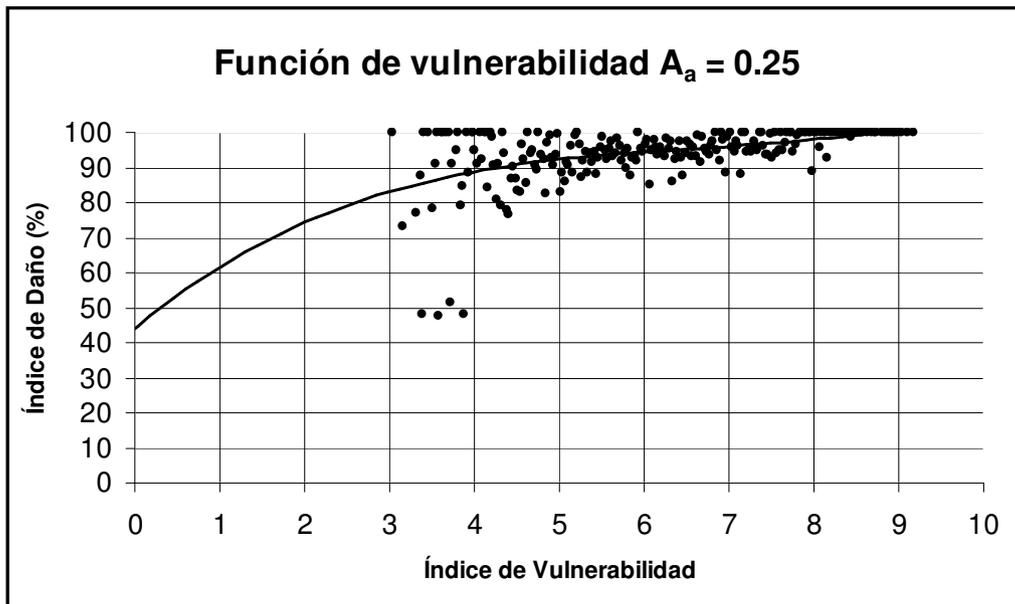
Fuente: elaboración propia

Figura 17. Función de vulnerabilidad utilizada para el escenario asociado a la Falla Bucaramanga Santa Marta, A_a igual a 0,16g.

Tabla 4. Matriz de probabilidad de daño para A_a igual a 0,21g

P(D/V, $A_a=0.21$)	Rango de Daño				
	0-5	6-20	21-45	46-80	81-100
3-5	1,11%	1,89%	5,11%	9,44%	82,44%
5-7	0,94%	0,65%	2,33%	6,69%	89,39%
7-10	1,10%	0,47%	0,39%	1,49%	96,55%

Fuente: elaboración propia



Fuente: elaboración propia

Figura 18. Función de vulnerabilidad utilizada para el escenario sísmico asociado a la Falla Frontal, A_a igual a 0.21g.

Establecida la metodología para calcular el daño, definidos los escenarios de daño e inventariada las edificaciones de la zona de estudio se procedió a estimar el daño para los

dos posibles eventos sísmicos. El resultado obtenido por manzana se visualiza en los mapas de daño para cada uno de los escenarios, ver figura 19 y 20.

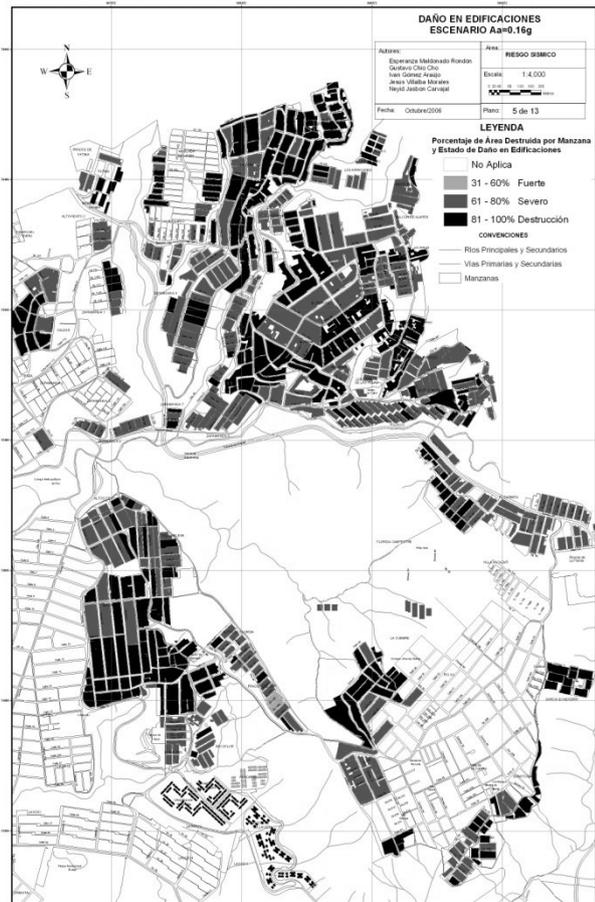
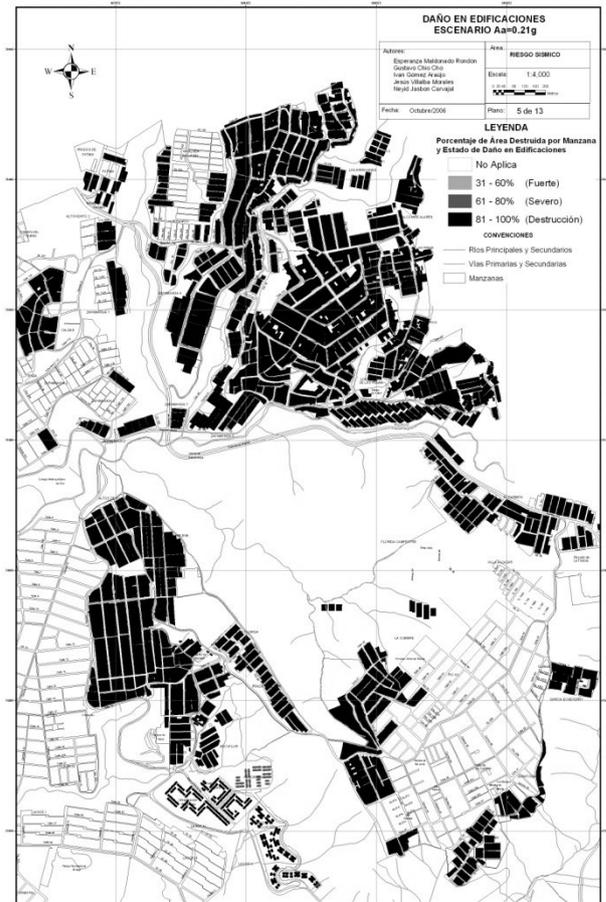


Figura 19. Mapa de daño para el escenario asociado a la Falla Bucaramanga Santa Marta, A_a igual a 0.16g.



Fuente: elaboración propia

Figura 20. Mapa de daño para el escenario sísmico asociado a la Falla Frontal, A_a igual a 0.21g.

CONCLUSIONES

Mediante el presente estudio se aplican funciones de vulnerabilidad sísmica obtenidas mediante técnicas de simulación (Montecarlo, es decir, a través de la generación aleatoria de los parámetros que intervienen en la determinación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de mampostería, y la consecuente evaluación del daño global que puede llegar a sufrir la edificación simulada frente a una acción sísmica.

El modelo de construcción de las funciones de vulnerabilidad por medio de la simulación fue propuesto, por la falta de información de datos

reales y ante la necesidad de conocer el nivel de daño que pueden alcanzar las edificaciones frente a la acción de un sismo. Las funciones no han sido calibradas por la falta de datos reales de daño de las edificaciones para las que fueron construidas; tan solo han sido comparadas con las propuestas por Guagenti y Petrini (1989). En la comparación se encontró similitud entre ellas, especialmente para los valores de daño alcanzados a aceleraciones de 0,2g y 0,25g.

El área de estudio corresponde a una zona de Floridablanca dentro del Área Metropolitana de Bucaramanga caracterizada por su topografía

de alta pendiente, cercanía a la zona de la Falla Bucaramanga-Santa Marta y por la falta de uso de una normativa sismorresistente en el diseño y construcción de sus edificaciones.

Los alcances de este trabajo se han limitado a la información disponible, factible y justificable de conseguir sobre la amenaza en la zona de estudio. Por tal razón, las valoraciones y estimaciones resultantes del presente estudio tienen asociadas diversas incertidumbres que provienen de la intensidad del movimiento del suelo considerada.

Del análisis de los resultados de los mapas de daño y de las características de las edificaciones de la zona de estudio se concluye que la vulnerabilidad de las estructuras está asociada a: a) Aspectos estructurales como mal confinamiento, crecimiento en altura de las edificaciones y elementos de gran peso en la parte superior, cantidad insuficiente de muros en la dirección más corta, irregularidades en planta y altura, unión incorrecta de los diafragmas, inexistencia de separación entre estructuras adyacentes; b) Aspectos constructivos como mala calidad, deterioro de los materiales y costumbres constructivas deficientes; c) Aspectos asociados a la cimentación como construcción de cimientos sobre terrenos de alta pendiente; d) Aspectos asociados al suelo como existencia de coluviones y de zonas propensas a deslizamientos y e) Aspectos asociados al entorno como empujes de tierra y niveles freáticos altos y cercanía a la zona de la Falla Bucaramanga-Santa Marta.

Uno de los grandes problemas de la zona es el estar poblada con edificaciones de mampostería que no cuentan con confinamiento y que por consiguiente no poseen las características requeridas en una edificación ubicada en una zona de alta amenaza sísmica y con condiciones topográficas de alta pendiente.

El objetivo último del artículo, una vez cuantificado el nivel de daño que se puede alcanzar cuando ocurre un evento sísmico, es la propuesta

de medidas a seguir para disminuir el riesgo. Para el caso de Floridablanca las medidas están orientadas a mejorar las condiciones de las estructuras existentes, recomendaciones para las nuevas construcciones y aspectos generales para estar mejor preparados durante y después del evento sísmico. Sin embargo, dados los niveles de daño que se pueden lograr para los dos escenarios estudiados, el nivel de riesgo es tan alto que las medidas que se tomen tan solo lo disminuirán pero las pérdidas que se pueden producir seguirán siendo significativas. Por consiguiente, se le hace un llamado a las entidades gubernamentales para prevenir el desarrollo urbano en zonas no planeadas para la construcción de las edificaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo de la Universidad Industrial de Santander, COLCIENCIAS y la Alcaldía de Floridablanca.

REFERENCIAS

- ABRAMS, D. P. (1992). Strength and behavior of unreinforced masonry elements. Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, España.
- ALCALDÍA DE FLORIDABLANCA. (2006). (a) Mapa topográfico y cartográfico del municipio de Floridablanca.
- ALCALDÍA DE FLORIDABLANCA. (2006). (b) Información de niveles socioeconómicos de la zona.
- ARDILA, R. y MÉNDEZ A. (2003). Caracterización dinámica de las edificaciones ubicadas en el sector de Morrorrico (Bucaramanga). Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98, Bogotá, Imprenta Nacional de Colombia.
- BENEDETTI D., PETRINI V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Prioste di un método di valutazione, Lindustria delle Costruzioni, Roma, Italia.

- CASTILLO, A. (2005). Seismic risk scenarios for buildings in Mérida, Venezuela. Detailed vulnerability assessment for non-engineered housing. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- CONSUEGRA, J. F. y NIÑO, C. (2007). Análisis paramétrico al variar la geometría de los muros de mampostería en casas de uno y dos pisos. Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- INGEOMINAS - CDMB. (2002). Microzonificación sísmogeotécnica indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. Bucaramanga.
- JIMÉNEZ, J. (2002). Vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la ciudad de Cuenca mediante técnicas de simulación, Quito, Ecuador.
- MALDONADO, E., CHÍO, G. y GÓMEZ, I. (2007). Aplicación de los conjuntos difusos en la evaluación de los parámetros de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de mampostería. Artículo aceptado para su publicación en la revista Ingeniería y Universidad de la Universidad Javeriana.
- MALDONADO, E., GÓMEZ, I y CHÍO, G. (2008). Funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño sísmico para edificaciones mampostería utilizando técnicas de simulación. *Dyna*, 75, (155), pp. 63-76. Medellín, Julio de 2008.
- MALDONADO, E. y CHÍO, G. (2007). Visión estructural de las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga, Ediciones Universidad Industrial de Santander.
- MENA, U. (2002). Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas. Tesis doctoral, Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.
- OLARTE, L. (2006). Metodología para la evaluación del riesgo debido a amenazas naturales en zonas urbanas de ciudades colombianas. Caso de estudio: Floridablanca. Componente social, diagnóstico y planeación. Informe final de Práctica de Trabajo Social, Escuela de Trabajo Social, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- PADILLA, J. A. & TRUJILLO, H. (2007). Evaluación de la respuesta sísmica por el efecto de la pendiente del terreno en un edificio aporticado. Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- PERCOVICH, C. A. & ALFONSO, E. W. (2006). Caracterización dinámica de las edificaciones del sector Cumbre, Santana, El Carmen, Altos de Villabel y Zapamanga. Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- REY, A. & BELTRÁN, R. (2002). Comportamiento estructural asociado al sistema de fallas Bucaramanga - Santa Marta y diaclasas, para definir una red de drenaje subterráneo en el macizo de Santander, sección entre Piedecuesta (Río de Oro) y Bucaramanga (Río Surata), Trabajo de grado, Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- SÁNCHEZ, J. (2006). Información verbal, Alcaldía de Floridablanca.
- UIS & ALCALDÍA DE FLORIDABLANCA (2006). Metodología para la evaluación del riesgo debido a amenazas naturales en zonas urbanas de ciudades colombianas. Caso de estudio Floridablanca. Fase I Riesgo sísmico. Convenio interadministrativo 012-2006.
- YÉPEZ, F. (1996). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación, Tesis Doctoral, Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña.