

ESTIMACIÓN DE ESCENARIOS DE PÉRDIDAS

Riesgo Sísmico Físico de Bogotá

Omar Darío Cardona A.¹, Luis Eduardo Yamín L.²

Desde 1994, con el apoyo financiero del gobierno nacional y distrital, la Universidad de los Andes y el Ingeominas han venido adelantando estudios para evaluar más detalladamente la amenaza y el riesgo sísmico urbano de Santafé de Bogotá. Una vez realizada la microzonificación sísmica, para lo cual se llevaron a cabo estudios del comportamiento dinámico de los suelos, análisis de acelerogramas y estudios de microtrepidaciones en una amplia área de la capital del país, se estimaron los diferentes escenarios de pérdidas que podrían sufrir los diferentes tipos de estructuras e infraestructura de líneas vitales de la ciudad ante tres sismos hipotéticos probables. Estas estimaciones de pérdidas están siendo usadas por las autoridades nacionales y distritales de prevención y atención de desastres para actualizar sus planes de emergencia y contingencia y para promover programas de educación e información pública. También, nuevas exigencias y requisitos sismorresistentes y de planificación urbana están siendo considerados y la intervención o rehabilitación de edificaciones claves existentes está siendo fomentada por la administración de la ciudad con fines de reducción del riesgo sísmico.

PROYECTO DE MITIGACIÓN DE RIESGO SÍSMICO

La ciudad de Bogotá, Distrito Capital de Colombia, está localizada en las inmediaciones de un ambiente sismotectónico que demuestra, desde el punto de vista geológico, actividad sísmica reciente, aunque desde el punto de vista histórico no se tenga la percepción de dicha actividad debido a la baja frecuencia relativa de eventos importantes. Esta aparente contradicción debe verse con extrema cautela dado que no es correcto suponer que como en los últimos años no ha ocurrido un sismo intenso así han de seguir las cosas. El sismo del 19 de enero de 1995, de magnitud 6.5 grados Richter que ocurrió a 120 km de Bogotá, tuvo una aceleración de sólo el 3 % g (después de amplificado por el suelo), es decir 7 veces menos que el valor máximo probable esperado (20 % g) para el cual se deben diseñar los edificios en la ciudad; no obstante este evento causó 5 víctimas, 28 heridos, daños en 40 edificios, crisis en los sistemas de comunicaciones, 30 accidentes de tránsito y dos incendios en la capital.

Teniendo en cuenta el nivel de la amenaza y riesgo sísmico de Bogotá, las entidades del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres consideraron de especial importancia formular un proyecto integral de mitigación del riesgo sísmico para la ciudad, el cual hace parte actualmente de su plan de desarrollo económico y social *Formar Ciudad*. El Gobierno Nacional y la Alcaldía Mayor de Bogotá convocaron al Instituto de Geociencias, Minería y Química Ingeominas y a la Universidad de los Andes para que adelantaran los

¹ Presidente, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Profesor Catedrático, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá.

² Director, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Apartado 4976, Bogotá.

estudios de microzonificación sísmica del suelo y la estimación del grado de vulnerabilidad que ofrecen las edificaciones, los servicios públicos y en general el contexto material de la ciudad ante sismos probables que se pueden presentar en la zona, con el fin de aportar esta información a otras entidades del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Desastres quienes, de acuerdo con el ámbito de su competencia, tienen la responsabilidad de aplicar medidas de mitigación del riesgo sísmico y de preparación para emergencias. Aunque proyectos similares se han desarrollado en otras ciudades intermedias, este proyecto es el primer en el país, en el cual se han desarrollado en su totalidad todos los pasos y actividades interinstitucionales y multidisciplinarias.

Este artículo presenta un resumen de la base conceptual, los análisis, los resultados y las aplicaciones de los estudios de microzonificación sísmica y de la estimación de los escenarios de pérdidas en caso de sismos probables, establecidos por los estudios de amenaza sísmica y el comportamiento de los suelos en el área donde se encuentra localizada la ciudad. El objetivo de este trabajo ha sido dar a conocer de manera técnica y científica el riesgo sísmico de Bogotá a las autoridades competentes y orientarlas mediante la recomendación de las actividades pertinentes para su mitigación; aspectos de especial importancia para el desarrollo urbano y la seguridad de la ciudad y el país.

El Proyecto Integral de Mitigación de Riesgo Sísmico de Bogotá se puede subdividir en general en tres grandes componentes:

1. Evaluación de la amenaza y microzonificación sísmica de la ciudad.
2. Estimación de los escenarios de pérdidas sísmicas.
3. Formulación y aplicación de medidas de mitigación del riesgo sísmico.

A continuación se hace una descripción general de los tres componentes mencionados, de los cuales más adelante se hará especial énfasis en la estimación de los escenarios de pérdidas sísmicas, debido al alcance y propósito de esta publicación.

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA Y MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

No obstante que existía un estudio general de amenaza sísmica de Colombia realizado en 1983, el cual está siendo actualizado (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1996), como parte del proyecto se llevó a cabo un nuevo análisis detallado de la amenaza sísmica regional y local de Bogotá. El Ingeominas y la Universidad de los Andes llevaron a cabo un trabajo conjunto de sismología histórica, tectónica regional y neotectónica con el fin de precisar las trazas y la actividad de las fallas geológicas más importantes del área en donde se encuentra la ciudad. Igualmente, se llevó a cabo una revisión y ajuste del catálogo sísmico de eventos, el cual ha sido alimentado de manera notable en los últimos años con sismos registrados tanto en acelerómetros digitales como en las estaciones sismológicas de la nueva red sismológica nacional que opera vía satélite desde 1991.

Del estudio de amenaza sísmica se pudo obtener que Bogotá se encuentra amenazada principalmente por el conjunto de fallas que conforman la falla Frontal de la Cordillera Oriental, las cuales pueden llegar a tener eventos del orden de 7 a 7.5 grados en la escala de magnitudes de Richter a una distancia del orden de 60 km al oriente de la ciudad. Sin embargo, la existencia de otras fallas activas alrededor y el potencial de ocurrencia de sismos lejanos que pueden amplificarse notablemente debido a las propiedades del suelo de la ciudad, ratifica que la

amenaza sísmica de Bogotá no depende de una sola fuente sismogénica sino de una amplia provincia de accidentes geotéctónicos.

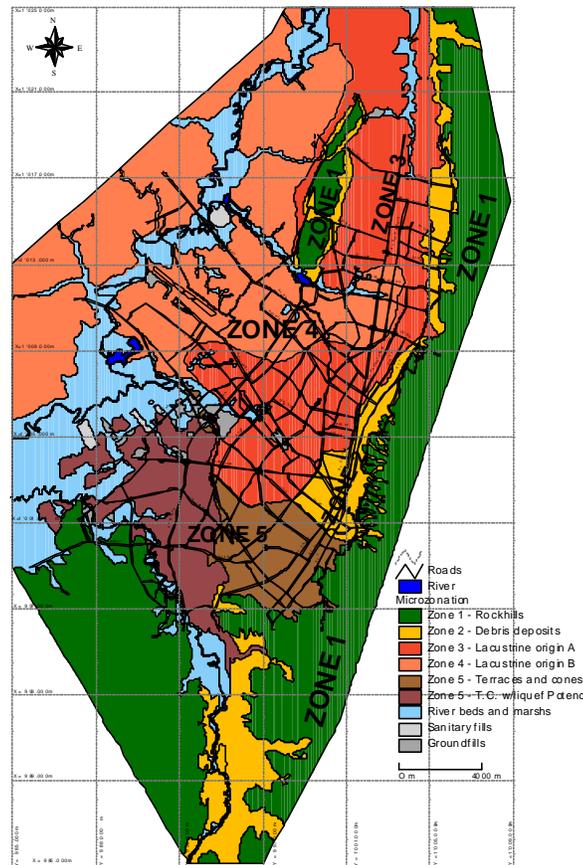


Figura 1. Mapa de Microzonificación Sísmica de Bogotá

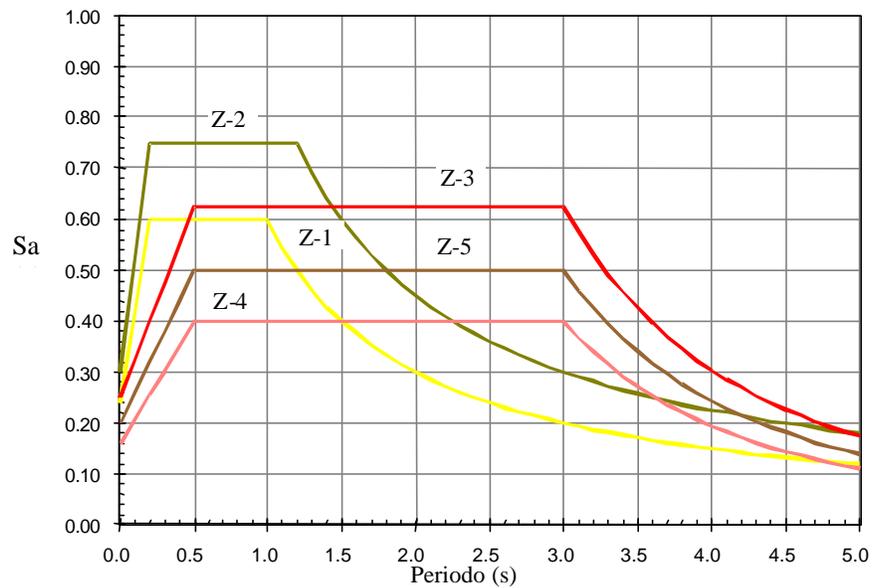


Figura 2. Espectros de aceleración, S_a vs. Período para cada zona

Teniendo en cuenta la información existente y complementándola con nuevos estudios geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos y geofísicos (gravimetría, microtremores, down hole, refracción, reflexión), se propuso un mapa de zonificación sismogeotécnica, tanto de la zona plana de origen lacustre como de los cerros orientales de la ciudad, de acuerdo con los modelos de respuesta sísmica unidimensional y bidimensional evaluados y calibrados con el programa SHAKE 91 y mediante modelos de elementos finitos utilizando el programa generador de mallas ANSYS y QUAD4M (Idriss *et al.*, 1992). Esta modelación se obtuvo utilizando registros de aceleración reales y artificiales en roca y en el suelo blando de la ciudad. Se realizaron cerca de 117 mediciones de microtremores, lo cual permitió obtener un mapa de períodos de vibración predominante (Yamín, Ojeda, 1995) y 38 perforaciones profundas entre los 20 y los 200 m que permitieron caracterizar, mediante ensayos dinámicos de laboratorio, los tipos de suelos de Bogotá. Se encontró que estos suelos, que tienen un comportamiento elástico sorprendente, amplifican entre 3 a 10 veces, o más, la aceleración máxima registrada en la roca. Igualmente, se encontró un efecto de amplificación por topografía notable que puede significar la ocurrencia de deslizamientos en algunos sitios en los cerros orientales de la ciudad.

La figura 1 corresponde de zonificación sismogeotécnica, en el cual se diferenciaron cinco zonas para las cuales se determinaron los espectros de diseño con los cuales se deben analizar y diseñar las edificaciones en cada zona, figura 2. Utilizando esta metodología se obtuvieron igualmente los valores de aceleración espectral para otros sismos de menor intensidad, con el fin de estimar otros escenarios de pérdidas potenciales en la ciudad en caso de sismos moderados. La metodología desarrollada para la determinación de los daños en edificaciones y líneas vitales parte del conocimiento de la respuesta espectral para cada escenario sísmico hipotético, en cada una de las zonas identificadas en la microzonificación sísmica de la ciudad.

ESTIMACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PERDIDAS SÍMICAS

Para efectos de este estudio se consideraron tres escenarios hipotéticos de riesgo sísmico, teniendo en cuenta la incidencia que tendrían: a) un sismo de origen lejano, ubicado por ejemplo en la zona de subducción, similar a los sismos que afectaron a la ciudad de México en septiembre de 1985, cuya aceleración en el lecho rocoso podría ser del orden de 0.03g; b) un sismo ubicado en la Falla Frontal de la Cordillera Oriental, aproximadamente a 60 km de distancia de la ciudad, cuya aceleración en la roca sería del orden de 0.12g, que tiene una probabilidad de excedencia del 40% en 50 años y cuyo período de retorno promedio sería del orden de 100 años, el cual podría considerarse un sismo moderado equivalente a los terremotos que afectaron a Bogotá en 1785, 1827 y 1917; y c) un sismo también ubicado en la Falla Frontal, con una magnitud que podría ser del orden de 7.2 en la escala de Richter, con una duración podría alcanzar los 60 segundos y que generaría una aceleración en la roca bajo los suelos de la ciudad del orden de 0.20g. Este sismo cuya probabilidad de excedencia es del 10% en 50 años, corresponde a un evento cuyo período de retorno es de 475 años, y aunque no hay indicios de que haya ocurrido en tiempos históricos, se utiliza como el sismo máximo para el cual se deben diseñar las edificaciones en Bogotá. Estos tres sismos probables y particularmente los dos últimos escenarios tendrían las mayores consecuencias para la ciudad y la nación dado que seguramente desbordarían sus capacidades de respuesta.

El alcance del estudio y el tipo de metodología se definieron teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La escala del espacio geográfico involucrado;
- El tipo de decisiones de mitigación que se esperaban tomar;
- La información disponible, factible y justificable de conseguir;
- La importancia económica y social de los elementos expuestos; y
- La consistencia entre los niveles de resolución posibles de obtener en cada etapa de la evaluación.

Se realizó una amplia revisión y adaptación metodológica que permitiera de acuerdo con el tamaño de la ciudad, la información disponible, la resolución factible del estudio y el tipo de resultados creíbles esperados que permitieran llevar a cabo un estudio de utilidad para la Administración del Distrito Capital en términos de la planificación de la ciudad y los preparativos para la atención de una eventual emergencia sísmica. De acuerdo con la clasificación realizada por el Committee on Earthquake Engineering of the Division of Natural Hazard Mitigation of National Research Council de los Estados Unidos, este estudio puede considerarse del tipo II, III y V, (FEMA-177, 1989).

Es importante mencionar que para las evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo sísmico deben realizarse modelaciones que permitan llevar a cabo estimaciones descriptivas en forma de escenarios cuyas valores corresponden a "ordenes de magnitud" del tipo de situaciones que dichos escenarios representarían. Cada valoración tiene asociadas incertidumbres que se derivan de diferentes fuentes. Primero hay una incertidumbre en la intensidad del movimiento del suelo y los efectos colaterales o fallas en el mismo para un evento dado. Segundo existe incertidumbre en el daño estimado causado por la intensidad del movimiento del suelo o sus efectos colaterales. Tercero existe incertidumbre en la estimación de las pérdidas asociadas al daño en un elemento expuesto. Finalmente existe incertidumbre en el proceso de inventario del número de elementos expuestos, en la clasificación de los mismos y en el área geográfica en la cual están ubicados. No obstante que se podría llevar a cabo, con un esfuerzo adicional, un análisis siempre más preciso en cada caso, de todas maneras es inevitable que existan incertidumbres en un estudio práctico de esta naturaleza; por esta razón para Bogotá se delimitó el alcance y su responsabilidad técnica asociada, definiéndolas de manera explícita así:

ESTE ESTUDIO HA SIDO REALIZADO EXCLUSIVAMENTE CON PROPÓSITOS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO, TOMA DE CONCIENCIA Y PLANIFICACIÓN PARA LA ATENCIÓN DE POSIBLES EMERGENCIAS ORIGINADAS POR TERREMOTOS. SUS ESTIMACIONES SON HIPOTÉTICAS Y ESTÁN BASADAS EN QUE LOS SIGUIENTES HECHOS SE PRESENTEN: 1. LA OCURRENCIA DE UN SISMO CON LAS MISMAS CARACTERÍSTICAS QUE LOS PROPUESTOS. 2. QUE SE EXPERIMENTE UN MOVIMIENTO DEL SUELO COMO LOS DESCRITOS PARA CADA ESCENARIO ESTUDIADO. 3. QUE SE PRESENTEN DAÑOS EN ALGUNOS ELEMENTOS EXPUESTOS Y EN OTROS NO. POR LO TANTO, UN TERREMOTO DE CARACTERÍSTICAS DIFERENTES PODRÍA GENERAR CONSECUENCIAS MARCADA-MENTE DISTINTAS A LAS PROYECTADAS CON LOS PATRONES DE DAÑOS Y PERDIDAS UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO.

Considerando el proceso de agregación de una metodología como la desarrollada, es importante mencionar que en un sitio como Bogotá, en el cual no existe la forma de llevar a cabo una calibración con base en un sismo significativo reciente, el nivel de incertidumbre puede llegar a ser equivalente a un factor del orden de 5 para la estimación de los daños y de 10 para la estimación del número de víctimas. No obstante, las estimaciones obtenidas han sido consideradas de especial significación para la toma de conciencia, la reducción de riesgos y los preparativos para la atención de emergencias en la ciudad. Finalmente, es importante mencionar

que no se han realizado estimaciones de pérdidas directas para amenazas colaterales o de segundo orden, tales como desplazamiento de fallas en superficie, deslizamientos, licuación de suelos ni de pérdidas indirectas causadas por incendios o escape de sustancias tóxicas. El alcance de este estudio no consideró evaluaciones del impacto social ni de costos de rehabilitación y reconstrucción.

FORMULACIÓN Y APLICACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN

La administración de la ciudad de Bogotá cuenta con una oficina coordinadora del comité distrital de prevención y atención de desastres, la cual acordó con la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, ente coordinador nacional del sistema, la realización de estos estudios con fines de mitigación del riesgo sísmico. Siendo su financiación realizada exclusivamente con recursos de la ciudad y la nación.

No obstante que el proyecto se inició en 1994, desde tiempo atrás los sistemas nacional y distrital para la prevención y atención de desastres, ha venido adelantando campañas educativas en los colegios y las comunidades, promoviendo las normas sismorresistentes, la intervención de la vulnerabilidad de edificaciones y promoviendo los preparativos para emergencias. Aspectos que actualmente se están consolidando una vez conocidos los resultados de los estudios de microzonificación y estimación de pérdidas ante futuros terremotos.

Dentro de las medidas de mitigación que se han realizado recientemente o que están en curso se pueden mencionar las siguientes:

- Actualización de la norma sísmica de edificaciones de Bogotá, mediante su aprobación por el concejo de la ciudad.
- Aporte metodológico para la elaboración de microzonificaciones sismogeotécnicas, estimación de daños y evaluación de vulnerabilidad y diseño de edificaciones indispensables, acogido por la nueva Norma Sísmica Colombiana que se encuentra en el Congreso de la República para su aprobación.
- Instrumentación adicional de la ciudad con acelerómetros tanto en la superficie como en la roca a 200 m de profundidad, con fines de calibración y seguimiento.
- Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de hospitales y diseño de su rehabilitación y reforzamiento estructural, no-estructural y funcional.
- Análisis de vulnerabilidad sísmica, diseño y construcción del reforzamiento de los edificios del Centro Administrativo Distrital (sede de la administración local).
- Evaluación detallada de vulnerabilidad de puntos críticos de líneas vitales y creación de normas para el diseño de las redes de gas a nivel urbano.
- Fortalecimiento de las actividades educación, capacitación y participación comunitaria.
- Revisión del Sistema Unificado de Manejo de Emergencias SUME, con el fin de mejorar y complementar las medidas de repuesta y preparación para la atención de emergencias sísmicas.

VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICACIONES

El análisis del potencial de daños se realizó llevando a cabo una identificación del tipo de edificaciones que se han construido en la ciudad desde su fundación. Para el efecto fue necesario hacer un a revisión del crecimiento histórico de Bogotá y de la manera como las tecnologías de

la construcción se fueron modificando con el pasar del tiempo. Por otra parte y teniendo en cuenta que las tipologías de construcción también cambian de acuerdo con la capacidad económica, fue necesario hacer un análisis de los estratos socioeconómicos y de la información que en relación con las zonas de uso, limitación de altura de las edificaciones y zonas de tratamiento tiene la Secretaría de Planeación de la ciudad. Finalmente, con base en información sistematizada del Catastro Distrital y una amplia verificación en el campo realizada por cuadrillas de evaluadores se logró desarrollar una base de información que permitiera conocer qué tipo de tipologías de edificaciones son las más comunes en la ciudad y la manera como están distribuidas en cada una de las manzanas, barrios y sectores de la ciudad.

Teniendo en cuenta que las propiedades dinámicas y las características de resistencia, rigidez y disipación de energía inelástica de las edificaciones ante los terremotos varían notablemente dependiendo del tipo de material del sistema estructural, de la altura, de la técnica de construcción, de la edad, y de otros factores; se consideraron las tipologías y características indicadas en el la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de edificaciones.

<u>TIPOS DE ESTRUCTURAS</u>	<u>USO</u>	<u>AÑO DE CONSTRUCCION</u>
1. Mampostería, 1-2 pisos	1. Residencial	1. Post código
2. Mampostería >= 3 pisos	2. Comercial	2. Moderna
3. Pórticos de CR hasta 5 pisos	3. Education	3. Premoderna
4. Pórticos de CR 5-10 pisos	4. Salud	
5. Pórticos de CR más de 10	5. Institucional	<u>ENTREPISOS</u>
6. Industrial liviana	6. Industrial	1. Concreto
7. Industrial pesada	7. Otro	2. Madera
8. Informal liviana		3. Otro
9. Informal pesada	<u>CUBIERTA</u>	<u>MANTENIMIENTO</u>
10. Otras	1. Liviana	1. Bueno
	2. Teja de barro	2. Regular
	3. Placa	3. Malo

Es importante notar que este tipo de clasificación se definió de acuerdo con las características arquitectónicas y constructivas observadas del conjunto general de edificaciones de la ciudad. No menos del 85% de la población se encuentra alojada en edificaciones de uno y dos pisos típicamente de mampostería. Un amplio número de los conjuntos multifamiliares tienen como límite superior los cinco pisos debido a la reglamentación urbana y a los requerimientos de ascensores en los edificios. Los edificios con estructuras metálicas no se consideran como una tipología adicional, ya que al momento de llevar a cabo este trabajo sólo se habían construido en la ciudad cerca de 30 edificios aporticados en acero.

El levantamiento de la información consistió en identificar en cada una de las manzanas de la ciudad las tipologías de las edificaciones, determinar la cantidad de área construida aproximada de las mismas y sus principales características. Utilizando los planos más recientes de la ciudad, elaborados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escala 1:2000, y con la ayuda de una planilla debidamente diseñada para el efecto se identificaron, la manzana, el número de la edificación y sus características. Para efectos de determinar la altura de las edificaciones se utilizaron fotografías aéreas laterales similares a las publicadas en el libro "Bogotá desde el Aire" , (Horney J., et al, 1994), las cuales permitían conocer la altura de las

edificaciones por el ángulo en que fueron tomadas, a diferencia de las fotografías aéreas típicas. Igualmente se utilizó información de la Secretaría de Planeación y el Catastro Distrital, y finalmente de las visitas de los grupos técnicos de verificación que recorrieron la ciudad, realizando inspecciones manzana por manzana en las zonas donde la heterogeneidad de las tipologías así lo ameritaban.

En total se cubrió una área de 405 km², correspondiente a 46.000 manzanas sobre un perímetro de la ciudad del orden de 92 km. El área construida total sumó 317 millones de metros cuadrados, donde las estructuras informales y de mampostería son el 66%, los pórticos de concreto reforzado hasta de 5 pisos son el 20% y los pórticos mayores a 5 pisos son el 9%. En las tomas aéreas laterales se puede detectar la heterogeneidad de la zona centro-oriente de la ciudad y la homogeneidad del sur, el occidente y el nor-occidente, debido al patrón repetitivo de las edificaciones a nivel de la vivienda informal o de los complejos de vivienda multifamiliares de bloques de varios pisos o unifamiliares en urbanizaciones o conjuntos cerrados.

Una vez obtenida la información por manzanas se llevó a cabo una sectorización de la ciudad por "celdas", las cuales pasaron a ser las unidades de análisis del estudio. Esto con el fin de presentar la información adecuadamente mediante un SIG. En cada celda la aceleración del suelo se consideró constante y se trató de mantener cierta homogeneidad de acuerdo con la distribución de las tipologías estructurales; además, sus perímetros se hicieron coincidir en su mayor parte con límites físicos existentes tales como vías principales, ríos y parques, como también con los límites de la sectorización de las alcaldías menores de la ciudad.

FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

Con el fin de determinar los diferentes niveles de daño que puede presentar una edificación, se adoptó la metodología ya ampliamente generalizada propuesta en el ATC-13 (Applied Technology Council, 1985) basada en Estados de Daño.

Tabla 1. Estados de Daño

Factor de Daño	Rango de Daño %	Factor Central de Daño
Ninguno	0	0
Leve	(0-1)	0.5
Ligero	(1-10)	5
Moderado	(10-30)	20
Fuerte	(30-60)	45
Severo	(60-100)	80
Destrucción	100	100

Estos valores de probabilidad de daño para cada valor de intensidad sísmica propuestos por el método ATC-13, son basados en las matrices de probabilidad de daños desarrolladas por Whitman et al. (1973), aplicando la técnica estadística del Método Delphi, en el cual se utilizó el criterio y las apreciaciones de un amplio grupo de expertos. Dichas matrices de probabilidad permiten deducir unas funciones de vulnerabilidad para ciertos valores de intensidad, en las cuales cada estado de daño puede expresarse en términos físicos.

De acuerdo con el criterio y experiencia obtenida por expertos locales de sismos colombianos y utilizando la ecuación la Trifunac y Brady (1975) que relaciona la Intensidad MM y la aceleración pico del suelo y llevando a cabo una revisión de las diferentes funciones

de vulnerabilidad desarrolladas por varios autores como Algermissen (1984) y Steinbrugge (1982), Sauter y Shah (1978), Petrovsky y Milutinovic (1985), Ordaz et al.(1994) se ajustaron las matrices de daños propuestas por el ATC-13 para el caso de las tipologías de edificación definidas para Bogotá. Se usaron, entonces, matrices de probabilidad de daño para cada intensidad y la función de vulnerabilidad respectiva basada en factores de daño medio.

El valor de la amenaza sísmica en cada zona de la ciudad está representado por un espectro de aceleración obtenido para cada sismo postulado, sea éste el sismo lejano o los previstos en la Falla Frontal de la Cordillera Oriental (moderado y fuerte). En consecuencia, para conocer el valor de aceleración espectral al cual está sometida cada tipología de edificación fue necesario estimar el período fundamental de vibración de cada una. Ahora bien, utilizando el método desarrollado por Scholl *et al.* (1982) para relacionar valores de aceleración espectral e intensidad teniendo en cuenta tres tipos de suelo similares a los que se encuentran en Bogotá y 546 acelerogramas de terremotos registrados en todo el mundo desde 1933 a 1979, se realizó un procedimiento de correlación que permitiera mediante una función de transferencia, conocidos los valores de aceleración espectral, utilizar las funciones de vulnerabilidad modificadas, que fueron desarrolladas para valores de intensidad en la escala de Mercalli Modificada.

ESTIMACIÓN DEL RIESGO

Para la modelación de los escenarios de daños y pérdidas se desarrolló una aplicación de computador que se le denominó Sistema de Evaluación de Riesgo Sísmico SERS, el cual se ajusta de una manera adecuada a la información recolectada y al nivel de resolución adoptado. La filosofía básica del programa, consiste en crear una base de datos a partir de los archivos de las hojas electrónicas, elaborados en la etapa de recolección de información, con el fin de poder llevar a cabo los cálculos con toda la información en conjunto. El programa permite la creación de celdas y familias de celdas con la información de las edificaciones. A manera de tabla, se le introduce la información de las curvas de vulnerabilidad sísmica de cada una de las tipologías y el valor de la amenaza sísmica de entrada se le incorpora de acuerdo con los valores de aceleración espectral estimada para cada celda, según la zonificación sismogeotécnica y el tipo de terremoto. El programa permite obtener evaluaciones de carácter estadístico sobre el número de habitantes, área construida de tipos de edificación, usos, etc. y estimaciones de riesgo sísmico obtenidas de la convolución de la amenaza sísmica y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, como área dañada, costos de reposición, heridos leves o graves y pérdidas de vida. Este tipo de estimaciones se pueden obtener para cualquier nivel o unidad de información requerida, es decir, para una celda, una familia de celdas (sector) o para un grupo de celdas señalado. El costo de reposición se obtuvo para cada tipología estructural con base en el costo por metro cuadrado de construcción dependiendo del tipo de estrato económico. Dicho valor varió desde US\$ 240 hasta US\$ 864 dólares promedio por metro cuadrado, para edificaciones en mampostería en estrato bajo y pórticos de concreto reforzado de más de diez pisos en estrato alto respectivamente. Las figuras 3 y 4 ilustran el área de construcción dañada considerando los dos escenarios más graves de amenaza sísmica para la ciudad. De esta información se obtienen las pérdidas económicas directas como un porcentaje del costo de reposición para cada tipología de edificación.

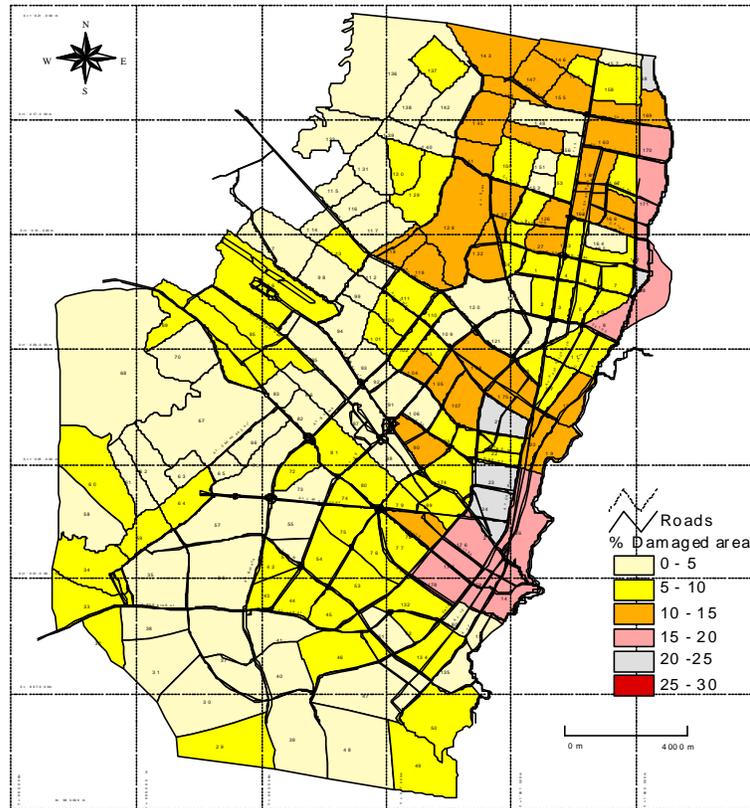


Figura 3. Escenario de daños para un sismo moderado en Bogotá.

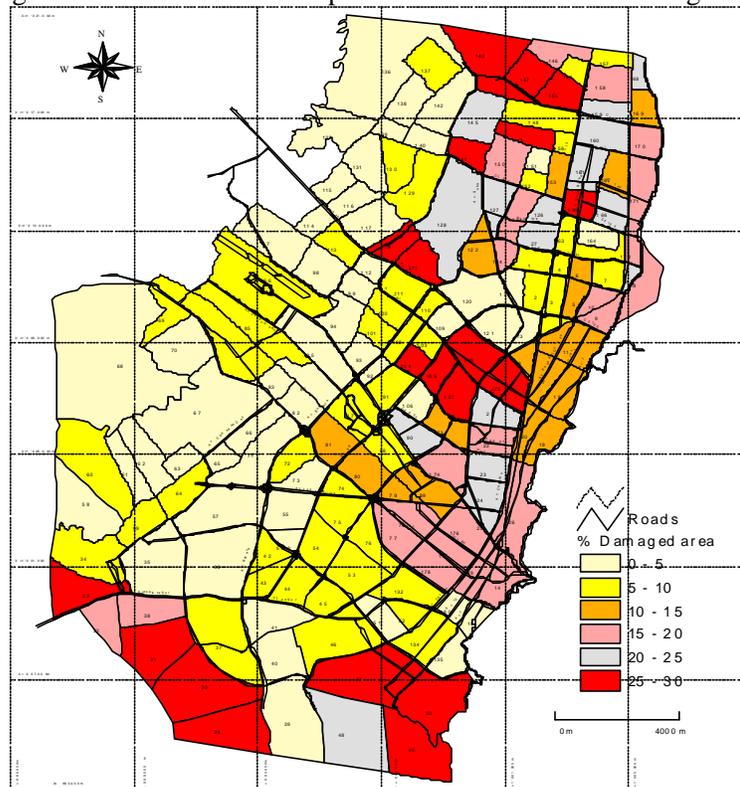


Figura 4. Escenario de daños para un sismo fuerte en Bogotá.

Debido a la falta de información local, para efectos de estimar la cantidad de personas que pueden presentar heridas e incluso la muerte, se utilizaron estimativos similares a los propuestos por Whitman et al. (1973) y ajustados en el ATC-13, que son en general aceptados para los países occidentales. Estas figuras muestran un mapa de la ciudad con las principales vías para referencia. La mayoría del área es plana, excepto el oriente y suroriente donde se encuentran los cerros. El aeropuerto se encuentra al occidente y se utiliza como límite a la izquierda del mapa.

VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LÍNEAS VITALES

Para el caso de Bogotá, teniendo en cuenta la información disponible aportada por las diferentes empresas de servicios públicos involucradas, se desarrolló un modelo simplificado que permitiera relacionar de manera global, a nivel de escenarios potenciales, la probabilidad de falla o daño de los componentes principales de cada sistema con la intensidad de tres posibles terremotos probables en la ciudad. En algunos casos se estimó, en general, el nivel de vulnerabilidad sísmica estructural de componentes tales como las subestaciones eléctricas y las centrales telefónicas de manera independiente de los sismos específicos considerados y se hizo una revisión de la estadística de daños en los últimos años tanto de la red de acueducto como de la red de gas natural, lo cual permitió aportar información relativa a la vulnerabilidad inherente o intrínseca de los sistemas, como una correlación notable en el aumento de los daños durante los días siguientes a la ocurrencia del sismo de Tauramena, ocurrido el 19 de enero de 1995.

Se desarrolló una metodología que intenta identificar los puntos donde eventualmente se pueden presentar mayores daños en líneas vitales (acueducto, energía, teléfonos, gas) ante la ocurrencia de los tres escenarios hipotéticos de sismos probables. Para el estudio de redes de distribución de acueducto, energía y gas se siguió el método propuesto en el ATC-13. Para edificaciones tales como subestaciones eléctricas y centrales telefónicas, se utilizó, como herramienta de evaluación el ATC-21. En cuanto a subestaciones eléctricas y centrales telefónicas, se tuvo en cuenta las edades de las edificaciones, sus características estructurales, su ubicación dentro de la ciudad, e igualmente la intensidad a la que estarían sometidas de acuerdo con los sismos anteriormente definidos.

La clasificación de los elementos de cada línea vital se realizó de acuerdo con la clasificación propuesta por el ATC-13. a) Elementos principales, b) Elementos de distribución y c) Elementos de servicio

Se identificaron los problemas más frecuentes en el funcionamiento diario de las líneas vitales, para lo cual se obtuvo de cada sistema un reporte de daños ocurridos en el pasado y de esta manera se realizó un análisis de la incidencia de la edad, la localización y los materiales en el comportamiento del sistema. No necesariamente los daños observados provienen de un evento sísmico, pero los daños representan puntos críticos a los que se debe dar especial cuidado. Debido al alcance del estudio, para el cálculo de la vulnerabilidad se tuvo en cuenta únicamente lo relacionado a elementos de distribución. Sin embargo, en los sistemas de energía eléctrica y teléfonos se consideraron también algunos elementos principales. En este documento se hace referencia al estudio de los siguientes elementos de líneas vitales:

1. Vulnerabilidad de redes

- Red matriz de distribución de agua.

- Líneas de alta tensión.
- Red de gas.

2. Vulnerabilidad de edificaciones que hacen parte de las líneas vitales

- Subestaciones eléctricas
- Centrales telefónicas.

VULNERABILIDAD DE REDES

Para el estudio de las principales redes de distribución se utilizó la metodología de estimación de daño propuesta por el ATC-13. El daño se evaluó como un porcentaje de la longitud caída de cable para el caso de líneas de alta tensión y por número de rupturas por Km para el caso de tuberías enterradas. El daño se relaciona con la intensidad sísmica esperada en cada uno de los tramos de la red.

Las matrices de daño calibradas mediante la consulta de expertos para líneas vitales se combinaron con las de intensidad sísmica esperada para determinar la distribución de daños en la ciudad. Las matrices de daño utilizadas en este estudio se obtuvieron del ATC-13 y se modificaron de acuerdo a los procedimientos descritos en el ATC-25 dependiendo de la edad, el mantenimiento, la calidad de los materiales y la calidad de la construcción colombiana.

El factor de daño en los sistemas de acueducto y gas fue expresado en términos del número de roturas por km de tubería. Para el cálculo de la vulnerabilidad de las edificaciones principales de los sistemas de energía eléctrica (subestaciones eléctricas) y teléfonos (centrales telefónicas) se utilizó una metodología aproximada que considera los siguientes aspectos : a) Importancia, b) Vulnerabilidad intrínseca y c) Vulnerabilidad a la amenaza

La importancia define la participación de un elemento en el funcionamiento del sistema completo o su participación en la operación de zonas especiales. Para la calificación de la importancia tanto de las subestaciones eléctricas como de las centrales telefónicas, se hicieron encuestas a personas calificadas dentro de cada una de las empresas de servicios públicos.

Para las subestaciones eléctricas, adicionalmente a las visitas, se observó el estado de la estructura de la casa de control y el anclaje de los transformadores, de las celdas y de las baterías, elementos indispensables para el buen funcionamiento de la subestación. Los demás instrumentos de la subestación no fueron revisados debido a que se salen del nivel de detalle de este estudio.

ESTIMACIÓN DEL RIESGO

Para redes de alta tensión a diferencia de tuberías enterradas, los daños se calcularon como porcentaje de longitud caída de la red. En cuanto a las redes primarias y secundarias de teléfonos de la ciudad la Empresa no suministró la información necesaria para realizar el estudio. Por tanto se realizaron visitas a cada una de las centrales telefónicas y se obtuvo información de las características más importantes de cada una de ellas.

Es importante mencionar que el modelo de análisis se basó en una apreciación semicuantitativa, teniendo en cuenta aspectos cualitativos y relativos de calificación, como análisis estadísticos de daños propuestos a nivel internacional por grupos de expertos y observados durante terremotos pasados. Por lo tanto, no se diferenció si los componentes eran

elementos enterrados o sobre la superficie, no obstante que en general se acepta que en caso de sismos los componentes que se encuentran sobre la superficie tienden a ser más vulnerables a los efectos vibratorios causados por las fuertes sacudidas del suelo, mientras que los que se encuentran bajo la superficie tienden a ser vulnerables al desplazamiento permanente de la tierra causada por movimientos tectónicos (fallas), licuación o deslizamientos. Por lo tanto, este estudio debe considerarse como una evaluación indicativa del potencial de daños esperados en las líneas vitales de Bogotá, que permite dimensionar la magnitud de los problemas potenciales que se tendrían para cada sismo de análisis y que por lo tanto su utilización sirve fundamentalmente para establecer criterios generales de intervención de la vulnerabilidad de los diferentes componentes como la formulación de planes de respuesta y rehabilitación realistas y el costo y el tiempo de recuperación del servicio en las diferentes zonas de la ciudad, lo cual debe ser estimado y analizado por cada entidad de acuerdo con los escenarios de daños estimados.

ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO URBANO

Del trabajo realizado se puede concluir que aún cuando la amenaza sísmica para de Bogotá no corresponde a valores extremos en el país, el riesgo si lo es debido al alto grado de vulnerabilidad de sus edificaciones, las cuales hasta hace muy pocos años fueron construidas sin tener en cuenta criterios sismorresistentes. Sólo a partir de 1984, año en el cual se aplicó el primer estudio de amenaza sísmica en el país para efectos de expedir por primera vez el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR, se podría decir que las edificaciones cuentan con algún grado de protección en caso de terremoto; obviamente siempre que hayan sido construidas en forma correcta. Infortunadamente, con anterioridad a 1984 no se tuvieron requerimientos para soportar sollicitaciones dinámicas y cargas laterales, razón por la cual las edificaciones diseñadas y construidas antes de ese año en su mayoría son altamente vulnerables, como lo han demostrado sismos incluso mucho menores a los de diseño en otras zonas del país.

De acuerdo con la información obtenida de las evaluaciones presentadas anteriormente, se puede resumir en algunas cifras el alto riesgo sísmico de Bogotá, entendido como el potencial de consecuencias sociales, ambientales y económicas en caso de terremoto. La Tabla 3 presenta las principales cifras obtenidas del estudio para el inventario de las edificaciones y para cada uno de los escenarios sísmicos hipotéticos considerados.

Tabla 3. Resultados de Pérdidas Totales - Escenarios Sísmicos

ESCENARIO SÍSMICO HIPOTÉTICO	EN EL DÍA		EN LA NOCHE		SIN VIVIENDA (10% de Afectados Habitantes)	ÁREA DESTRUIDA (Millones m ²)	COSTO (US \$ Millones)
	Muertos	Heridos	Muertos	Heridos			
SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)	3500	20000	4500	26000	74000	33.8	14000
SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)	1600	9000	1400	7700	44000	20.6	8800
SISMO LEJANO (0.03g)	300	1600	350	1900	27000	12.3	5100

Por dificultades de acceso e interrupción del tránsito, lo cual impediría el rescate y la atención médica inmediata, se sumarán los heridos muy graves a los valores estimados de muertos obtenidos de la Tabla 3. Igualmente, teniendo en cuenta que un estudio de ésta naturaleza no puede ser exacto, se aproximarán las cifras obtenidas del cálculo a números globales, que sirven como valores indicativos de la dimensión de la catástrofe.

Ante el escenario hipotético de un sismo lejano que llegara con una aceleración del orden de 0.03g a nivel del basamento rocoso, se esperaría una amplificación importante de las ondas sísmicas en particular en las zonas de suelos blandos, lo que afectaría posiblemente edificios altos. Algunas zonas de la zona norte presentarían la mayor concentración de pérdidas, que se reflejarían en daños no estructurales de cierta consideración en algunas edificaciones y una afectación menor pero general de las edificaciones en toda la ciudad. Se estima que si el sismo ocurre durante el día habría del orden de 300 muertos y 1.600 heridos. Si ocurre en la noche habría 350 muertos y 1900 heridos. Habría daños equivalentes a la destrucción del 4% del área construida de la ciudad, lo que corresponde a 12.3 millones de metros cuadrados de edificaciones, cuyos costos serían del orden de 5.100 millones de dólares. Se estima que en el área total afectada habría 270.000 habitantes, de los cuales se considera que no menos del 10% podrían tener problemas de alojamiento, es decir, unas 27.000 personas sin vivienda. En general los daños o rupturas que se presentarían en las redes serían mínimos o despreciables. Este sismo causaría posiblemente algunas víctimas y un número importante de heridos fundamentalmente por la caída de elementos no estructurales de las edificaciones afectadas, las cuales podrían sufrir algunos incendios por averías en las instalaciones domiciliarias, particularmente de gas propano (GLP). Ante este sismo, posiblemente, la capacidad actual de las empresas de servicios para atender interrupciones sería suficiente para restablecer en forma inmediata su funcionamiento.

En la eventualidad de la ocurrencia de un sismo en la Falla Frontal de la Cordillera Oriental, que cause una aceleración del orden de 0.12g a nivel del basamento rocoso, el cual se considera podría ser un sismo con un período de retorno de 100 años, similar a los sismos que afectaron a la ciudad en 1785, 1827 y 1917, se esperaría una fuerte respuesta en la zona oriental de la ciudad cercana a los cerros, lo que afectaría notablemente edificaciones localizadas en las zonas de suelos rocosos y de piedemonte. Este sismo, a diferencia del anterior, causaría graves daños estructurales y no estructurales en edificaciones de diferentes alturas. Se estima que si el sismo ocurre durante el día habría del orden de 1.600 muertos y 9.000 heridos. Si ocurre en la noche habría cerca de 1.400 muertos y 7.700 heridos. Habría daños equivalentes a la destrucción del 6.8% del área construida de la ciudad, lo que corresponde a 20.6 millones de metros cuadrados de edificaciones, cuyos costos podrían alcanzar los 8.800 millones de dólares. Se estima que en el área afectada habría 435.000 habitantes, de los cuales se estima que no menos del 10% podrían tener problemas de alojamiento, es decir, del orden de 44.000 personas sin vivienda. Una fuerte respuesta en la zona oriental de la ciudad cercana a los cerros, afectaría notablemente segmentos de la red del acueducto localizados en las zonas de suelos rocosos y de piedemonte. No obstante, en la zona plana habría daños importantes en todos los sistemas de redes. La red del acueducto se estima podría tener en total, en los diferentes tipos de tubería, entre 300 y 350 rupturas, la red de gas natural entre 25 y 30 daños importantes y la red de alta tensión del orden de 4 kilómetros y medio de líneas de cables caídos. Varias subestaciones de energía presentarían daños que contribuirían a interrumpir los servicios. Esto agravado por el amplio número de víctimas, los posibles incendios por los escapes adicionales de gas propano, significaría una grave crisis para la ciudad y la nación, pues el tiempo de recuperación de los

servicios y la atención a la población sería notablemente deficiente, razón por la cual las medidas de reducción de vulnerabilidad y riesgo de los sistemas como la elaboración de planes de contingencia acorde con este escenario son acciones de especial importancia, más si se tiene en cuenta la alta probabilidad de ocurrencia de un evento como este, que ya ha ocurrido en el pasado en la ciudad.

Finalmente, ante un sismo que se presente en la misma falla que genere aceleraciones del orden de 0.20g, lo cual equivale a un sismo de 475 años de período de retorno, considerado como el sismo de diseño para el cual se deben diseñar las estructuras de las edificaciones que se construyen en la ciudad, se tendría el escenario de pérdidas más notable de los considerados en este estudio. Las pérdidas de nuevo se presentarían de manera intensa en las cercanías de los cerros orientales, pero habría una participación elevada de otros sectores al norte y al sur. Este sismo causaría graves daños estructurales y no estructurales en todos los tipos de edificaciones. Habría colapsos totales de estructuras en diferentes sitios de la ciudad, con menor incidencia en la zona occidental donde los daños en general serían menores. Se estima que si el sismo ocurre durante el día habría del orden de 3.500 muertos y 20.000 heridos. Si ocurre en la noche habría 4.500 muertos y 26.000 heridos. Habría daños equivalentes a la destrucción del 10.9% del área construida de la ciudad, lo que corresponde a 33.8 millones de metros cuadrados de edificaciones, cuyos costos serían de 14.000 millones de dólares. Se estima que en el área afectada habría 738.000 habitantes, de los cuales se estima que no menos del 10% podrían tener problemas de alojamiento, es decir, del orden de 74.000 personas sin vivienda. La red del acueducto se estima podría tener entre 450 y 500 rompimientos, la red de gas natural del orden de 60 daños importantes y la red de alta tensión cerca de 6 kilómetros y medio de líneas de cables colapsadas. Un amplio número de subestaciones de energía del norte, el sur y el borde oriental, y la mayoría de las centrales telefónicas del norte el centro-oriente y sur de la ciudad presentarían daños importantes para el funcionamiento de los servicios. Sería la mayor crisis factible para la nación debido a la concentración de población, bienes y servicios en la capital y por lo tanto no solo se debe hacer un esfuerzo notable de las instituciones para identificar recursos financieros y presupuestales cada año para realizar medidas efectivas de reducción de vulnerabilidad y riesgo de los sistemas, sino la elaboración de un plan específico de contingencia para responder de la mejor manera posible ante este escenario extremo, no solo considerando la atención a la población inmediatamente y semanas después del evento sino para efectos de rehabilitación y recuperación de la infraestructura afectada.

Es importante señalar que el sismo lejano genera daños notables en los edificios altos localizados en suelos blandos. Estos edificios, en su mayoría, pertenecen a los estratos socio económicos más altos, razón por la cual se explica que los costos de los daños para ese escenario lleguen a ser cerca de un tercio de los costos del escenario de terremoto cercano fuerte. Tal como se mencionó con anterioridad, estas cifras no son exactas y solamente permiten dimensionar en ordenes de magnitud la problemática que para Bogotá y Colombia habría en la eventualidad de la ocurrencia de cualquiera de los escenarios hipotéticos propuestos, que obviamente tienen una probabilidad de ocurrencia y pueden llegar a ocurrir según la información disponible y las evidencias existentes en la actualidad. Por esta razón, es fundamental incorporar este tipo de evaluaciones a los programas de ordenamiento urbano y definir procedimientos y protocolos de respuesta institucional, áreas de alojamiento temporal y ejercicios de simulación de eventos hipotéticos.

CONCLUSIÓN

Tres escenarios de pérdidas fueron considerados, teniendo en cuenta un sismo lejano quien bien podría ocurrir en la zona de subducción del Pacífico y dos sismos cercanos de intensidad moderada y fuerte ubicados en una de las fuentes sísmicas cercanas a la ciudad. Estas estimaciones, obtenidas de la convolución de funciones analíticas de vulnerabilidad y de los resultados de la microzonificación sísmica, han sido dadas a conocer a la Presidencia de la República, la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y se están utilizando por el Comité Distrital para la Prevención y Atención de Desastres de Santafé de Bogotá para actualizar sus planes de emergencia y para promover nuevos programas de educación e información pública. Los resultados de la microzonificación sísmica se han convertido en nueva información, fundamental para la planificación urbana, dado que con base en los mismos se encuentra en proceso la reglamentación de los requisitos y exigencias de la norma sísmica de la ciudad. Igualmente, con base en estos estudios, la administración distrital ha venido identificando recursos presupuestales para el reforzamiento o rehabilitación sismorresistente de edificaciones existentes consideradas como claves, tales como el Centro Administrativo Distrital y los hospitales de tercer nivel de complejidad. Por su parte, las empresas de servicios públicos están identificando los sitios críticos más vulnerables de las líneas vitales con fines de intervención. En resumen, este proyecto es un ejemplo de un estudio técnico en un país en desarrollo realizado sin la necesidad de contar con enormes recursos financieros, como usualmente se piensa, donde se ha demostrado que la voluntad política y la concertación interinstitucional son la base para conseguir resultados efectivos.

RECONOCIMIENTOS

Este artículo es un resumen de los estudios realizados por la Universidad de los Andes y el Ingeominas, entidades que hicieron un especial esfuerzo para el éxito del proyecto, representado no sólo en su aporte técnico-científico sino económico. Un especial reconocimiento se hace a la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y a la Unidad Distrital de Prevención de Emergencias de Bogotá, quienes aportaron a través de la Fiduciaria La Previsora la mayor parte de los recursos económicos para la realización del proyecto.

REFERENCIAS

- Algermissen, S. T., and Steinbrugge, K.V. 1984. Hazard and Risk Assessment : Some Case Studies, *The Geneva Papers on Risk and Insurance*, 9 :30. January 1984.
- Applied Technology Council, 1985. *Earthquake Damage Evaluation Data for California* , ATC-13, (FEMA), Redwood City, CA.
- Applied Technology Council, 1988. *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, ATC-21, (FEMA Report 154) Redwood City, CA, April 1988.
- Applied Technology Council, 1991. *Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States*, ATC-25, (FEMA), Redwood City, CA.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 1995. *Norma AIS 100-95*, Bogotá.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 1996. Universidad de los Andes, Ingeominas, *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia*, Bogotá.
- Cardona O.D., 1991. Metodología para la Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones y Centros Urbanos, *VII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente - IX Jornadas Estructurales*, SCI/AIS/MOPT, Bogotá Octubre 1991.

- Cardona O.D., Meyer H., 1991. Integrated Urban Seismic Risk Mitigation Project - Its Coordination and Management in Cali, Colombia, *Fourth International Conference on Seismic Zonation*, EERI, San Francisco, August 1991.
- Cardona O.D., Enfoque Metodológico para la Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo Sísmico, *Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS*, Boletín No. 33, Diciembre 1986; *II Conferencia Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá*, Medellín Agosto, 1988, *II Simposio Latinoamericano de Riesgo Geológico Urbano*, Vol.1, EAFIT, Pereira, Julio 1992.
- Cardona O.D., 1993. Reducción de la Vulnerabilidad Sísmica de Líneas Vitales, Seminario Internacional *Prevención y Reducción de Riesgos en Sistemas de Acueducto y Alcantarillado*, Cali, Colombia, 1993.
- Cardona O.D. 1996. *Estudio de Vulnerabilidad y Rehabilitación Sísmica del Hospital Kennedy*, DNPAD, MINSALUD, FNC, OPS,ECHO-3, Bogotá,1996
- Centre for Advanced Engineering , 1990. *Lifelines in Earthquakes*, Wellington Case Study-Project Report, University of Canterbury, New Zealand, 1990.
- CERESIS, *Evaluación de los Efectos Económicos de los Terremotos en América del Sur - ECOSIS*, Vol 13, 13A.
- FEMA 1989. *Estimating Losses From Future Earthquakes*, Panel Report and Technical Background, Series 51, FEMA 177/June 1989.
- Fournier d'Albe E.M., 1985. The Quantification of Seismic Hazard for the Purposes of Risk Assessment, *International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas*, Skopje, November 1985.
- Grases, J. 1994. *Requerimientos Normativos para la reducción del riesgo sísmico en los sistemas de gas domiciliario*. Informe de la Tercera Fase., DNPAD, Bogotá, Febrero 1995.
- Horney T. 1994. *Bogotá desde el Aire*, Villegas Editores, Bogotá, 1994.
- Idriss I, Sun, J., SHAKE91, November 1992.
- INGEOMINAS, OPES, Universidad de los Andes, 1996. *Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá*, Subproyectos 11, 15 y 16, Bogotá, Noviembre 1996.
- Milutinovic, Z., Petrovski J., 1985. *Earthquake Damage Prediction - Modeling and Assessment*, IZIIS, Skopje, April 1985.
- Ordaz, M. et al., 1994. Bases de Datos para la Estimación de Riesgo Sísmico en la Ciudad de México, *Cuadernos de Investigación No. 1*, CENAPRED, México D.F., Marzo, 1994.
- Petrovski, J., Milutinovi Z.,, 1990. Modelo para la Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo Sísmico, *Seminario Desastres Sísmicos en Grandes Ciudades*, Bogotá, 1990.
- Sauter, Shah, 78a 78b pág. 322, ATC-13, 1978.
- Sarria, A. 1996., *Análisis de la Vulnerabilidad Sísmica de las Subestaciones Circo, Noroeste, Salitre, Carrera 5A, Suba y Darío Valencia*. CIFI Universidad de los Andes. Santafé de Bogotá, Abril 1996.
- Scholl, R.E. et al., 1982. *Seismic Damage Assessment for High-Rise Buildings*, URS/Blume Engineers Report URS/JAB 8020, URS/John A. Blume & Associates, San Francisco, California, 300 pp.
- Spence R.J.S. 1990, Seismic Risk Modelling - A review of Methods, contribution to *Velso il New Planning*, University of Naples, Papers of Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Cambridge 1990.
- Steinbrugge, K.V. 1982. *Earthquakes, Volcanos and Tsunamis : An Anatomy of Hazard*, 1982.
- Trifunac, M.D. and Brady, A.G., 1975. On the Correlation of Seismic Intensity Scales with the Peaks of Recorded Strong Ground Motion, *Bull. Seism. Soc Am.* 65, :1, 1975
- Whitman R., Reed J.W., and Hong, S.T. 1973. Earthquake Damage Probability Matrices, *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*. El Cerrito, Calif. : EERI, 1973.
- Yamín, L.E., Ojeda, A., 1995. Evaluación de los Efectos de Sitio en Bogotá: Períodos Dominantes y Amplificaciones Relativas a partir de Registros Sísmicos y Microtrepidaciones, *Seminario sobre Microzonificación Sismogeotécnica y Vulnerabilidad de Ciudades*, Uniandes, y Jornadas Geotécnicas, SCI, Bogotá, 1995.