CAPITULO 4

VULNERABILIDAD SÍSMICA URBANA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

Debido al crecimiento y a la densificación de la población en centros urbanos y al desarrollo de tecnologías peligrosas en áreas donde pueden ocurrir fuertes terremotos, la ingeniería sísmica mundial ha tenido que explorar metodologías, técnicas y estrategias con el fin de mitigar o reducir el riesgo sísmico. Este término puede entenderse como las consecuencias sociales y económicas potenciales que podrían sufrir uno o varios de los elementos que componen el contexto social y material, tales como las personas, las edificaciones, la infraestructura de servicios públicos, las industrias y el comercio, entre otros.

El riesgo se obtiene de relacionar la amenaza, o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Desde el punto de vista físico, el "riesgo específico" es la pérdida esperada en un período de tiempo, que puede ser expresada como una proporción del valor o costo de reemplazo de los elementos bajo riesgo. Usualmente, el riesgo específico representa pérdida de vidas, heridos y pérdidas de inversiones de capital.

Estimar las pérdidas potenciales que puede producir un terremoto es una tarea difícil pero fundamental para estimular y generar acciones de mitigación sísmica. Un amplio número de métodos han sido propuestos para estimar pérdidas de futuros terremotos entre los cuales pueden encontrarse inconsistencias significativas. Sin embargo, si no es posible actualmente predecir con "precisión" cuándo y dónde va a ocurrir un terremoto, cuántas víctimas causará y qué daños producirá en la amplia variedad de edificios de diferentes edades y características, si es posible realizar aproximaciones y estimativos que indiquen la naturaleza y la magnitud del problema que tendrá que afrontar una ciudad o una región, razón por la cual este tipo de estudios se han convertido en ineludibles y necesarios.

4.1 METODOLOGÍA GENERAL

Las metodologías para la evaluación del riesgo sísmico de centros urbanos, consideran diferentes técnicas para evaluar la amenaza sísmica y utilizan matrices o funciones de vulnerabilidad empírica para diversos tipos de edificaciones y de líneas vitales. Estas técnicas para la estimación de escenarios de pérdidas anticipadas permiten inferir la forma mediante la cual puede mitigarse el riesgo sísmico, no sólo utilizando sus resultados para la definición de planes de emergencia o de preparativos para desastres, sino también para aportar información que permita ser utilizada en la planificación física y urbana de los centros poblados en zonas sísmicas.

El alcance de los estudios y el tipo de metodología para la evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo dependen de:

- La escala del espacio geográfico involucrado;
- El tipo de decisiones de mitigación que se esperan 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.

En el caso de Santafé de Bogotá, se realizó una amplia revisión y adaptación metodológica que permitiera, de acuerdo con el tamaño de la ciudad y de la información disponible, 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 para obtener estimaciones descriptivas en forma de escenarios cuyos 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, en la intensidad del movimiento del suelo y los efectos colaterales o fallas en el mismo para un evento dado. Segundo, en el daño estimado causado por la intensidad del movimiento del suelo o sus efectos colaterales. Tercero, 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 se realizó, con un esfuerzo adicional, un análisis siempre más preciso en cada caso, de todas maneras es inevitable que existan incertidumbres en estudio práctico de esta naturaleza; por esta razón se debe delimitar su alcance y su responsabilidad técnica asociada, definiéndolas de manera explícita:

ESTE ESTUDIO HA SIDO REALIZADO EXCLUSIVAMENTE PARA 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 MARCADAMENTE 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 para evaluar los potenciales escenarios de pérdidas por terremoto, es importante mencionar que en un sitio en el cual no existe la forma de llevar a cabo una calibración con base en un sismo significativo reciente, como lo es Santafé de Bogotá, 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[1]. No obstante, las estimaciones obtenidas son de

[1] Un factor de 5 puede interpretarse para el caso de una buena estimación de 1000, como que el

especial significación para la toma de conciencia, la reducción de riesgos y los preparativos para la atención de emergencias.

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 considera evaluaciones del impacto social ni de costos de rehabilitación y reconstrucción.

4.2 VULNERABILIDAD DE LAS EDIFICACIONES

Un 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 una revisión del crecimiento histórico de Santafé 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 que tiene la Secretaría de Planeación de la ciudad. Finalmente, con base en información sistematizada del Catastro Distrital y la 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.

El inventario de edificaciones se realizó inicialmente con base en la información facilitada por un amplio número de entidades del sector público y privado. Se obtuvieron planos, estadísticas, documentación poblacional, proyectos e investigaciones específicas, algunas de las cuales se relacionan a continuación:

- Tasas de crecimiento poblacional por estratos y por barrios .
- Tasas de expansión urbana.
- Registros de fundación de barrios.
- Diferentes fuentes de ingreso económico y poder adquisitivo de la población.
- Evolución de la construcción en Bogotá.
- Evolución de los procesos constructivos y calidad de la mano de obra.
- Evolución del casco y perímetro urbano.
- Crecimiento de la red vial.
- Proyección de la red vial actual hasta el año 2010.
- Información acerca de construcciones en proceso.
- Plano sobre zonas no reglamentadas y zonas marginales.
- Identificación de edificaciones gubernamentales, edificaciones indispensables y sitios estratégicos.
- Estratificación socio-económica.
- Características y evolución de los materiales de construcción.
- Estudios sobre vivienda.
- Información acerca de programas de vivienda social.

---

valor puede encontrarse dentro de un rango de sobre o infra estimación de 400 a 2000.

Esta información se analizó cuidadosamente en conjunto con la suministrada por la Secretaría de Planeación Distrital y el Centro Distrital de Sistematización y Servicios Técnicos, la cual sirvió de base general para la tipificación de las edificaciones y la determinación de las características relevantes para el estudio mediante visitas de campo a los sitios de mayor diversidad por parte de los grupos técnicos de identificación y verificación.

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, altura, técnica de construcción, edad y otros factores; se consideraron las siguientes tipologías y características para el caso de Santafé de Bogotá:

TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL
(1) MAMPOSTERÍA 1-2 PISOS
(2) MAMPOSTERÍA MAYOR O IGUAL A 3 PISOS
(3) PÓRTICOS MENORES O IGUALES A 5 PISOS
(4) PÓRTICOS 5-10 PISOS
(5) PÓRTICOS MAS DE 10 PISOS
(6) BODEGA LIVIANA
(7) BODEGA PESADA
(8) INFORMAL LIVIANA
(9) INFORMAL PESADA
(10) OTROS

USO
(1) RESIDENCIAL
(2) COMERCIAL
(3) EDUCATIVO
(4) SALUD
(5) INSTITUCIONAL
(6) FABRIL E INDUSTRIAL
(7) OTROS

TIPO DE CUBIERTA
(1) LIVIANA
(2) TEJA DE BARRO
(3) LOSA DE CONCRETO

AÑO DE CONSTRUCCIÓN
(1) POSCODIGO
(2) MODERNA
(3) PREMODERNA

ENTREPISOS
(1) CONCRETO
(2) MADERA
(3) OTROS

MANTENIMIENTO

(1) BUENO
(2) REGULAR
(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 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" de Villegas Editores, (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 km^2 sobre un perímetro de la ciudad del orden de 92 km. Algunas tomas de las aéreas laterales muestran 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, con el fin de presentar la información adecuadamente mediante un sistema de información geográfica. 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, con los límites de la sectorización de las alcaldías menores de la ciudad.

4.2.1 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 que propuso el ATC-13/FEMA (Applied Technology Council, 1985) basada en *Estados de Daño*, los cuales han sido obtenidos para diferentes relaciones de demanda contra capacidad tanto a

nivel de rigidez, resistencia y disipación de energía inelástica y que cubren todas las posibilidades de daño que pueden presentarse ante la ocurrencia de un movimiento sísmico. Los estados de daño los presenta la Tabla 4.1

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

Tabla 4.1 Estados de daño

De donde cada estado de daño significa:

Ninguno : Sin daño.
Leve : Daño mínimo que no requiere reparación.
Ligero : Daño menor localizado en algunos elementos que generalmente no requiere reparación.
Moderado : Daño menor localizado en muchos elementos que deben ser reparados.
Fuerte : Daño extensivo que requiere reparaciones mayores.
Severo : Daño grave generalizado que puede significar su demolición.
Destrucción : Destrucción total o colapso.

Estos valores de probabilidad de daño para cada valor de intensidad sísmica propuestos por el método ATC-13/FEMA, son basados en las matrices de probabilidad de daños desarrolladas por Whitman (Whitman R., et al 1973) y Martel (Martel R., 1964), 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 lo anterior, utilizando la ecuación la Trifunac (Trifunac M. et al, 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 (Algermissen, 1984), Steinbrugge (Streinbrugge, 1982), Sauter (Sauter et al, 1978), Petrovsky (Petrovsky et al, 1985) y Ordaz (Ordaz, 1994), se ajustaron las matrices de daños propuestas por el ATC-13/FEMA para el caso de las tipologías de edificación definidas para Santafé de Bogotá. En la Figura 4.1 se presenta a manera de ejemplo una de las matrices de probabilidad de daño para cada intensidad y la función de vulnerabilidad respectiva.

Para el caso de Santafé de Bogotá, 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 (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 Santafé de Bogotá y 546 acelerogramas de terremotos registrados en todo el mundo desde 1933 a 1979, se realizó un procedimiento de correlación que permitiera finalmente, 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.

4.2.2 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, que como ya se mencionó corresponde a un sismo lejano del tipo subducción y dos sismos en la falla Frontal de la Cordillera Oriental; uno moderado y otro fuerte.

De esta manera 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

FIGURA 4.1

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.

Desde el punto de vista metodológico, la matriz de relaciones de daño se obtuvo utilizando el Factor de Daño Medio *Mean Damage Factor* (MDF), calculado para cada intensidad y la tipología de edificación considerada. El MDF para una tipología "T" sometida a una intensidad "I" está dado por:

$$MDF(T,I) = \sum_{DS=1}^{n} P_{DSI} \times DR_{DS} \qquad \text{Ec. 4.1}$$

donde :

DS = Estado de Daño *(Damage State)* de 1 (ninguno) a 7 (destrucción).
P_{DSI} = Probabilidad de daño para un DS dado de una tipología de edificación "T" y para una intensidad "I".
DR_{DS} = Relación de daño *(Damage Ratio)* para un DS dado.

Por lo tanto la matriz de relaciones de daños, tiene la siguiente forma:

$$\begin{vmatrix} MDF_{1,1} & ..... & MDF_{1,L} \\ ..... & MDF_{I,J} & ..... \\ MDF_{K,1} & ..... & MDF_{K,L} \end{vmatrix}_{KxL}$$

donde :

$MDF_{i,j}$ = Mean Damage Factor (MDF) para la tipología i a una intensidad j.
K = Número de tipologías de edificación bajo consideración
L = Número de niveles de aceleración sísmica considerados.

Las Figuras 4.2 a 4.5 ilustran el área de construcción dañada y las pérdidas económicas directas obtenidas como un porcentaje del costo de reposición para cada tipología de edificación, considerando los dos escenarios más graves de amenaza sísmica para la ciudad.

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/FEMA, que son en general aceptados para los países occidentales. Las Figuras 4.6 a 4.9 presentan una distribución de heridos y de posibles pérdidas de vida para algunos de los escenarios de amenaza sísmica.

4.2.3 Análisis de resultados

Del trabajo realizado se puede concluir que aún cuando la amenaza sísmica para Santafé 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 sismoresistentes. Sólo a partir de 1984, año en el cual se aplicó el primer estudio de amenaza sísmica en el país para efectos de

FIGURA 4.2

FIGURA 4.3

FIGURA 4.4

FIGURA 4.5

FIGURA 4.6

FIGURA 4.7

FIGURA 4.8

FIGURA 4.9

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 solicitaciones 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.

Es importante mencionar que en los últimos años el estado del arte de la ingeniería sísmica ha cambiado, en cuanto a normativa sismoresistente, del criterio de proteger solamente la vida hacia el criterio de proteger, al menos en parte, los bienes. Al respecto la nueva versión de la Norma AIS-100-95, que fue recientemente presentada al Congreso de la República con el fin de actualizar la norma sismo resistente nacional NSR, es más estricta en lo referente a la deformación máxima de las estructuras con el objeto de dar mayor protección a los elementos no estructurales, debido a sus costos y al impacto que pueden generar cuando al deteriorarse producen el colapso funcional de las actividades que se realizan en la edificación. Este tipo de situación se pudo detectar claramente en la ciudad de Pereira con el sismo del 8 de febrero de 1995, el cual causó cuantiosos daños en mampostería y acabados y no generó efectos importantes en las estructuras.

De acuerdo con la información obtenida de las evaluaciones presentadas anteriormente, se puede resumir en algunas cifras el alto riesgo sísmico de Santafé de Bogotá, entendido como el potencial de consecuencias sociales, ambientales y económicas en caso de terremoto. La Tabla 4.2 presenta las principales cifras obtenidas del estudio para cada uno de los escenarios sísmicos hipotéticos considerados.

Por dificultades de acceso e interrupción del tránsito, los 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 4.2. 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. Es importante reiterar que éste tipo de estimativos puede, en todos los casos, tener un nivel de incertidumbre muy alto, que puede ser del orden de un factor de 10; lo que significa que una buena estimación de 1.000 puede ser un valor que oscila dentro de un rango de sobre o infraestimación de 350 a 3.500.

ESCENARIO SÍSMICO HIPOTÉTICO	**EN EL DÍA**		**EN LA NOCHE**		**SIN VIVIENDA** (10% de Afectados Habitantes)	**ÁREA DESTRUIDA** (Millones m2)	**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 (0.038g)	300	1600	350	1900	27000	12.3	5100

Tabla 4.2. Resultados de pérdidas totales- escenarios sísmicos

Ante el escenario hipotético de un sismo lejano que llegara con una aceleración del orden de 0.038g 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 del norte, de Usaquén y Suba 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 afectada habría 270.000 habitantes, de los cuales por lo menos el 10% podrían tener problemas de alojamiento, es decir, unas 27.000 personas sin vivienda[2].

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. Las zonas más afectadas serían posiblemente algunos sectores de Los Mártires y La Candelaria en el centro y de Chapinero y Usaquén hacia el norte. Habría daños también de consideración en algunos sectores de Barrios Unidos y Suba. 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 en el área afectada habría 435.000 habitantes, de los cuales por lo menos el 10% podrían tener problemas de alojamiento, es decir, del orden de 44.000 personas sin vivienda.

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. Se presentarían daños importantes en Ciudad Bolivar, Usme, Rafael Uribe y San Cristobal, en el extremo sur de la ciudad. Habría daños significativos en Los Mártires, Teusaquillo y Barrios Unidos hacia el centro, y en amplios sectores de Suba y Usaquén al norte, donde se presentarían las mayores concentraciones de pérdidas. 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 por lo menos el 10% podrían tener problemas de alojamiento, es decir, del

[2] En otros estudios se ha estimado entre el 20% y el 50% de las personas relacionadas con el área afectada, los que significa que éste tipo de estimaciones son apenas indicativas de la magnitud del problema.

orden de 74.000 personas sin vivienda.

No se ha considerado en éstos análisis la posibilidad de ocurrencia de un sismo cercano muy intenso, generado en una de la falla locales como puede ser la falla la Cajita, la de Usaquén - Los Lagartos, la falla Bogotá o cualquiera similar. Este evento será catastrófico para la ciudad en especial para todas las edificaciones que se encuentran en terrenos de cierta competencia. Ante la falta de antecedentes claros y con la poca información disponible a nivel mundial para éste tipo de eventos, no se presenta en éste estudio una cuantificación sobre éste aspecto, pero se deja abierta la posibilidad que un sismo con la características descritas se presente en la ciudad en el futuro.

Tal como se mencionó con anterioridad, estas cifras no son exactas y solamente permiten dimensionar en ordenes de magnitud la problemática que para Santafé de Bogotá 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.

4.3 VULNERABILIDAD DE LÍNEAS VITALES

Las líneas vitales son sistemas complejos cuya función es la distribución de recursos, el transporte de personas y bienes, así como la transmisión de información. Todas las líneas vitales incluyen componentes planificados por ingenieros. Hasta ahora, los efectos de los terremotos sólo se han considerado en el diseño de algunos componentes de estos servicios. Sin embargo, las prácticas de ingeniería están cambiando a medida que el comportamiento de los sistemas de los servicios públicos se convierte en una preocupación reconocida en el diseño sísmico, en el planeamiento de emergencia y en la fase de recuperación posterior a un terremoto.

Una línea vital es un sistema que tiene diversas características distintivas. A diferencia de un edificio, puede extenderse muchos kilómetros y con frecuencia debe seguir derechos de vía que están confinados por ley o propiedad. Las líneas vitales están interconectadas; por lo general son parte de redes que se extienden sobre grandes áreas. El comportamiento en una localidad de la red puede estar influenciado en gran medida por las alteraciones en una localidad distante. Por consiguiente, los servicios vitales están afectados por características sísmicas, de suelo y basamento que difieren en varias partes del mismo sistema. Estos sistemas son interdependientes, es decir que el daño de un sistema dado puede afectar el comportamiento de otro. La ruptura de las líneas de combustible puede ser causa de incendio, lo que debe considerarse en el uso post-terremoto de las redes de distribución de agua. Las roturas simultáneas de las lineas de agua y desague pueden contaminar el agua potable. La interrupción de la energía eléctrica puede afectar las estaciones de bombeo de agua, limitando por consiguiente la disponibilidad de agua y sobrecargando el sistema de transporte para extender reparaciones de emergencia.

Por lo general, los daños en las líneas vitales están relacionadas con falla del suelo. En resumen, la profesión de la ingeniería sísmica ha realizado progresos significativos en el reconocimiento y antelación de daños potenciales a los servicios vitales como producto de los terremotos. En algunos casos se han tomado medidas concretas para mitigar los daños,

sea mediante la aplicación de innovaciones o mediante el uso de conocimientos básicos de ingeniería así como el buen juicio. Es necesario que se realicen más investigaciones para así ampliar nuestros servicios vitales durante terremotos, así como para desarrollar soluciones eficientes de diseño, mitigación y refuerzo.

Para evaluar el funcionamiento de las lineas vitales se pueden seguir varios procedimientos. Entre ellos se encuentra el análisis multiescenario, en el cual se evalúa el funcionamiento del sistema para uno o varios sismos. Esta técnica de evaluación se ha empleado en este estudio para determinar el funcionamiento de un sistema durante y después de eventos catastróficos. Con este tipo de análisis se puede establecer el requerimiento máximo del sistema y sus resultados se usan para formular planes de emergencia y contingencia.

En el caso de Santafé de Bogotá 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:

- Elementos principales
- Elementos de distribución
- 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 con elementos de distribución. Sin embargo, en los sistemas de energía eléctrica y teléfonos se consideraron también algunos elementos principales. En este documento se presenta el 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.

4.3.1 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.

El concepto de "matriz de daño" es fundamental para el cálculo de la vulnerabilidad. Las matrices de daño relacionan el nivel de daño (por ejemplo: leve, moderado, alto) con su probabilidad de ocurrencia para diferentes niveles de intensidad del evento sísmico. La probabilidad de ocurrencia se calculó con base en las opiniones de expertos. En la Tabla 4.3 se presenta una matriz de daño típica para líneas de energía (redes de alta tensión).

FACTOR CENTRAL DE DAÑO	INTENSIDAD MMI						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0.00	94.10	6.90	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	5.90	78.80	51.00	2.90	0.00	0.00	0.00
5.00	0.00	14.30	48.00	96.30	63.70	10.60	0.50
20.00	0.00	0.00	0.00	0.80	36.30	82.70	39.00
45.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.70	59.20
80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30
100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FACTOR DE DAÑO MEDIO	0.03	1.11	2.66	4.99	10.45	20.09	35.51

Tabla 4.3. Matriz de daño para líneas de distribución

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.

Para evaluar la vulnerabilidad, el primer paso consiste en utilizar las longitudes de las redes de los sistemas, con el fin de construir la matriz de longitudes.

$$L = [L_{1,1} \ldots\ldots \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad L_{1,m}]$$

donde :
$L_{i,j}$ = Longitud de la red del sistema i en el tramo j
m = Número de tramos.

De igual manera la intensidad sísmica obtenida del estudio de amenaza ha sido usada para construir la matriz de amenaza sísmica.

$$SI = \begin{vmatrix} SI_{1,1} & SI_{1,2} \; . . & SI_{1,n} \\ SI_{2,1} & SI_{2,2} \; . . & SI_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ SI_{m,1} & SI_{m,2} \; . . & SI_{m,n} \end{vmatrix}_{m \times n}$$

donde :

$SI_{m,j}$ = Intensidad sísmica (MMI - Mercalli Modificada) estimada en el tramo m para el terremoto j.
m = Número de tramos en los que se dividió la red.
n = Número de sismos (n = 3)

Usando las matrices de probabilidad de daño de líneas vitales del ATC-13, el Factor de Daño Medio para un sistema dado y para una intensidad dada es :

$$MDF(S,I) = \sum_{DS=1}^{n} P_{DSI} \times DR_{DS} \qquad \text{Ec. 4.2}$$

donde :

DS = Estado de daño (damage state).
P_{DSI} = Probabilidad de daño para un estado de daño del sistema *S* a intensidad *I*
DR_{DS} = Relación de daño (damage ratio) por un estado de daño.

Obteniendo así, la matriz MDF:

$$MDF = \begin{vmatrix} MDF_{1,1} & . . & MDF_{1,L} \\ \vdots & MDF_{i,i} & \vdots \\ MDF_{k,1} & . . & MDF_{k,L} \end{vmatrix}_{kxL}$$

donde :

$MDF_{i,j}$ = Mean Damage Factor (MDF) para el sistema i a una intensidad j. (Este valor es el que se obtiene de las matrices de daño).
K = Número de sistemas bajo consideración.
L = Número de niveles de intensidad sísmica considerados.

Finalmente el daño del sistema S en el i-ésimo tramo, el cual tiene una intensidad sísmica estimada $SI_{i,e}$ para el terremoto hipotético e, se estima como el producto del elemento (S, $S_{i,e}$) de la matriz MDF por el total de longitud $L_{S,I}$ del tramo (matriz de longitudes).

$$D_{s,i} = MDF_{S,SIe} \times L_{i,j} \qquad \text{Ec. 4.3}$$

donde:

$D_{s,i}$ = Daño del Sistema S en el i-ésimo tramo
$MDF_{S,SIe}$ = Factor de daño dado por las matrices para un sistema S sometido a una

intensidad e.
$L_{i,j}$ = Longitud del sistema i en el tramo j.

El factor de daño en los sistemas de acueducto y gas se expresa en términos del número de roturas por Km de tubería. El procedimiento descrito anteriormente se utilizó para evaluar las redes de distribución de los sistemas de acueducto, alta tensión y gas .

4.3.2 Vulnerabilidad de edificaciones de líneas vitales

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 :

- Importancia.
- Vulnerabilidad intrínseca
- Vulnerabilidad a la amenaza

El cálculo de la vulnerabilidad se realiza de la siguiente forma :

$$V_T = I*0.3 + VI*0.4 + VA*0.3 \qquad \text{Ec. 4.4}$$

donde:
I = Importancia
VI = Vulnerabilidad Intrínseca
VA = Vulnerabilidad a la Amenaza
V_T = Vulnerabilidad Total

Los valores de 0.3 y 0.4 que se expresan como porcentajes y representan el peso de la calificación de la importancia, la vulnerabilidad intrínseca y la vulnerabilidad a la amenaza en el cálculo de la vulnerabilidad total.

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 servicio público.

Con respecto a la vulnerabilidad intrínseca, ésta se define con base en el comportamiento de la estructura de acuerdo con sus características propias (regularidad e irregularidad tanto en planta como en alzado, construcción con base en el Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes, presencia de columnas cortas y otros factores).

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. De la misma manera que para las centrales telefónicas, la vulnerabilidad intrínseca de cada subestación se calificó entre 0 y 1 siendo 1 la más vulnerable.

4.3.3 Estimación del riesgo

La Figura 4.10 muestra los daños esperados en las redes del acueducto para el caso de un sismo cercano moderado que ocurra en la falla Frontal de la Cordillera Oriental con una aceleración máxima en terreno firme del orden de 0.12g. La Figura 4.11 muestra los daños esperados para un sismo hipotético en la falla Frontal con una aceleración de 0.2g. Este último correspondería a una de las peores situaciones que podría esperarse.

Para redes de alta tensión a diferencia de tuberías enterradas, los daños se calcularon como porcentaje de longitud caida de la red. La Figura 4.12 y 4.13 muestran los tramos de cables afectados debido a un sismo cercano moderado de 0.12g y los daños esperados para un sismo cercano fuerte con una aceleración máxima de 0.20g, respectivamente.

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. En las Figuras 4.14 y 4.15 se presenta la calificación de la vulnerabilidad de las centrales telefónicas ante los dos sismos probables esperados en la falla frontal de la Cordillera Oriental.

Para obtener los daños de cada tramo de la tubería de la red de gas se hizo uso del sistema de información geográfica con la metodología para redes explicada anteriormente. Las Figuras 4.16 y 4.17 muestran los daños esperados para los escenarios hipotéticos que causarían los sismos ya descritos de la falla Frontal.

FIGURA 4.10

FIGURA 4.11

FIGURA 4.12

FIGURA 4.13

FIGURA 4.14

FIGURA 4.15

FIGURA 4.16

FIGURA 4.17

4.3.4 Análisis de resultados

En relación con las líneas vitales el riesgo puede considerarse, en forma general, como la probabilidad de no estar disponible para satisfacer unos niveles de funcionamiento y servicio mínimos establecidos. Este tipo de análisis considera un balance entre los costos de dar un aumento en la resistencia sísmica de las líneas vitales evaluadas, con los costos asociados de los daños esperados en cada sistema como consecuencia de un evento probable durante un tiempo de exposición definido. Esto permitiría a cada una de las empresas de servicios públicos establecer criterios de optimización que tengan en cuenta las consecuencias sociales debidas al daño en las líneas vitales y la seguridad para la sociedad.

Un análisis de esta naturaleza permite en algunos casos identificar componentes vulnerables de un sistema, requerimientos de seguridad y la formulación de planes de emergencia y contingencia para retornar en el menor tiempo posible a un nivel de funcionamiento o servicio aceptable. Además, es una herramienta para la evaluación de los requerimientos de rehabilitación e intervención de componentes que se identifiquen como críticos de cada sistema analizado.

Para el caso de Santafé 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 terremotos probables en la ciudad. En algunos casos se estimó en forma 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.

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 Santafé de Bogotá, que permite dimensionar la magnitud de los problemas potenciales que se tendrían para cada sismo de análisis. 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, rehabilitación, costo y tiempo de recuperación del servicio en las diferentes zonas de la ciudad. Esto debe ser estimado y analizado por cada entidad de acuerdo con los escenarios de daños calculados, los cuales se describen a continuación:

- Ante el escenario hipotético de un sismo lejano que llegara con una aceleración del orden de 0.038g a nivel del basamento rocoso, se esperaría una amplificación importante de las ondas sísmicas en particular en las zonas de suelos blandos. Aunque este tipo de evento afectaría posiblemente a algunas edificaciones altas ubicadas particularmente en el norte de la ciudad, 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, tal como se describe en el capítulo relacionado con la vulnerabilidad de las edificaciones, pero dichas pérdidas serían motivadas 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 moderado en la Falla Frontal de la Cordillera Oriental (cercano), 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 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 como Suba, Concordia, Circo y Bosanova, y centrales telefónicas como Suba, Chapinero, Teusaquillo, Centro, Bosa y Candelaria 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 fuerte que se presente en la misma falla u otra cercana a la ciudad 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 calcular las estructuras de las edificaciones y la mayoría de la infraestructura de servicios que se construye 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. 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. 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. Causaría además miles de muertos y heridos, tal como se describe en el capítulo de vulnerabilidad de las edificaciones; se presentarían incendios generalizados en la ciudad por los escapes tanto de gas natural como de las instalaciones domiciliarias de gas propano. 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.

No obstante que las empresas de servicios cuentan con brigadas para la atención de las situaciones de daño convencionales y que incluso la Empresa de Acueducto y Alcantarillado cuenta con un plan de contingencia que indica las posibles alternativas de respuesta en caso de la interrupción de alguno de los sistemas de abastecimiento al cual se hizo referencia en este estudio, es importante enfatizar que, para los escenarios sísmicos antes descritos, no serían suficientes las medidas allí establecidas y que, por lo tanto, deben complementarse las medidas de contingencia existentes con planes de acción específicos para cada escenario sísmico. Igualmente, debe destacarse que este estudio no consideró la vulnerabilidad sísmica de las plantas de abastecimiento ni de la infraestructura de los sistemas externa al perímetro de la ciudad, que también puede ser afectada por los mismos sismos, y que por lo tanto ameritan estudios detallados de vulnerabilidad y eventualmente de intervención o reforzamiento.

Tal como se mencionó con anterioridad, aunque este estudio debido al tipo de información disponible y su alcance, no permite en la mayoría de los casos identificar los componentes específicos que sufrirían las rupturas o daños pronosticados de manera estadística, si permite dimensionar en ordenes de magnitud la problemática que habría para Santafé de Bogotá en la eventualidad de la ocurrencia de cualquiera de los escenarios hipotéticos propuestos, que obviamente tienen una probabilidad y se consideran factibles. Por lo tanto se espera que el Comité Distrital para la Prevención y Atención de Desastres y cada una de las empresas de servicios de la ciudad utilicen este análisis como un punto de partida para identificar estudios específicos que permitan determinar con mayor precisión el grado de vulnerabilidad sísmica de los principales componentes de los sistemas y se puedan así definir las medidas de mitigación de riesgo más efectivas que reduzcan el potencial de daños y pérdidas en términos económicos y sociales.

4.4 ORIENTACIONES PARA LA PLANIFICACIÓN URBANA Y LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE CONTINGENCIA

Determinado el modelo de pérdidas y evaluado el nivel de riesgo existente se pueden definir, a través de los planes de desarrollo urbano, políticas de mitigación o reducción del mismo y los niveles de intervención necesarios para alcanzar un nivel prefijado de

seguridad. Estas políticas están relacionadas con:

- La definición mediante un acto administrativo de las zonas identificadas en la microzonificación sísmica, con fines de reglamentación urbana y normativa sismo resistente.

- La reducción de densificación de zonas urbanas, redefinición de tipos de estructura y número de pisos para edificaciones localizadas en áreas de alta susceptibilidad, reconocidas por la amenaza estimada de la microzonificación sísmica y de la vulnerabilidad de los elementos sometidos;

- La relocalización de elementos de vital importancia, como la infraestructura de servicios públicos, fundamental después de la manifestación del evento;

- La modificación del grado de vulnerabilidad de elementos que no pueden ser relocalizados, mejorando su resistencia a las solicitaciones que pueden esperarse del sismo probable en la zona, en especial de aquellos elementos usualmente denominados "tradicionales", los cuales han sido diseñados para soportar solamente cargas gravitacionales y que ofrecen un alto grado de vulnerabilidad; y

- La definición estratégica de áreas de emergencia en las cuales se establecerán las viviendas temporales para alojar la población después del evento. Estas áreas corresponden normalmente a los espacios públicos de diversión y entretenimiento.

Estas políticas deben tenerse en cuenta en adición a las políticas convencionales de desarrollo urbano en regiones localizadas en áreas propensas, puesto que son parte fundamental del desarrollo económico y social de dichas regiones y su no consideración puede llegar a presentar resultados desastrosos. El no tener en cuenta las variables de riesgo sísmico urbano en la definición del "uso del suelo" podría llegar en un alto número de casos a aumentarlo, lo cual sería infortunado y podría llegar a calificarse como un acto de negligencia de los planificadores, administradores y encargados del manejo de la región.

Además de las políticas de mitigación del riesgo que deben llevarse a cabo en la planificación urbana y regional existen otras medidas de predesastre y posdesastre que deben implementarse como parte de las actividades y programa de seguridad, con el fin de crear un marco adecuado y consistente que permita una flexible toma de decisiones para la efectiva e inmediata rehabilitación y revitalización de las actividades industriales, económicas y sociales de las zonas afectadas.

4.4.1 Actividades predesastre

Fundamentalmente, a nivel de medidas predesastre, tal como se ha ilustrado en este documento debe llevarse a cabo una evaluación científica del riesgo sísmico partiendo de la premisa irrefutable de que una región afectada por movimientos sísmicos fuertes en el pasado está expuesta a sufrir las consecuencias de la manifestación de innumerables sismos moderados y la alta probabilidad de la manifestación de un sismo de proporciones catastróficas. Es responsabilidad de las autoridades gubernamentales el promover que los planes maestros de desarrollo urbano incorporen criterios de seguridad sísmica, basados en la determinación de niveles económicamente justificados de riesgo sísmico aceptable, que asegure que el nivel de daño estimado permita el uso sin peligro de las edificaciones,

los servicios públicos y otras estructuras de vital importancia ante la manifestación de un evento esperado (Cardona, 1986)

Una vez dado a conocer este estudio, las autoridades, los organismos de socorro y las entidades nacionales con anticipación, deben llevar a cabo un plan de mitigación del riesgo y de protección civil que cumpla los siguientes objetivos:

- Cuantificación de datos para la planificación urbana y preparación de planes de emergencia y contingencia que definan con anterioridad y de acuerdo con las características de los escenarios la actuación coordinada de los organismos operativos y de apoyo que garantice la máxima eficiencia en las etapas de búsqueda y rescate, atención médica, suministros, alojamiento y en general la asistencia de la zona afectada;

- Identificación de las zonas de atención médica y de las edificaciones claves de la ciudad; las Figuras 4.18 y 4.19, ilustran para el caso de Santafé de Bogotá las edificaciones de mayor importancia y los sitios de recreación, que en caso de un fuerte terremoto pueden ser utilizados para efectos de disponer de alojamiento temporal.

- Elaboración de programas de educación e información pública para la comunidad expuesta acerca del fenómeno y recomendaciones generales y domiciliarias que permitan mitigar los efectos sobre la población y los bienes.

- Estimación de las pérdidas económicas directas e indirectas y los respectivos planes de ajuste, rehabilitación y asistencia para la reconstrucción y desarrollo de la región.

Este plan de mitigación del riesgo y de protección civil debe incluir básicamente las siguientes actividades:

- Elaboración de material para los medios de comunicación con el fin de realizar campañas de información pública acerca de los futuros eventos y recomendaciones de comportamiento;

FIGURA 4.18

FIGURA 4.19

- Desarrollo de cursos de orientación, ilustración y preparación para los futuros eventos dentro de los programas de educación en todos los niveles educativos;

- Preparación de grupos operativos de emergencia, adiestrados y listos para asumir el manejo organizado de la búsqueda, el rescate, el transporte en caso de evacuaciones, los suministros, el alojamiento temporal y las comunicaciones, entre otros. Esta preparación puede ser calibrada a través de simulacros en diferentes puntos de la ciudad;

- Preparación de planes de emergencia y capacitación del personal médico y paramédico para la atención de la población en el caso de presentarse el evento;

- Mejoramiento e instalación de las estaciones sismológicas y las redes de instrumentos de medición de movimientos fuertes, fundamentales para la depuración y refinamiento de la evaluación del riesgo.

4.4.2 Actividades posdesastre

Las actividades posteriores a la manifestación del evento sísmico pueden catalogarse como: medidas de emergencia, cuyo objetivo es la atención inmediata a la población; medidas a corto plazo, que pretenden la rápida recolección de información a cerca del daño y el estado de las edificaciones, necesaria para la determinación de los programas de protección civil y rehabilitación; y las medidas a largo plazo, correspondientes al desarrollo de los planes de reconstrucción y rehabilitación de la zona con la aplicación de los programas de ajuste económico definidos con base en la información obtenida. (Cardona, 1996)

Las medidas de emergencia pueden resumirse en las siguientes:

- Establecimiento de centros que puedan llevar a cabo actividades de emergencia en cada alcaldía menor, coordinada por una unidad central.

- Control de incendios por parte de personal voluntario y profesional.

- Búsqueda y rescate de la población.

- Evacuación de las zonas densamente pobladas y de lugares peligrosos.

- Establecimiento de centros para el suministro de alimentos y para la organización de otras actividades de emergencia.

- Organización del alojamiento temporal, de centros médicos, escuelas y otros servicios públicos de primera necesidad.

- Retiro de las ruinas, demoliciones y limpieza de estructuras o partes de las edificaciones peligrosas para la población.

- Aplicación de los programas de ajuste económico para el restablecimiento, la reconstrucción y rehabilitación de las zonas afectadas.

- Medidas a mediano y corto plazo corresponden básicamente a estudios después de la manifestación del evento, fundamentales para la recuperación posterior al desastre:

- Clasificación de las edificaciones de acuerdo con su nivel de daño y grado de funcionalidad utilizando una metodología única de evaluación;

- Análisis de la actividad sísmica utilizando las estaciones existentes y temporales y acelerómetros de movimiento fuerte instalados en la zona para que recojan la información de posibles replicas;

- Elaboración de especificaciones de reparación y restauración de las estructuras deterioradas;

- Plan de emergencia de desarrollo urbano para la reconstrucción de vivienda, servicios públicos, escuelas, etc. y

- Ejecución de la reparación y demolición de las edificaciones, simultáneamente con el estudio de las condiciones locales del suelo.

Utilizando una metodología sistemática y única puede llevarse a cabo una evaluación eficiente y rápida de la magnitud de los daños y puede presentarse en un corto tiempo la información básica para la toma de decisiones y la elaboración de medidas económicamente justificadas y técnicamente consistentes para la reducción de las consecuencias del desastre.

En general, las medidas pre y posdesastre no difieren fundamentalmente, sin embargo de las evaluaciones a corto plazo de los daños y la vulnerabilidad de los elementos sometidos al evento se podrán definir las modificaciones respectivas de los estudios de riesgo desarrollados con anterioridad, lo cual resulta de especial importancia para la zona expuesta.

4.5 REFERENCIAS

Algermissen, S.T., and K.V. Steinbrugge, 1984. *"Seismic Hazard and Risk Assessment : Some Case Studies"*. The Geneva Papers on Risk and Insurance. Vol. 9, No. 30.

Applied Technology Council, 1978. *"Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings"*. Commentary on ATC 3-06, Versión en Español Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, Bogotá.

ATC - 13, Applied Technology Council, 1985. *"Earhtquake Damage Evaluation Data fot California "*. (FEMA), Redwood City, CA.

ATC - 14, Applied Technology Council, 1987. *" Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings "*. Redwood City, CA.

ATC - 21, Applied Technology Council, 1988. *"Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook"*. (FEMA Report 154) Redwood City, CA.

ATC - 22, Applied Technology Council, 1989. *"Seismic Evaluation of Existing Buildings: Supporting Documentation "*, Redwood City, CA.

Cardona, O.D., 1986. *"Estudios de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo Sísmico: Planeación Física y Urbana en Areas Propensas"*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Boletín Técnico No. 33. Santafé de Bogotá.

Cardona, O.D., 1996. *"Variables Involucradas en el Manejo de Riesgos: Aspectos Técnico-Científicos, Sociales y Políticos"*. Revista Desastres y Sociedad, La Red, Enero-Junio 1996. No.6/Año4. Lima.

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santafé de Bogotá, 1994. *"Condiciones Operacionales Sistema Acueducto"*. Resumen Gerencia Operativa. Dirección Operación y Control Acueducto. Santafé de Bogotá D.C.

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santafé de Bogotá, 1995. *"Informe Anual 1994"*. Gerencia de Operación, Dirección Operación y Control Acueducto. Santafé de Bogotá D.C.

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santafé de Bogotá, 1995. *"Informe Anual de Desempeño"*. Gerencia de Operación. Enero-Abril 1995. Santafé de Bogotá D.C.

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santafé de Bogotá, 1993. *"Diagnóstico - Localidad Usme"*. Subgerencia de Planeamiento. Santafé de Bogotá D.C.

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santafé de Bogotá, 1995. *"Informe Anual de Operación 1994"*. Subgerencia de Generación y Transmisión. División Centro de Control. Departamento de Operación y Control. Santafé de Bogotá D.C..

FEMA, 1988. *"Estimating Losses From Future Earthquakes"*. Panel Report and Technical Background, Series 51.

Gas Natural E.S.P, 1996. *"Estadísticas de Fuga. Año 1994 a 1996"*. Santafé de Bogotá D.C.

Gas Natural E.S.P, 1995. *"Manual Básico para Atención de Emergencias"*. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS - Universidad de los Andes, 1996. *"Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones y Líneas Vitales"*. Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyectos Nos. 15 y 16. Santafé de Bogotá.

Martel, R. R., 1964. *"Earthquake Damage to Type III Buildings in Long Beach, 1933"*. Earthquake Investigations in the Western United States, 1931-1964. Washington, D.C. Coast and Geodetic Survey.

Petrovski J.and Milutinovicz, 1985. *"Earthquake Damage Prediction - Modeling and Assessment"*, IZIIS, Skopje.

Ordaz M., 1994. *"Bases de Datos para la Estimación de Riesgo Sísmico en la Ciudad de México"* . Cuadernos de Investigación No. 1. CENAPRED. México D.F.

Planeación Distrital, 1994. *"Conservación del Estilo en Santafé de Bogotá"*.

Sauter y Sha *"ATC-13".* (FEMA), Redwood City, CA.

Secretaria Distrital de Salud, 1994. *"Análisis de Vulnerabilidad y Planes Hospitalarios de Emergencia"* . Memorias Seminario Taller.

Secretaria Distrital de Salud, 1994. *"Manual de Normas Técnico - Administrativas para la Prestación de Servicios de Urgencias en el Sistema Distrital de Salud".*

Steinbrugge K.V., 1982. *"Earthquakes, Volcanos and Tsunamis : An Anatomy of Hazard"*.

Trifurnac M.D and Brady A.G, 1975. *"On the Correlation of Seismic Intensity Scales with the Peaks of Recordered Strong Ground Motion".* Bull. Seism. Soc Am. Vol. 65, No. 1.

Horney J, 1994. *"Bogotá Desde el Aire"*. Villegas Editores. Santafé de Bogotá.

Whitman R.V., J. W. Reed, and S. T. Hong, 1973. *"Earthquake Damage Probability Matrices"*. Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering. El Cerrito, Calif. : EERI.