INGEOMINAS

UPES
Unidad de Prevención y Atención de Emergencias de Santa Fe de Bogotá, D.C.

DIRECCION NACIONAL PARA LA PREVENCION Y ATENCION DE DESASTRES

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO 01 - 93

Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá

ENTIDAD EJECUTORA

INGEOMINAS

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTA FÉ DE BOGOTÁ

Agosto de 1997

CARTA DEL DIRECTOR

Colombia está localizada en un ambiente sismo-tectónico de gran actividad caracterizado por la frecuente ocurrencia de fenómenos naturales como deslizamientos, sismos y erupciones volcánicas. Debido a la vulnerabilidad a la cual está expuesta la mayoría de nuestra población, todos estos fenómenos se constituyen en amenazas permanentes. Dentro de estos eventos, el que produce mayores pérdidas de vidas humanas y daños a bienes son los terremotos.

Santafé de Bogotá sufrió en las últimas décadas un crecimiento incontrolado de asentamientos humanos, que sumado a la falta de planificación urbana trajo como consecuencia la existencia actual de una gran diversidad de construcciones, de las cuales muchas no cumplen con las normas establecidas para el país en el Código de Construcciones Sismo-Resistentes de 1984; lo anterior conlleva a un incremento no cuantificado de su vulnerabilidad ante estas amenazas de origen geológico.

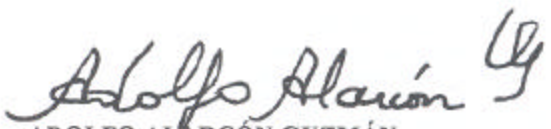
La Unidad para la Prevención de Emergencias del Distrito (UPES), la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (DNPAD) e INGEOMINAS establecieron un convenio entre los años 1994 y 1997, para lograr culminar con éxito el proyecto **Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá**, contando con la participación de la Universidad de los Andes e INGEOMINAS como entidades ejecutoras. En este proyecto se definen cinco zonas de comportamiento homogéneo en la ciudad, caracterizadas por parámetros particulares útiles para el diseño y construcción de edificaciones y líneas vitales, los cuales serán incorporados a la Norma de Construcciones Sismoresistentes de la ciudad. Así mismo, se establecieron tres escenarios de daño que pueden presentarse en caso de que ocurran sismos de determinadas características.

Dentro de los grandes productos alcanzados se resaltan:

- Mapa geológico de la ciudad a escala 1:50.000.
- Mapas tectónicos y neotectónicos de la zona de influencia sismológica de la ciudad.
- Caracterización estática y dinámica de los suelos de la ciudad.
- Mapa de zonificación geotécnica a escala 1:50.000
- Mapa de microzonificación sísmica a escala 1:50.000.
- Mapas de vulnerabilidad sísmica de edificaciones y líneas vitales de acuerdo con tres escenarios hipotéticos probables.

Tengo el agrado de presentar la publicación de dicho estudio el cual servirá para que la ciudad lo tome como un insumo importante de tal forma que se establezcan las orientaciones para la planificación urbana y la elaboración del plan de contingencia ante la probable ocurrencia de un sismo, en donde debe haber una participación activa de todas las entidades del Distrito, así como de la comunidad en general.

Cordialmente,



ADOLFO ALARCÓN GUZMÁN
Director General
INGEOMINAS

INDICE

INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA REGIONAL

Pág.

1.1 ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA DE LAS PRINCIPALES FUENTES SISMOGÉNICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO 1
1.1.1 Emplazamiento tectónico regional 1
1.1.2 Actividad neotectónica 2
1.1.3 Características morfotectónicas 4
1.1.4 Análisis microtectónico 7
1.1.5 Síntesis de resultados 8
1.2 CATÁLOGO DE SISMOS 10
1.2.1 Sismicidad histórica de Santafé de Bogotá y alrededores 11
1.2.2 Actualización y análisis del Catálogo de sismos de Colombia 15
1.3 AMENAZA SÍSMICA REGIONAL 16
1.3.1 Aspectos sismotectónicos de la amenaza sísmica de la ciudad de Santafé de Bogotá 18
1.3.2 Aceleración e intensidad local máximas probables 22
1.3.3 Componentes locales de la amenaza sísmica 27
1.3.4 Acelerogramas de diseño 28
1.3.5 Aproximación al establecimiento de los acelerogramas de diseño 29
1.3.6 Espectros de respuesta de acelerogramas de diseño 31
1.4 REFERENCIAS 32

CAPITULO 2 CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO DE LA CIUDAD

2.1 GEOLOGÍA LOCAL 35
2.1.1 Litoestratigrafía 35
2.1.2. Geología estructural 38
2.2 ESTUDIOS GEOFÍSICOS 39
2.2.1 Estudios de resistividad eléctrica 39
2.2.2 Estudios gravimétricos 40
2.2.3 Estudios sísmicos 42
2.2.4 Modelo geológico-geofísico del subsuelo de la ciudad 43
2.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA 45
2.3.1 Localización de los sondeos 45
2.3.2 Propiedades básicas del subsuelo de Santafé de Bogotá 47
2.3.3 Compresibilidad del subsuelo de Santafé de Bogotá 50
2.3.4 Resistencia al corte 53
2.3.5 Comportamiento del subsuelo de Santafé de Bogotá bajo cargas cíclicas 54
2.3.6 Zonificación geotécnica de síntesis 58
2.4 REFERENCIAS 61

CAPITULO 3 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

3.1 DETERMINACIÓN DE ZONAS CON RESPUESTA DINÁMICA 65
3.1.1 Técnicas utilizadas en el análisis de señales sísmicas 66
3.1.2 Mediciones realizadas y zonas de respuesta dinámica similar 66
3.1.3 Mediciones e interpretación de microtrepidaciones en Bogotá 66
3.1.4 Observaciones finales 68
3.2 INFORMACIÓN SÍSMICA Y MODELO UNIDIMENSIONAL DE CALIBRACIÓN 68
3.2.1 Datos y características de eventos sísmicos 68
3.2.2 Caracterización geotécnica y propiedades dinámicas 70
3.2.3 Respuesta frecuencial en la estación INGEOMINAS 71

3.3 RESPUESTA MEDIANTE MODELOS UNIDIMENSIONALES ... 73
3.3.1 Perfiles de análisis ... 73
3.3.2 Caracterización geotécnica y propiedades dinámicas ... 73
3.3.3 Sismos de diseño ... 73
3.3.4 Análisis de respuesta dinámica ... 73
3.4 RESPUESTA SÍSMICA MEDIANTE MODELOS BIDIMENSIONALES ... 76
3.4.1 Forma de la cuenca y secciones para el análisis ... 77
3.4.2 Análisis de respuesta dinámica y resultados ... 77
3.4.4 Amplificaciones locales en zonas de los cerros ... 79
3.5 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y RECOMENDACIONES ... 81
3.5.1 Zona 1 - Cerros ... 81
3.5.2 Zona 2 - Piedemonte ... 81
3.5.3 Zona 3 - Lacustre A ... 81
3.5.4 Zona 4 - Lacustre B ... 81
3.5.5 Zona 5 - Terrazas y Conos ... 81
3.6 REFERENCIAS ... 87

CAPITULO 4 VULNERABILIDAD SÍSMICA URBANA DE SANTAFÉ DE BOGOTA

4.1 METODOLOGÍA GENERAL ... 91
4.2 VULNERABILIDAD DE LAS EDIFICACIONES ... 92
4.2.1 Funciones de vulnerabilidad ... 94
4.2.2 Estimación del riesgo ... 95
4.2.3 Análisis de resultados ... 96
4.3 VULNERABILIDAD DE LÍNEAS VITALES ... 106
4.3.1 Vulnerabilidad de redes ... 107
4.3.2 Vulnerabilidad de edificaciones de líneas vitales ... 109
4.3.3 Estimación del riesgo ... 109
4.3.4 Análisis de resultados ... 118
4.4 ORIENTACIONES PARA LA PLANIFICACIÓN URBANA Y LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE CONTINGENCIA ... 119
4.4.1 Actividades predesastre ... 120
4.4.2 Actividades posdesastre ... 123
4.5 REFERENCIAS ... 123

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

INDICE DE FIGURAS

INTRODUCCIÓN

I.1 LOCALIZACIÓN TECTÓNICA DE COLOMBIA
I.2 DIAGRAMA DE PROCESO GENERAL PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

CAPITULO 1

1.1 TRAZAS IDEALIZADAS DE LOS SISTEMAS DE FALLAMIENTO
1.2 MAPA DE ACTIVIDAD DE FALLAS DE LAS REGIONES NOROCCIDENTAL Y SURORIENTAL
1.3 MAPA DE ACTIVIDAD DE FALLAS DE LA REGIÓN CENTRAL
1.4 BLOQUE DIAGRAMA DE LA REGIÓN NOROCCIDENTAL
1.5 BLOQUE DIAGRAMA DE LA REGIÓN SURORIENTAL
1.6 RASGOS NEOTECTÓNICOS SOBRE LA FALLA DE GUAYURIBA
1.7 DEPÓSITO CUATERNARIO DEFORMADO TECTÓNICAMENTE
1.8 MAPA PRELIMINAR DE ZONIFICACIÓN SISMOTECTÓNICA
1.9 MAPA GENERAL DE INTENSIDADES DE LA SABANA DE BOGOTA Y ALREDEDORES (PERÍODO 1500-1994)
1.10 MAPA DE EPICENTROS DE SISMOS HISTÓRICOS EN LA SABANA DE BOGOTÁ 1500 - 1994
1.11 EVENTOS SELECCIONADOS PARA LA CONFORMACIÓN DEL CATÁLOGO
1.12 NÚMERO ESPERADO DE SISMOS POR AÑO PARA LOS PERÍODOS DE REPORTE COMPLETO
1.13 FOCOS DE LOS SISMOS PARA EL TERRITORIO COLOMBIANO Y TRAZAS IDEALIZADAS DE LAS FALLAS
1.14 VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD FOCAL EN LA ZONA DE BENIOFF (SECCIÓN A)
1.15 VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD FOCAL EN LA ZONA DE BENIOFF (SECCIÓN B)
1.16 SISMOS ASIGNADOS PARA BOGOTÁ R=200KM
1.17 SISMOS NO ASIGNADOS PARA BOGOTÁ R=200KM
1.18 RECURRENCIA PARA LA REGIÓN ESTUDIADA EN LOS SISMOS NO ASIGNADOS
1.19 GRÁFICAS DE ATENUACIÓN DE LA ACELERACIÓN DADAS POR ESTEVA, DONOVAN Y McGUIRE
1.20 ACELERACIÓN LOCAL HORIZONTAL MÁXIMA PROBABLE OBTENIDA CON EL MODELO DE FUENTES DEL CSR
1.21 ACELERACIÓN LOCAL HORIZONTAL MÁXIMA PROBABLE OBTENIDA CON EL MODELO NEOTECTÓNICO DE ESTE ESTUDIO
1.22 REGISTROS DE LOS TRES SISMOS DE DISEÑO ESTABLECIDOS
1.23 ESPECTROS DE RESPUESTA CORRESPONDIENTES A LOS ACELEROGRAMAS DE DISEÑO

CAPITULO 2

2.1 MAPA GEOLÓGICO DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
2.2 MAPA DE ANOMALÍA RESIDUAL CON EFECTOS DE SOMBRA
2.3 VALORES DE V_p, V_s Y PROFUNDIDADES EN INGEOMINAS
2.4 MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO CALLE 170
2.5 MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO INGEOMINAS - FUNZA
2.6 MAPA DEL ESPESOR DE SEDIMENTOS
2.7 LOCALIZACIÓN DE LOS SONDEOS
2.8 PERFIL ESTRATÉGICO Y ENSAYOS DE LABORATORIO - SONDEO REALIZADO EN INGEOMINAS
2.9 GRÁFICO DEL LÍMITE LÍQUIDO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD - ZONA DE ARCILLAS BLANDAS
2.10 GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE PARA TODOS LOS SUELOS ESTUDIADOS
2.11 GRÁFICO DE PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD - ZONA DE ARCILLAS BLANDAS.
2.12 GRÁFICO DE INDICE DE COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO
2.13 GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL CORRESPONDIENTE AL LÍMITE LÍQUIDO

2.14 GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL CORRESPONDIENTE AL LÍMITE PLÁSTICO
2.15 GRÁFICO DE RESULTADO ENSAYO TRIAXIAL CU (MUESTRA N14-18, PROFUNDIDAD 41.5)
2.16 GRÁFICO DE LOS CICLOS DE HISTÉRESIS ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO
2.17 GRÁFICO DE RESULTADO TÍPICO DE ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO CURVA DE MÓDULO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN
2.18 GRÁFICO DE RESULTADO TÍPICO DE ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO. CURVA DE AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN
2.19 VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE PARA DIFERENTES PRESIONES DE CONFINAMIENTO
2.20 GRÁFICAS DEL MÓDULO DE CORTANTE MÁXIMO
2.21 GRÁFICO DE G_{max} EN FUNCIÓN DEL ESFUERZO DE CONFINAMIENTO σ_3
2.22 GRÁFICO DE G_{max} EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE VACÍOS e
2.23 GRÁFICO DE CURVAS G/G_{max} EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN CORTANTE PARA DIFERENTES Ip
2.24 GRÁFICO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO CONTRA ENSAYO DE LABORATORIO
2.25 RESULTADOS TÍPICOS DE UN ENSAYO PRESIOMÉTRICO CÍCLICO
2.26 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DOWN HOLE
2.27 MAPA DE ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE SANTAFÉ DE BOGOTA

CAPITULO 3

3.1 MAPA DE ISOSISTAS DE BOGOTÁ PARA EL SISMO DE MURINDÓ
3.2 MAPA DE ISOSISTAS DE BOGOTÁ PARA EL SISMO DE TAURAMENA
3.3 PLANO BÁSICO DE LA CIUDAD DONDE SE INDICAN LOS PUNTOS SELECCIONADOS PARA EL REGISTRO DE MICROTREPIDACIONES
3.4 PERÍODOS DE VIBRACIÓN DOMINANTES A PARTIR DE MICROTREPIDACIONES
3.5 UBICACIÓN DE LOS EPICENTROS DE LOS SISMOS UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO Y LAS ESTACIONES DE LA RED SIMOLÓGICA NACIONAL
3.6 COMPARACIÓN DE LAS COMPONENTES EW REGISTRADAS EN EL SISMO DE TAURAMENA Y SUS RESPECTIVOS ESPECTROS DE RESPUESTA
3.7 GRÁFICAS DE DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ Y DE AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN POR CORTANTE
3.8 COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS TEÓRICAS OBTENIDAS MEDIANTE EL MODELO UNIDIMENSIONAL
3.9 VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA DE RESPUESTA CON LA PROFUNDIDAD PARA LOS CUATRO SISMOS DE CALIBRACIÓN
3.10 MAPA DE ISOPERÍODOS FUNDAMENTALES DEL DEPÓSITO
3.11 ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL SONDEO No. 49 - INGEOMINAS
3.12 RESULTADOS OBTENIDOS CON ESPESORES DE PROFUNDIDAD 20, 40, 60, 80M. MANTENIENDO LAS CARACTERÍSTICAS DEL SONDEO DEL INGEOMINAS
3.13 FORMA DE LA CUENCA UTILIZADA EN EL ANÁLISIS Y LAS ACELERACIONES MÁXIMAS DE RESPUESTA EN SUPERFICIE PARA CADA UNO DE LOS SISMOS
3.14 MAPAS DE ISOACELERACIONES HORIZONTALES MÁXIMAS EN LA SECCIÓN DE ANÁLISIS PARA CADA UNO DE LOS SISMOS
3.15 ESPECTROS DE RESPUESTA SONDEO N48 UNIAGRARIA SISMO CERCANO (0.25g)
3.16 CORTE No. 3 QUEBRADA BOLONIA ACELERACIONES MÁXIMAS EN SUPERFICIE PARA SISMO DE DISEÑO
3.17 CORTE No. 3 QUEBRADA BOLONIA MAPAS DE ISOACELERACIONES MÁXIMAS PARA SISMOS DE DISEÑO
3.18 CORTE No. 3 QUEBRADA BOLONIA SISMO FRONTAL (0.20g) ESPECTROS DE RESPUESTA
3.19 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
3.20 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO - TALUDES NO INTERVENIDOS
3.21 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DISEÑO ZONA 1-CERROS
3.22 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO ZONA 2- PIEDEMONTE
3.23 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO ZONA 3 - LACUSTRE A
3.24 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO ZONA 4 - LACUSTRE B
3.25 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO ZONA 5 - TERRAZAS Y CONOS
3.26 ESPECTROS DE DISEÑO PARA LAS ZONAS 1,2,3,4 Y 5
3.27 ECUACIONES Y PARÁMETROS DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO PARA LAS ZONAS SÍSMICAS DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

CAPITULO 4

4.1 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD
4.2 PORCENTAJE DE ÁREA DESTRUÍADA POR MANZANA SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)
4.3 PORCENTAJE DE ÁREA DESTRUÍDA POR MANZANA SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)
4.4 PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR MANZANA SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)
4.5 PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR MANZANA SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)
4.6 NÚMERO DE HERIDOS SISMO CERCANO FUERTE (NOCHE) (0.20g)
4.7 NÚMERO DE MUERTOS SISMO CERCANO FUERTE (NOCHE) (0.20g)
4.8 NÚMERO DE HERIDOS SISMO CERCANO FUERTE (DÍA) (0.20g)
4.9 NÚMERO DE MUERTOS SISMO CERCANO FUERTE (DÍA) (0.20g)
4.10 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE ACUEDUCTO DEBIDOS AL SISMO CERCANO (0.12g)
4.11 DANOS ESPERADOS EN LA RED DE ACUEDUCTO DEBIDOS AL SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)
4.12 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE ALTA TENSIÓN PARA EL SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)
4.13 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE ALTA TENSIÓN PARA EL SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)
4.14 VULNERABILIDAD DE CENTRALES TELEFÓNICAS A LA AMENAZA SISMO CERCANO (0.12g)
4.15 VULNERABILIDAD DE CENTRALES TELEFONICAS A LA AMENAZA SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)
4.16 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE GAS PARA EL SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)
4.17 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE GAS PARA SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)
4.18 CLINICAS Y HOSPITALES CLAVES PARA LA CIUDAD EN CASO DE SISMO
4.19 ESCENARIOS DEPORTIVOS Y PARQUES ÚTILES PARA ALOJAMIENTO TEMPORAL EN CASO DE SISMO

NOTA: En el sobre se encuentran:

Mapa No. 1 MAPA GEOLÓGICO DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
Mapa No. 2 MAPA DE ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
MAPA No. 3 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

INTRODUCCION

I. ANTECEDENTES

Santafé de Bogotá está localizada en 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 clara de dicha actividad, debido a la baja frecuencia relativa de eventos importantes. Esta aparente contradicción debe tomarse con extrema cautela dado que no es correcto suponer que como en los últimos años no ha ocurrido un sismo fuerte, 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 al noreste de Santafé de Bogotá, tuvo una aceleración 7 veces más pequeña que el valor máximo probable esperado 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 2 incendios en la capital.

Las particularidades de la amenaza sísmica a la cual está expuesta la ciudad de Santafé de Bogotá se vienen tratando a nivel de especialistas desde finales de la década del 80. El terremoto que afectó a ciudad de México en 1985, cuyos daños se concentraron en una zona construída sobre depósitos de suelos blandos, de geometría y estratigrafía particular, fué un campanazo de alerta, ya que Santafé de Bogotá posee características similares a ésta.

Las autoridades distritales responsables del planeamiento físico de la ciudad, han tratado este tema desde finales de 1991 en el contexto de la elaboración de la reglamentación del Estatuto para el Ordenamiento Físico del Distrito Especial de Bogotá (Acuerdo 6 de 1990) y específicamente en el proceso de formulación del Plan de Gestión Ambiental - PGA. Resultado de lo anterior fué la inclusión en dicho Plan de la "Estrategia para la Prevención y Atención de Desastres por Riesgo Sísmico" que tiene como base la elaboración de los estudios necesarios para efectuar una microzonificación sísmica de la ciudad. El PGA fué aprobado por la Junta de Planeación Distrital en abril de 1992.

Por su parte, el Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química - INGEOMINAS y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, conscientes con anterioridad de las condiciones de amenaza sísmica que presenta la ciudad y con la experiencia adquirida por ambas entidades en la ejecución del proyecto de la evaluación de amenaza sísmica y microzonificación del territorio de la ciudad de Popayán, presentaron a la Administración Distrital, en octubre de 1992, una propuesta técnica y económica para la realización del "Estudio de la Respuesta Sísmica del Subsuelo de Santafé de Bogotá y de los efectos de un terremoto sobre la Ciudad". La presentación de dicha propuesta estuvo precedida de una reunión convocada en noviembre de 1991, para que los promotores del estudio ilustraran a funcionarios del Departamento Nacional de Planeación y la Unidad para la Prevención y Atención de Emergencias - UPES (anteriormente llamada Oficina para la Prevención de Emergencias de Santafé de Bogotá - OPES), sobre su conveniencia, así como de una propuesta preliminar sobre dicho estudio dirigida al Alcalde Mayor de la Ciudad en diciembre del mismo año.

En septiembre de 1992, la UPES presentó al Concejo Distrital el Plan Integral de Prevención y Atención de Desastres de Santafé de Bogotá (PAD), en el cual incluye la ejecución del proyecto propuesto por INGEOMINAS y la Universidad de los Andes. Dicho Plan fue aprobado como parte integrante del Plan General de Desarrollo de la ciudad, mediante el Acuerdo 31 de 1992. Posteriormente, la UPES inicia gestiones ante la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (DNPAD), el Departamento Administrativo de Planeación Distrital y la Secretaría de Obras Públicas para estructurar acuerdos interinstitucionales que permitieran la pronta ejecución del proyecto.

Finalmente, en Diciembre de 1993 se firmó un Convenio para el desarrollo del proyecto "Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá", entre la Unidad para la Prevención y Atención de Emergencias - UPES, como la entidad distrital responsable de la ejecución del Proyecto, la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres - DNPAD, como la entidad nacional cabeza del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y el Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química -INGEOMINAS, como la Institución directora de las actividades técnicas previstas. Como entidades ejecutoras participaron el INGEOMINAS y la Universidad de los Andes. La duración de dicho Convenio fué de 28 meses.

El documento aqui presentado, se constituye en el resumen técnico de los resultados obtenidos en el Proyecto.

II. JUSTIFICACIÓN

La ciudad de Santafé de Bogotá, capital de la República de Colombia, cuenta con aproximadamente seis millones de habitantes. Es aqui donde se concentra gran parte de la economía del país ya que se encuentran la mayoría de industrias de producción y las principales instituciones gubernamentales.

Es importante resaltar que existe inmigración contínua hacia la ciudad por diversas causas (violencia, mejoramiento del status de vida y nuevas oportunidades de progreso) trayendo como consecuencia asentamientos humanos en zonas no aptas para la urbanización. Lo anterior conlleva a la presencia de edificaciones que no cuentan con los mínimos requerimientos de construcción sismoresistente, así como de instalaciones eléctricas y sanitarias adecuadas, generando problemas de alto impacto ambiental. El crecimiento y la concentración de la población, el desarrollo de tecnologías peligrosas sin mínimas normas de seguridad y el deterioro del medio ambiente han dado como resultado que cada vez que se presentan fenómenos naturales intensos tales como terremotos, deslizamientos e inundaciones se produzcan graves efectos sobre la población y daños a sus bienes y su infraestructura causando enormes pérdidas que en ocasiones pueden llegar a afectar en forma muy severa el desarrollo económico y social del país.

En consideración a lo anterior se realizó el estudio de los efectos de un terremoto sobre la ciudad y de la respuesta sísmica del subsuelo de la misma. Este estudio se basa en las siguientes circunstancias técnicas:

- La zona Andina Colombiana es considerada a nivel global como altamente propensa a la actividad sísmica, por cuanto está afectada por un complejo sistema de fuerzas tectónicas derivadas de la interacción de tres placas principales: la placa de Nazca, que se desplaza de occidente a oriente con una velocidad de 60 a 80 mm/año, la placa Suramericana desplazándose en sentido aproximadamente contrario a la anterior con una velocidad promedio de 30 mm/año y la placa del Caribe con menores desplazamientos relativos regionales (Figura I.1). Como consecuencia de estos movimientos, en la zona se desarrollan varios sistemas de falla en los cuales se acumula y libera energía potencial con recurrencia variable.

- La ciudad de Santafé de Bogotá está localizada en las inmediaciones de un ambiente sismotectónico de reconocida actividad histórica, en el cual la Zona de Subducción del Pacífico, la falla de Romeral y el sistema de falla de Piedemonte Llanero (Falla de Guaicáramo o Frontal de la Cordillera Oriental), son las fuentes sismogénicas que mayor efecto potencial tienen sobre la Sabana de Bogotá. Lo anterior sin destacar la acción de otras fallas de carácter menos regional, como las fallas de Salinas, Bucaramanga y Bogotá, que presentan evidencias de actividad reciente.

- Según los datos históricos en los últimos quinientos años la sismicidad de Bogotá y su área cercana ha sido importante. En la capital, tres sismos han causado destrucción parcial de la ciudad (1785, 1827 y 1917) cuyos epicentros han sido localizados en el Páramo de Chingaza (Cundinamarca), Timaná (Huila) y Páramo de Sumapaz (Cundinamarca), respectivamente.

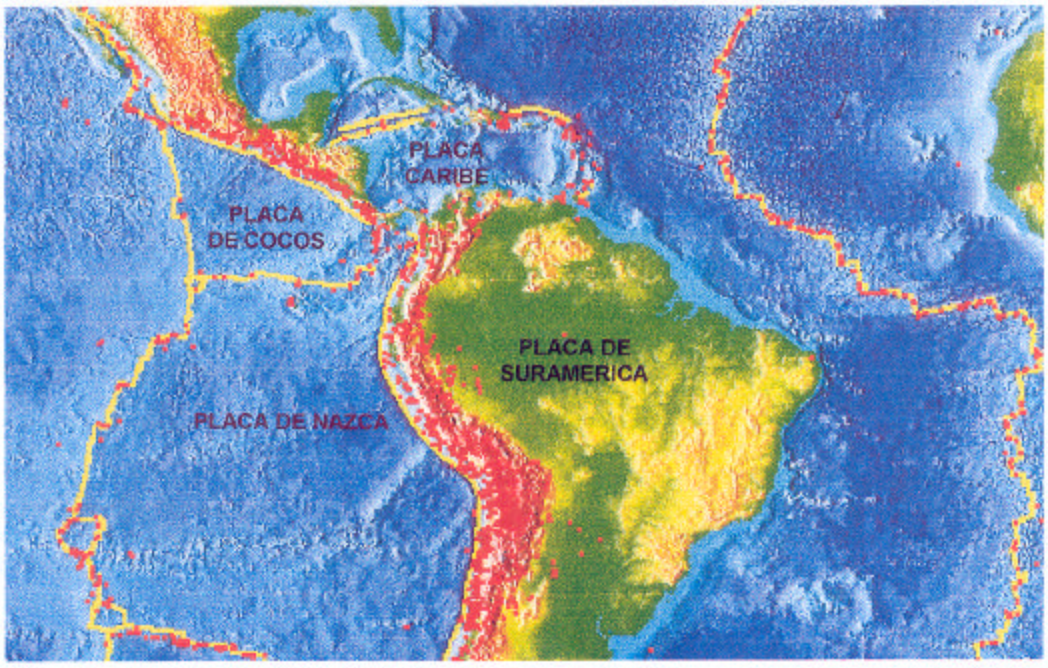


FIGURA I.1 LOCALIZACIÓN TECTÓNICA DE COLOMBIA

- En la actualidad, la ciudad se ha desarrollado hacia los terrenos de la Sabana, los cuales están conformados por suelos blandos de origen lacustre, que tienen propiedad de amplificar la respuesta del subsuelo cuando es afectado por un tren de ondas sísmicas, de tal manera que la intensidad de los daños que puede ocasionar un sismo a las construcciones localizadas en ellos puede ser considerablemente mayor a la que se registren en terrenos duros o rocosos. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el nivel de agua se encuentra en algunas zonas a poca profundidad y la presencia de suelo saturado hace aún más complejo el comportamiento del suelo ante un evento sísmico.

- Gran parte de la extensión de la ciudad fué construida antes de la expedición del Decreto 1400 de junio de 1984 o Código de Construcciones Sismos Resistentes para Colombia. Además, si se tiene en cuenta que dicho Código no contempla especificaciones de respuesta local a las ondas sísmicas, como el caso de la amplificación de las ondas en suelos blandos o efectos topográficos, resulta necesario conocer el grado de vulnerabilidad de la ciudad ante la amenaza sísmica.

III. OBJETIVOS Y MÉTODO DE TRABAJO

Los objetivos del proyecto se enmarcan en la política del PAD, que plantea la necesidad de estudiar y evaluar técnicamente las diferentes amenazas naturales, como requisito para implementar los correspondientes planes de mitigación y prevención.

Objetivos generales

- Realizar la microzonificación de la ciudad y sus áreas de futura expansión de acuerdo con la respuesta sísmica local del subsuelo, de tal manera que a partir de ella se puedan definir los parámetros específicos que debe cumplir el diseño estructural sismo resistente.

- Estudiar los efectos generales que el máximo sismo probable puede causar en Santafé de Bogotá y sus zonas de futura expansión.

Objetivos específicos

- Revisar las características geológicas de la ciudad y de sus condiciones tectónicas e hidrogeológicas.
- Evaluar y revisar la amenaza sísmica a la cual está sometida la región y también de la posibilidad de actividad sísmica local.
- Caracterizar geofísica y geotécnicamente la cuenca sobre la cual está situada la ciudad.
- Evaluar la respuesta sísmica local de los suelos de la ciudad.
- Estimar los efectos potenciales sobre edificaciones vulnerables mediante la identificación y tipificación de áreas con construcciones de cierta homogeneidad.
- Estimar los efectos de un sismo sobre los sistemas matrices de abastecimiento de agua, eléctrico, teléfonos y gas.

El método de trabajo se dividió en cuatro grandes actividades: amenaza sísmica regional, respuesta sísmica local, vulnerabilidad y sistema de información georreferenciado (SIG). En la figura I.2 se presenta el diagrama de procesos seguido para la ejecución del proyecto. En forma general, la parte superior contempla las actividades realizadas para la evaluación de la amenaza sísmica regional y la parte inferior las actividades para el análisis de la amenaza sísmica local y la vulnerabilidad. El SIG se llevó a cabo paralelamente con el desarrollo del proyecto.

El proyecto se dividió en 17 estudios interrelacionados uno con otro. El nombre de cada estudio y su ejecutor principal se indican en la Tabla I.1

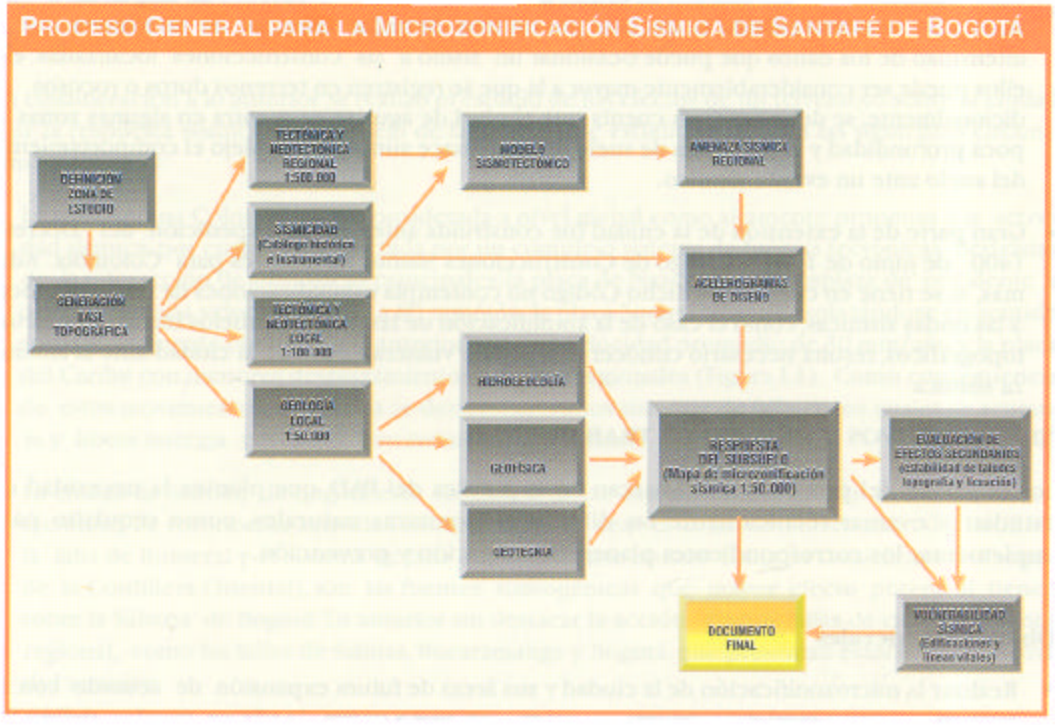


FIGURA I.2 PROCESO GENERAL PARA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

No. DEL SUBPROYECTO	NOMBRE DEL ESTUDIO	ENTIDAD EJECUTORA
1-13	Dirección Técnica	INGEOMINAS
2	Estudios Geológicos	INGEOMINAS
3	Estudios Tectónicos y Neotécnicos	INGEOMINAS - UNIANDES
4	Estudios Hidrogeológicos	INGEOMINAS
5	Estudios Sismológicos	INGEOMINAS
6	Microtrepidaciones	UNIANDES - INGEOMINAS
7	Estudios Geofísicos	INGEOMINAS
8	Recopilación de Información Geotécnica	INGEOMINAS
9	Ejecución de Sondeos	P.S.I Ltda.
10	Ensayos de Laboratorio y de campo -Zonificación Geotécnica.	UNIANDES
11	Microzonificación Sísmica	UNIANDES
14	Amenaza Sísmica Regional	UNIANDES
15-16	Vulnerabilidad Sísmica	UNIANDES
12-17	Informes y Edición Final	INGEOMINAS

TABLA I.1 NOMBRE DE LOS SUBPROYECTOS Y EJECUTOR PRINCIPAL DE CADA UNO DE ELLOS

IV. AGRADECIMIENTOS

Tal como se ha mencionado este estudio fué preparado por un grupo interdisciplinario de trabajo conformado por ingenieros, geólogos, físicos, sismólogos y geofísicos, entre otros. La dirección general de los trabajos la adelantó la Subdirección de Ingeniería Geoambiental del INGEOMINAS y las actividades se ejecutaron coordinadamente entre INGEOMINAS y el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes. La ejecución de las perforaciones fué contratada con la firma P.S.I Ltda.

Se agradece, especialmente, la colaboración del personal de INGEOMINAS y de la Universidad de los Andes, quienes trabajaron incansablemente durante el desarrollo de este estudio.

Igualmente, se resalta la participación que ha tenido la Comisión Asesora de Riesgo Sísmico y Volcánico del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, la cual aportó valiosas ideas para la realización del Proyecto.

Se hace un especial agradecimiento al ing. Alberto Sarria Molina, ex-decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, al ing. Omar Darío Cardona Arboleda, ex-director de la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, al ing. Juan Manuel Martínez Rodríguez, ex-subdirector del área de Ingeniería Geombiental del INGEOMINAS y al Comunicador Bernardo Grau Arias ex-director de la Unidad para la Prevención de Emergencias del Distrito (UPES, antigua OPES), por la preparación de las propuestas iniciales de trabajo, por sus gestiones ante la Nación y ante el Distrito en el inicio del Proyecto y por el apoyo dado durante la ejecución del mismo. Igualmente se reconocen los valiosos aportes del Ing. Alvaro Jaime González García como asesor técnico permanente del proyecto.

Finalmente, se agradece a la Unidad para la Prevención y Atención de Emergencias del Distrito Capital (UPES), la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (DNPAD) y a las directivas del INGEOMINAS, ya que este proyecto no se hubiera podido llevar a cabo sin el gran esfuerzo realizado por ellos.

CAPITULO 1

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA REGIONAL

La amenaza sísmica de una zona determinada depende de un gran número de variables, algunas de las cuales pueden ser imposibles de cuantificar en la actualidad, con el fin de desarrollar modelos que permitan darle un tratamiento científico al problema. Sin embargo, desde el punto de vista de ingeniería sísmica se han desarrollado modelos simplificados que permiten considerar las variables fundamentales en forma probabilística.

Inicialmente se determinó un área de influencia que permitió limitar el problema a la zona dentro de la cual la ocurrencia de sismos es relevante para el sitio específico de estudio; una con 200 km de radio y centro en la ciudad capital se seleccionó en este caso. Luego, se identificaron las fuentes sismogénicas que pudieran generar eventos sísmicos de importancia dentro de esa área de influencia.

Una vez identificadas, las fuentes sismogénicas se caracterizaron mediante ecuaciones basadas en los datos sísmicos existentes para la zona. En este caso se trabajaron de manera comparativa las fuentes empleadas en la actualización del Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (CSR) (Presidencia de la República, 1984) y las correspondientes a los resultados de investigaciones resultantes de este proyecto que refinan el conocimiento sobre el tema.

1.1 ACTIVIDAD NEOTECTÓNICA D E LAS PRINCIPALES FUENTES SISMOGÉNICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO

1.1.1 Emplazamiento tectónico regional

Este numeral tiene por objeto mostrar el emplazamiento tectónico regional de un territorio amplio que conforma la esquina noroccidental de América del Sur que podría considerarse similar al territorio nacional de Colombia, para luego concentrarse en un área mucho menor conformada por un círculo de 200 km de radio con un área de 125.000 km^2 , aproximadamente, cuyo centro corresponde al área urbana de Santafé de Bogotá. Al círculo anotado se le denomina área de influencia sísmica y se supone que incluye las fuentes sismogénicas regionales que pueden generar amenaza sísmica sobre la ciudad.

Más adelante se analiza la situación de la zona de subducción, ubicada por fuera del círculo antes mencionado, que puede dar origen a grandes sismos cuyas ondas llegarían a la ciudad de Bogotá con períodos de vibración que excitarían de manera notable los depósitos de suelos blandos, conformando de esta manera una fuente de amenaza sísmica especial.

El marco tectónico regional a mayor escala está gobernado por la interacción de las placas Nazca, Caribe y Sur América. La placa Nazca se desplaza a una alta velocidad relativa en el sentido Occidente-Oriente; la placa Sur América se desplaza con una velocidad relativa intermedia en el sentido Oriente-Occidente aproximadamente. Por último la placa Caribe tiene un movimiento relativo hacia el Sur-Oriente más lento que las otras dos. Las velocidades relativas horizontales promedio de las placas Nazca y Sur América son de aproximadamente 60 y 20 milímetros por año, respectivamente. El proyecto CASA (INGEOMINAS, 1996), realizado recientemente entre varias instituciones, entre ellas NASA e INGEOMINAS, muestra los valores relativos de movimiento entre las placas.

La interacción de las placas ha generado una serie de fallas geológicas en el país, algunas de las cuales están en la actualidad activas o tienen tales características que permiten suponerlas así. La Figura 1.1 ilustra la tendencia sismo tectónica; en ella se aprecian las trazas idealizadas de las 32 fallas activas o probablemente activas que se tuvieron en cuenta para la actualización de la normativa sismo resistente de la nación CSR, la cual ha sido sometida al Congreso Nacional para su aprobación (AIS, 1996).

La región occidental del país parece estar conformada por terrenos alóctonos (bloques provenientes de remotas regiones, que se han desplazado aleatoriamente sobre la superficie terrestre (Sarria, 1990)) que se acrecionaron al terreno continental (Restrepo et al,1989 ;Toussaint et al, 1989); concretamente para los investigadores nombrados, la zona donde se localiza la ciudad de Bogotá se ubica dentro de lo que denominan Terreno Tahami.

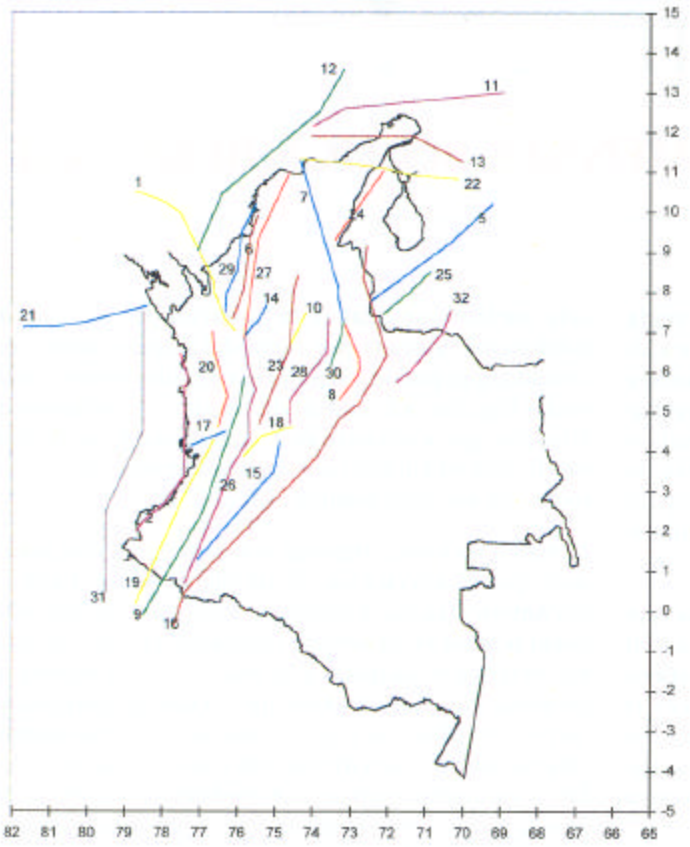


FIGURA 1.1 TRAZAS IDEALIZADAS DE LOS SISTEMAS DE FALLAMIENTO

1.1.2 Actividad neotectónica

El objetivo de la neotectónica es identificar y caracterizar la actividad reciente de las principales fallas geológicas corticales, situadas dentro de una extensión de 200 km de radio alrededor de Santafé de Bogotá. La investigación se realizó a niveles de detalle regional y local, para lo cual se subdividió el área en tres regiones: Suroriental (Piedemonte Llanero), Noroccidental (Valle del río Magdalena) y Central (Sabana de Bogotá).

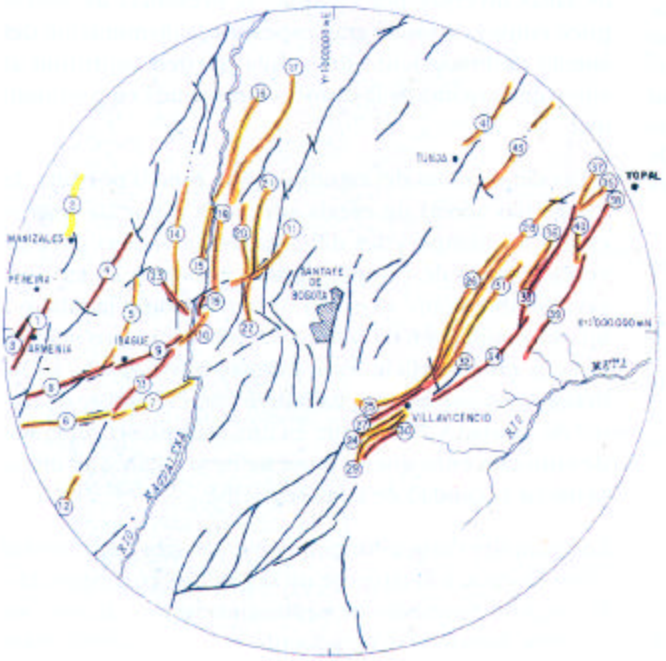
La caracterización de probables fuentes sismogénicas comprende la identificación de los principales indicios morfológicos de actividad neotectónica y la determinación de la longitud de los segmentos de falla con rasgos activos y potencialmente activos. El análisis morfoneotectónico se realizó mediante fotointerpretación, con verificación y toma de datos de campo. Se estimaron orientaciones de esfuerzos tectónicos a partir de mediciones de planos estriados, diaclasas y pliegues observados en afloramientos.

A los principales segmentos de las fallas activas y potencialmente activas, se le estimaron las Magnitudes Máximas Probables (MMP), con ecuaciones empíricas de regresión estadística que correlacionan el valor de la magnitud con algunos parámetros de terremotos, tales como la longitud de ruptura en profundidad, la longitud de la ruptura en superficie y el tipo de movimiento.

Se definieron las fallas corticales susceptibles de moverse bajo el campo de esfuerzo tectónico actual, el cual se presume activo a partir del Plio-cuaternario, aproximadamente los últimos cinco millones de años.

Existen relaciones empíricas entre la magnitud de un terremoto y otros parámetros tales como: a) la longitud de la ruptura superficial del terreno, b) la longitud de ruptura en profundidad, c) el área de ruptura, d) la cantidad de desplazamiento (Slemmons, 1977; Bonilla et al, 1984; Wells et al, 1994). Estas relaciones se pueden utilizar para evaluar la amenaza sísmica.

Las Figuras 1.2 y 1.3 ubican las principales fallas activas y potencialmente activas que se identificaron a lo largo de sistemas mayores como el del Piedemonte Llanero, el valle del río Magdalena, Ibagué, Romeral y otros.



CONVENCIONES

① Número de falla
Falla definida
Falla inferida
Falla activa
Falla potencialmente activa
Falla actividad incierta
.....Falla cubierta
● Ciudad capital de departamento

FIGURA 1.2 MAPAS DE ACTIVIDAD DE FALLAS DE LAS REGIONES NOROCCIDENTAL Y SURORIENTAL - TABLA 1.1

CONVENCIONES

① Número de falla
Falla de movimiento principal de rumbo con sentido de movimiento
Fallas principales inversas
Falla potencialmente activa
Actividad incierta
Falla activa

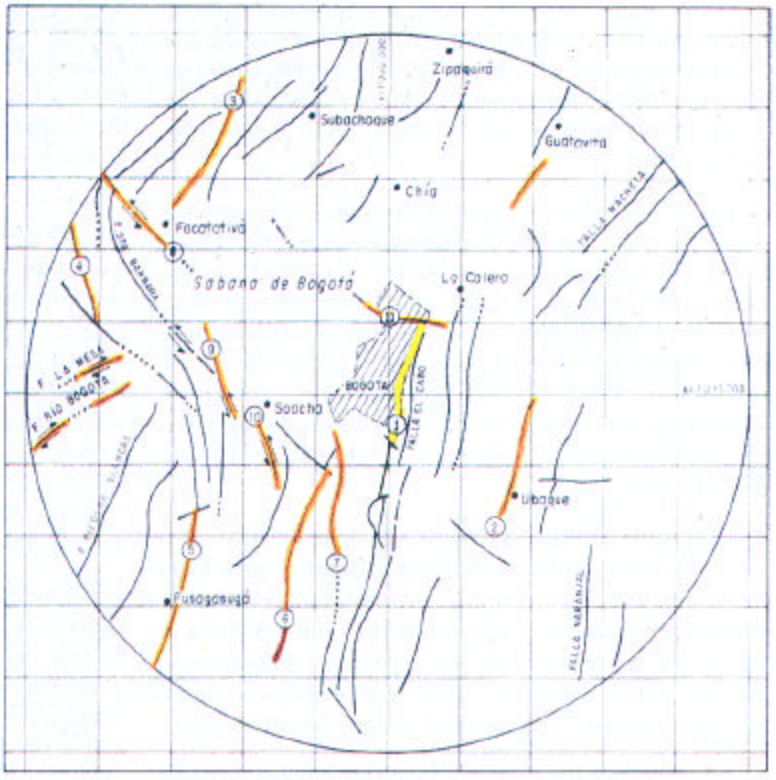


FIGURA 1.3 MAPA DE ACTIVIDAD DE FALLAS DE LA REGIÓN CENTRAL - TABLA 1.2

1.1.3 *Características morfotectónicas*

Los rasgos neotectónicos se desarrollan por la acumulación, en el tiempo geológico, de formas topográficas producidas por rupturas y deformaciones sucesivas del terreno. Los principales rasgos morfológicos de actividad neotectónica detectados son: escarpes de falla, facetas triangulares, valles y corrientes alineadas, ganchos de flexión, lomos de presión, lomos alineados, depresiones cerradas y lagunas de falla y silletas, entre otros.

Las características de los segmentos activos, tales como la longitud total del segmento, la longitud de rasgos neotectónicos, la tasa de actividad, el tipo de falla y la magnitud máxima probable (MMP), están indicadas en las tablas 1:1 y 1.2. El valor de MMP se estimó a partir de las relaciones estadísticas entre longitud de ruptura y magnitud sísmica, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

a) Durante un evento sísmico se puede activar una porción del segmento de falla, cuya longitud de ruptura en profundidad no excede la longitud total del segmento en superficie. La estimación de la MMP, suponiendo que todo el segmento se activa durante un solo evento, representa una cota superior para el valor estimado.

b) Durante un mismo evento sísmico se pueden activar distintos sectores de fallas vecinas. Por esta razón es importante considerar escenarios de ruptura en los cuales se activan varios segmentos de falla, incre-mentándose de esta manera el valor MMP. El movimiento de una falla de rumbo se puede acompañar por la activación de fallas inversas o fallas normales, que amortiguan el movimiento de rumbo en las terminaciones de la falla principal.

c) Los indicios y evidencias de actividad neotectónica observados a lo largo de un segmento, corresponden al efecto de la deformación del terreno acumulada durante un gran número de sismos. Las rupturas de superficie asociadas con un sismo pueden estar limitadas a una determinada porción del segmento considerado. La estimación de MMP podrían sobre estimarse, en caso de suponer que la longitud de ruptura en superficie coincida con la longitud total de rasgos de actividad neotectónica.

d) Los rasgos morfotetónicos de actividad de fallas tienden a ser erosionados por los distintos procesos exógenos, disminuyendo en forma notoria la expresión de las geoformas. La vegetación densa también limita la observación, enmascarando rasgos geomorfológicos de neotectónica, aspecto que puede conducir a una subestimación de la longitud de rasgos de falla activa.

e) La expresión de las rupturas superficiales está condicionada por diversos factores locales que pueden inhibir la propagación de la falla hasta la superficie. En el caso de fallas inversas, por ejemplo, la presencia de suelos poco consolidados de gran espesor o la disminución del ángulo de buzamiento de la falla pueden contribuir al amortiguamiento de la dislocación sísmica en profundidad.

f) Las deficiencias del estudio neotectónico por falta de fotografías aéreas de escala adecuada o por las restricciones de tiempo y las dificultades de acceso para las verificaciones de campo, pueden conducir a cierta incertidumbre sobre el grado de actividad de la falla y a una subestimación de la longitud total de rasgos neotectónicos en superficie. Para evaluar este aspecto se ha definido un parámetro cualitativo con el nombre de factor de calidad A, B ó C, que es una indicación del grado de conocimiento que se tiene de cada falla y que intenta medir la calidad de la información.

En cualquier caso, la longitud de los rasgos de actividad neotectónica, a lo largo de un segmento, corresponde a la longitud promedio de ruptura en superficie; este valor debe ponderarse de acuerdo con los criterios mencionados anteriormente y es susceptible de modificarse con un estudio más detallado de las fallas.

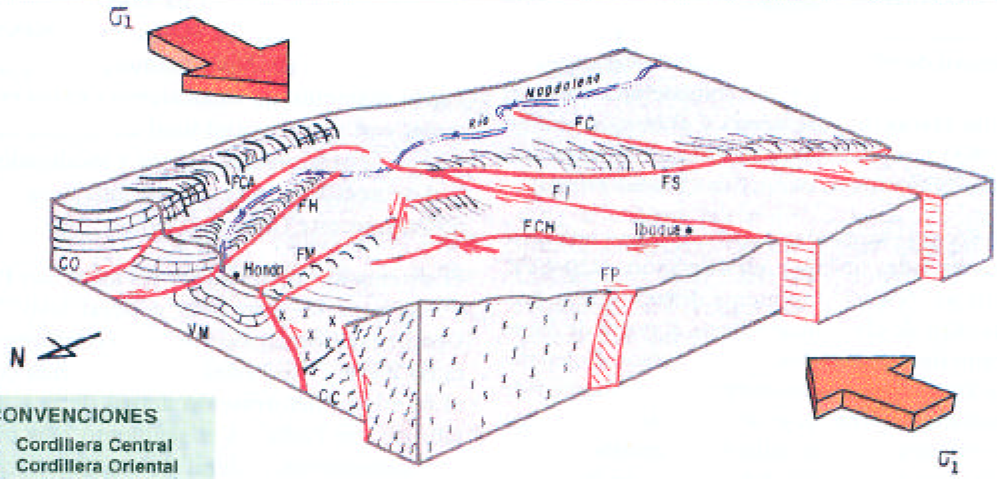
A continuación se hace una breve descripción de cada una de las regiones estudiadas (INGEOMINAS et al, 1996 - a).

1.1.3.1 *Región Noroccidental*

Se caracteriza por presentar fallas regionales de rumbo de orientación noreste-suroeste y este-oeste, con movimientos dextrales y sinistrales, y fallas inversas norte-sur.

El Valle del Magdalena limita con las Cordilleras Central y Oriental, por fallas inversas que buzan al occidente y oriente, respectivamente. Las fallas inversas del Magdalena, especialmente las ubicadas en el borde occidental de la Cordillera Oriental, amortiguan el movimiento dextral de las fallas de rumbo de dirección ENE-WSW. Las fallas seleccionadas son las de mayor importancia regional: Armenia, Manizales, Montenegro, Palestina, Chapetón, Cucuana, Ibagué, Doima, Viani, Samaria, El Chocho, Mulatos, Honda, Cambras, Cambao, Alto del Trigo, Bituima, La Salina y El Palmar.

Por la evidencia de rasgos neotectónicos sobresalen las fallas de Ibagué, Doima, Cocora, Montenegro y Armenia. La falla de Ibagué, de dirección N75°E, atraviesa el Departamento del Tolima, pasando por el casco urbano de Ibagué, donde afecta los depósitos del Plioceno Superior y Holoceno que conforman el abanico de Ibagué (Vergara, 1989). En la Figura 1.4 se presenta el diagrama que indica la orientación de las fallas.



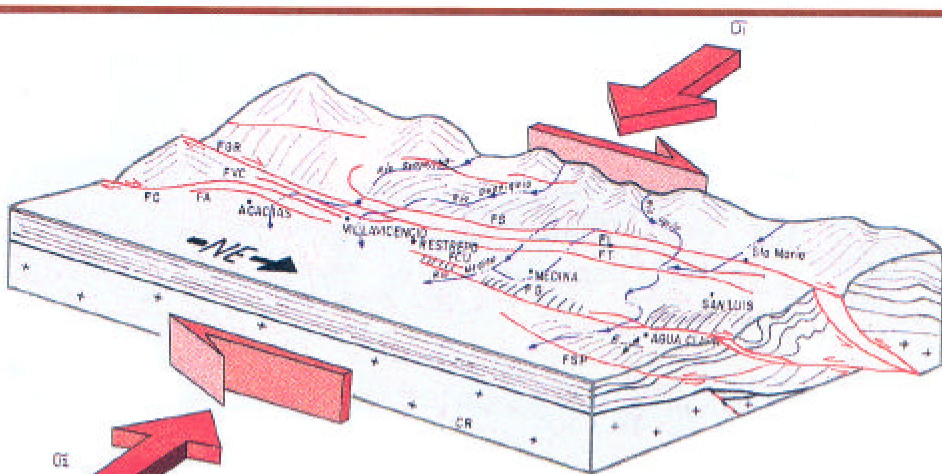
CONVENCIONES

CC	Cordillera Central
CO	Cordillera Oriental
FC	Falla Cucuana
FCA	Falla de Cambao
FCH	Falla de Chapetón
FH	Falla de Honda
FI	Falla de Ibagué
FM	Falla de Mulatos
FP	Falla El Palmar
FS	Falla Samaria
VM	Valle del Magdalena

FIGURA 1.4 BLOQUE DIAGRAMA DE LA REGIÓN NOROCCIDENTAL

1.1.3.2 Región Suroriental

Comprende el flanco oriental de la Cordillera Oriental y los Llanos. Las fallas de mayor expresión morfológica y longitud son cabalgamientos de dirección suroeste-noreste, con trazos sinuosos y subparalelos. También se presentan fallas de dirección noreste (Figura 1.5).



CONVENCIONES

FA	Falla Acacías	FT	Falla Tesalia
FC	Falla Colonia	FCU	Falla Curumal
FSP	Falla San Pedro -Yopal	FS	Falla Servitá
FGR	Falla Guayuriba	FG	Falla Gualcaramo
FVC	Falla Colepato	FL	Falla Lengupá
CR	Cratón		

FIGURA 1.5 BLOQUE DIAGRAMA DE LA REGIÓN SURORIENTAL

Este conjunto de fallas representa el límite entre el borde noroeste del Cratón de Guayana, de naturaleza estable, y el cinturón móvil de afinidad continental de los Andes en Colombia (París et al, 1994), y es considerado como el límite entre las Placas de Suramérica y el bloque Andino (Aggarwal, 1983). Los principales sistemas de falla del sector son el de Servitá - Santa María, Guaicáramo y Yopal.

El sistema de Servitá - Santa María corresponde a una serie de segmentos de fallas inversas, en dirección N20-40°E, buzamiento de 45° NW y componente dextral, que se prolonga por 180 Km, desde Cumaral hasta el norte de Santa María. Los segmentos de falla documentados son: Colepato, Servitá, Acacías, Colonia y Guayuriba. En el abanico de Restrepo de edad cuaternaria, se observaron rasgos de actividad neotectónica sobre la falla de Guayuriba (Figura 1.6). Esta falla tiene una longitud de 60 Km, en 29 km de los cuales presenta indicios fuertes y moderados de actividad. Su rumbo general varía entre N30°- 45°E, es de movimiento inverso, con plano de falla buzando entre 30 y 45° al noroeste y, aparentemente, componente de rumbo lateral derecho.

El Sistema del Guaicáramo está compuesto de una serie de segmentos de dirección general N40°E, que se presentan al noreste del Sistema de Servitá-Santa María. Pone en contacto rocas del Cretáceo que cabalgan rocas Terciarias y Cuaternarias ubicados en el frente montañoso y en la cuenca de los Llanos Orientales, respectivamente.

La Falla del Guaicáramo ha sido dividida en tres tramos, cuyas direcciones oscilan entre N45°E y N10°E: Guaicáramo Norte, Guaicáramo Centro y Guaicáramo Sur. El segmento de Guaicáramo Centro es el más extenso, con una longitud total de 80 Km, de los cuales 44 Km tienen indicios fuertes y moderados de actividad neotectónica. Su plano de falla buza alrededor de 35° al noroeste (Renzoni, 1975).

El sistema de Yopal incluye las fallas San Pedro, Yopal y Chámeza, de dirección general N40°E, y la Falla Upamena de dirección N-S (salto compresivo entre las fallas Yopal y San Pedro). Dicho sistema corresponde al frente de deformación actual de la cordillera. La falla de San Pedro es el segmento más oriental, con una orientación general de N38°E, el cual ha sido cartografiado en 80 Km con el nombre de San Pedro-Sisigua, entre los ríos Upía y Cusiana. Presenta rasgos de actividad moderados, tales como el escarpe de falla que bordea las mesas de Sisigua y de San Pedro por un tramo de unos 38 Km y alturas que oscilan entre 50 y 80 metros.

En la zona axial de la Cordillera Oriental se revisaron fallas mayores, entre las que se destacan las de Soapaga, Boyacá y San Francisco, todas ellas de movimiento principal inverso. La actividad neotectónica de estas fallas es baja a muy baja.

FIGURA 1.6 RASGOS NEOTECTÓNICOS SOBRE LA FALLA DE GUAYURIBA

1.1.3.3 Región Central

Se caracteriza por la presencia de la Sabana de Bogotá la cual está limitada, con los sectores montañosos circundantes, por rasgos rectilíneos sugiriendo control tectónico. Está caracterizada por sistemas de fallas inversas de dirección nor-noreste y fallas de movimiento lateral izquierdo de dirección noroeste-sureste. Se seleccionaron las fallas principales, ubicadas en la Sabana de Bogotá y en zonas circundantes, entre las que se destacan la falla de Bogotá y las fallas del Río Tunjuelito, Facatativá, Usaquén, Fusagasugá, La Cajita y Corraleja. La actividad neotectónica es baja, con excepción del sector del Páramo de Sumapaz donde se detectaron rasgos de neotectónica en depósitos de edad reciente, falla La Cajita (Acosta et al, 1991) y Río Tunjuelito.

La falla de Bogotá es el límite estructural más sobresaliente que bordea la Sabana por el costado este. Su dirección promedio es N10°E, con plano buzando al oriente. Los indicios neotectónicos que muestra la falla de Bogotá no fueron claramente establecidos, por lo cual se catalogó como de actividad incierta.

1.1.4 Análisis microtectónico

El conocimiento del régimen de esfuerzos tectónicos que actúan dentro de la corteza terrestre, permite caracterizar en forma más precisa el tipo de movimiento y la geometría de las fallas activas. El estudio de la fracturación de la roca en afloramientos deformados, da información sobre el régimen de esfuerzos tectónicos y permite calcular la orientación y la magnitud relativa de los ejes de esfuerzos: σ_1 (principal), σ_2 (intermedio) y σ_3 (extensivo). La medición en campo de estas estructuras y el análisis posterior permitió calcular numéricamente el estado de esfuerzos que les dió origen (Etchecopar et al, 1981; Ritz, 1991; Taboada, 1993). Se estudiaron afloramientos, en cercanías de las fallas del Magdalena, del Borde Llanero y la Sabana de Bogotá.

De manera general, el esfuerzo principal compresivo (σ_1) es subperpendicular a la cadena de montañas, concluyéndose que las principales fallas activas y potencialmente activas tienen movimiento inverso dominante. A lo largo del Piedemonte Llanero se observa una rotación del eje principal compresivo: al sur de Medina, la dirección de σ1 es sureste (perpendicular a la traza de falla del Guaicáramo), mientras que hacia el norte (Aguazul) la dirección es E-SE. Este cambio de dirección podría indicar un aumento de la componente dextral, hacia el noreste de los Sistemas de Guaicáramo y Yopal, a medida que las fallas remontan la Cordillera Oriental.

La Figura 1.7 muestra un depósito Cuaternario deformado tectónicamente sobre el escarpe de la falla Yopal, 8 km

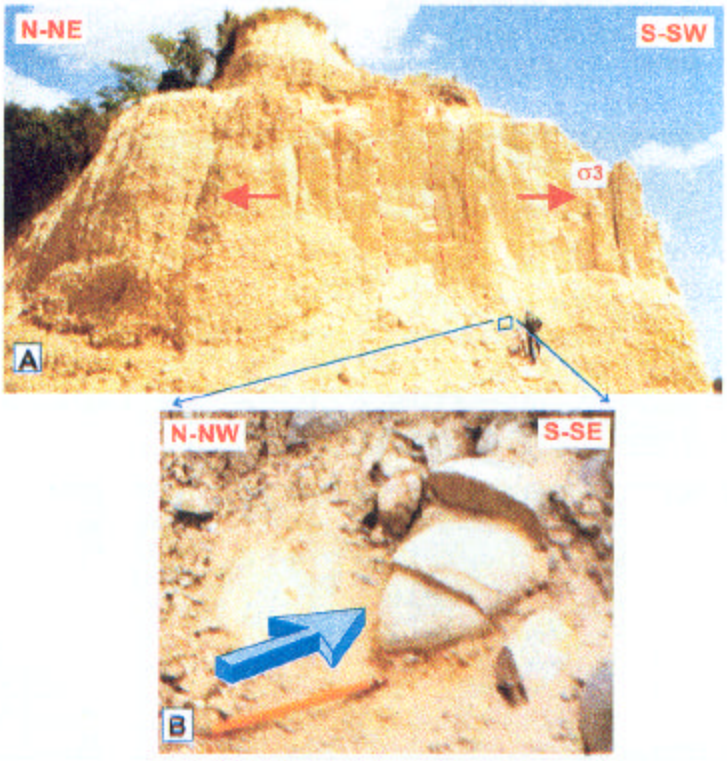


FIGURA 1.7 DEPÓSITO CUATERNARIO DEFORMADO TECTÓNICAMENTE

al suroeste de Aguazul, sobre la carretera principal. La deformación de los conglomerados es muy intensa, presentando cantos fracturados y cizallados, sugiriendo que la magnitud de los esfuerzos tectónicos que generaron esta deformación fue particularmente intensa. Dicha deformación pudo haberse originado durante rupturas superficiales asociadas a sismos sucesivos a lo largo de la falla Yopal.

La dirección de σ_1 en el Sistema de fallas de la Sabana de Bogotá y del Magdalena, es relativamente homogénea y cercana a E-SE. Esta dirección podría sugerir una ligera componente lateral izquierda a lo largo de algunas trazas de falla, cuya dirección es norte-sur, tales como la Falla del Alto del Trigo, en la proximidad de Vianí, y la Falla de Mulatos cerca a Lérida. Los movimientos de los diversos sistemas de falla, que afectan la Cordillera Oriental, indican un acortamiento notable de dirección media E-SE.

1.1.5 Síntesis de resultados

Los resultados de este estudio indican que las fallas de mayor potencial sismogénico están situadas en la región Suroriental y hacen parte del sistema del Piedemonte Llanero. Varios segmentos de las fallas de Servitá-Santa María, Guaicáramo y Yopal presentan valores estimados de MMP superiores a 7 Ms con períodos de retorno del orden de 600 años (suponiendo una tasa de actividad de 3 mm/año). Algunos de ellos están situados a una distancia de 50 - 100 km de Santafé de Bogotá por lo cual representan fuentes sismogénicas particularmente peligrosas para la ciudad. Estas fallas, cuyo movimiento predominante es de tipo inverso, tienen una actividad dentro del rango moderado - alto.

Cabe resaltar los segmentos activos de Guayuriba y Servitá, cuya distancia media a Bogotá es inferior a 80 km y cuya ubicación coincide con una zona de sismicidad anormalmente baja a lo largo del Sistema de Piedemonte Llanero. Esta zona podría corresponder a un silencio sísmico en el cual se está acumulando energía elástica que se liberaría durante un evento sísmico mayor.

La región Noroccidental presenta fallas cuyas magnitudes máximas probables no exceden el valor de 7 Ms. Cabe destacar la falla de Ibagué, considerada como la más activa de este sector, cuyos indicios y evidencias de actividad lateral derecha se siguen prácticamente a lo largo de toda la traza. El plano de falla de Ibagué está alineado con la ciudad de Bogotá y es de esperarse que, tratándose de una falla de rumbo, los efectos de un movimiento sísmico sean particularmente notorios en Bogotá. En efecto, la amplitud de las ondas de cizalla es mayor en dirección paralela al sentido de movimiento sobre el plano de falla. Este efecto de direccionalidad puede acentuarse si la propagación de la ruptura se hace en dirección N-NE (hacia Bogotá).

Otras fallas de importancia en la región Noroccidental son las de Cambao Sur, Honda, Doima, Cocora y Cucuana cuyos valores de MMP son superiores a 6.0 y cuyo rango

SISTEMA	No	NOMBRE DE LA FALLA	LONGITUD TOTAL (km)	LONGITUD CON RASGOS NEOTECTÓNICOS (km)				TAS	TIPO DE FALLA	AZIMUT; BUZAMIENTO	(MS) MMP
				FUERTE	MODERADO	DEBIL	TOTAL				
Romeral	1(*)	Armenia	60	3	10	9	22	A-IA	ID	30;W	6,8
	3(*)	Montenegro	45	10	10		20	A-IA	ID	45;W	6,7
Ibagué	8(*)	Cocora	60	8	25		33	I	D	65;V	6,9
	9(*)	Ibagué	45	35	5		40	A	D	75;V	7,0
	10(+)	Piedras	20		6	8	14	I	DI	55;V	6,4
Samaria-La Colorada	13(*)	Doima	35	5	9	2	16	A	ID	30;E	6,7
Noroeste	23(*)	El Palmar	20	1	8		9	I	S	150;V	6,2
Servitá-Santa María	24	Colepato	40(*)		18		18	I	I	50;30W	6,7
	25	Servitá	60(*)		26		26	I-A	I	45;40W	6,9
	27	Guayuriba	60(*)	11	18		29	A	ID	45;40W	7
	30	Acacias	30(*)	4	9		13	I	I	30;30W	6,6
Guaicáramo	33	Guaicáramo Centro	80(*)	24	20		44	A	ID	35;35W	7,2
	34	Guaicáramo Sur	65(*)	3	5		8	I	I	35;35W	7,1
	37	Pajarito	60(*)	5	9		14	I	ID	30;50W	6,7
Yopal	38	Yopal	65(*)	12	12		24	A	I	40;40W	7,1
	39	San Pedro	80(*)		38		38	A	I	40;30W	7,2

TABLA 1.1 CARACTERIZACIÓN NEOTECTÓNICA DE FALLAS DE LAS REGIONES NOROCCIDENTAL Y SURORIENTAL

ORIENTE	1(-)	Bogotá	50			10	10	B	I	10;E	6,4
SUR	6(*)	La Cajita	35	5		5	10	I	ID	10;E	6,4
	7(+)	Río Tunjuelito	35		5	5	10	I	I	5;W	6,4

TABLA 1.2 CARACTERIZACIÓN NEOTECTÓNICA DE FALLAS DE LA REGIÓN CENTRAL.

MMP: Magnitud máxima probable
TAS : Tasa de actividad semicuantitativa

D: Dextral
S: Sinistral
N: Normal
I: Inversa

TAS:
A: alta
I: intermedia
B: baja

(*): Falla activa
(+): Falla potencialmente acti···
(-): Actividad incierta

de actividad es moderado - alto. La distancia media de todas estas fallas a Santafé de Bogotá es de 80 a 120 km.

La región Central está caracterizada porque la mayoría de las fallas presenta actividad baja a moderada cuyas magnitudes estimadas son inferiores a 6.5 Ms. Los rasgos neotectónicos son de menor contundencia sugiriendo una actividad sísmica muy inferior a las otras regiones, con períodos de retorno más largos. Sin embargo, la actividad potencial de estas fallas es de gran interés debido a la cercanía entre los tramos potencialmente activos y la ciudad de Santafé de Bogotá. Se destaca la falla de la Cajita por su característica de falla activa, con una MMP de 6.4 y sismo histórico probable asociado.

Tal como se mencionó anteriormente en las tablas 1.1 y 1.2 se presenta la caracterización neotectónica de las diferentes regiones citadas.

1.1.6 Zonificación Sismotectónica Preliminar

El conocimiento de la tasa de actividad y del tipo de movimiento a lo largo de las diferentes fallas analizadas permite subdividir la región de estudio en función del estilo y la intensidad de la actividad neotectónica.

El estilo de la deformación está determinado por el régimen de esfuerzos tectónicos a escala regional. La orientación y la magnitud relativa de los esfuerzos principales determina la dirección y el sentido de movimiento sobre los planos de falla.

Para efectos de caracterizar la zona se definen tres regímenes de esfuerzos fundamentalmente distintos (Ritz et al, 1993):

1) El régimen compresivo, caracterizado por un eje extensivo σ_3 vertical y los dos ejes restantes (σ_1, σ_2) de dirección horizontal. La deformación asociada está caracterizada por fallas inversas de dirección perpendicular a la compresión.

2) El régimen de rumbo, caracterizado por un eje intermedio σ_2 vertical y los dos ejes restantes (σ_1, σ_3) de dirección horizontal. Se observan generalmente fallas de rumbo conjugadas relativamente inclinadas.

3) El régimen extensivo, caracterizado por un eje compresivo σ_1 vertical y los dos ejes restantes (σ_2, σ_3) de dirección horizontal. Asociado usualmente al funcionamiento de fallas normales de dirección perpendicular a la extensión.

La Figura 1.8 ilustra la zonificación sismotectónica preliminar de la región de estudio. Las zonas caracterizadas por un régimen compresivo, de rumbo o extensivo están indicadas en azul, verde o rojo, respectivamente. La intensidad del color es proporcional a la intensidad de los esfuerzos desviadores principales de dirección horizontal que varían de acuerdo con el régimen considerado. Se asume que este parámetro es indicativo del grado de actividad sismotectónica en distintos sectores. En cada caso se indican los valores correspondientes al esfuerzo horizontal máximo y mínimo (σ_{hmax}, σ_{hmin}) con respecto al valor promedio de los esfuerzos principales (esfuerzo diferencial o desviador).

A manera de ejemplo, el régimen compresivo está caracterizado por un valor de esfuerzo diferencial $\sigma_{hmax} = \sigma_1$ relativamente elevado y un valor de $\sigma_{hmin} = \sigma_2$ despreciable.

Se observa que el contexto tectónico de la región se sitúa entre el régimen compresivo y el régimen de rumbo. El sector del Piedemonte Llanero presenta la mayor actividad tectónica en compresión, la cual disminuye

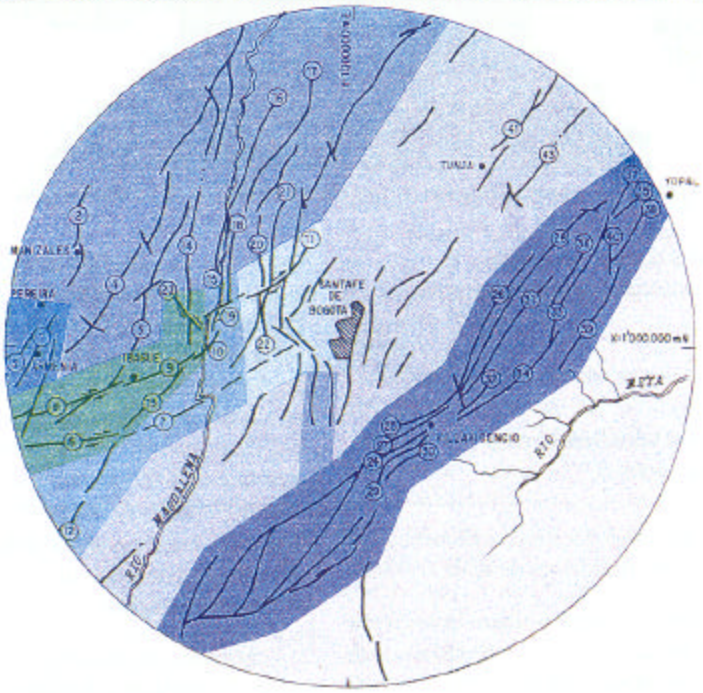


FIGURA 1.8 MAPA PRELIMINAR DE ZONIFICACIÓN SISMOTECTÓNICA

abruptamente en dirección del cratón. La zona axial de la Cordillera Oriental presenta un nivel bajo de actividad tectónica compresiva con un ligero aumento al sur de Bogotá.

El valle del Magdalena, al norte, registra un nivel intermedio de actividad tectónica compresiva. La intensidad de la actividad tectónica aumenta progresivamente hacia el sur (zona de Armenia, Ibagué) y los esfuerzos cambian de régimen compresivo a régimen de rumbo. Esta transición se manifiesta en el aumento progresivo de la componente de rumbo con respecto a la componente inversa de movimiento sobre las fallas, en dirección del sistema de Ibagué.

La zona de régimen de rumbo se extiende desde la Cordillera Central hacia la Sabana de Bogotá englobando fallas de rumbo como las de Viani y Facatativá. Se observa una disminución progresiva de la intensidad de la actividad tectónica y un aumento de la componente inversa en dirección de la Sabana.

1.2 *CATÁLOGO DE SISMOS*

Para la identificación de las fuentes sismogénicas y la caracterización de su actividad, la evaluación de la amenaza sísmica requiere el uso de distintos tipos de estudios: geológicos y tectónicos, históricos e instrumentales. Los resultados que proporcionan estos estudios son complementarios, en cuanto existe un compromiso entre el grado de detalle que pueden aportar (respecto a tiempo de ocurrencia, tamaño mínimo detectable y la localización del evento) y el período de tiempo de cubrimiento. Los datos geológicos proporcionan información sobre los patrones de esfuerzos regionales y las tasas de liberación de energía sísmica a largo plazo, mientras que los datos históricos e instrumentales permiten la ubicación más precisa de las fuentes sismogénicas y la estimación de la frecuencia de ocurrencia en los últimos cientos de años. De manera que el mejoramiento en la calidad de la información disponible en estos campos y su manejo cuidadoso contribuyen a una estimación más robusta de la amenaza sísmica.

Santafé de Bogotá y su región disponen de una excelente información histórica, sin duda alguna, la mejor del país. Durante la Colonia, los mejores historiadores y cronistas escribieron sus obras en Santa Fé. Las autoridades españolas fueron además muy cuidadosas en la adquisición y la conservación de información, gracias a lo cual la ciudad dispone de excelentes archivos coloniales. En el siglo XIX ya se publicaba un razonable número de periódicos y revistas, el estado producía y conservaba documentos muy abundantes y de buena calidad, y aparecieron estudios históricos importantes. En el siglo XX el desarrollo de la prensa es notable. Todo lo anterior permite afirmar sin ninguna exageración que la ciudad cuenta con información suficiente para hacer un estudio confiable de su sismicidad histórica.

La actualización y análisis del Catálogo Sísmico de Colombia se inscribe en este marco. En el proceso de actualización, además de cubrir los períodos que no estaban incluidos previamente, se han discriminado las réplicas y eventos premonitorios de los registros disponibles, con el fin de ajustar mejor la serie de eventos a los requerimientos de la distribución de Poisson, usada comúnmente para modelar el proceso de ocurrencia de sismos. En cuanto a las magnitudes, se genera una serie homogénea usando como parámetro la magnitud Ms.

En la preparación de este catálogo de sismos de Colombia se han tomado como referencias principales el Catálogo de Terremotos para América del Sur en la parte colombiana, para el período 1566 a 1981 (CERESIS, 1985); la Actualización de la Información Sísmica de Colombia, período 1980 a 1987 (ITEC-ISA, 1988); el catálogo del Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano (Universidad del Valle, Cali - Colombia) para el período 1987 a 1990; el catálogo de la Red Sismológica Nacional de INGEOMINAS de 1993 a 1995; el catálogo del ISC de 1904 a 1993; el catálogo del NEIC de 1566 a 1995; y los estudios recientes de sismicidad histórica de Colombia (Espinosa, 1993; INGEOMINAS, 1995).

1.2.1 *Sismicidad histórica de Santafé de Bogotá y alrededores*

1.2.1.1 *Catálogo de sismos históricos*

Una manera práctica de abordar el problema de la sismicidad histórica de una región es empezar el estudio elaborando un mapa general de intensidades, el cual se va actualizando a medida que los datos se van completando. El valor de intensidad significa el efecto local que sobre diferentes sitios produce un mismo sismo (Sarria, 1990); existen numerosas escalas de intensidad, no obstante, la más empleada en la actualidad sigue siendo la de Mercalli Modificada, la cual está dividida en doce grados; que varía entre el grado I, donde el sismo es prácticamente imperceptible y no produce el más mínimo daño y el grado XII donde el daño es total.

El mapa general de intensidades contiene la ubicación de la localidad donde hay datos disponibles, el listado de sismos conocidos ordenados cronológicamente, llevando en cada caso la intensidad en el sitio en cuestión. Sin embargo, la densidad de la información no es homogénea, resultando siempre privilegiadas las ciudades y poblaciones históricamente importantes. Hecha la salvedad de esta limitante, un mapa general de intensidades es muy útil por dos razones principales: a) da una idea general del nivel de sismicidad y de la amenaza sísmica en la región, permitiendo en algunos casos hacerse una idea de los períodos de recurrencia, y b) de él se deducen fácilmente el catálogo de sismos históricos y el mapa de epicentros.

Mapa general de intensidades a nivel histórico

El mapa general de intensidades de la Sabana de Bogotá (Figura 1.9) muestra que en los últimos siglos la sismicidad del área ha sido relativamente importante. La máxima intensidad registrada en la zona es IX; corresponde a Chipaque en el sismo de 1644 (determinada por efectos de la topografía), pero es un caso excepcional. La intensidad VIII es estadísticamente la más frecuente intensidad máxima en las localidades de la Sabana. La máxima intensidad registrada en Santafé de Bogotá es VIII entre la fundación de la ciudad y la actualidad.

Como era de esperar, Santafé de Bogotá tiene el mejor registro de la región. En el período históricos ocurrieron doce sismos de intensidad igual o mayor a VI, de los cuales siete están en el rango VII-VIII. Clasificados por intensidad se presentan en la tabla 1.3.

Los eventos de intensidad VI son 5 (1616, 1644, 1928, julio 1967 y noviembre 1979). Se constata que este número es demasiado bajo, ya que se está en el límite de confiabilidad de la sismicidad histórica a esta escala: muchos eventos de esta intensidad pudieron ser olvidados en un período de varios siglos. En este caso los datos de intensidad VI no son aptos para análisis estadísticos o, en otros términos, para el cálculo de amenaza sísmica.

Para la elaboración del catálogo de sismos históricos se tuvieron en cuenta los eventos que en el área correspondiente al mapa general de intensidades fueron sentidos en una o más localidades con una intensidad igual o mayor a VII, independientemente de que su epicentro esté localizado o no dentro de esta área. Con estas características, el catálogo quedó conformado por 14 eventos.

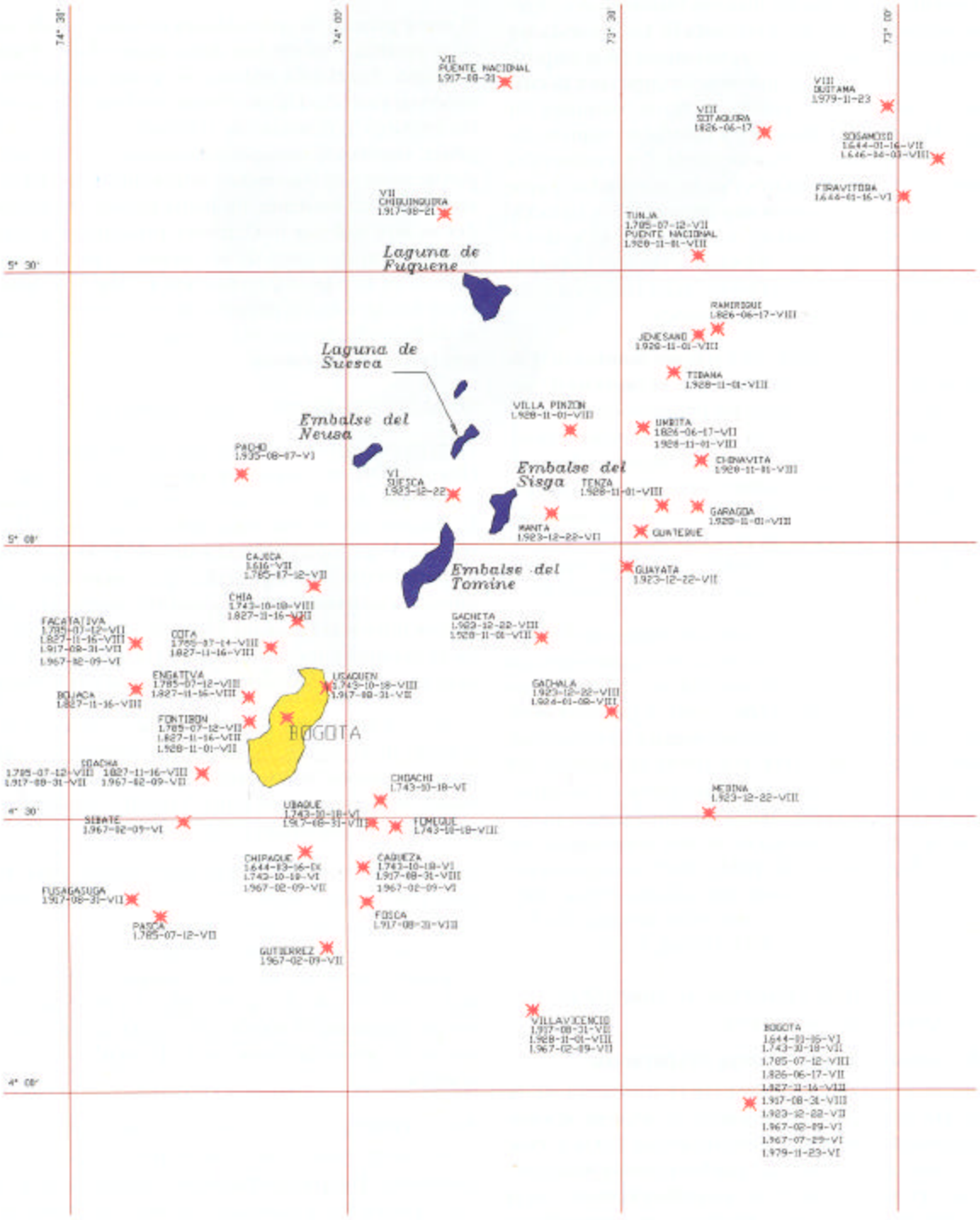


FIGURA 1.9 MAPA GENERAL DE INTENSIDADES DE LA SABANA DE BOGOTÁ Y ALREDEDORES (PERÍODO 1500 - 1994)

INTENSIDAD	FECHAS	No. DE EVENTOS
VIII	1785,1827,1917	3
VII	1743,1826,1923,1967 (febrero)	4

TABLA 1.3 CLASIFICACIÓN DE EVENTOS POR INTENSIDAD.

El Catálogo de sismos sentidos en Santafé de Bogotá y sus áreas vecinas desde 1500 hasta 1994 , se presenta a continuación en la tabla 1.4.

La contribución de este catálogo a la sismicidad regional tiene dos componentes. Por una parte es el primer catálogo histórico de Santafé de Bogotá y sus alrededores, por otra parte contiene modificaciones importantes con relación a los catálogos nacionales anteriores. Las modificaciones tienen que ver con: a) nuevos eventos, es decir eventos no incluidos en los catálogos anteriores, b) cambio de epicentro, c) cambio de intensidad epicentral, d) supresión de eventos, ya sea porque se ha comprobado que no existieron, o que su intensidad epicentral fue menor, lo cual los coloca por debajo del límite inferior del catálogo.

Mapa de epicentros históricos

El mapa general de epicentros (Figura 1.10) contiene todos los eventos del catálogo. Su principal interés es indicar las zonas que en los últimos quinientos años han producido sismos con intensidades iguales o mayores a VII en la Sabana de Bogotá. La ubicación de los epicentros indican las proyecciones de los puntos (o focos) sobre la superficie terrestre, de los sitios donde han ocurrido sismos. Estos están localizados sin excepción en la Cordillera Oriental, tomando como límites de esta el Valle del Magdalena y el Piedemonte Llanero. Zonas sismogénicas importantes a escala de los Andes colombianos, como la falla de Romeral en la Cordillera Central y las de la Cordillera Occidental no han sido significativas durante el período histórico pues los sismos ge-

ANO	MES	DIA	HORA	EPICENTRO	LAT N	LONG W	Io MSK**
1616	02	-	-	Cajicá (Cundinamarca)	5.00	74.00	VII
1644	01	16	06:-	Pamplona (N. Santander)	7.40	72.70	IX
1644	03	16	-	*Chipaque (Cund.)	4.50	74.00	IX
1646	04	03	03:-	Sogamoso (Boyacá)	5.70	73.00	VIII
1743	10	18	0:045:	Páramo de Chingaza (Cund.)	4.40	73.90	VIII
1785	07	12	07:45:	Páramo de Chingaza (Cund.)	4.70	73.80	IX
1826	06	17	23:45:	Sopó (Cund.)	4.80	73.90	VIII
1827	11	16	18:-	*Timaná (Huila)	1.90	7590	X
1917	08	31	06:36:29	*Páramo de Sumapaz	4.26	74.15	IX
1923	12	22	04:55:35	ParatebuenoCund.)	4.40	73.20	VIII
1924	01	07		Gachalá	4.70	73.50	VIII
1928	11	01	11:08:18	El Milagro (Casanare)	5.50	71.50	VII
1967	02	09	11:35:11	Los Cuachos (Huila-Caquetá)	2.93	74.00	IX
1967	07	29	05:24:24	Chucurí (Santander)	6.84	74.09	VIII

*Sismos con algún indicio de huellas en superficie (neotectónica).
**Escala de Intensidades de Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK).

TABLA 1.4 CATÁLOGO DE SISMOS HISTÓRICOS

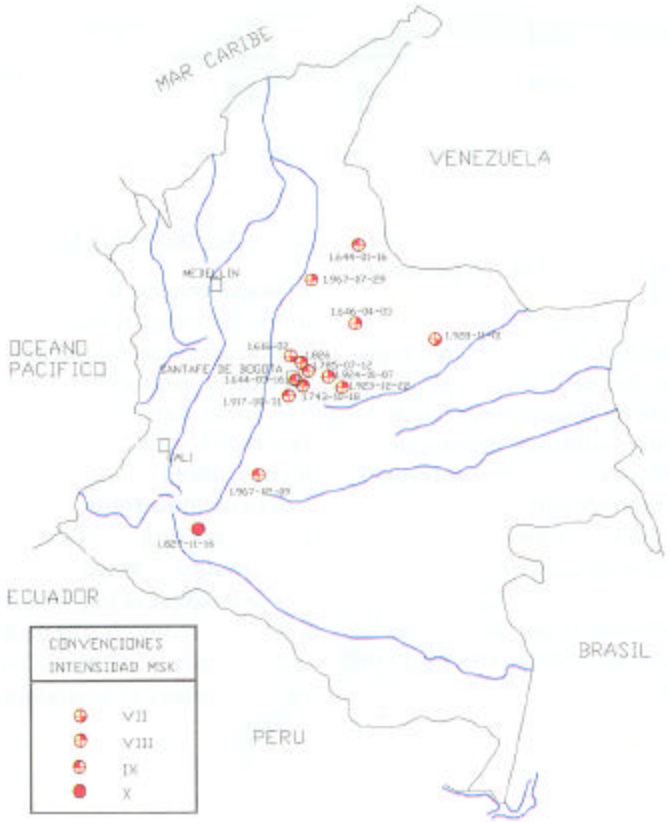


FIGURA 1.10 MAPA DE EPICENTROS DE SISMOS HISTÓRICOS EN LA SABANA DE BOGOTÁ 1500 - 1994

nerados en ellas no han producido intensidades altas en el área de Santafé de Bogotá, aunque sí se han sentido muy claramente. Por ejemplo, los sismos del 4 de febrero de 1938 y del 23 de noviembre de 1979, cuyos epicentros están en el Viejo Caldas, en las Cordilleras Central y Occidental respectivamente, tuvieron intensidades epicentrales IX y fueron sentidos en Bogotá con intensidades V y VI. La zona de la fosa de subducción del Pacífico, la cual ha producido una alta sismicidad en el siglo XX, tampoco ha sido significativa, pero hay que hacer la salvedad de que la información histórica del Pacífico es muy pobre, quizá la mas pobre del país. El sismo de Tumaco, en 1906, tuvo intensidad epicentral X y fue sentido en Bogotá con intensidad V. El norte de la Cordillera Oriental, zona de los Santanderes, aunque muy activo en el período histórico tampoco ha generado eventos destructores en Santafé de Bogotá.

1.2.1.2 Efectos locales de sismos históricos en la Sabana de Bogotá

La información conocida sobre los sismos históricos permite identificar varios efectos locales interesantes en la Sabana de Bogotá. Los más notables son: a) el comportamiento geotécnico y estructural no homogéneo de la capital, b) la acumulación de daños por sismos sucesivos, c) la licuación de suelos en algunas partes de la Sabana y d) los efectos topográficos.

Comportamiento geotécnico y estructural no homogéneo de Santafé de Bogotá

Este efecto sólo puede verse en los sismos del siglo XX, debido a que en el siglo XIX la ciudad era demasiado pequeña (en 1827 debía tener unos quince mil habitantes), pero en los sismos de 1917 y 1928 el efecto parece bastante claro.

En el sismo del 31 de agosto de 1917 es evidente que en algunos sectores de la ciudad los daños fueron mayores, independientemente de la calidad de las construcciones. Incluso, de los barrios más afectados, Chapinero, Liévano, Las Cruces, los dos primeros eran barrios modernos, y en el primero estaban las viviendas más elegantes de la ciudad. El comportamiento diferencial de la ciudad fue observado muy claramente en su momento y sorprendió notablemente.

Acumulación de daños en Santafé de Bogotá por sismos sucesivos

Dadas las características de la recurrencia de eventos destructores en Bogotá en el período histórico, con largos periodos de quietud y acumulación de eventos durante cortos períodos, es de esperar que algunos sismos se tornen aún más destructores por encontrar la ciudad ya seriamente afectada por eventos recientes. Esta situación es bastante particular, y hasta ahora no se ha identificado en zonas de alta sismicidad estudiadas en Colombia, como Popayán, Cali y el Viejo Caldas, pero en Bogotá se ha presentado en varias ocasiones.

De los sismos más destructores de Bogotá (1785, 1827, 1917) dos ocurrieron después de un período de quietud , 1785 y 1917. En ellos no se vio un efecto de acumulación, aunque sí debió ocurrir en pequeña escala. El de 1785 ocurrió cuarenta y dos años después del de 1743 y dada la lentitud de la reconstrucción de templos y conventos en la Colonia pudo encontrar algunos de ellos aún averiados. El del 31 de agosto de 1917 tuvo eventos precursores que alcanzaron a causar daños de alguna importancia.

El terremoto de 1827 sí debió encontrar a Bogotá en malas condiciones, tras el sismo de junio del año anterior que tuvo una intensidad de VII. Hay que anotar, que esto globalmente no quita importancia al terremoto de 1827 porque el de 1826 solo afectó un área pequeña. Desafortunadamente no se han identificado hasta ahora casos específicos de construcciones o de sectores en los cuales los daños de 1827 se hayan sobreimpuesto a los de 1826.

Durante el siglo XX sí se conocen casos en los cuales los daños de un sismo vinieron a agravar los de un sismo anterior. Ejemplos típicos se vieron el 1o. de noviembre de 1928, época en que muchos daños de 1917 eran aún visibles en la ciudad. Se pueden citar dos casos concretos, pero hay más: las iglesias de la Veracruz y de Chapinero. En la Veracruz se abrieron nuevamente las grietas producidas por el sismo de 1917, dejando la iglesia seriamente averiada, y en Chapinero la iglesia en reconstrucción vio reactivarse los daños de 1917. Aunque los efectos señalados no son espectaculares, por ser el segundo sismo menor que el primero, si podría serlo al suceder la situación inversa.

Licuación de suelos en la Sabana

Este efecto fue observado durante el sismo del 16 de marzo de 1644 en el área de Tunjuelo (INGEOMINAS, 1995), y debe ser tenido en cuenta, en vista de que la situación geológica de Tunjuelo (conos aluviales recientes provenientes de rocas sedimentarias detríticas del Cretáceo) es común en el sector oriental de la ciudad.

Durante el sismo de 1644, en las orillas del río Tunjuelo se describen muy claramente varios fenómenos típicos de licuación, como son la formación de cráteres de arena y la eyección de agua y arena puntualmente o a lo largo de fisuras.

Efectos topográficos

Estos se han presentado en varias ocasiones, siendo los más espectaculares aquellos ocurridos en la cima de Monserrate y Guadalupe, cuyas iglesias han sido destruidas en cada uno de los tres sismos de intensidad VIII (1785, 1827, 1917) y en uno de intensidad VII (1743).

Los efectos en la topografía son interesantes desde dos puntos de vista. Una parte de ellos viene de fenómenos inducidos, o secundarios, originados por los movimientos sísmicos; es el caso de los deslizamientos y de los flujos producidos por represamiento. Detectar estos fenómenos contribuye directamente a la evaluación de las amenazas geológicas en una región. La otra parte de los efectos en la topografía proviene de posibles rupturas de falla en superficie, y en ese caso es fundamental como guía de los estudios de neotectónica y de amenaza sísmica. Los casos de deslizamientos en sismos históricos son bastante comunes en los alrededores de Bogotá. Quizás los ejemplos más espectaculares estén en los sismos de 1743, 1827 y 1917. Entre los sismos históricos hay varios que ofrecen datos interesantes desde ese punto de vista, siendo los más relevantes los de 1644, marzo 16 (Chipaque-Ubaque), 1827, y 1917.

1.2.2 Actualización y análisis del Catálogo de sismos de Colombia

Para la evaluación de la amenaza se debe preparar un catálogo que contenga tanto los sismos históricos como los instrumentales, localización y magnitud, para tener una idea de la actividad sísmica de la zona e incluirla dentro del cálculo de amenaza correspondiente.

La selección de los eventos que aparecen en el catálogo se hizo de la siguiente manera:

a) Del Catálogo de Terremotos para América del Sur-Colombia - Proyecto SISRA (CERESIS, 1985) y la Actualización de la Información Sísmica de Colombia, 1980 a 1987 (ITEC-ISA, 1988), se seleccionaron los eventos de magnitud m_b mayor que 4.0 (M_s mayor que 2.4). Para los eventos que únicamente reportaban magnitud M_s se hizo la conversión a m_b de acuerdo con la ecuación $m_b = 2.5+0.63\ M_s$ (Bullen, 1985). Excepto modificaciones menores, los datos de los eventos seleccionados se ha conservado casi en su totalidad. Para el período 1900-1981 se han incluido nuevas réplicas reportadas en los catálogos internacionales.

b) La información histórica del Catálogo de Terremotos para América del Sur-Colombia, Proyecto SISRA I, se ha actualizado con información de los estudios recientes de Espinosa (1993) e INGEOMINAS (1995), a la cual se le ha dado preferencia sobre los registros previos, pues se trata de estudios más detallados.

c) Del Catálogo del Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano (OSSO) de la Universidad del Valle se hizo una selección inicial de los eventos con magnitud de duración mayor o igual que 4.0, ubicados en la zona cubierta por esa red o cercanos a sus límites (-79.0° ≤ longitud ≤ -73.5° ; 1.0° ≤ latitud ≤ 6.0°). Después de hacer una equivalencia a magnitudes M_s, se seleccionaron los eventos de acuerdo con el mismo criterio que el numeral a).

d) De los eventos reportados por los catálogos internacionales, en general se han preferido las soluciones del ISC, excepto cuando otra solución aportaba mejores datos, como número de estaciones o magnitud. Los eventos que no tenían reportada magnitud en ninguna fuente no se han incluido.

e) De los Eventos reportados por el catálogo de la Red Sismológica Nacional se han seleccionado aquellos con magnitud M_l mayor o igual que 4.0.

En general, para todos los eventos del catálogo se calculó la magnitud M_s. Para los eventos que no la reportaban originalmente, ésta se ha calculado a partir de la magnitud m_b. En los casos en los cuales la magnitud m_b no había sido reportada por la fuente, se obtuvieron relaciones entre la magnitud reportada y m_b.

Los eventos seleccionados se presentan en la Figura 1.11.

1.2.2.2 Tasas de ocurrencia esperadas para Colombia

A partir de los resultados anteriores se creó una muestra artificial, o subcatálogo, que sólo incluyó los eventos ocurridos en el período de tiempo para el cual una determinada magnitud aparece completamente reportada. Las tasas de ocurrencia para este subcatálogo corresponden a las de la tabla 1.5, en ella se resumen los períodos de observación "completos" para cada rango de magnitud y las respectivas tasas de ocurrencia esperadas. Los valores de las tasas de ocurrencia contra los de magnitud se muestran en la Figura 1.12.

Vale la pena resaltar que los períodos de completitud y las tasas de ocurrencia encontrados, son válidos a nivel regional. Pero, es de esperarse que a medida que se reduzca el área geográfica disminuya la velocidad a la cual los datos son adquiridos. Por consiguiente se necesitan períodos de observación más largos para obtener un muestreo adecuado de un determinado rango de magnitud para un área comparativamente más pequeña.

RANGO MAGNITUD	PERÍODO "COMPLETO"	TASA OCURRENCIA ESPERADA (N/AÑO)
2.5	5 a 15	68.17
3.0	5 a 25	41.69
3.5	5 a 25	26.13
4.0	15 a 45	11.14
4.5	15 a 45	4.38
5.0	25 a 65	2.61
5.5	25 a 85	1.53
6.0	25 a 85	1.12
6.5	25 a 95	0.67
7.0	25 a 95	0.24
7.5	200	0.041
8.0	?	0.002

TABLA 1.5 PERÍODOS "COMPLETOS" PARA CADA RANGO DE MAGNITUD Y TASAS DE OCURRENCIA ESPERADAS EN ESTOS PERÍODOS.

Los datos sísmicos empleados en el informe hacen parte del catálogo sísmico nacional que ha sido revisado intensamente por varios investigadores; recientemente fue objeto de un estudio de completitud que lo ha llevado a una depuración máxima con un total de 4516 eventos hasta finales de 1995.

No obstante, el catálogo sísmico nacional es de características deficientes y la posición de los focos sísmicos adolece de grandes restricciones que conducen a enfoques particulares para la caracterización de las fuentes sísmicas. La particularidad da origen a los denominados corredores de influencia de cada fuente sismogénica para encontrar los sismos que se supone fueron la consecuencia de rupturas en las fuentes.

1.3 AMENAZA SÍSMICA REGIONAL

En el área de influencia sísmica de Santafé de Bogotá, con 200 km de radio, se tiene noticia de 396 sismos incluyendo todas las magnitudes. Si se tiene en cuenta el registro a partir de 1957 el número total de sismos registrados en el área es de 245 de los cuales 120 tienen magnitud M_s>3. Más adelante se presenta la posible asignación de la población sísmica a las diferentes fuentes

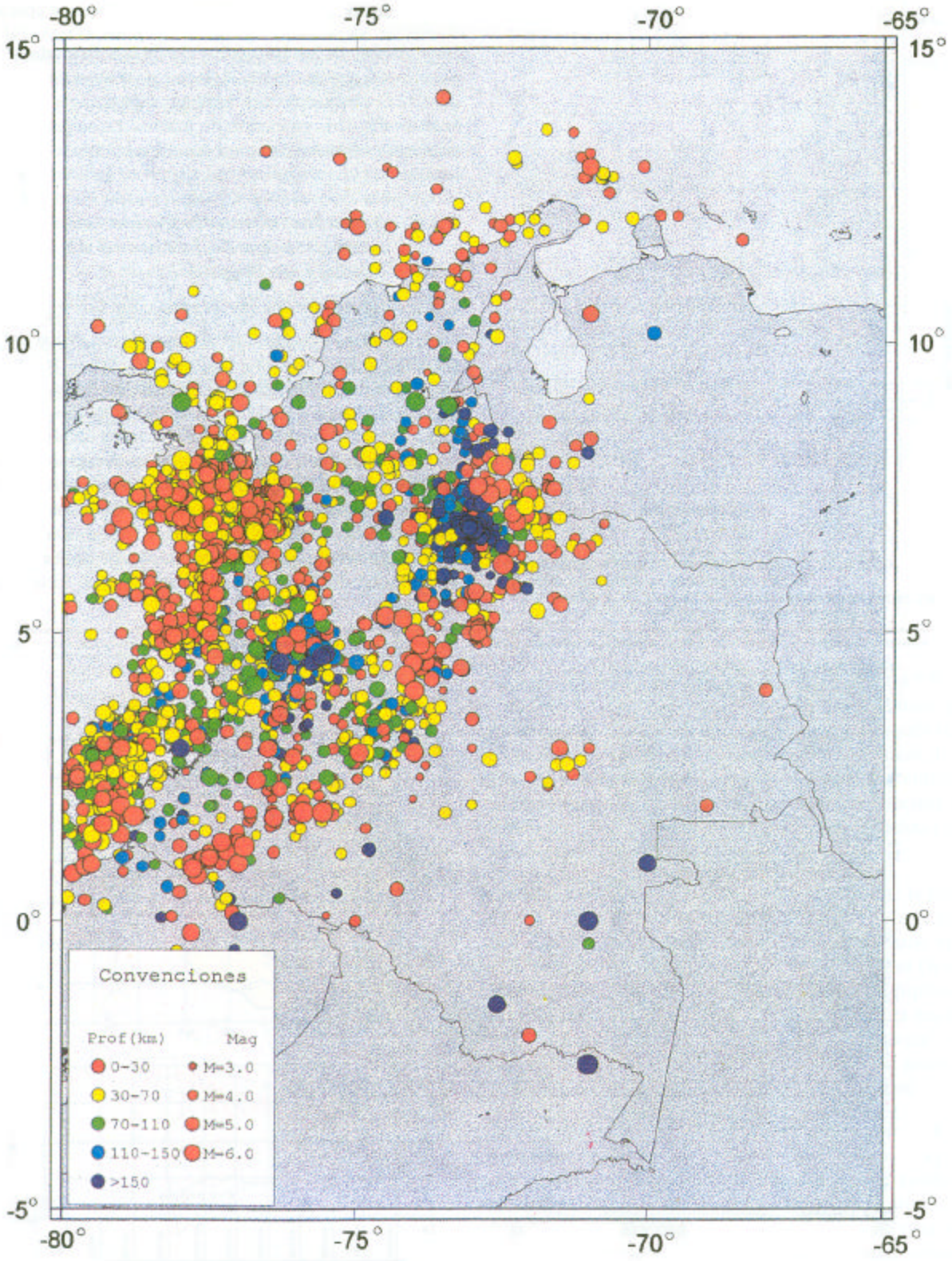


FIGURA 1.11 EVENTOS SELECCIONADOS PARA LA CONFORMACIÓN DEL CATÁLOGO

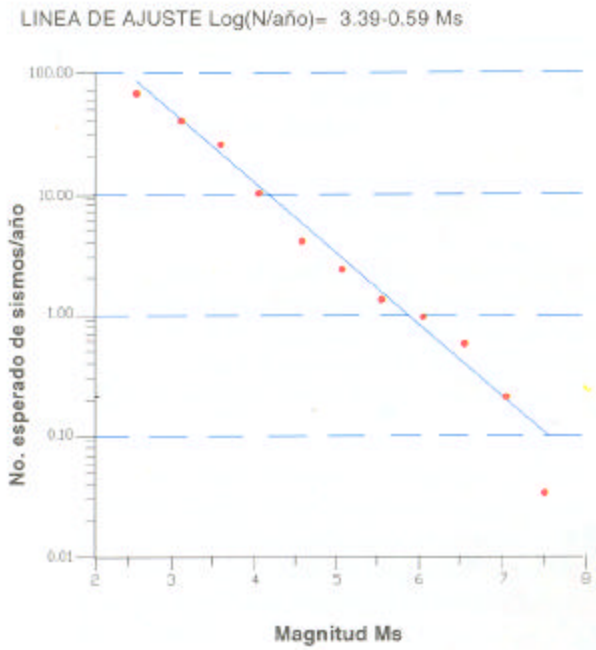


FIGURA 1.12 NÚMERO ESPERADO DE SISMOS POR AÑO PARA LOS PERÍODOS DE REPORTE COMPLETO

sismogénicas que se han identificado en la zona central del territorio nacional.

Disponiendo de la caracterización de la actividad sísmica para las diferentes fuentes sismogénicas identificadas fué posible la evaluación probabilística de parámetros para análisis sísmicos en el sitio de interés. Estos parámetros deben ser modificados para tener en cuenta los efectos locales.

1.3.1 Aspectos sismo-tectónicos de la amenaza sísmica de la ciudad de Santafé de Bogotá

1.3.1.1 Ocurrencia de sismos en la región

En la Figura 1.13 se aprecian algunos focos de los sismos registrados en Colombia. Las trazas de las 32 fallas activas (o posiblemente activas) principales se han dibujado en colores y los eventos sísmicos asignados a su actividad llevan el mismo color que la traza idealizada. Sobre la distribución espacial se ven concentraciones de epicentros en el límite con Panamá, en la Costa del Pacífico, en el Antiguo Caldas y en el Nido de Bucaramanga. Esta figura muestra que los sismos han tenido en los últimos quinientos años una distribución no uniforme dentro del territorio andino nacional.

1. Arco de Dabeiba
2. Bahía Solano
3. Benioff Intermedia
4. Benioff Profunda
5. Bocono
6. Bolivar
7. Bucaramanga- Sta. Marta Norte
8. Bucaramanga- Sta. Marta Sur
9. Cauca
10. Cimitarra
11. Comprensión Sur Caribe Este
12. Comprensión Sur Caribe Oeste
13. Cuiza
14. Espíritu Santo
15. Fallas del Magdalena
16. Falla de la Cordillera Oriental
17. Garrapatas
18. Ibagué
19. Junín Sanbiambi
20. Murindó Atrato
21. Normal Panamá Pacífico
22. Oca
23. Palestina
24. Perijá
25. Puerto Rondón
26. Romeral
27. Romeral Norte
28. Salinas
29. Sinú
30. Suárez
31. Subducción
32. Uribante Caparo

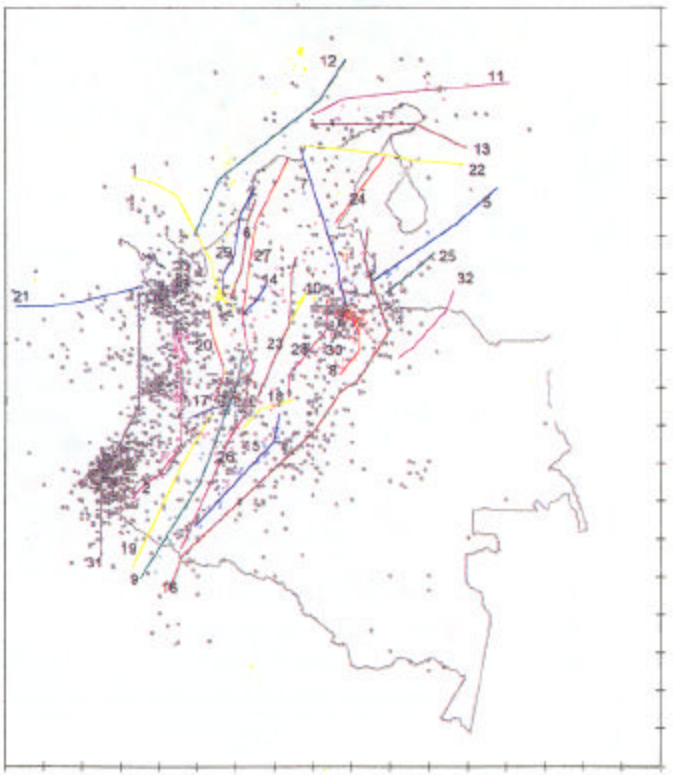


FIGURA 1.13 FOCOS DE LOS SISMOS PARA EL TERRITORIO COLOMBIANO Y TRAZAS IDEALIZADAS DE LAS FALLAS

La ocurrencia de los sismos en el territorio nacional está asociada a uno de los tres procesos siguientes: rupturas en las zonas de subducción, ruptura de la placa subducida que conforma la llamada zona de Benioff y ruptura en alguna falla de las ya mencionadas, o alguna desconocida en la actualidad.

Los sismos que ocurren en la zona de subducción y en las fallas geológicas tienen profundidades focales menores a 60 km (aunque en este estudio tal es el valor máximo estimado debido a los fuertes errores en la profundidad focal) mientras que aquellas que ocurren en la zona de Benioff de la placa subducida pueden llegar a tener focos con profundidades que oscilan entre unos 40 km en la parte más occidental y tal vez un máximo del orden de 600 km en la parte más oriental de la planicie inclinada de Benioff. La variación de la profundidad focal en la zona de Benioff, de Occidente a Oriente, se aprecia en las Figuras 1.14 y 1.15 (Costa, 1990).

Al norte del territorio colombiano la sismicidad no solamente es más escasa sino que en promedio los sismos ocurren con magnitudes menores. La razón de este comportamiento es apenas parcialmente entendida. Una hipótesis es que la placa subducida termina a unos 7.5° N; por otra parte, la placa Caribe parece unirse con la

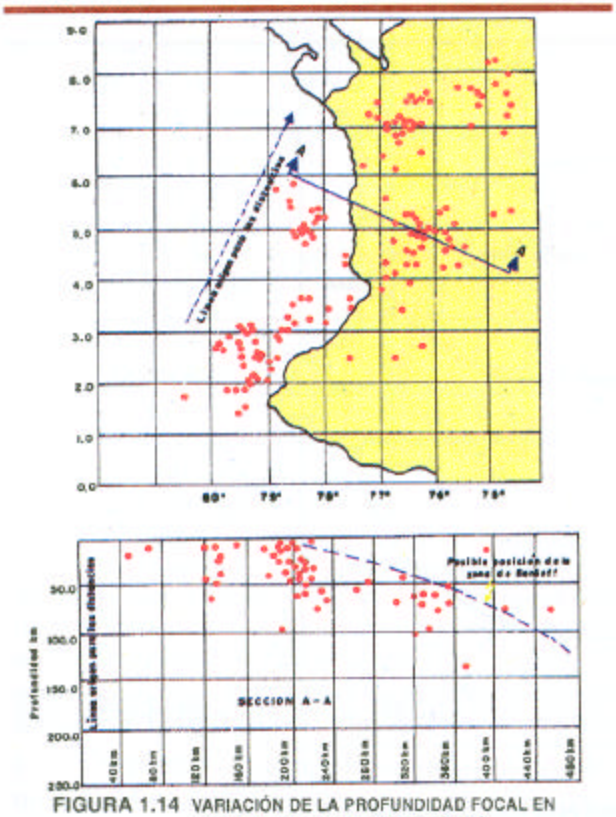


FIGURA 1.14 VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD FOCAL EN LA ZONA DE BENIOFF (SECCION A)

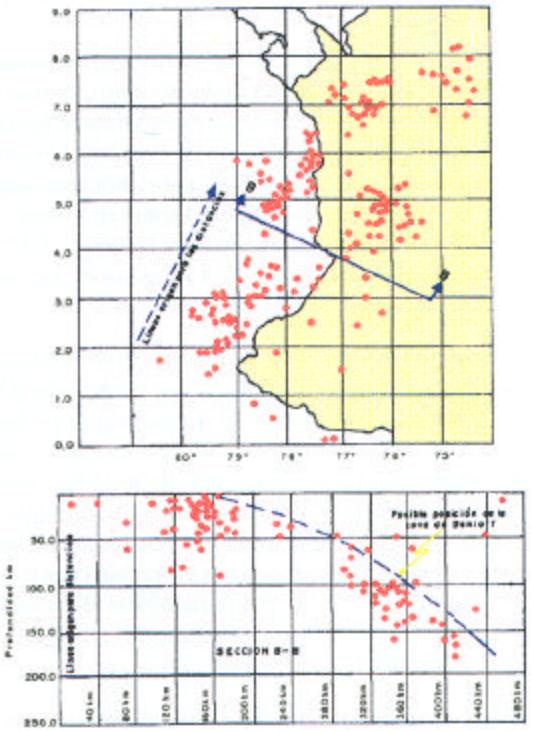


FIGURA 1.15 VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD FOCAL EN LA ZONA DE BENIOFF (SECCION B)

Sur América dentro del territorio nacional desde los 7.5° N hasta los 9° ó 9.5° N, en un tipo de unión difuso que promueve la fracturación de las placas en bloques relativamente pequeños; en esta forma la liberación de la energía se realizaría en una forma menos concentrada; además existe la posibilidad que se libere energía en forma de flujo plástico generando una sismicidad imperceptible. Todo esto es hipotético.

Otros autores (Pennington, 1981) postulan que la placa Caribe limita con la Sur América a lo largo de la falla Boconó en Venezuela; en el territorio colombiano el límite seguiría por la falla Frontal de la Cordillera Oriental y llegaría hasta el Golfo de Guayaquil. Esta hipótesis la respalda con la ocurrencia de sismos de alta magnitud a lo largo de algunos tramos de la falla Frontal, con los mecanismos focales estudiados y con otra serie de consideraciones de orden morfológico y sismológico.

Resulta razonable considerar que las fallas con rumbo sensiblemente norte-sur que abundan en Colombia pueden producir sismos de mayor magnitud en el centro y sur del país que al norte de éste. Debe exceptuarse la falla Frontal de la Cordillera Oriental que conforma una estructura que puede representar una amenaza sísmica significativa, ya sea que haga parte de un límite de placa o que sea una falla geológica intraplaca.

1.3.1.2 Fallamientos activos en el centro de Colombia

En la Figura 1.16 se aprecian las fuentes sismogénicas empleadas en la actualización de la normativa sismo resistente y los sismos asignados correspondientes, los cuales pertenecen al catálogo de 4516 eventos. Las ocho fuentes que se aprecian en la figura son: Bucaramanga - Santa Marta, Magdalena, Cordillera Oriental, Ibagué, Palestina, Romeral, Salinas y Suárez. En la figura 1.17 se aprecian los sismos no asignados a ninguna de las ocho fuentes que se consignan en la figura.

La información empleada por el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (Presidencia de la República, 1984) y su actualización no publicada en la actualidad (AIS, 1996), se ha integrado de una gran cantidad de estudios geológicos y algunos neotectónicos adelantados en Colombia a lo largo de años de trabajos sobre el tema, desarrollados con motivo de las actividades normales de INGEOMINAS, de la exploración para la búsqueda de hidrocarburos y principalmente de los estudios para grandes proyectos de ingeniería civil como carreteras y centrales hidro y termo eléctricas.

Además se debe mencionar la Zona de Benioff que se subdivide en dos partes: Benioff Intermedia y Benioff Profunda. La zona de Benioff se idealiza como la placa marina (Nazca) subducida debajo del territorio continental de Sur América.

Por su parte, el estudio neotectónico (Vergara et al, 1996), agrupa la actividad tectónica del área de influencia en dos grupos de fallas. El primer grupo lo denomina fallas de la región noroccidental, el cual lo conforman las del Valle del Magdalena y de la Cordillera Central. El segundo grupo lo denomina fuentes de la región suroriental y lo conforman esencialmente fallamientos del ambiente de la Cordillera Oriental.

Los fallamientos de la región noroccidental son los siguientes: Romeral, Palestina, Chapetón-Pericos, Cucuana-Rio Bogotá, Ibagué, Viani, Samaria - La Colorada, Magdalena y Noroeste.

En la región suroriental el estudio de neotectónica (Vergara et al, 1996), ha identificado los siguientes fallamientos: Servitá-Santa María, Guaicáramo, Yopal y fallamiento Zona Axial (F. Boyacá, F. San Francisco, F. Soapaga).

Con el fin de simplificar un poco el modelo sismogénico que permite evaluar la aceleración local máxima probable fué necesario hacer algunas agrupaciones de fallamientos muy cercanos entre sí. Esto con el objeto de manejar un criterio razonable dentro de la evalua-

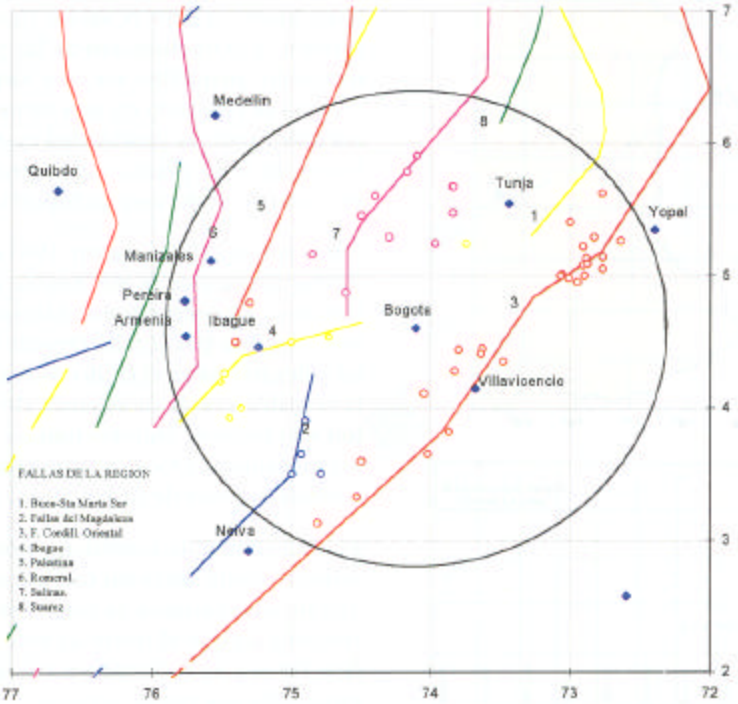


FIGURA 1.16 SISMOS ASIGNADOS PARA BOGOTÁ R=200 KM

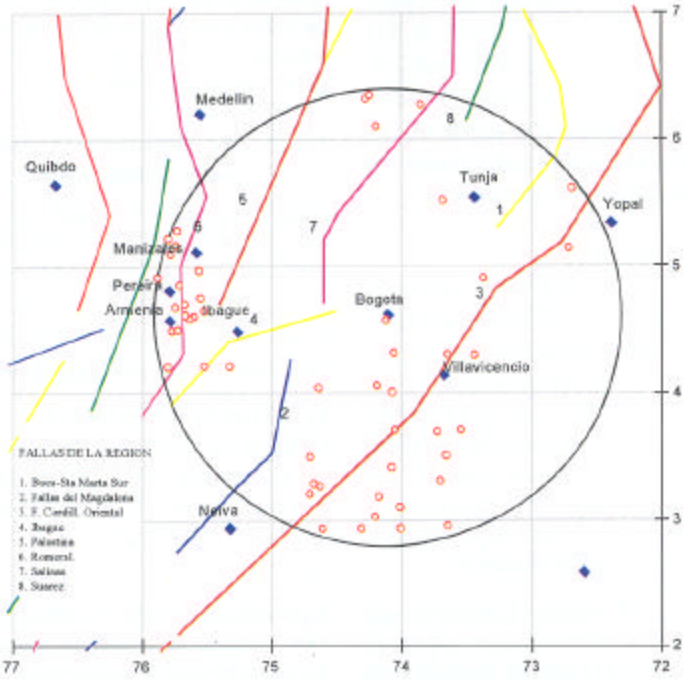


FIGURA 1.17 SISMOS NO ASIGNADOS PARA BOGOTÁ R=200 KM

ción de la amenaza sísmica local, modelación dentro de la cual dos parámetros básicos son la frecuencia media de ocurrencia y la magnitud última Mu.

La simplificación del modelo a partir de las fallas del estudio neotectónico (Vergara et al, 1996), conduce a las fuentes sismogénicas siguientes: Romeral, Palestina, Chapetón, Mulatos, Trigo-Bituima, Viani, Ibagué, Cucuana-Rio Bogotá, Cambao-Cambras, El Chocho, Servitá-Santa María, Guaicáramo, Yopal, Soapaga.

1.3.1.3 Aspectos generales sobre la sismicidad

Puede encontrarse una clara correlación entre el número de sismos N, que ha igualado o superado una magnitud M en una fuente sismogénica y la magnitud (Richter, 1958). Richter empleó este concepto usando datos en su investigación que provenían de varias fuentes alrededor del mundo. Gran número de estudios posteriores, hechos ya para diferentes fuentes sismogénicas, han mostrado la validez de este concepto y a menudo se habla de la ley de Richter, la cual se puede expresar así:

$$M = A - B \log N \qquad \text{Ec. 1.1}$$

En esta expresión, N es el número de sismos que dentro de la muestra estudiada, igualan o superan a una magnitud de referencia M, mientras que A y B son parámetros ligados a la magnitud máxima a que puede conducir la muestra y a la distribución relativa de las magnitudes de ésta entre grandes y pequeñas. A y B se evalúan por regresión.

El catálogo de 4516 eventos ha sido revisado por INGEOMINAS a la luz de la posible conversión de sus datos que la entidad estima se asemejan a la noción de magnitud M_L y la magnitud M_s. Luego de tal análisis se ha llegado a un factor de conversión que permite pasar de M_L a M_s, que es lo más apropiado para homogenizar la muestra y darle así la mayor consistencia posible. En consecuencia, para el estudio de la amenaza sísmica local se han empleado los valores M_s corregidos por INGEOMINAS de acuerdo con el procedimiento anotado.

Con respecto a la ecuación de Richter, la caracterización de los parámetros A y B para cada fuente sismogénica no siempre es posible. A veces el tramo de la fuente cubierto por el área de influencia de interés resulta muy corto y por tanto el número de sismos es muy pequeño. A menudo simplemente no se detecta un sismo dentro del tramo fuente. Otras veces puede resultar que la información disponible no cuente con datos sobre profundidad o que las magnitudes sean muy pequeñas.

Sobre la noción de magnitud última creíble, la cual desempeña un papel trascendental en la evaluación de la amenaza sísmica local, puede haber fuertes discrepancias en especial cuando se trata de evaluar dicho parámetro fuera de un contexto regional. En el presente caso se han utilizado conceptos generados a partir del parámetro A de las correlaciones y a partir de las observaciones y recomendaciones neotectónicas y de acuerdo con las condiciones locales y regionales.

1.3.1.4 Análisis de magnitudes

La primera aproximación para el estudio de Amenaza Sísmica local del área urbana de Santafé de Bogotá D.C. consistió en estudiar las fuentes sismogénicas de la actualización del CSR aplicándoles la información del catálogo depurado que contiene 4516 eventos. La segunda, consistió en formular un modelo a partir de los estudios neotectónicos (INGEOMINAS-Universidad de los Andes, 1996-a) al cual se le aplicó la misma información de catálogo. Como se verá más adelante, los resultados de los dos modelos tienden a ser muy similares.

La Figura 1.18 muestra a título ilustrativo la recurrencia para toda la región, de los sismos no asignados, para la fuente Benioff Intermedia y para la fuente Benioff Profunda. Análisis similares se realizaron para todas la fuentes activas de la región.

De manera análoga se estableció la correlación de las magnitudes de los registros con el número de eventos ocurridos, para el modelo correspondiente al sistema de fallas geológicas del estudio neotectónico pero simplificado a la concepción de fuentes sismogénicas antes explicado y de acuerdo con la ecuación 1.1.

1.3.2 Aceleración e intensidad local máximas probables

Para completar el estudio de amenaza sísmica para el área urbana de Santafé de Bogotá fué necesario hacer estimativos sobre las aceleraciones e intensidades máximas probables, así como de las probabilidades de ocurrencia de niveles máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento en terreno firme.

La aceleración local máxima probable se evaluó en terreno firme siguiendo procedimientos establecidos en la bibliografía. Para ello se hizo uso del modelo sismotectónico y las fuentes sismogénicas que se integran en un modelo que evalúa la aceleración local máxima probable anotada.

La intensidad local máxima probable dominante en el área urbana se evalúa a partir de la aceleración local máxima probable en terreno firme. Este estudio demuestra que existe un importante efecto local producido por el terreno blando y grueso en gran parte del área urbana.

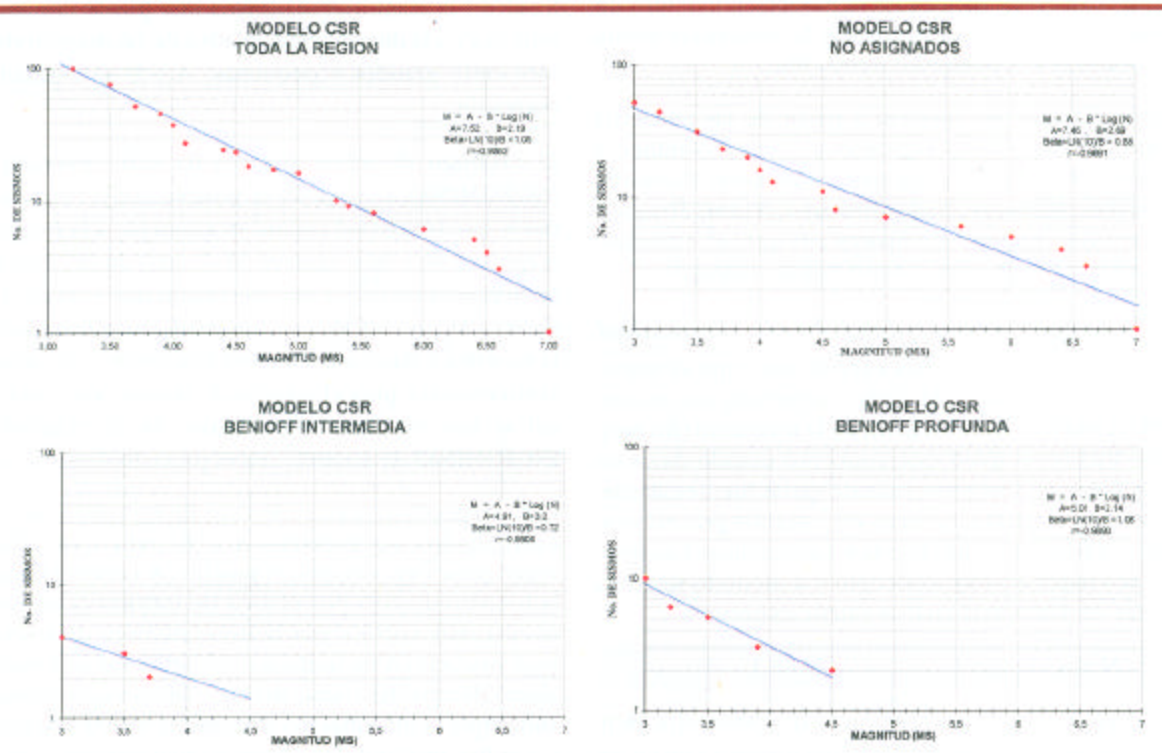


FIGURA 1.18 RECURENCIA PARA LA REGIÓN ESTUDIADA EN LOS SISMOS NO ASIGNADOS

En consecuencia, la intensidad local máxima probable dominante obtenida a partir de terreno firme se debe incrementar de alguna manera concordante con los efectos de amplificación encontrados durante la investigación.

Las fuentes sismogénicas que involucran una o varias fallas geológicas activas, conforman anchos corredores que para el estudio analítico se deben convertir en abstracciones caracterizadas por un eje hipotético de la traza, su longitud, la frecuencia y profundidad de los eventos asignados a la fuente, la magnitud última que se ha deducido para cada una de las fuentes y la posición y forma de la traza con respecto al área urbana de la capital de Colombia.

Establecidas las características geométricas y físicas del modelo, se introduce la noción de atenuación de las aceleraciones y se producen rupturas ficticias en las diferentes fuentes del modelo. Estas rupturas envían señales hacia el área urbana de Santafé de Bogotá, las cuales se van debilitando.

El modelo integra las señales provenientes de cada una de las fuentes y las adiciona en términos de la probabilidad de que generen determinado nivel de aceleración local; se llega a la aceleración local máxima probable en terreno firme producida como consecuencia de rupturas independientes de las diferentes fuentes sismogénicas que conforman el modelo.

1.3.2.1 Aceleración máxima probable

La aceleración máxima que un sismo futuro puede generar en una localidad determinada, depende de la magnitud del sismo, de la distancia entre el foco y el sitio bajo consideración, de la atenuación con la distancia y de las condiciones locales en el sitio de interés.

La magnitud máxima que puede generarse en una región depende esencialmente del ambiente sismotectónico regional, tal como se ha discutido anteriormente.

La distancia entre el foco del futuro sismo y el sitio de estudio está íntimamente asociada a la posición relativa de las fuentes sismogénicas regionales dentro de la zona de influencia. Por esta razón es necesario el estudio detallado de la sismotectónica regional.

La atenuación depende de dos fenómenos principales, cada uno de los cuales depende a su vez de complejas situaciones que todavía no han podido manejarse analíticamente sino por modelos de una sencillez tal, que su parecido con la realidad es a menudo casi inexistente; los dos fenómenos son los llamados atenuación geométrica y atenuación mecánica.

La atenuación geométrica condiciona la energía intrínseca del estado de esfuerzos que se desplaza ya que se refiere al proceso de dispersión de la energía a medida que se aleja de la fuente. La misma cantidad de energía pasa por áreas cada vez mayores a medida que las ondas viajan.

La atenuación mecánica condiciona el contenido frecuencial del tren ondulatorio puesto que involucra un proceso de fricción intergranular que se origina en la transmisión del estado de esfuerzos.

Ante las formidables dificultades físico-matemáticas que impone el proceso de atenuación, los ingenieros han recurrido a la interpretación semi-empírica de datos de aceleración registrados a diferentes distancias focales para magnitudes conocidas. En esta forma se ha establecido la aceleración a en función de la distancia por la expresión siguiente:

$$a = b_1 e^{b_2 M} (b_3 + R)^{b_4} \qquad \text{Ec. 1.2}$$

En la cual :

a = aceleración horizontal máxima local en cm/s/s (gals)

b_1, b_2, b_3, b_4 son constantes que se obtienen por regresión

R = distancia epicentral en kilómetros

M = magnitud Ms del sismo

Se ha anotado que en Colombia no se han podido realizar estudios de esta naturaleza porque no existían los acelerógrafos para el registro, aunque en épocas muy recientes comenzó a aparecer una información básica de la RSNC que permitirá en el futuro al menos iniciar estudios sobre el tema. Por esta razón fué necesario hacer uso de las muchas funciones de atenuación desarrolladas por investigadores extranjeros. Las siguientes ecuaciones son las más empleadas en la actualidad y fueron propuestas por Esteva, Donovan y McGuire, respectivamente.

$$a = 1230\, e^{0.80M} (R+25)^{-2.00} \qquad \text{Ec. 1.3}$$

$$a = 1320\, e^{0.58M} (R+25)^{-1.52} \qquad \text{Ec. 1.4}$$

$$a = 472\, e^{0.64M} (R+25)^{-1.30} \qquad \text{Ec. 1.5}$$

En estas expresiones M está en la escala Ms, R en kilómetros y la aceleración horizontal "a" resulta en cm/s/s, evaluada en terreno firme. Cada uno de los autores le establece a su propia función una medida de la dispersión como criterio para cuantificar la incertidumbre asociada al fenómeno. En este estudio se emplean las funciones de atenuación presentadas, aunque debe anotarse que existen muchas más y que cada autor pretende que la suya resulte más apropiada que la de los otros. Conviene anotar aquí que el término (R+25) corresponde a la distancia focal.

En la Figura 1.19, se aprecian gráficas de las ecuaciones 1.3, 1.4 y 1.5, respectivamente, en comparación con la información disponible de eventos recientes en Colombia.

La integración de la sismicidad pasada y la sismotectónica regional se puede lograr mediante cualquier modelo que permita transferir al sitio de interés las aceleraciones que se derivan de sismos regionales que ocurran en el futuro dentro del área de influencia. Para el estudio regional de Colombia se empleó el llamado modelo de la "Línea Fuente" (Der Kiureghian et al, 1975). En este modelo se involucran variables como las magnitudes máxima y mínima; distancia entre la fuente de actividad sísmica y el sitio de interés; sismicidad media pasada; características de la fuente; distribución de la sismicidad pasada y atenuación de la aceleración. Estas variables se introducen en el modelo geométrico a la vez que se les da un cubrimiento por las incertidumbres asociadas, para luego evaluar la probabilidad de que se iguale o sobrepase determinada aceleración en función de períodos de retorno prefijados.

El modelo de la "Línea Fuente" parte de la independencia física de los eventos, lo cual es aceptable tal como ya se ha analizado en este informe. Este modelo ha sido empleado por varios grupos de ingenieros desde 1.979 en numerosos estudios para obras del desarrollo nacional de Colombia. También es de amplio empleo internacional.

Introducidos los parámetros al modelo Línea Fuente con un cubrimiento por incertidumbre a la función de atenuación del 90% se generan las curvas de aceleración horizontal local máxima probable en terreno firme (para el caso se supone que es la roca base de la cuenca de Santafé de Bogotá).

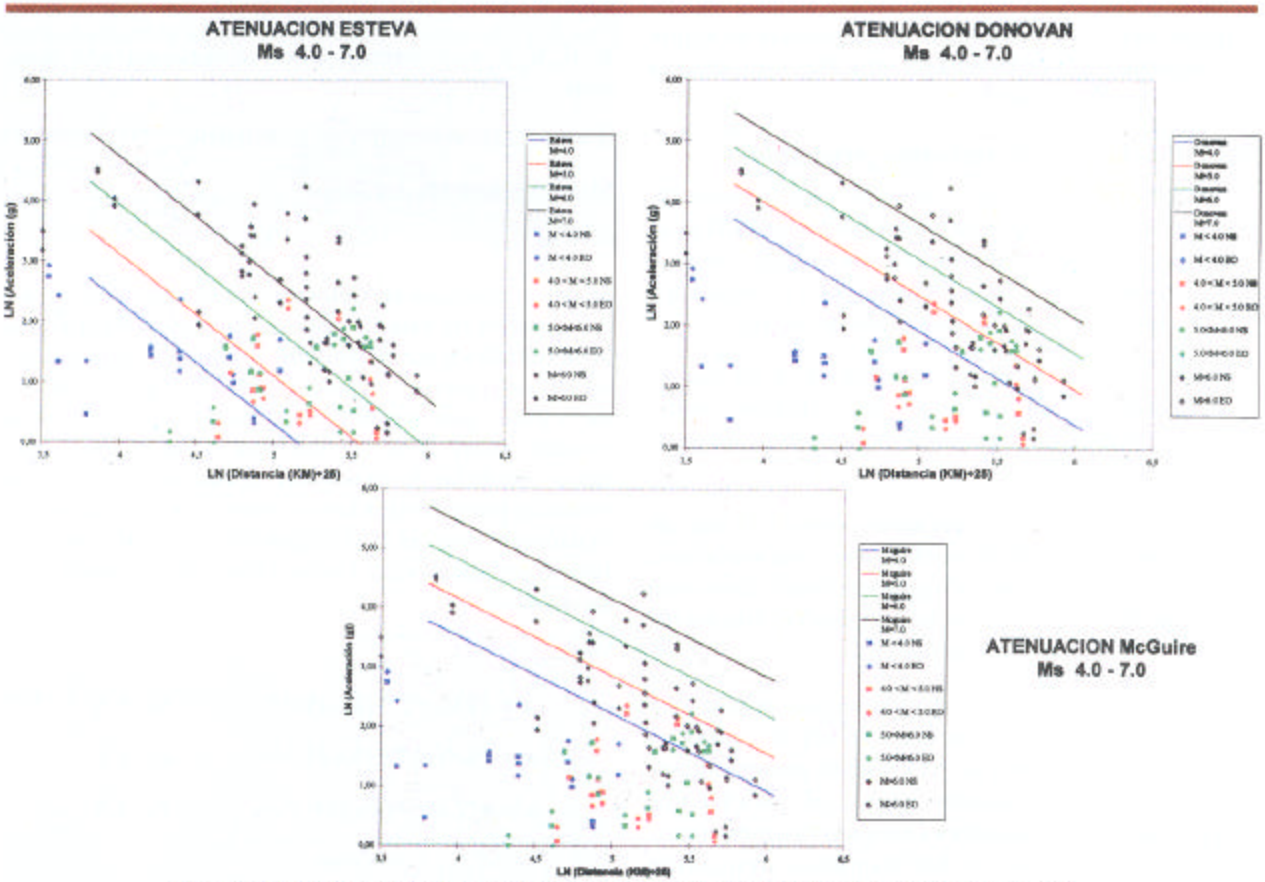


FIGURA 1.19 GRÁFICAS DE ATENUACIÓN DE LA ACELERACIÓN DADAS POR ESTEVA, DONOVAN Y McGUIRE

En la Figura 1.20 se aprecia la aceleración horizontal máxima probable utilizando los datos estadísticos de la zona empleados en el presente estudio, pero correspondientes al modelo sismo-tectónico del Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, CSR. En la Figura 1.21 se aprecia la aceleración horizontal máxima probable utilizando los datos estadísticos y las fuentes sismogénicas establecidas para este estudio.

El período de retorno T que aparece en las figuras debe entenderse más en términos probabilísticos que como el tiempo promedio de recurrencia de un sismo con aceleración horizontal máxima probable, tomado de la curva anterior. Según esto, debe entenderse T como un parámetro definido como 1/p donde p es la probabilidad que el valor de aceleración dado sea excedido en un año.

Para estructuras convencionales según el Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes (Presidencia de la República, 1984) el criterio de diseño consiste en aceptar una probabilidad de excedencia de $q_0 = 0.10$, por lo menos una vez en un lapso o tiempo de exposición de 50 años. Según esto el período de retorno de diseño para estructuras convencionales sería de 475 años.

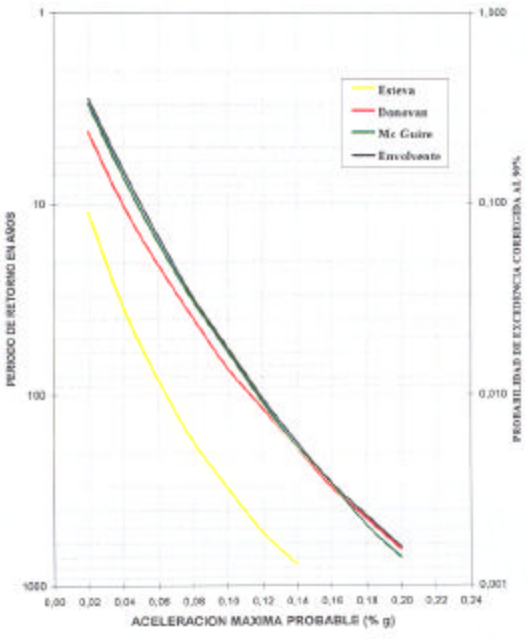


FIGURA 1.20 ACELERACIÓN LOCAL HORIZONTAL MÁXIMA PROBABLE OBTENIDA CON EL MODELO DE FUENTES DEL CSR

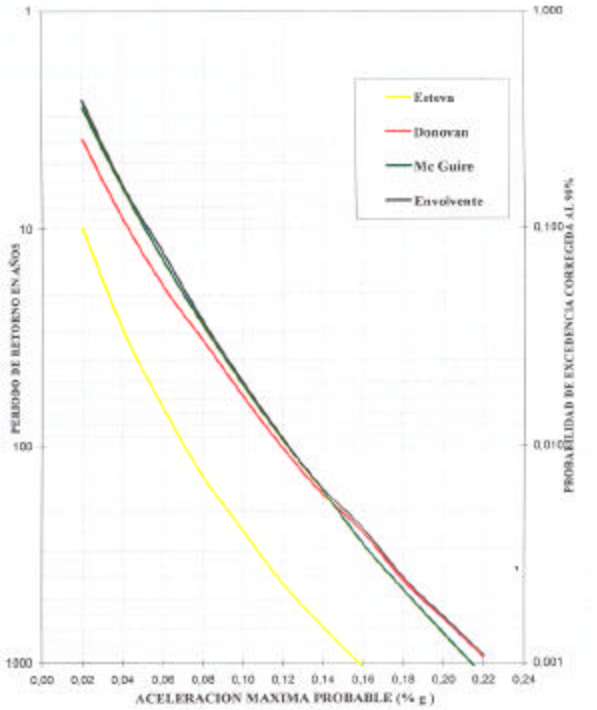


FIGURA 1.21 ACELERACIÓN LOCAL HORIZONTAL MÁXIMA PROBABLE OBTENIDA CON EL MODELO NEOTECTÓNICO DE ESTE ESTUDIO

Esto significa que la probabilidad de que el valor de a_0 correspondiente a un período de retorno T= 475 y leído de la curva a_0 contra T sea excedido en un año es de 1/475=0.0021 o simplemente que el período de retorno de diseño es de 475 años. Lo anterior no debe confundirse con el concepto que cada 475 años en promedio va a ocurrir un sismo de aceleración máxima a_0, lo cual es erróneo en términos precisos.

La escogencia del período de retorno apropiado para efectos de diseño o análisis exige gran criterio y es claro que lleva implícitas consecuencias económicas en el caso de diseños o importantes variaciones en el caso de análisis de edificaciones existentes. El tipo de obra, la vida útil, el peligro para las vidas humanas que implique su falla, el costo de repararla, el lucro cesante que se genera debido a que no sea operable y otros aspectos de igual importancia, son factores que deben tenerse en cuenta en la selección del período de retorno o de la probabilidad de excedencia que se desee aceptar para un lapso determinado.

No hay criterios claros al respecto del tiempo de exposición que se debe seleccionar para un estudio de microzonificación de una área urbana en vista de la enorme heterogeneidad de las construcciones que cubre una

investigación de esta naturaleza, en especial para una ciudad tan grande como Santafé de Bogotá. Lo que resulta claro es que la mayoría de las construcciones del área urbana corresponden a algo similar a las que podrían globalizarse dentro del término estructuras convencionales. No obstante, existen muchas plantas industriales y construcciones especiales que no cabrían dentro del término mencionado.

Teniendo en cuenta el predominio de las construcciones de tipo convencional se adoptan los mismos parámetros generales del CSR y se selecciona un tiempo de exposición de 50 años, manteniendo la probabilidad de excedencia en el 10 %, es decir un período de retorno de 475 años, asignando una confiabilidad al cubrimiento por incertidumbre de la función de atenuación de la aceleración igual al 90 %.

La definición de dos modelos sismo tectónicos, uno correspondiente al empleado por el CSR pero con la sismicidad más actualizada disponible y el otro correspondiente a la misma sismicidad, pero tomando en cuenta los resultados de los estudios neotectónicos adelantados con motivo de este estudio, ofrecen las bases para estimar la aceleración local horizontal local máxima probable en la base rocosa de la cuenca de Santafé de Bogotá, la cual puede obtenerse de las Figuras 1.20 y 1.21. Sobre las abscisas se lee la aceleración y sobre las ordenadas el período de retorno el cual se obtiene a partir del tiempo de exposición aplicable.

En las condiciones anotadas de tiempo de exposición y confiabilidad del 90% en las funciones de atenuación de la aceleración, de la Figura 1.20 se obtiene una aceleración local máxima probable del orden de 0.185 g, mientras que de la Figura 1.21 se obtiene un valor igual a 0.19g. En consecuencia, la aceleración local horizontal máxima probable sobre la cuenca rocosa de Santafé de Bogotá se puede tomar igual a 0.19 g. Para efectos de análisis posteriores se decidió tomar un valor igual a 0.20g.

Los resultados anteriores muestran la robustez del modelo matemático empleado, en vista de que dos condiciones sismo tectónicas regionales con significativas diferencias dan resultados prácticamente iguales.

1.3.2.2 Intensidades locales y regionales

La escala de intensidades pretende comparar sismos entre sí, con base en los efectos producidos en zonas determinadas. Es presumible entonces que un sismo de gran magnitud pero que ocurre lejos de una ciudad puede tener una intensidad similar a la producida por uno de menor magnitud pero que ocurra mucho más cerca. Este razonamiento cualitativo adolece de la falta de consideración del contenido frecuencial y de la duración del sismo. El de mayor magnitud y más distante casi seguramente durará más y tendrá frecuencias dominantes más bajas.

En la actualidad los sismos mejor documentados son el de Popayán (INGEOMINAS, 1986) ocurrido el 31 de marzo de 1983, el de Murindó del 18 de octubre de 1992, el de Páez el 6 de junio de 1994, el de Tauramena el 19 de enero de 1995 y el de Calima en febrero 8 de 1995, también han sido objeto de estudios preliminares de zonificación por intensidades.

Es bastante lógico suponer que exista una correlación entre la aceleración producida por un sismo en una determinada localidad y la intensidad allí mismo; este tipo de correlaciones ha sido estudiada por muchos autores.

Puede decirse que si se logra evaluar la aceleración local en función del período de retorno, también puede evaluarse la intensidad local máxima probable. Debe anotarse además que Newmark y Rosenblueth (Newmark et al, 1971), estiman que la intensidad local presenta una mejor correlación con la velocidad de las partículas del medio que con la aceleración y proponen la siguiente expresión como correlación entre la intensidad local "I" en la escala de Mercalli Modificada y la velocidad "v" en cm/s de las partículas del medio:

$$I = \log(14v)/\log(2) \qquad \text{Ec. 1.6}$$

La mejor manera de desarrollar la intensidad máxima probable sería siguiendo en forma directa un modelo probabilístico como el de "Línea Fuente" (Der Kiureghian et al, 1975). Desafortunadamente, la información de que se dispone en el país es mínima y no puede llevarse a cabo. Por esta razón aquí se emplea un método indirecto (Sarria, 1990), basado en las ecuaciones empíricas propuestas por McGuire (MacGuire, 1974).

De acuerdo con los resultados del análisis mencionado se deduce que la relación a/v podría expresarse aproximadamente por :

$$a/v = 7.6 \text{ (rango de 6.4 a 8.7)} \qquad \text{Ec. 1.7}$$

donde a y v son la aceleración y velocidad de las partículas en el medio, respectivamente.

Ante las grandes incertidumbres presentes en relaciones del tipo analizado, para la zona donde se encuentra

ubicado el proyecto de la ciudad de Bogotá se podría tomar la aceleración como siete veces la velocidad a=7*v para el terreno firme. En este caso "a" está dado en cm/s/s y "v" en cm/s. Si se aplica una aceleración local máxima probable igual a 0.19g, equivalente a 186 gals, se obtendría una velocidad local máxima probable de las partículas del medio transmisor firme de aproximadamente 27 cm/s.

Obtenida la velocidad máxima probable, la intensidad máxima probable I_{mp}, en función del período de retorno se obtiene de la ecuación 1.6 :

$$I_{mp}=\log(14\ v_{mp})/\log(2) \qquad \text{Ec.1.8}$$

Aplicando v_{mp}=27 cm/s se obtendría una intensidad local máxima probable en terreno firme igual a 8.57. Este valor debe comentarse. En primer lugar, la escala de intensidades se expresa en grados enteros. En segundo lugar, el valor obtenido correspondería a terreno firme. Como de la globalidad del estudio de microzonificación del área urbana de Santafé de Bogotá resulta claro que existe una marcada amplificación de las ondas sísmicas desde el terreno rocoso hasta la superficie del terreno blando, el valor de 8.57 debe crecer.

Saber cuanto debe crecer Imp entre el nivel de roca y el de la superficie del suelo blando es algo complejo de evaluar, si es que existieran los procedimientos para evaluar tal aumento. En este estudio se considera que ante la inexistencia de una relación de cualquier tipo entre la intensidad de un grado y otro en la escala de Mercalli Modificada y ante la diferenciación que debe existir entre la intensidad local máxima y la intensidad local dominante en una área urbana extensa como la de Santafé de Bogotá, el valor obtenido debe aproximarse al grado IX en la escala de Mercalli Modificada a nivel de superficie del terreno.

La concepción involucrada en la Imp debe interpretarse pensando que habrá áreas sacudidas de manera especialmente fuerte en las cuales la intensidad local puede superar al grado IX, mientras que en otras áreas la intensidad local será más benigna resultando de grado más bajo que la dominante. En consecuencia, es posible que el rango de intensidades correspondiente a una aceleración local de 186 gals en la base rocosa, corresponda a una intensidad en la superficie del suelo que puede variar desde un grado superior al VIII hasta otro tal vez algo inferior al X, compatibles con una intensidad local dominante grado IX en la escala de Mercalli Modificada.

1.3.3 Componentes locales de la amenaza sísmica

1.3.3.1 Generalidades de la amenaza sísmica en campo cercano

El problema de la amenaza sísmica aportada por fuentes sismogénicas locales continúa abierto; no existen metodologías exactas apropiadas para darle solución. Por ello, la aproximación debe hacer uso de conceptos un poco empíricos, que como es natural, pueden ser objeto de discrepancia.

Algunos factores que contribuyen a la imposibilidad de darle a la amenaza sísmica aportada por fuentes locales un tratamiento similar al de la aportada por fuentes sismogénicas regionales, aclarando que no son necesariamente los únicos ni se mencionan en orden de importancia, son los siguientes:

En primer lugar, si bien es cierto la traza y geometría de las fuentes locales puede ser conocida, generalmente su actividad reciente no admite estudios de recurrencia y en consecuencia, tal actividad no se puede introducir en un modelo probabilístico.

En segundo lugar, en el campo realmente cercano correspondiente a la distancia entre la fuente puramente local y el sitio de evaluación de la aceleración máxima en terreno firme, las ecuaciones de atenuación conocidas son inaplicables.

En tercer lugar, en el caso especial de fuentes locales relativamente menores como corresponde a Santafé de Bogotá y las fallas La Cajita, Mochuelo, Tunjuelito, Bogotá y Usaquén, lo que para una porción del área urbana puede ser una contribución muy cercana, para otra porción del área urbana puede no ser así. La Cajita se considera activa, las otras potencialmente activas. La gran extensión de la ciudad de Santafé de Bogotá impone consideraciones muy particulares a fuentes locales con longitudes de falla relativamente menores.

En cuarto lugar, puede presumirse que los efectos de direccionalidad de una ruptura muy cercana sobre las construcciones resulten lo suficientemente importantes para tenerlos en cuenta al menos en las frecuencias de quiebre de los espectros de diseño, cosa que no ocurre con las fuentes regionales, más distantes.

Por último aunque una falla local origine un sismo moderado, podría implicar una ruptura en superficie que podría tener trascendencia sobre la construcciones a lo largo de la ruptura cosa que no ocurre con las fuentes regionales. Esta consideración puede tener mayor importancia en el caso de líneas vitales o servicios esenciales tendidos a través de la posible ruptura en superficie. El caso de tuberías de gas, oleoducto o poliductos es significativo.

1.3.3.2 Aspectos particulares de la amenaza sísmica por fuentes locales

En el numeral de actividad neotectónica, se aprecia la posición relativa de las fuentes locales que pueden afectar el área urbana de Santafé de Bogotá. Las fuentes La Cajita, Mochuelo y Tunjuelito tienen trazas con dirección aproximada norte-sur y quedan ubicadas al sur de la ciudad mientras que la fuente Usaquén, que tiene dirección inclinada con respecto a las otras, se desarrolla en la parte norte de la ciudad. La fuente Bogotá se extiende por el piedemonte de los cerros orientales con dirección aproximada norte-sur.

Durante un sismo ocurrido en 1645 se reportó la ocurrencia de licuación de suelos a lo largo del río Tunjuelo. Durante la década 1960-1970 ocurrió un sismo con intensidades locales en el sur de Bogotá que difícilmente superaron el grado VII en la escala de Mercalli; también se reportaron algunos casos de licuación aislada en el sur de la ciudad. Estos son factores importantes en cuanto a la amenaza sísmica local generada por los sismos someros y de epicentro muy cercano como los que se derivarían de rupturas de las fuentes La Cajita, Mochuelo y Tunjuelito.

La posición de las fuentes locales anotadas, muy cercana o en el área urbana de la ciudad, se convierten en un significativo elemento de riesgo. Afortunadamente, si su posición resulta muy negativa, sus dimensiones hacen pensar que las magnitudes máximas creíbles, difícilmente podrían superar el valor de 6.0. El no tener registros de la actividad de las fuentes bajo consideración no permite estimar una profundidad focal apropiada para una posible ruptura. No obstante, se podría pensar que tal profundidad focal oscila entre 10 y 20 kilómetros. La magnitud anotada y la profundidad focal estimada conlleva a pensar que de ocurrir una ruptura, las aceleraciones puramente locales resultarían elevadas.

La poca profundidad focal y su consecuente pequeña distancia epicentral para una construcción localizada cerca de la traza, permite pensar que el contenido frecuencial de las ondas que le llegarían a la construcción tendrían una alta frecuencia relativa. Esto produce aceleraciones elevadas, aunque no necesariamente velocidades elevadas, y desplazamientos de las partículas relativamente bajos.

La posición relativa de las fuentes y las características frecuenciales posiblemente dominantes, deben generar espectros de respuesta de alta aceleración en períodos que casi seguramente variarían entre 0.2 y 0.6 segundos. Estos períodos no excitarían de manera especial suelos blandos y gruesos. Sí lo harían sobre los terrenos de piedemonte, más delgados y firmes.

Como una microzonificación no puede incluir detalles tan inciertos como las posibles aceleraciones en la zona de falla, la aceleración local dominante por la posible ruptura de cualquiera de las fuentes sismogénicas de la zona urbana podría resultar en el orden de 0.25g o tal vez un poco superior. Obsérvese que no se habla de la aceleración local máxima si no de la aceleración local máxima dominante.

1.3.4 Acelerogramas de diseño

A pesar de que no existe una definición aceptada internacionalmente, se podría postular que un acelerograma de diseño corresponde a la mayor estimación de un registro de aceleraciones contra el tiempo y el contenido frecuencial de las partículas, que provendrían de las rupturas correspondientes a los sismos máximos creíbles en las fuentes sismogénicas que contribuyen a la amenaza sísmica local de una área urbana.

El mencionar las rupturas en plural, significa que una localidad pude ser sacudida por diferentes acelerogramas de diseño correspondientes a las fuentes sismogénicas dominantes desde el punto de vista de la contribución de la amenaza sísmica local.

Con base en los estudios sismológicos, neotectónicos y de amenaza se establecen las eventuales posibilidades de ruptura de fuentes sismogénicas que controlarían la respuesta sísmica de la zona bajo estudio, cada una de las cuales se asocia con un acelerograma de diseño. Estas rupturas hipotéticas provendrían de las siguientes fuentes (Tabla 1.6):

CLASIFICACIÓN	FUENTE	DISTANCIA (Km)
Lejana	Subducción	400
Regional o Frontal	Frontal de la Cordillera Oriental	60
Cercana	Local en el área de la ciudad	15 - 20

TABLA 1.6 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES ANALIZADAS

El acelerograma de diseño es una función en el dominio del tiempo que mediante técnicas de propagación de ondas se propaga desde una roca base previamente establecida, hasta la superficie o profundidades intermedias del subsuelo, para el cual estudios geotécnicos previos han permitido establecer sus características de estratificación, rigidez y amortiguamiento. La aceleración cambia con la profundidad y características mecánicas del suelo, y éste magnifica las amplitudes de la señal que son similares a las de los modos de vibración dominantes del subsuelo en su conjunto.

1.3.5 Aproximación al establecimiento de los acelerogramas de diseño

Seleccionar un acelerograma de diseño no deja de ser algo arriesgado. Si no se han estudiado lo suficiente la fuente que lo originará, la distancia entre la fuente y el área donde se desea establecer la respuesta sísmica y no se conocen las características de respuesta local del área bajo consideración, la selección del acelerograma puede resultar con diferentes errores, tanto más significativos cuanto menos sea la consideración de la integralidad del problema.

En el pasado y en la actualidad se han empleado fundamentalmente tres aproximaciones para establecer un acelerograma de diseño. La primera consiste en emplear acelerogramas registrados que se consideren adecuados previo análisis integrado de las variables principales envueltas; en este caso el registro se emplea intacto. La segunda consiste en modificar en duración, en contenido frecuencial o en amplitud, acelerogramas previamente registrados; se pueden modificar los tres parámetros, dos de ellos o uno solo. El tercer procedimiento general consiste en emplear acelerogramas sintéticos para lo cual hay diferentes técnicas.

En el caso del estudio de la microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá D.C. se han establecido tres fuentes sismogénicas principales. La primera corresponde a la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano, la cual es significativa únicamente por las características de respuesta de algunas partes del subsuelo de la ciudad. La segunda corresponde a la fuente Frontal de la Cordillera Oriental la cual resulta dominante en el caso de la ciudad. La tercera corresponde a las fuentes locales.

1.3.5.1 Acelerograma correspondiente a la fuente Lejana - Zona de Subducción

El sismo de México, ocurrido en Septiembre de 1985, tuvo una magnitud del orden de 8 en la escala Ms. La distancia entre la zona de subducción que lo originó y Ciudad de México es cercana a 400 Km.

Las características de la zona de subducción colombiana y su posición relativa con respecto a la ciudad de Santafé de Bogotá, son muy similares a las existentes entre la zona de subducción mejicana y Ciudad de México. Por otra parte, aunque existen diferencias significativas entre los estimativos sobre las características de respuesta sísmica del subsuelo de Bogotá y las respuestas sísmicas medidas en Ciudad de México, puede decirse que hay similitudes evidentes. Dadas las similitudes antes mencionadas, se consideró que el sismo de diseño a emplear en el caso de la evaluación de la respuesta sísmica del subsuelo en Santafé de Bogotá sería el correspondiente al acelerograma del sismo del 19 de Septiembre de 1985, registrado en la Ciudad Universitaria (UNAM).

El sismo de México fue registrado en un gran numero de instrumentos. Algunos localizados relativamente cerca del epicentro y otros bastantes distantes. Entre estos últimos, los registrados en el área urbana de Ciudad de México son de enorme importancia porque corresponden a un sismo muy distante y extraordinariamente destructor sobre una muestra más o menos concentrada de edificios de la ciudad capital, cuyas alturas variaron entre ocho y veinte pisos.

En Ciudad de México el sismo fue registrado en instrumentos colocados en suelo duro y en suelos blandos. Para el estudio de microzonificación del área urbana de Santafé de Bogotá, el registro que interesa es el obtenido en roca o suelo muy firme porque no ha sido afectado por las propiedades del suelo que lo pueden alterar de tal forma que sólo contienen las características geotécnicas locales, más no las de la señal en su viaje por la roca.

El acelerograma de México, como se lo denomina de aquí en adelante, corresponde a un registro con una aceleración máxima de 0.038g y una duración del orden de ochenta segundos. El acelerograma es extraordinariamente limpio en el sentido de que se asemeja a una función monocromática con período dominante en el orden de dos segundos. En la Figura 1.22 se aprecia el acelerograma de México seleccionado como representativo para la zona de subducción colombiana en referencia a la ciudad de Santafé de Bogotá D.C.

1.3.5.2 Acelerograma correspondiente a la fuente Frontal de la Cordillera Oriental

La fuente Frontal de la Cordillera Oriental puede dar origen a sismos de magnitud elevada, aunque algo menores que los de la fuente lejana. El plano de falla tiene las dimensiones apropiadas para que la magnitud máxima creíble llegue a un valor del orden de 7.2 en la escala Ms. La distancia focal entre el plano y una región hipo-

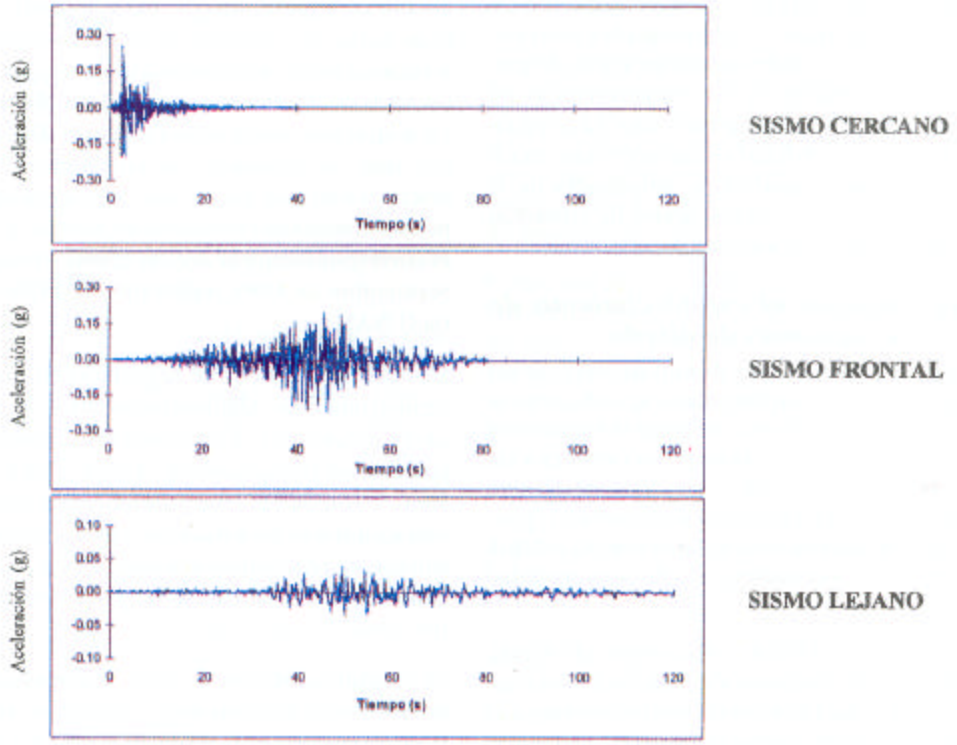


FIGURA 1.22 REGISTROS DE LOS TRES SISMOS DE DISEÑO ESTABLECIDOS

tética similar a un centro de gravedad de la ciudad de Santafé de Bogotá es de unos 60 Km.

Para este caso se analizó el sismo de Tauramena que se originó por una ruptura de la fuente Frontal de la Cordillera Oriental, unos cien kilómetros al norte de Santafé de Bogotá. La magnitud del sismo de Tauramena fue de 6.5 en la escala Ms, con una profundidad focal de unos 20 kilómetros. Se consideró que la fuente Frontal debía tener tal homogeneidad que permitiera generar un acelerograma sintético para simular el sismo frente a Santafé de Bogotá, con una magnitud mayor, a partir del registro de Tauramena con magnitud inferior.

Para generar acelerogramas sintéticos existen varios procedimientos, desde establecer un espectro de diseño y formular la suma de muchas funciones circulares desfasadas en el tiempo, hasta emplear un registro real y establecer una función de Green empírica que se puede aplicar al plano de ruptura desde el cual arrancaría el acelerograma sintético produciendo registros elementales que se propagan desfasados en el tiempo hasta conformar el registro del acelerograma de diseño.

En el presente caso se utilizó el método de FGE para generar un acelerograma sintético en "El Rosal", correspondiente a un sismo de magnitud 7.2 (longitud de ruptura, 80 Km), sobre el sistema de fallas del Piedemonte Llanero, a la altura de Santafé de Bogotá. El registro utilizado como base para la "reconstrucción" es el registro del sismo de Tauramena del 19 de Enero de 1995 (Ms ~ 6.5) en "El Rosal".

Parece razonable pensar que si un sismo de magnitud 7.2, sucede en esta zona, su mecanismo focal sea en falla inversa, como en el caso de Tauramena. En efecto, la deformación presente a lo largo de todo el Piedemonte Llanero colombiano es relativamente homogénea y corresponde esencialmente a un acortamiento perpendicular al eje de la cordillera, con una componente dextral menor.

La distancia entre el sitio del Rosal y los dos sismos no es la misma : 150 Km para el sismo de Tauramena y 100 Km para el reconstruido (en promedio). Para corregir parcialmente este efecto, se consideró la atenuación geométrica y se corrigió cada registro elemental según la distancia entre la fuente respectiva y el sitio de registro. La Figura 1.22 muestra el acelerograma de diseño generado por el método de la FGE.

1.3.5.3 Acelerograma correspondiente a la fuente local

La fuente local resultó la más complicada de caracterizar mediante un acelerograma de diseño. En el caso de Santafé de Bogotá se llegó a la conclusión de que el registro de Corralitos durante el sismo de Loma Prieta de 1989 se puede convertir en una muy buena base para establecer el diseño de fuentes locales.

El sismo de Loma-Prieta (California) que dio origen al registro de Corralitos tuvo una magnitud aproximada de 7.0 Ms. El registro se obtuvo en un instrumento localizado a unos 10 kilómetros de la ruptura y tuvo una aceleración máxima en terreno firme un poco superior a 0.60g, con una duración total de fase intensa de unos 40 segundos. El mecanismo dominante fue de desplazamiento horizontal.

Después de varias discusiones con el grupo sismológico y tectónico, se llegó a la conclusión de que el contenido frecuencial de la señal mencionada se puede conservar y se debe reducir la aceleración máxima hasta 0.25g manteniendo la duración. Haciendo estas modificaciones, el registro de Corralitos se tomó como acelerograma de diseño de las fuentes locales que se desarrollan en el área urbana de Santafé de Bogotá, las cuales corresponderían a las fallas La Cajita, Mochuelo, Bogotá y Usaquén. En la Figura 1.22 se aprecia el acelerograma modificado correspondiente.

1.3.6 Espectros de respuesta de acelerogramas de diseño

Para efectos de comparación de los contenidos frecuenciales y amplitudes de los tres acelerogramas de diseño definidos se han calculado y graficado los espectros elásticos de respuesta correspondientes a un coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico del 5%.

La Figura 1.23 presenta los espectros correspondientes los cuales se utilizan más adelante en el estudio mismo de respuesta dinámica del subsuelo y en el establecimiento de los espectros de diseño en las diferentes zonas de la ciudad.

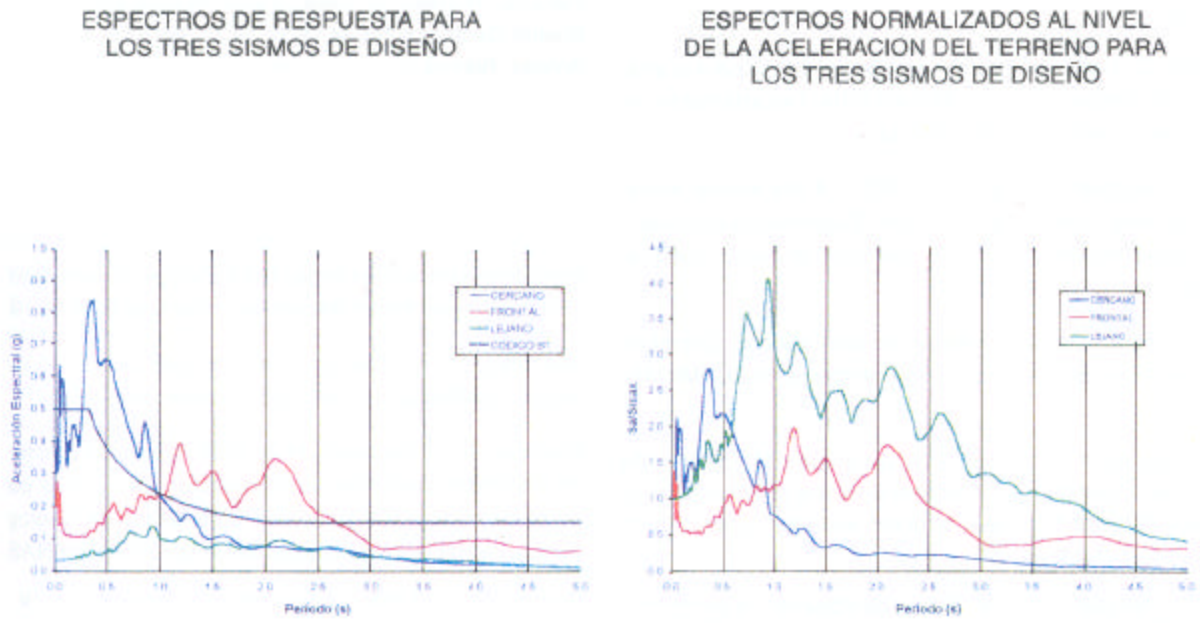


FIGURA 1.23 ESPECTROS DE RESPUESTA CORRESPONDIENTES A LOS ACELEROGRAMAS DE DISEÑO

1.4 REFERENCIAS

Acosta J., Hernández O., 1991. *"Fotointerpretación neotectónica al oriente del municipio de Pasca, Cundinamarca"*. Artículo presentado para publicación el la revista geológica de la UIS, Bucaramanga, 18 p.

Aggarwal, 1983. *"Presentday boundary and the motion of the Caribbean Plate relative of the South America"*. 10a Conferencia Geológica del Caribe, Cartagena (resumen), P. 156.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 1996. *"Actualización del Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes"*. Estudio presentado al Congreso Nacional para su aprobación.

Bonilla M., Mark R., Lienkaemper J., 1984. *"Statistical relations among earthquak magnitude, surface rupture length and surface fault displacement"*. BSSA, 74, 6, 2379, 2379-2411.

Bullen K. E.,1985. *"An Introduction to the Theory of Seismology"*. 4th ed. Cambridge University Press, 499 p.USA.

CERESIS, 1985. *"Catálogo de Terremotos para América del Sur"*. Ed. Askew, B., Algermissen, S.T., CERESIS, Vol.4., 269 p..

Costa C., 1990. *"Integración analítica y gráfica para el análisis del riesgo sísmico"*. MIC-89-II-04. Departamento de Ingeniería Civil Uniandes, Bogotá.

Der Kiureghian A., Ang H. S., 1975. *"A line source model for seismic risk analysis"*. Civil Engineering Studies , Structural Research No 419. University of Illinois. Urbana, USA.

Espinosa A., 1993. *"Actualización del Catálogo Colombiano de Sismicidad Histórica"*. Informe Interno, INGEOMINAS, Cali.

Etchecopar A., Vasseur G. & Daigneres M., 1981. *"An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis"*. Jour. Struct. Geol., V. 3, 1, pp 51 - 65.

INGEOMINAS, 1986. *"El Sismo de Popayán"*. Estudio preparado por un comité técnico científico por recomendación de la Presidencia de la República de Colombia. Publicado por INGEOMINAS. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS, 1995. *" Estudios Sismológicos"*. Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto No. 5. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS - Universidad de los Andes, 1996-a. *"Estudios tectónicos y neotectónicos"*, Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto No. 3. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS - Universidad de los Andes, 1996-b. *" Amenaza sísmica regional dentro de la microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá"*. Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto No. 14. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS, 1996. *"Proyecto CASA (Central and Southamerican, GPS Project)"*. Santafé de Bogotá.

ITEC - ISA, 1988. *"Actualización de la Información Sísmica de Colombia"*. ITEC Ltda., Ingenieros Consultores, Bogotá.

McGuire R. K., 1974. *"Seismic structural response risk analysis incorporating peak response regression on earthquake magnitude and distance"*. MIT Department of Civil Engineering , Research Report.

Newmark N.; Rosenblueth E., 1971. *"Fundamentals of earthquake engineering"*. Prentice Hall.

París G., Romero J., 1994. *"Fallas Activas en Colombia"*. Boletín Geológico No 34 (1-3), INGEOMINAS, Santafé de Bogotá. Bogotá.

Pennington W., 1981. *"La subducción de la cuenca oriental de Panamá y sismotectónica del noroeste de Sur América"*. Proyectos Nariño II y III. Instituto Geofísico de los Andes Colombianos, Bogotá.

Presidencia de la Republica, 1984 *"Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes"*. Decreto 1400 de 1984.

Renzoni G., 1975. *"Geología del Macizo de Quetame"*. Geología Colombiana, Universidad Nacional, Bogotá.

Restrepo J. J.; Toussaint H. F, 1989. *"Terrenos alóctonos en los Andes Colombianos; explicación de algunas paradojas Geológicas"*. V Congreso Colombiano de Geología; Bucaramanga. Memorias publicadas por INGEOMINAS.

Richter C. F., 1958. *"Elementary Seismology"*. W.H. Freeman and Company.

Ritz J.F., 1991. *" Evolution du champ de contraintes dans les Alpes du sud depuis la fin de l'Oligocène"*. Implications sismotéctoniques. Tesis de Doctorado, Univ. Montpellier II, Francia.

Ritz J.F., Taboada A., 1993. *"Revolution stress ellipsoids in brittle tectonics resulting from an uncritical use of inverse methods"*. Bull. Soc. Geol., Francia.

Sarria A, 1990. *"Ingeniería Sísmica"* . Editorial Uniandes. Santafé de Bogotá.

SISRA I, 1986. *"Sismicidad Regional Andina"* Proyecto del Centro Regional de Sismología Para América del Sur, Ceresis-USGS.

Slemmons D., 1977. *"Faults and Earthquake Magnitude: State of Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States"*. Mackay Schools of Mines, University of Nevada, Reno.

Stepp J. C, 1972. *"Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect in Statistical Estimates of Earthquake Hazard"*. Proceedings of the Microzonation Conference, V.2. Washington University, Seatle.

Taboada A. 1993. *"Stress and strain from striated pebbles. Theoretical analysis of striations on a rigid spherical body linked to a symmetrical tensor"*. Jour. Struct. Geol., V. 15.

Toussaint H. F.; Restrepo J. J., 1989. *"Acreciones sucesivas en Colombia. Un nuevo modelo de evolución geológica"*. V congreso colombiano de geología; Bucaramanga, Colombia 1989. Memorias publicadas por INGEOMINAS.

Vergara H., 1989. *"Tectónica cuaternaria de la Falla de Ibagué: edad y algunos aspectos sedimentológicos del Abanico de Ibagué"*. INGEOMINAS, Ibagué.

Vergara H.; Taboada A.; Romero J.; París G.I., 1996. *"Estudios neotectónicos para la microzonoificación de Santafe de Bogotá"* . VI Congreso Colombiano de Geología. Sociedad Colombiana de Geologia - INGEOMINAS. Santafé de Bogotá.

Wells D., Coppersmith K., 1994. *"New empirical relationships among magnitude, rupture, rupture width, rupture area and surface displacement"*. Bull. of Seismological Society of America, Vol. 84.

CAPITULO 2

CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO DE LA CIUDAD

2.1 GEOLOGÍA LOCAL

La ciudad de Santafé de Bogotá se localiza en promedio a 2650 m de altitud sobre el eje de la Cordillera Oriental de Colombia. Geomorfológicamente se diferencian dos zonas: 1) la plana, ubicada hacia la parte central del área, en donde se concentra la mayor parte de la población y 2) de relieve montañoso con una parte habitada, otra dedicada a la minería de tajo abierto (canteras, gravilleras y chircales) y otra aún no intervenida por el hombre, localizada en los sectores oriental y suroccidental de la ciudad.

La zona plana es drenada por el río Bogotá que corre en sentido NNE-SSW con sus afluentes Tunjuelito, Fucha y Juan Amarillo. La zona montañosa es drenada por los ríos Tunjuelito, San Francisco y quebradas de menor caudal que corren en sentido S-N y E-W que al entrar a la zona plana sus cauces se utilizan como canales de conducción de las aguas servidas de la capital a los ríos Bogotá y Tunjuelito.

Geológicamente la ciudad se localiza sobre un extenso relleno sedimentario que conforma la Sabana de Bogotá, y está rodeada por cerros constituídos por rocas de tipo arenisca, arcillolitas y conglomerados.

2.1.1 Litoestratigrafía

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades entre el Cretáceo y Terciario, y depósitos sedimentarios pocos consolidados de edad Pleistoceno a reciente. (INGEOMINAS, 1995-a ; Caro et al, 1996). Se describen a continuación las unidades en orden cronológico de la más antigua a la más reciente (Figura 2.1 - Mapa No. 1)

2.1.1.1 Formación Chipaque (Ksch)

Constituída por lutitas limo-arcillosas de color negro, carbonosas, piritosas y laminadas, en bancos hasta de 10m de espesor, con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano muy fino, en estratos de 0.2 a 1.0m, que se acentúan hacia el tope. En los anticlinales de Bogotá, la parte que aflora tiene 130m de espesor y en el de Cheba 205m.

2.1.1.2 Grupo Guadalupe (Ksg)

Está compuesto por las Formaciones de Arenisca Dura, Plaeners y Labor-Tierna, cuyas características principales son las siguientes:

Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Aflora en los ejes y flancos de los anticlinales de Bogotá y Cheba y conforma los cerros más prominentes del área, tales como, Guadalupe, Monserrate, Alto el Cable, La Cruz, La Viga y Cheba. Esta constituída por areniscas cuarzosas, duras, de grano fino y color gris claro, bien cementadas, con intercalaciones esporádicas de capas de arcillolitas silíceas. Su espesor de acuerdo con columnas estratigráficas levantadas varía entre 308 y 460 m.

Es importante económicamente como acuífero y como material para la construcción.

Formación Plaeners (Ksgp)

Aflora en los flancos de los anticlinales de Bogotá y Cheba. Consta de tres conjuntos litológicos: a) uno inferior donde predominan arcillolitas silíceas con un espesor de unos 40m; b) otro intermedio donde alternan arcillolitas silíceas y areniscas de grano fino, con un espesor entre 70 y 117m y c) el superior donde predominan las arcillolitas silíceas con un espesor de aproximadamente 50m. Se utiliza como fuente de recebo, caolín y como acuífero en zonas fracturadas.

Formación Labor-Tierna (Ksglt)

Esta unidad aflora en el flanco occidental del Anticlinal de Bogotá y flanco Oriental del Anticlinal de Cheba. Consta de tres conjuntos: a) uno inferior conformado por areniscas cuarzosas de color gris claro, de grano fino a medio, ligeramente friable y de espesor entre 135 a 165m; b) un conjunto intermedio donde predominan arcillolitas silíceas, con un espesor de 10 a 15m y c) el conjunto superior constituído por areniscas cuarzosas y feldespáticas, gris claras, de grano medio a grueso, con estratificación cruzada, en estratos de 0.2 a 3.0 m y de espesor variable entre 90 y 110m. Es importante como acuífero y proporciona la mayor parte de la "Arena de Peña" para la construcción.

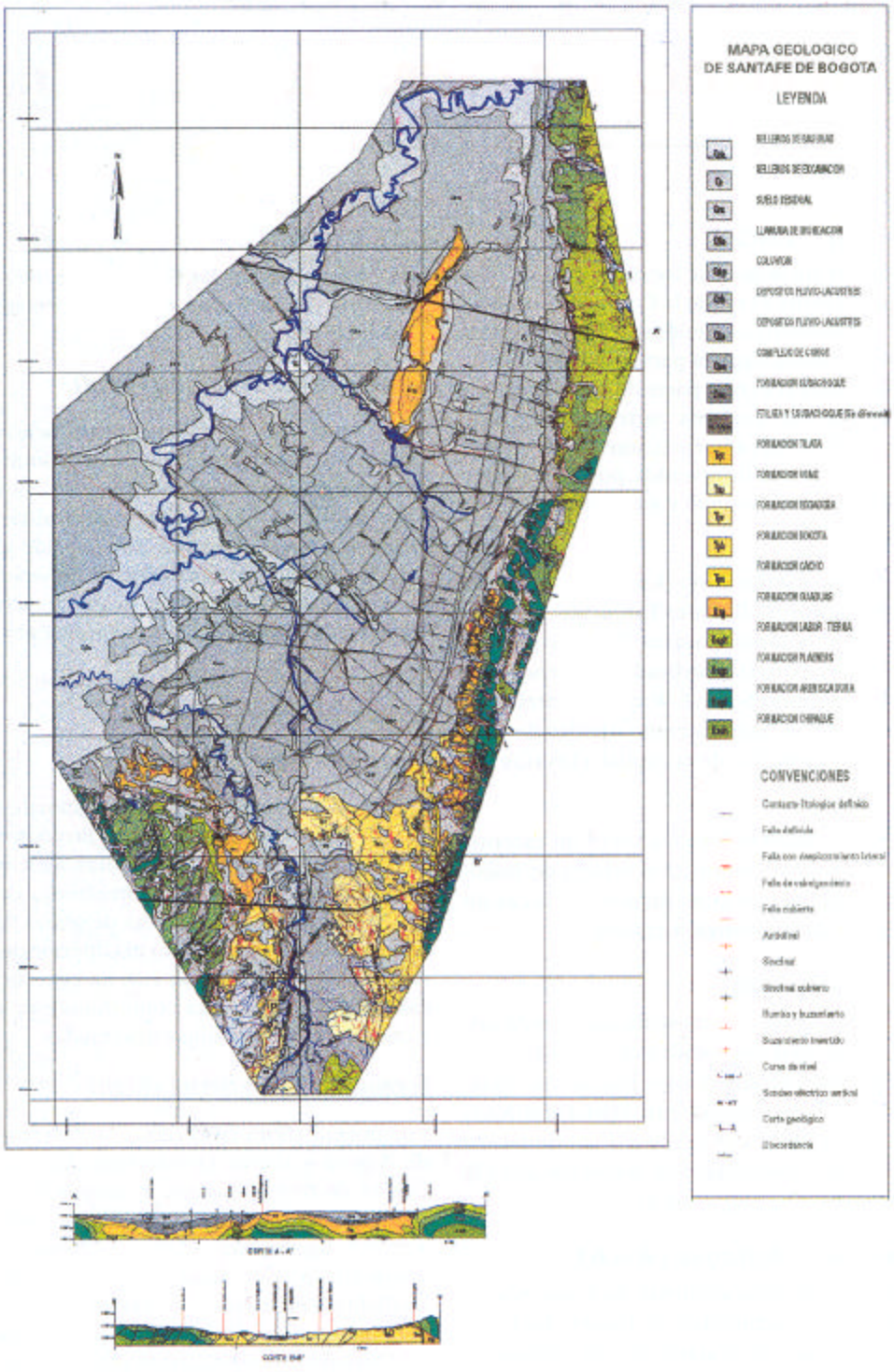


FIGURA 2.1 MAPA GEOLÓGICO DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

2.1.1.3 Formación Guaduas (Ktg)

Aflora en los Cerros de Suba, en el piedemonte de los Cerros Orientales y en los sectores Sur y Suroeste de Santafé de Bogotá. Consta de tres conjuntos litológicos: a) parte inferior conformada por arcillolitas y areniscas de grano fino y con 70m de espesor; b) conjunto intermedio constituído por areniscas cuarzosas de color gris claro, de grano fino a grueso y con intercalaciones de arcillolitas y un manto de carbón de 0.4m; tiene un espesor de 606m y c) conjunto superior constituído por arcillolitas de color gris oscuro, con intercalaciones de areniscas cuarzosas, de grano medio a grueso, y mantos de carbón; su espesor es de aproximadamente 324m. Esta unidad posee el carbón a nivel comercial en la Sabana de Bogotá. Las arcillas como producto de meteorización de la roca, se utilizan para la fabricación de ladrillo, bloque, teja y tubería. El nivel intermedio se considera importante como acuífero y como fuente de arena para la construcción.

2.1.1.4 Formación Cacho (Tpc)

Aflora a lo largo del piedemonte oriental de Santafé de Bogotá, haciendo parte del flanco occidental del anticlinal de Bogotá. Litológicamente está constituída por areniscas de color amarillo rojizo, de grano grueso, con estratificación cruzada, en estratos de 0.1 a 2.0m y con un espesor de 50m. Es importante como acuífero y sus arenas se explotan como material de construcción.

2.1.1.5 Formación Bogotá (Tpb)

Aflora en los flancos del sinclinal de Usme-Tunjuelito. Consta de dos conjuntos: a) el inferior constituído por alternancia de arcillolitas y areniscas cuarzosas-feldespáticas, gris verdosas, de grano fino hacia la base y grueso hacia el tope, con un espesor de 620m; b) el conjunto superior constituído por arcillolitas gris oscuro, gris verdoso y marrón, por meteorización; su espesor sobrepasa los 100m. Las arcillas como producto de meteorización se utilizan para la fabricación de ladrillo, teja y tubería y como lechos impermeables para depósitos de basura.

2.1.1.6 Formación Arenisca la Regadera (Tpr)

Aflora hacia la parte media en las laderas del Valle del río Tunjuelito, haciendo parte del sinclinal Usme-Tunjuelito. Está constituída por capas de areniscas de cuarzo y fragmentos líticos, de color gris claro, con abundante matriz arcillosa e intercalaciones de arcillolitas de color gris claro a oscuro, blandas y plásticas, las cuales predominan hacia el tope de la unidad. Su espesor es de 360m. Sus arenas son importantes como material de construcción; tiene poca importancia como acuífero por su alto contenido de matriz arcillosa.

2.1.1.7 Formación Usme (Tpu)

La parte inferior aflora a lo largo del eje sinclinal de Usme-Tunjuelito. La parte que aflora está constituída por limolitas y arcillolitas de colores gris oscuro y amarillo por meteorización. Se presenta en bancos de 4 a 20 m, con intercalaciones esporádicas de areniscas cuarzosas de grano muy fino a medio. La parte que aflora tiene un espesor de 150m.

2.1.1.8 Formación Tunjuelo (Qpt)

Aflora a lo largo del piedemonte oriental de Santafé de Bogotá, pero sus mejores afloramientos se presentan en el Valle del río Tunjuelito, entre Yomasa y la escuela de Artillería. Su litología está compuesta por bancos de bloques, guijarros, guijos y gránulos de areniscas, limolitas, arcillolitas y chert, dentro de una matriz areno-arcillosa poco consolidada. Ocasionalmente se presentan intercalaciones de capas de arena y limo-arcilloso de aspecto lenticular y estratificación horizontal. Su espesor se estima en unos 100m. De esta unidad se extrae la gravilla de mejor calidad que existe en la Sabana de Bogotá y se utiliza como agregado para concretos de alta resistencia.

2.1.1.9 Formación Sabana (Qs)

Constituye la mayor parte de la superficie plana del área de estudio; geomorfológicamente corresponde al nivel de terraza alta descrita en el mapa. Consta de arcillas plásticas de color gris oscuro, en estratos de 0.4 a 1.0m de espesor, con interestratificaciones de lentes de arena y grava e intercalaciones de ceniza volcánica de color gris blancuzco, las cuales son más abundantes hacia la parte media del depósito. Sus niveles arenosos y de gravas son importantes para el almacenamiento de agua. El espesor total alcanza los 320m.

Depósitos aluviales (Qtb - Terrazas Bajas; Qta - Terrazas Altas)

Los afloramientos son escasos y su delimitación se realizó exclusivamente con base geomorfológica. Algunos de los afloramientos están constituídos por limos y arenas.

Coluvión (Qdp)

Son los depósitos productos de la fracturación, meteorización y erosión de rocas preexistentes, que han tenido transporte por acción del agua y de la gravedad y se han depositado en las partes media e inferior de las laderas. Sus mejores afloramientos se presentan en los piedemontes oriental, suroriental y suroccidental de área.

Suelo residual (Qrs)

Es el material producto del intemperismo de las rocas y

son importantes por su espesor, hasta de 10m, en la parte suroeste. Por tratarse de suelos predominantemente arcillosos, su permeabilidad es baja y su comportamiento geomecánico pobre.

Rellenos de excavaciones (Qr)

Son los depósitos que han resultado de acciones antrópicas para la adecuación de terrenos en el desarrollo urbanístico, principalmente en zonas pantanosas y deprimidas, donde el material utilizado es el sobrante sacado de las excavaciones. Estos depósitos abundan principalmente en los alrededores de Guaymaral, Aeropuerto El Dorado, Autopista Norte y Norte de Bosa.

Rellenos de Basura (Qb)

Están conformados por desechos sólidos que produce la ciudad y que se han concentrado sobre lechos relativamente impermeables, previamente excavados y acondicionados. Se destacan los rellenos sanitarios de El Cortijo, Gibraltar, Santa Cecilia y Doña Juana.

2.1.2. Geología estructural

Se describe a continuación, algunos de los rasgos estructurales más notorios y se presentan interpretaciones sencillas, con el objeto de aportar ideas acerca de la génesis de la depresión que hoy ocupa la Sabana de Bogotá.

Por la conformación tectónica y estructural, el área de trabajo se ha subdividido en tres partes: a) bloque localizado al norte de la falla de Usaquén; b) bloque al sur de la falla de San Cristóbal; c) bloque central hundido, situado entre las fallas de Usaquén y San Cristobal.

2.1.2.1 Bloque al norte de la falla de Usaquén

Es curiosa la desaparición, bajo los sedimentos de la sabana, de los cerros de Suba, Cota-Chía y Tabio-Tenjo, además de corresponder a estructuras anticlinales; los valles que separan estos cerros parecen haberse formado sobre depresiones estructurales de forma sinclinal. La linealidad y abrupta terminación de la punta sur de estos cerros, contra la prolongación de la trayectoria de la falla de Usaquén, el estilo estructural particular y la menor profundidad del relleno cuaternario, respecto al bloque central, de acuerdo con datos obtenidos por registros de geofísica, este bloque se interpreta como desgarrado del bloque central a través de la falla de Usaquén, en sentido lateral izquierdo, mediante movimiento de despegue hacia el W del bloque Central a través de las fallas de cabalgamiento como la de Bogotá.

Por otra parte, la continuidad de los Cerros Orientales hacia el Norte se ve interrumpida por la falla de Usaquén, sitio a partir del cual los cerros Guadalupe y Monserrate aumentan de altura notoriamente y el Bloque Central presenta desplazamiento lateral.

La falla de Usaquén está cartografiada en los cerros orientales de la Sabana, pero parece prolongarse más al suroriente por varias decenas de kilómetros. En estudios recientes su traza ha sido ubicada dentro de la Sabana, debido a su alineamiento en la parte sur de los cerros de Suba, Cota-Chía y Tabio-Tenjo y el control y alineamiento del cauce del río Juan Amarillo.

2.1.2.2 Bloque al sur de la falla San Cristobal

Se localiza al sur del Bloque Central teniendo como límite la prolongación de las fallas de San Cristobal-Facatativá. Como estructuras sobresalientes se mencionan el sinclinal de Usme-Tunjuelito y la falla del río Tunjuelito, que parecen curvarse al noroeste, y la falla de Bogotá, aparentemente desplazada por la falla de San Cristóbal.

La falla de Tunjuelito es una falla inversa de dirección general NNE y buzamiento al oeste la cual, junto con la falla de Bogotá, practicamente delimita el sinclinal de Usme-Tunjuelito. La dirección de la inclinación del plano de falla, contrasta con el buzamiento de los planos de falla del Bloque Norte.

2.1.2.3 Bloque central

Limita con los bloques norte y sur por las fallas de Usaquén y San Cristóbal-Facatativá, respectivamente. En este sector se tiene la mayor amplitud y profundidad del relleno Cuaternario de la sabana, además de otras particularidades como la inversión de las formaciones litológicas que conforman los cerros orientales.

La falla de Bogotá es una falla de cabalgamiento de dirección nor-noreste y plano buzando al este, el cual pone en contacto areniscas del Grupo Guadalupe y arcillolitas de la Formación Guaduas, sobre la parte media baja de los cerros al Oriente de Bogotá. Su traza está bien definida en los bloques Central y Sur, pero hacia el Norte, luego de Usaquén, no se tiene conocimiento de su continuidad.

La falla de San Cristóbal controla el curso del río del mismo nombre, en los cerros orientales de la Sabana. Su prolongación hacia el sureste se manifiesta por una serie de rasgos topográficos y drenajes alineados. La prolongación de su traza hacia el NW parece limitar el borde sur de la depresión de Funza, y de manera aproximada con el límite sur del relieve plano del valle de la sabana. Esta falla, junto con el sistema de fallas de Facatativá, marca la frontera sur de la cuenca de la Sabana de Bogotá las cuales probablemente ejercieron control tectónico, que sirvió de barrera estructural e impidió la depositación hacia el sur.

2.2 ESTUDIOS GEOFÍSICOS

Los ensayos de prospección geofísica tuvieron por objeto caracterizar los sedimentos y rocas que conforman el depósito con propiedades físicas como velocidad de ondas de compresión (V_p), de corte (V_s), densidad (σ) y resistividad eléctrica (ρ), de los sedimentos y rocas. La integración de la interpretación de resultados de los diferentes métodos geofísicos, correlacionados con perforaciones simultáneas, determinó un modelo único de la cuenca sedimentaria con su correspondiente geometría y características geofísicas. (INGEOMINAS, 1996-b; Rivera et al, 1996)

La toma de datos de los diferentes estudios realizados se efectuó por separado y sus resultados fueron integrados en una fase de interpretación conjunta para la obtención de un modelo de la cuenca. Se realizaron ensayos de resistividad eléctrica, gravimetría y sísmica.

2.2.1 Estudios de resistividad eléctrica

2.2.1.1 Adquisición de los datos geoeléctricos

El método geoeléctrico utilizado se denomina Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), que consiste en registrar la variación en profundidad de la resistividad eléctrica de los sedimentos y rocas para un punto dado.

Se utilizó un arreglo tipo Schlumberger y se hicieron 50 SEV. Los datos se tomaron con un equipo de resistividad eléctrica marca OYO.

2.2.1.2 Procesamiento de datos geoeléctricos

Los datos geoeléctricos fueron procesados con el paquete Resix Plus de la firma Interpex Ltda, el cual está basado en el método de aproximaciones sucesivas.

Para la interpretación final, no sólo se usaron los datos tomados para este proyecto, sino los recopilados en diferentes estudios realizados en el Instituto, para un total de 130 SEV. Los resultados obtenidos se generalizaron en perfiles y mapas para analizar la variación de la resistividad eléctrica de los materiales de la cuenca sedimentaria, tanto lateralmente como en profundidad.

2.2.1.3 Interpretación de resultados geo-eléctricos

Los resultados obtenidos se agruparon en cinco unidades petrofísicas de variación de valores de resistividad eléctrica, a los que se les denominó "zonas de resistividad", (Tabla 2.1).

ZONA DE RESISTIVIDAD	ρ, ohm-n	PROFUNDIDAD MEDIA, h, metros	LITOLOGÍA	DISTRIBUCIÓN AREAL
1	15-60	0-25	Alternancia de arcillas, limos y algunas arenas parcialmente saturadas.	Toda el área de estudio
2	10-20	25-50	Arcillas con algunas intercalaciones de limos.	Toda el área de estudio
3	25-60	50-200	Intercalaciones de arenas con capas delgadas de arcilla y algunos limos.	En la mayoría del área de estudio
4	10-19	200-300	Arcillas	Sector occidental
			Arcillolitas	Sector central y norte
5	>100	<500	Areniscas con intercalaciones de limolitas saturadas.	Areas aledañas a los cerros orientales, cerros de Suba y en cercanías de Soacha

TABLA 2.1 ZONAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

2.2.1.4 Mapas geoeléctricos

Con base en la información puntual de los SEV se realizaron dos mapas: el mapa de la profundidad del límite sedimento-roca y el mapa de contornos de la profundidad de la roca más compacta.

En el mapa de la profundidad del límite sedimento-roca, se sitúa dicho límite entre las zonas de resistividad 3 y 4. Los datos de este mapa fueron calibrados por los sondeos mecánicos realizados en INGEOMINAS y en la Universidad Agraria. Este mapa es confiable en los sectores sur, centro y norte (entre los cerros de Suba y cerros Orientales), mientras que hacia el occidente pierde su validez.

El mapa de contornos de la profundidad del techo de la roca más compacta o techo de la zona de resistividad 5, corresponde principalmente a areniscas. En el sector entre los cerros de Suba y cerros Orientales la variación de la profundidad muestra una cuenca o estructura sinclinal con una dirección norte-sur. Una estructura similar se observa al Oeste de Soacha, en donde la estructura sinclinal posee también una orientación norte-sur.

Estos mapas permitieron obtener una primera aproximación de la geometría de la cuenca. En INGEOMINAS (1996-b) se presenta en forma detallada los resultados de este estudio.

2.2.2 Estudios gravimétricos

2.2.2.1 Adquisición de datos gravimétricos

El levantamiento de las estaciones gravimétricas se llevó a cabo con un gravímetro digital marca Scintrex, modelo CG-3, cuya resolución es de 0.01 miliGales y un rango dinámico de medida de 7000 miliGales.

Aún cuando el gravímetro utilizado permite realizar correcciones por deriva instrumental, mareas, inclinación y temperatura, se levantó una red de bases para minimizar las variaciones residuales por los factores arriba mencionados. La red estuvo conformada por 24 polígonos triangulares y 20 bases, siendo debidamente amarrada a la Red Nacional de Gravimetría a través de la estación MGLS-1967, ubicada en el Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional, la cual a su vez fué trasladada de la estación absoluta NPA2E1, ubicada en el Instituto Geofísico de los Andes.

En total se levantaron 320 nuevas estaciones gravimétricas con espaciamiento promedio de 0.7 a 1.0 km. Al presente estudio se adicionó la información gravimétrica obtenida por Pérez (1988), realizado en los alrededores de Funza, Mosquera y Madrid y la línea gravimétrica CM-10, levantada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi a lo largo de la carretera Funza-Cota.

2.2.2.2 Procesamiento de los datos gravimétricos

Los datos gravimétricos fueron procesados con el fin de obtener la anomalía de Bouguer Total, que es la manifestación directa de la distribución areal y en profundidad de las masas en el subsuelo y se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\Delta GBT = Gobs - Gt + CA - CB + CT, \qquad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:
- Gobs - gravedad observada,
- Gt - gravedad teórica, fórmula Internacional de gravedad de 1971
- CAL - corrección de aire libre, referenciada a la altura del Observatorio Astronómico.
- CB - corrección de Bouguer, para una densidad de 2.6 gr/cc.
- CT - corrección topográfica, hasta el sector I de la tabla de Hammer.

2.2.2.3 Mapa de Anomalía Residual

Con el objetivo de resaltar los elementos estructurales locales se elaboró el mapa de anomalía residual sustrayéndole la componente regional del campo gravimétrico al mapa de anomalía de Bouguer Total.

Para resaltar los gradientes gravimétricos se le aplicó a este mapa un efecto de sombras, colocando una fuente ficticia a 270° de azimut y 30° de inclinación y otra fuente a 20° de azimut y 30° de inclinación, (Figura 2.2).

2.2.2.4 Interpretación gravimétrica cualitativa

De acuerdo con lo observado en el mapa de anomalía residual y en términos generales, la cuenca de la Sabana de Bogotá puede dividirse en dos subcuencas. La más profunda de ellas está localizada al noroeste del área de estudio, limitada al oeste por los cerros de El Rosal, al este por el Río Bogotá y a la altura de la intersección del río con la avenida de Las Américas tomando una orientación noreste-suroeste hacia los cerros de Bosa. Al norte esta cuenca estaría limitada por la conjunción de los cerros de Tenjo y los cerros de Cota y al sur por los cerros de Madrid. Esta subcuenca alcanza su mayor profundidad a 5 km al norte del municipio de Funza.

La segunda subcuenca se extiende de Sur a Norte por la cuenca del río Tunjuelito hasta la intersección de este con la Autopista del Sur, para posteriormente ramificarse en dos subcuencas más, localizadas entre los cerros de Cota y Suba y entre los cerros de Suba y los cerros Orientales. Estas últimas poseen su límite Norte por la unión en profundidad de los cerros de Cota, Suba y cerros Orientales.

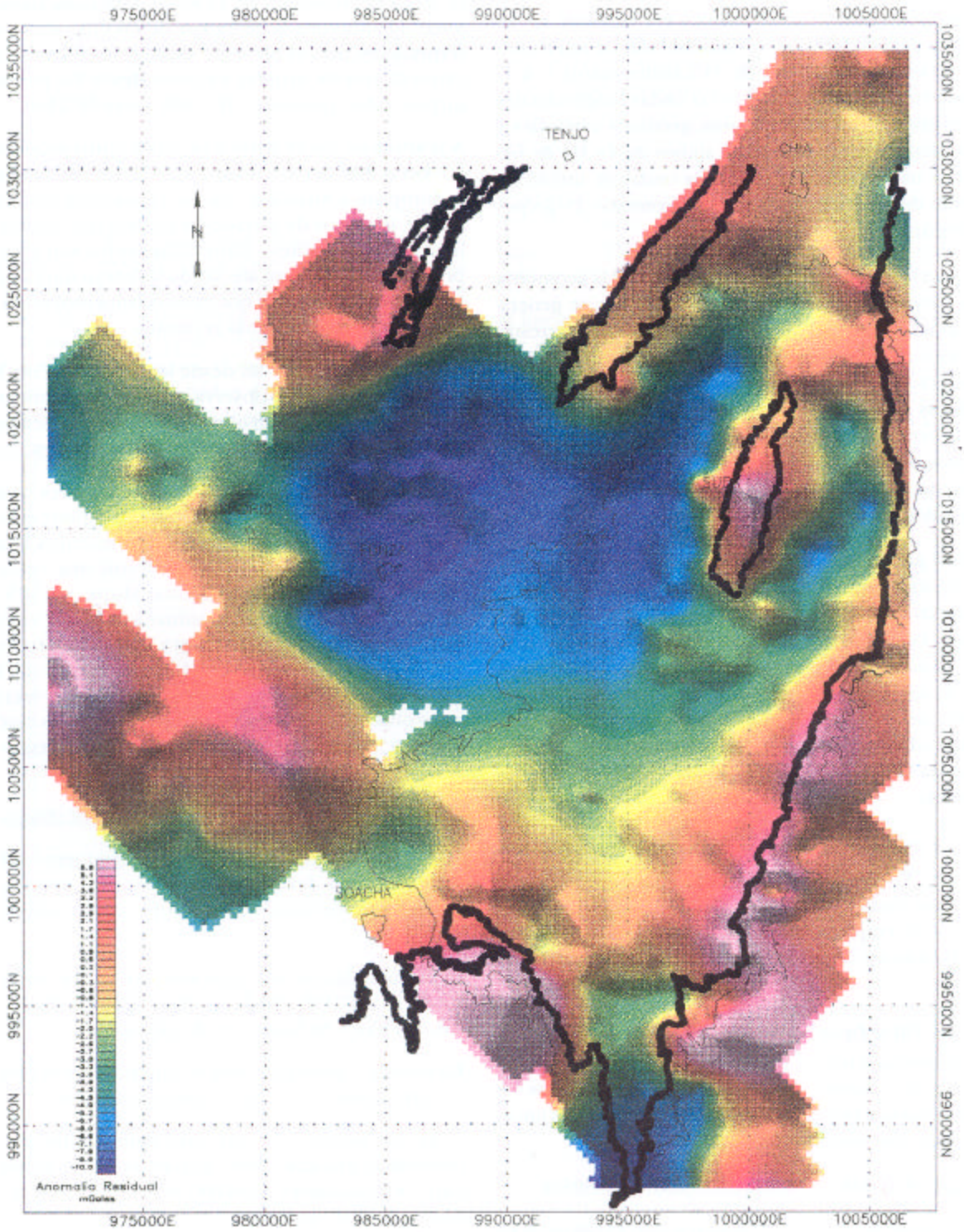


FIGURA 2.2 MAPA DE ANOMALÍA RESIDUAL CON EFECTOS DE SOMBRA

2.2.3 Estudios sísmicos

2.2.3.1 Adquisición de los datos sísmicos

La toma de la información sísmica fue realizada en 15 sectores para un total de 10.12km lineales de refracción con un sismógrafo digital de 24 canales marca E & G Geometrics. Para el registro de las ondas longitudinales P y transversales S se emplearon geófonos verticales y horizontales, respectivamente; ambos de 14 Hz de frecuencia natural. Para producir las ondas se utilizó un martillo de 16 libras, apilando en promedio 25 golpes por registro.

Para la generación y registro de las ondas P, la geometría de las líneas sísmicas fue de tipo Z-Z; o sea, se generaron ondas con golpes verticales a la superficie terrestre y se registró la componente vertical de las mismas. Para la generación y registro de las ondas S, la geometría de las líneas sísmicas fue de tipo Y-Y; o sea, las ondas fueron generadas con golpes horizontales, normales a la orientación de la línea sísmica y fue registrada la componente horizontal de las ondas. Se utilizó la metodología de perfiles reversos.

En cada uno de los perfiles sísmicos, con el fin de obtener información sísmica detallada en profundidad, se utilizaron arreglos de geófonos de diferente longitud, para lo cual la distancia entre canales tuvo una variación de Δx=1m hasta Δx=15m. La longitud de los arreglos de geófonos variaron entre 25m y 400m, dependiendo del espacio disponible y/o de la potencia de la señal; es decir, si se registraban o no, a una determinada distancia los primeros arribos de la onda de refracción generada.

2.2.3.2 Procesamiento de los datos de refracción sísmica

Los datos sísmicos fueron procesados con el paquete SIPX de la empresa Rimrock Geophysics Inc., el cual está basado en el método de tiempos de retardo o de Gardner.

2.2.3.3 Interpretación de los datos sísmicos

La interpretación de la información sísmica estuvo dividida en dos partes: interpretación de las líneas de reflexión sísmica recopiladas e interpretación de las líneas de refracción sísmica ejecutadas.

Interpretación de las líneas de reflexión sísmica

Se recopilaron líneas de reflexión sísmica realizadas en diferentes proyectos ejecutados en la zona de estudio. Sin embargo, de todas estas líneas, la de mejor calidad y proximidad al área de estudio, es la línea J-78-08, realizada por ECOPETROL.

La línea J-78-08 está localizada a lo largo de la Autopista Medellín, desde el barrio Quirigua en Santafé de Bogotá, hasta el municipio de El Rosal. Esta línea tiene una longitud aproximada de 24 km, de los cuales fueron interpretados, para el presente estudio, los 8 km más cercanos al área de estudio; es decir, desde los puntos de disparo (Shot points-SP) SP 2385, hasta SP 2540.

A la altura de los SP 2405 y SP 2480, aproximadamente a 1 km al NW del Río Bogotá y en la intersección entre la Autopista a Medellín y la vía Funza-Cota, respectivamente, los arcos de difracción evidencian fallamientos inversos importantes. Estos fallamientos son claros en profundidad y estarían afectando la Formación Tilatá. No se observa con claridad que estos fallamientos estén afectando los sedimentos más recientes.

En una dirección NW-SE, desde los cerros de Cota hacia el barrio Quirigua se observa un claro hundimiento de todos los reflectores, lo que indica una tectónica de bloques controlados por fallamientos importantes.

Una interpretación puntual de los reflectores observados para el SP 2480 de base a tope, en la parte más profunda de la cuenca fue la siguiente: Formación Chipaque a una profundidad de 2760 m y con una velocidad Vp=3450 m/s; Formación Guadalupe a 2385 m y Vp=3350 m/s; Formación Guaduas a 2000 m y Vp=3200 m/s; Formación Bogotá a 680 m y Vp=1700 m/s; Formación Regadera a 504 m y Vp=1680 m/s; Formación Tilatá 396 m y Vp=1650 m/s. Los sedimentos más recientes no se observan debido a la aplicación en el procesamiento de un "mute" o silencio de 200 ms (ms-milisegundos), el cual cortó toda la información somera.

Interpretación de las líneas de refracción sísmica

Los estudios de refracción sísmica permitieron establecer con cierto detalle las interfases más someras; así, como las variaciones de los valores de las velocidades Vp y Vs.

La profundidad de investigación varió en promedio entre 50 m y 170 m, donde se detectaron, en algunos casos, interfases de hasta 1 m de espesor.

En términos generales, para las interfases más someras, el corte sísmico de base a tope es el siguiente:

- Sector norte, interfase con velocidades de roca (arcillolita) Vp=2281-2500 m/s, en el sector Suba-Compartir, y velocidades Vp=1800 m/s y Vs=378 m/s, en el sector Bosque Calderón,

- Sector sur, interfase con velocidades de sedimentos muy compactos (arenas y gravas muy densas) Vp=2091 m/s y Vs=655 m/s, y con velocidades de roca (areniscas) Vp=3301 m/s, en el sector del Parque Distrital del Sur.

· Sectores norte y centro, interfase con velocidades de material arcilloso, arcillas húmedas, Vp=1000-1400 m/s y Vs=120-280 m/s,

· Sector norte, interfase con velocidades de sedimentos arcillosos con contenido orgánico y poco compacto, Vp=130 - 450 m/s y Vs=70 - 120 m/s,

· Sector sur, interfase con velocidades de sedimentos arenosos poco compactos, Vp=470 - 660 m/s y Vs=167 - 348 m/s.

Con el objetivo de unificar los resultados obtenidos con los diferentes arreglos de geófonos utilizados en cada uno de los sectores, se elaboraron columnas sísmicas generalizadas, en donde se muestran las variaciones de las velocidades Vp y Vs y de las profundidades a la base de las diferentes interfases. Como ejemplo, se presenta en la Figura 2.3 los resultados del perfil típico para el sitio ubicado en las instalaciones del INGEOMINAS.

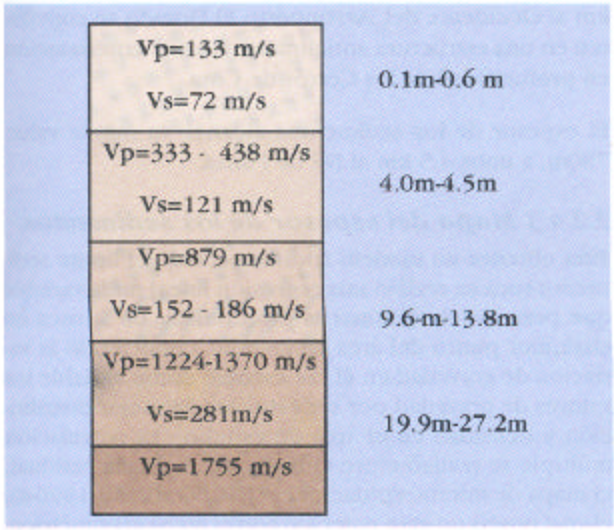


FIGURA 2.3 VALORES DE V_p, V_s Y PROFUNDIDADES EN INGEOMINAS

2.2.4 *Modelo geológico-geofísico del subsuelo de la ciudad*

Para tener una noción más aproximada acerca de los lineamientos que controlan la cuenca, se realizó una interpretación conjunta de los mapas sombreados de anomalía residual, mapa topográfico y mapa geológico.

Debido a que los datos gravimétricos poseen una distribución areal homogénea y una mayor densidad de datos con respecto al resto de estudios, el modelamiento final, se realizó tomando como base dichos datos, los cuales fueron debidamente "amarrados" a los resultados de todos los estudios.

El modelamiento se realizó por medio de los programas GM-SYS y Geosoft, inicialmente en 2D (modelamiento determinístico) y posteriormente se calculó una regresión lineal (modelamiento estadístico) para determinar arealmente la profundidad de la roca.

2.2.4.1 *Interpretación conjunta de los mapas de anomalía residual, mapa topográfico y mapa geológico.*

Para poder correlacionar los lineamientos detectados en el mapa de Anomalía Residual con los observados en el mapa Topográfico, al primero se le aplicó un efecto de sombra simultáneamente con un ángulo de inclinación de 30° y azimuts de 20° y 270°, como se observa en la Figura 2.2. El mapa Topográfico se iluminó con un ángulo de 30° y un azimut de 270°.

El lineamiento que mejor se observa en ambos mapas fue el denominado falla de San Cristóbal, que corresponde a una falla de desplazamiento lateral, la cual fué corroborada en superficie. Esta falla tiene una orientación NW-SE y pudo detectarse hasta unos 2.5 km al occidente del Aeropuerto El Dorado.

Otro lineamiento de igual orientación al anterior es el denominado Molinos-Sasaima; éste, a la altura del Club de los Lagartos, se intersecta con la falla cartografiada en el Mapa Geológico de Santafé de Bogotá, como falla de Usaquén-Sasaima. La falla de Molinos-Sasaima tiene un caracter más regional que la de Usaquén-Sasaima .A 3 km hacia el sur de dicha falla se encuentra el lineamiento denominado Los Rosales, el cual se extiende desde la intersección de la Avenida Chile con la Avenida Circunvalar hasta el barrio Quirigua. Este lineamiento correspondería a la continuación en profundidad de la falla de Bogotá o podría estar controlándola, ya que precisamente, de acuerdo con el Mapa Geológico, se pudo cartografiar dicha falla hasta la intersección de la Avenida Chile con Circunvalar.

De los lineamientos de orientación NE-SW se destacan los denominados falla de Cota y falla de Soacha.

En el sector norte de los cerros de Suba se observan lineamientos de desplazamiento lateral. La mayoría de estos lineamientos están cartografiados en superficie. En este caso el aporte de los métodos geofísicos consiste en extender la continuación en profundidad de dichos lineamientos.

En el sector sur, en cercanías de Bosa y Soacha, se observa una buena correlación entre los lineamientos cartografiados en superficie y los observados en el mapa de Anomalía Residual. El mapa de Anomalía Residual pudo definir la continuación en profundidad de algunos de estos lineamientos, como es el caso de la falla de Mochuelo, cuyo extremo norte se detectó a unos 3 km más al norte que el inferido en el Mapa Geológico de Santafé de Bogotá.

2.2.4.2 Modelamiento Bidimensional

Con la ayuda del programa GM-SYS se generaron modelos en 2D por medio del método de aproximaciones sucesivas. Los modelos obtenidos fueron los siguientes:

a. *Modelo Geológico-Geofísico Calle 170*. Este modelo tiene una orientación noroeste-sureste, normal a las estructuras, desde el borde de los Cerros de Cota, atravesando los Cerros de Suba y a lo largo de la Calle 170 al norte de la ciudad. Figura 2.4. Se obtuvo un error de ajuste de las curvas gravimétricas medida y generada por el modelo de RMS = 0.1 (RMS- error medio cuadrático).

Como puntos de control o de amarre de la información se utilizaron los afloramientos de las rocas en los cerros de Suba y los cerros Orientales, la perforación 227-IVB-444 a 350m del Inventario Hidrogeológico de Colombia, (INGEOMINAS, 1990), en donde no se llegó a roca, y el sondeo geotécnico realizado en la Universidad Agraria, en donde se encontró arcillolita a los 119m.

Para la elaboración del modelo se emplearon los resultados de los estudios geoeléctricos y de refracción sísmica, los cuales permitieron obtener una primera aproximación del modelo geológico-geofisico. Estos resultados fueron debidamente calibrados con los sondeos geotécnicos. Por ejemplo, el perfil geoeléctrico realizado en el Sector Norte y que intersecta la Calle 170 a unos 700 m del sondeo geotécnico realizado en ese sector, estableció una capa arcillosa a 140m. Al correlacionar estos resultados con el sondeo geotécnico se definió que dicha capa podría ser arcillolita, la cual fue encontrada por el sondeo mecánico a 120m. Los perfiles de refracción sísmica en el sector Suba-Compartir establecieron una interfase entre 106m-144m con velocidades de roca Vp=2281-2500 m/s, las cuales de acuerdo con la información geológica, podrían corresponder a arcillolitas.

Utilizando la metodología antes descrita se elaboraron todos los modelos geológico-geofísicos. Estructuralmente, el modelo representa un sinclinorio conformado por sinclinales (entre los cerros de Cota y Suba y entre los cerros de Suba y cerros Orientales) y anticlinales (Cerros de Suba y Cerros Orientales), los cuales se encuentran afectados por fallamientos inversos.

El espesor de los sedimentos en el sector entre los cerros de Cota y cerros de Suba alcanza un máximo de 500 m, mientras que entre los cerros de Suba y cerros Orientales no supera los 240 m.

En el modelo están descritas las propiedades físicas de las diferentes interfases encontradas: Velocidades de propagación de las ondas, densidades y resistividad eléctrica.

b. *Modelo Geológico-Geofísico INGEOMINAS-Funza*. Este modelo tiene una orientación noroeste-sureste, desde aproximadamente 4 km al NW del municipio de Funza, pasando por la Calle 39 o Vía a Catam e intersectando el Sondeo Geotécnico en el INGEOMINAS, hasta alcanzar los Cerros Orientales a la altura de la Vía Circunvalar. El error de ajuste de las curvas gravimétricas medida y generada por el modelo fue de RMS=0.08. Figura 2.5.

Los puntos de control o de amarre de la información fueron los afloramientos de las rocas en los Cerros Orientales, el sondeo geotécnico realizado en el INGEOMINAS, en donde se encontró arcillolita a los 180 m, los Pozos Funza I y II, llegando este último a la parte superior de la Formación Tilatá a 468 m, (Arévalo et al, 1989).

En este modelo se muestra una serie de plegamientos alargados asociados a fallas inversas, los cuales a unos 4 km al Occidente del Aeropuerto El Dorado se convierten en una estructura anticlinal como una continuación en profundidad de los Cerros de Cota.

El espesor de los sedimentos alcanza su mayor valor, 780m, a unos 4.5 km al NE de Funza.

2.2.4.3 Mapa del espesor de los sedimentos.

Para obtener un modelo tridimensional del límite sedimento-roca se realizó una regresión lineal multivariable que permitió determinar la profundidad de la roca en cualquier punto del área de estudio, conociendo la variación de gravedad en él. Se escogió como variable los valores de gravedad por ser éstos los de mejor distribución y densidad en el área de estudio. La correlación múltiple se realizó entre el mapa de anomalía residual, el mapa de microtrepidaciones (INGEOMINAS, 1996-a), el cual poseía un gran parecido con el mapa gravimétrico, y las profundidades de la roca, obtenidas en los modelos de 2D, los cuales estaban previamente calibrados con los sondeos geotécnicos y los pozos presentes en el área de estudio.

Se obtuvo la siguiente regresión lineal :

$$H = -51.17 - 36.96\,\Delta g + 276.13\,T \qquad \text{Ec. 2.2}$$

donde :H = profundidad a la roca
Δg = anomalía residual
T = microtremores

Para los siguientes radios de correlación :

$R_{TH} = 0.72$

$R_{\Delta g H} = -0.93$

$R_{T\Delta g} = -0.60$

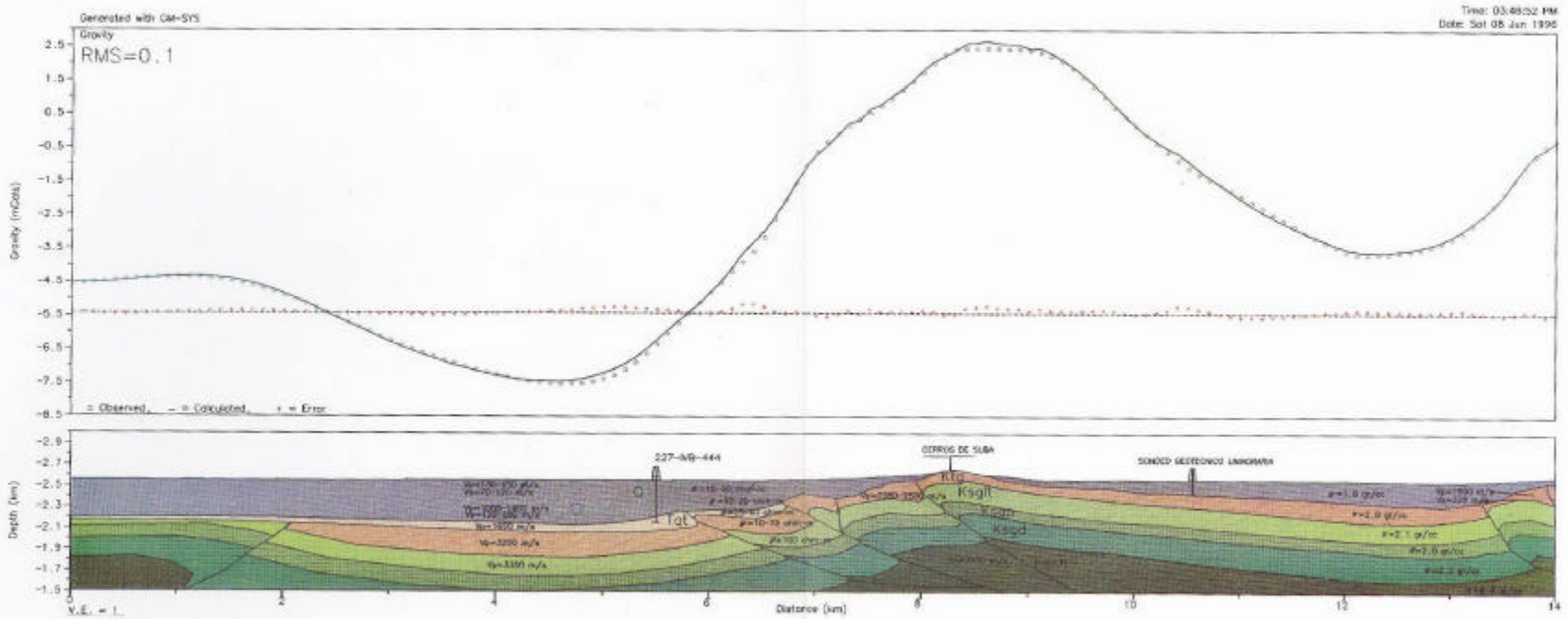


FIGURA 2.4 MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO CALLE 170

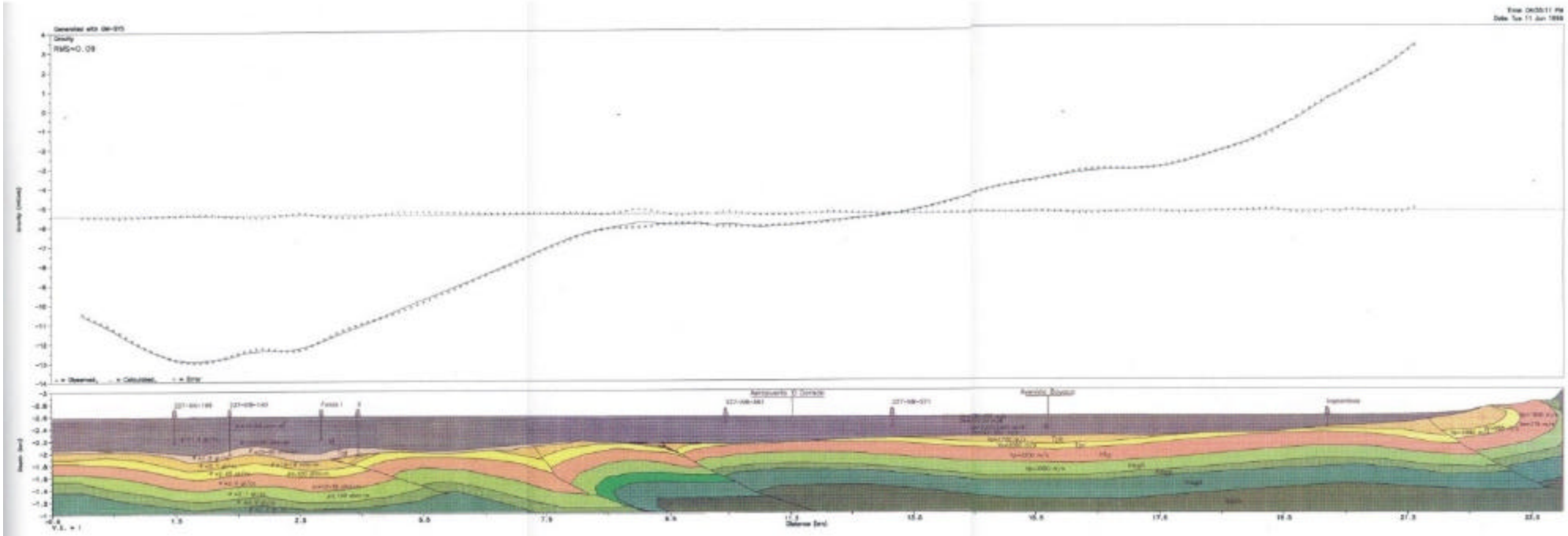


FIGURA 2.5 MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO IN SEDIMNAS - FURZA

Con base en la función de regresión lineal obtenida se pudo convertir el valor de gravedad de cada celda de la grilla de anomalía residual en valores de profundidad a la roca o el espesor de los sedimentos, (Figura 2.6). Al comparar los valores de profundidad obtenidos en el mapa con los puntos de control se observa que la diferencia no supera los 5 metros.

Es de anotar que el mapa obtenido no hace distinción entre los diferentes tipos de rocas presentes en el área de estudio y debe interpretarse como el límite entre sedimentos (arcillas y/o arenas) y roca (arcillolita y/o areniscas).

2.3 - ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Los estudios de zonificación geotécnica del subsuelo de la ciudad de Santafé de Bogotá realizados con anterioridad a este trabajo han puesto en evidencia la presencia de diferentes zonas con características geomecánicas homogéneas. De acuerdo con INGEOMINAS (1988) y Martínez et al (1990,1992), es posible identificar 5 zonas cuya descripción a grandes rasgos es la siguiente:

- Zona montañosa caracterizada por la presencia de areniscas duras resistentes a la erosión y arcillolitas cuya resistencia y deformabilidad dependen de su humedad.

- Zona de piedemonte o de conos de deyección conformada por materiales que bajo el efecto de la gravedad han sufrido movimientos y se han depositado en forma de cono o abanico.

- Zona de suelos duros en donde predominan las arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosos de origen aluvial.

- Zona de suelos blandos caracterizada por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad.

- Zona de Rondas de ríos y humedales a la cual pertenecen los cuerpos de agua de la ciudad: humedales, antiguos lagos y zonas de inundación.

Si bien el subsuelo de la ciudad de Bogotá ha sido estudiado desde hace algún tiempo desde el punto de vista de su resistencia y compresibilidad, cabe destacar que el conocimiento de su comportamiento bajo cargas cíclicas similares a las producidas durante los sismos es prácticamente nulo. La investigación geotécnica realizada en el proyecto, trata de llenar este vacío.

El comportamiento dinámico de los suelos se investigó en laboratorio utilizando principalmente el aparato triaxial cíclico y un conjunto de elementos piezoeléctricos formado por un generador y un receptor de ondas de corte. El aparato triaxial cíclico se utilizó para investigar las propiedades del suelo en el intervalo de medias a grandes deformaciones cortantes ($10^{-4} < \gamma_c < 10^{-2}$)* , para las deformaciones cortantes muy pequeñas ($\gamma_c < 10^{-6}$) se utilizó el aparato piezoeléctrico.

2.3.1 Localización de los sondeos

A partir de los resultados de la recopilación de información geotécnica (INGEOMINAS, 1995-b) y de las zonificaciones geotécnicas existentes, se determinaron los sitios para ejecutar las perforaciones necesarias con el fin de lograr la caracterización geotécnica de cada zona.

En total se realizaron 38 sondeos y 14 apiques cuya localización se indica en la Figura 2.7. La profundidad de los sondeos realizados varió desde 20 m hasta 250 m. Para asegurar la buena calidad de las muestras se utilizó un muestreador de pistón estacionario el cual, comparado con las otras técnicas de muestreo, ofreció las mejores características en cuanto a la inalterabilidad de las muestras.

Mediante los sondeos profundos se trató de encontrar el basamento rocoso y recuperar muestras inalteradas que permitieran su caracterización desde el punto de vista del comportamiento estático y dinámico. Aunque el objetivo principal de los sondeos profundos fue llegar al basamento rocoso, en razón de su costo la profundidad máxima se limitó a 250 m. Teniendo en cuenta esta restricción, 3 de los 5 sondeos profundos realizados lograron llegar hasta la roca. Estos sondeos están localizados en: INGEOMINAS (Cll 53 con Cra 30) en donde la roca se encuentra a 179 m de profundidad, Universidad Agraria (Cll 170 con Autopista Norte) cuyo basamento se encuentra a 130 m de profundidad y en la calle 127 con autopista norte en donde la roca se encuentra a 190 m de profundidad. En los sondeos localizados en el Aeropuerto El Dorado y en Tibabuyes (Cll 139 - Av. Cundinamarca) perforados hasta 250 m y 246 m, respectivamente, no fue posible llegar al basamento rocoso. En forma general se perforaron 2483 metros, donde se realizaron aproximadamente los siguientes ensayos: 2000 humedades, 2000 clasificaciones, 1000 densidades aparentes, 100 gravedades específicas, 100 granulometrias, 1000 compresiones simples, 170 triaxiales estáticos, 100 triaxiales dinámicos, 100 consolidaciones y 40 bender element, entre otros. Dentro de los ensayos de campo se hicieron ensayos de

* Como convención en este informe las deformaciones axiales y de cortante se presentan en términos de deformación unitaria. Siempre que las deformaciones se expresen en porcentaje se indicará explícitamente con el símbolo %

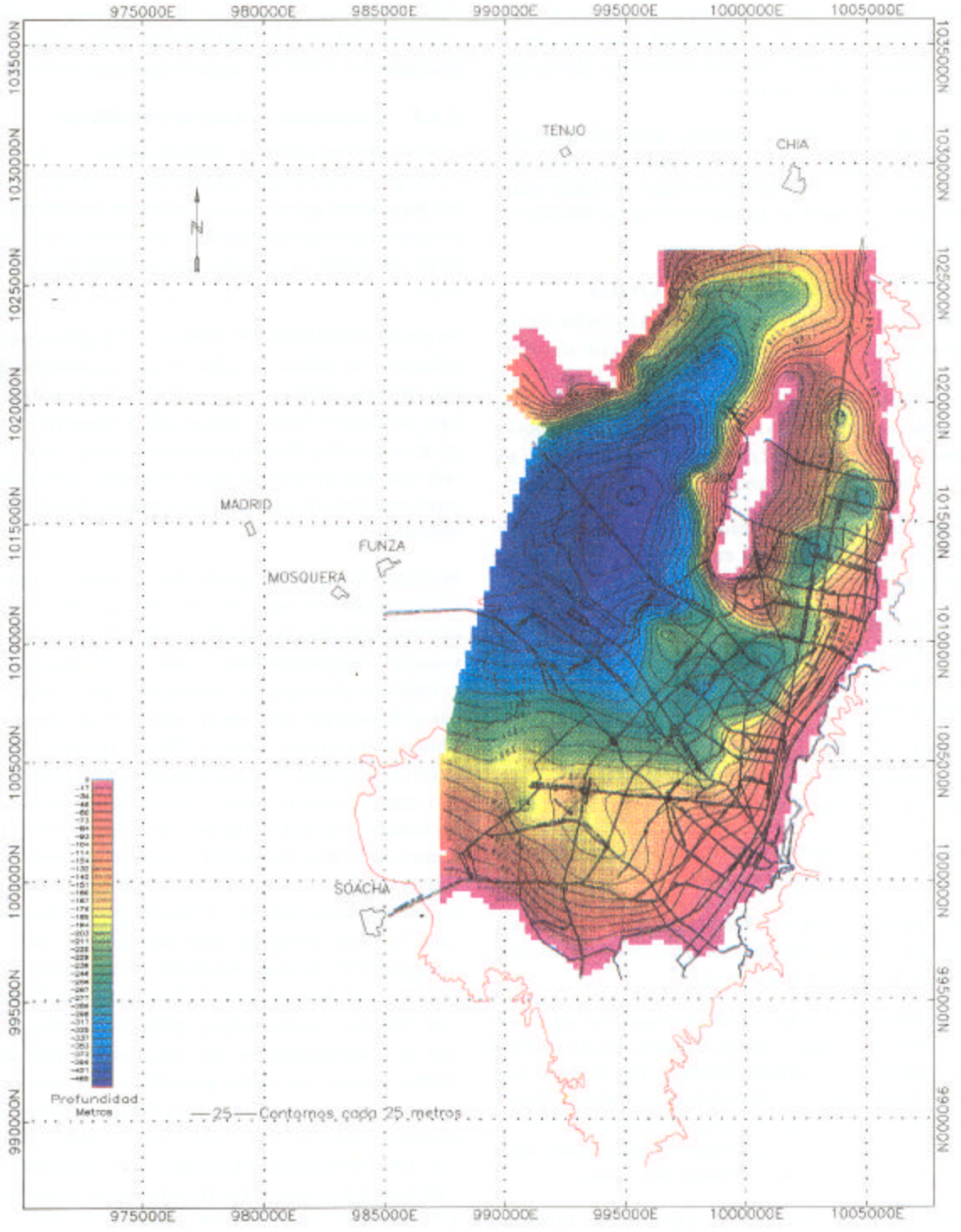


FIGURA 2.6 MAPA DEL ESPESOR DE SEDIMENTOS

FIGURA 2.7 LOCALIZACIÓN DE LOS SONDEOS

presiómetro de Menard y de down-hole. El detalle de los resultados obtenidos se encuentran en el informe de "Ensayos de Laboratorio y Zonificación Geotécnica ". (Universidad de los Andes e INGEOMINAS, 1996)

2.3.2 *Propiedades básicas del subsuelo de Santafé de Bogotá*

Para el análisis de las propiedades básicas del subsuelo de la ciudad se tuvieron en cuenta la totalidad de los sondeos realizados. Como ejemplo típico en la Figura 2.8 se presenta el perfil de propiedades básicas encontradas en el sondeo realizado en INGEOMINAS.

A continuación se hace una breve descripción de cada una de las propiedades básicas del subsuelo.

2.3.2.1 *Límites de Atterberg*

Los límites de Atterberg se determinaron por los métodos usuales de laboratorio. En la zona de arcillas blandas de la ciudad de Bogotá, la cual se encuentra en la parte norte de la ciudad, es posible obtener límites líquidos superiores a 200% e índices de plasticidad superiores a 100% principalmente en las capas más superficiales. Esta característica ubica al subsuelo de la ciudad de Bogotá entre los suelos con mayor dificultad ingenieril en el mundo.

Variación del límite líquido con la profundidad

En la zona de arcillas blandas, el perfil de variación de los límites de Atterberg con la profundidad muestra un comportamiento típico de las formaciones lacustres. En el sondeo realizado en INGEOMINAS se observa que el límite líquido pasa de un máximo de 200% en superficie hasta un mínimo de 30% en profundidad. Adicionalmente, es importante notar que la dispersión del límite líquido disminuye con la profundidad. Particularmente se encuentra que de 0 a 60 m de profundidad es posible encontrar valores que varían de 30 a más de 200 %. Existen diversas explicaciones a estos fenómenos fundamentadas en el proceso de sedimentación y en los aportes de eventos volcánicos, sin embargo, es conveniente esperar los resultados de los estudios de palinología que adelanta INGEOMINAS para plantear hipótesis bien fundamentadas sobre el proceso de depositación.

Hacia el sur de la ciudad se puede identificar una zona de suelos duros en la que se encuentran principalmente dos tipos de suelo: el primero, formado por arcillas limosas secas y preconsolidadas ubicado en la parte oriental y el segundo, al occidente formado principalmente por suelos más arenosos de origen aluvial en su mayoría, que son producto del transporte de sedimentos del río Tunjuelito, entre otros. La zona arcillosa se caracteriza por su plasticidad baja a media, encontrándose el límite líquido en un rango entre 20 y 70% en los primeros 30 m, en profundidad la arcilla tiende a volverse más arenosa y presenta un límite líquido de alrededor del 30%. Adicionalmente se encuentra una capa de turba aproximadamente a 30 m de profundidad con un espesor de 4 m en promedio. La parte occidental, como ya se mencionó, se caracteriza principalmente por la presencia de arenas de grano fino a muy fino, con poca presencia de arcillas. Hacia los límites con las zonas arcillosas (la zona blanda y la zona de arcillas duras) el contenido de arcillas aumenta aunque no presentan una alta plasticidad (límite líquido alrededor de 30%). Esta diferencia en plasticidad con respecto a las otras zonas puede explicarse por una mayor influencia del transporte de sedimentos de los ríos.

En la Figura 2.9 están agrupados la totalidad de los resultados de límite líquido en función de la profundidad en la zona de arcillas blandas. En este gráfico se observan las características ya anotadas: gran dispersión en los primeros 50 m, disminución del límite líquido con la profundidad y presencia de un estrato de alta plasticidad a 160 m.

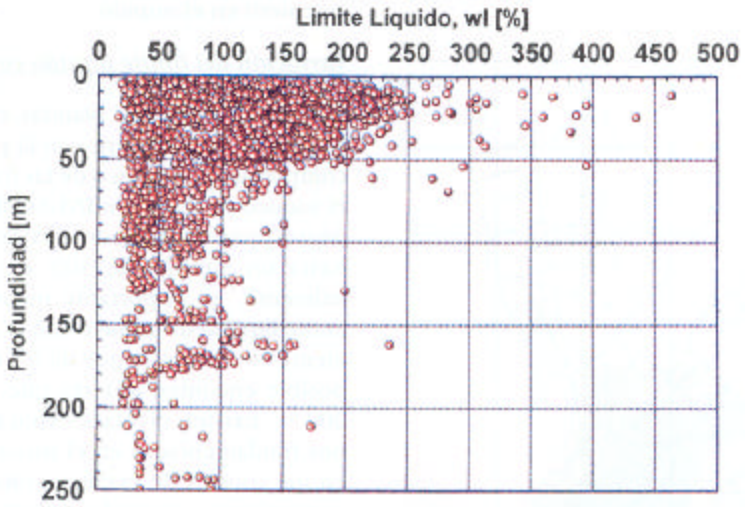


FIGURA 2.9 GRÁFICO DEL LÍMITE LÍQUIDO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD - ZONA DE ARCILLAS BLANDAS

Correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido

Es conocido en geotécnia que los suelos de un mismo origen tienden a ubicarse en el gráfico de plasticidad de Casagrande en una franja bien definida, esto implica la existencia de una relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido.

Con base en el resultado de todos los puntos estudiados es posible proponer la siguiente correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido para los suelos de Bogotá:

$$Ip = 0.7792 * (wl - 15.2), \quad r = 0.967 \quad \text{Ec.2.3}$$

En la Figura 2.10 se presentan los resultados de los ensayos de límites líquido y plástico de la totalidad del estudio en el gráfico de plasticidad de Casagrande. Igualmente se presenta en esta figura la relación propuesta y la franja correspondiente a los suelos de Bogotá.

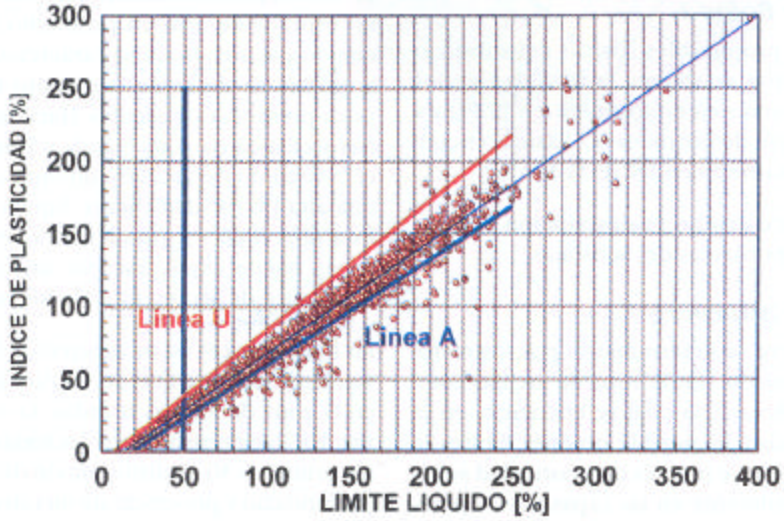


FIGURA 2.10 GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE PARA TODOS LOS SUELOS ESTUDIADOS

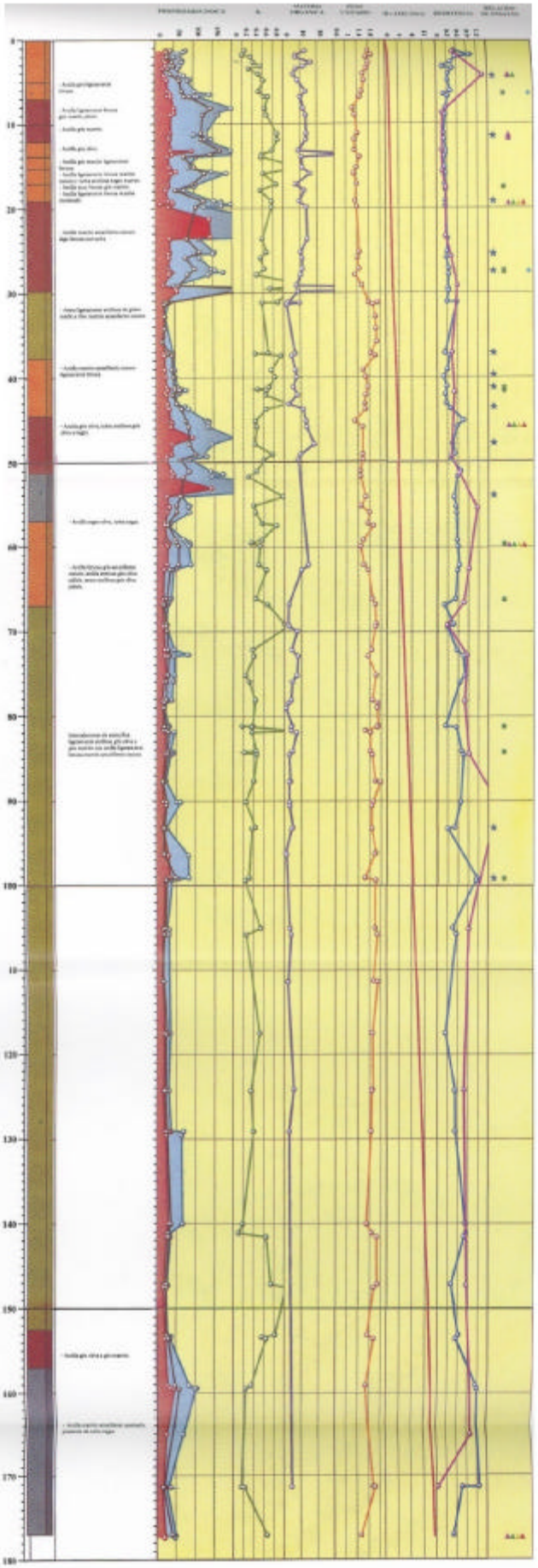


FIGURA 2.8 PERFIL ESTRATIGRÁFICO Y ENSAYOS DE LABORATORIO SONDEO REALIZADO EN INGENIERIAS

CONVENCIONES

2.3.2.2 Granulometría y tamaño de las partículas

Al igual que los límites de Atterberg, la distribución granulométrica de la zona de arcillas blandas presenta un aspecto típico de una formación lacustre. Las capas con mayor contenido de material arcilloso (partículas inferiores a 2 μm) se encuentran en la superficie. Este valor puede llegar hasta un máximo de 70 % y disminuye progresivamente con la profundidad hasta un valor promedio de 10 %.

En la zona de suelos duros y en la zona de piedemonte se encuentran intercalaciones de arena y arcillas duras que dificultan poner en evidencia cualquier variación del tamaño de las partículas con la profundidad. Esto se explica por el hecho de que su formación no es lacustre.

2.3.2.3 Contenido de materia orgánica

El valor de la materia orgánica se determinó por los métodos usuales de laboratorio. En los materiales que predominan en la zona de suelos blandos existe un alto contenido de materia orgánica cuya presencia se explica por el origen lacustre de esta zona y por las condiciones paleoclimáticas. Puesto que esta característica modifica de una manera importante las propiedades mecánicas de los suelos y diferencia al suelo de la ciudad de Bogotá de los suelos estudiados por diferentes autores en diferentes partes del mundo, se consideró conveniente estudiar la variación de este parámetro en la zona de suelos blandos.

En la Figura 2.11 se representa la variación de este parámetro en toda la zona blanda. Se observa que el contenido de materia orgánica disminuye a medida que aumenta la profundidad. En los primeros 30 m aparecen variaciones importantes, donde los valores oscilan entre 8 y 30 % con intercalaciones de turba cuyo contenido de materia orgánica, expresado en porcentaje con respecto a las partículas minerales, es superior al 100%.

A partir de los 30 m el contenido de materia orgánica comienza a descender paulatinamente hasta valores de alrededor del 5% a 100 m de profundidad.

2.3.2.4 Relaciones gravimétricas y volumétricas

Una de las características básicas de los suelos que tiene una gran influencia en su comportamiento mecánico es su peso unitario. El valor de esta propiedad física depende de la densidad de las partículas minerales que forman el suelo (peso específico de sólidos) y de la proporción en que se reparten los tres componentes que forman el suelo: mineral, agua y aire.

El peso específico de sólidos de los minerales arcillosos oscila alrededor de 2.7, sin embargo en los suelos de Bogotá esta característica física es considerablemente inferior a este valor. Esta aparente discrepancia se explica por el alto contenido de materia orgánica que presenta el suelo de la ciudad. En efecto, las regresiones indican que existe una buena correlación entre el peso específico de sólidos y el contenido de materia orgánica; se observa además que para un contenido de materia orgánica cercano a cero el valor de la gravedad específica es aproximadamente 2.65 el cual corresponde al promedio de la gran mayoría de minerales arcillosos.

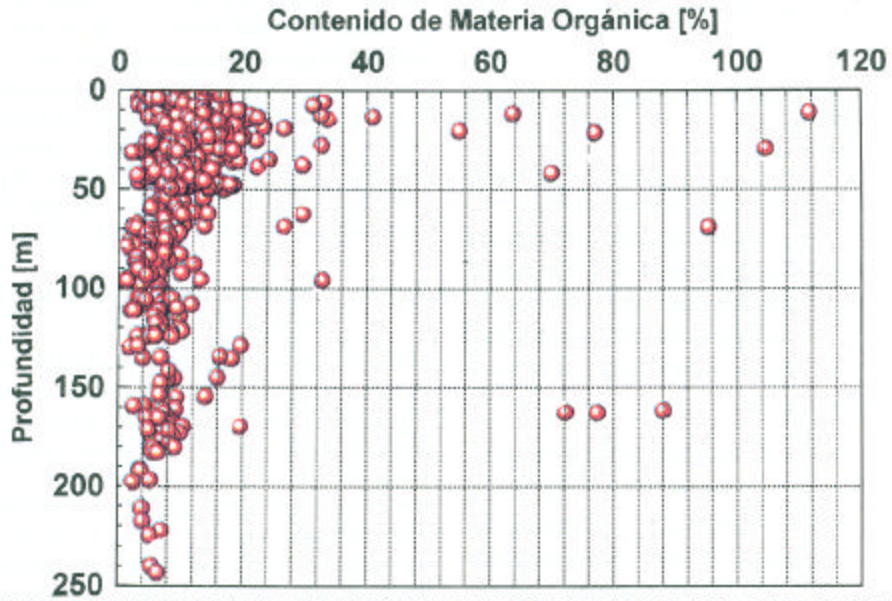


FIGURA 2.11 GRAFICO DE PORCENTAJE DE MATERIA ORGANICA EN FUNCION DE LA PROFUNDIDAD - ZONA DE ARCILLAS BLANDAS

La humedad natural de los suelos presentes en la zona blanda tiene un comportamiento típico de suelos normalmente consolidados: inmediatamente por debajo del nivel freático la humedad natural se acerca al límite líquido de tal manera que se obtienen índices de liquidez del orden del 90%, a medida que aumenta la profundidad la humedad natural disminuye paulatinamente hasta que para profundidades correspondientes a un esfuerzo efectivo vertical de 10 Kg/cm² su valor se acerca al límite plástico, tal como lo indican diferentes autores (Biarez et al, 1994). La humedad natural del suelo que se encuentra por encima del nivel freático disminuye considerablemente debido a los altos valores de succión derivados del fenómeno de desecación al que ha estado sometido esta capa de suelo.

El peso unitario tiene un comportamiento similar al de la humedad natural; en la superficie debido al fenómeno de desecación presenta un valor superior a 1.8 ton/m³ y disminuye hasta 1.4 en las vecindades del nivel freático. A partir de esta profundidad el peso unitario aumenta paulatinamente debido al mayor esfuerzo efectivo vertical y a la menor compresibilidad del suelo hasta llegar a valores cercanos a 2 ton/m³ para profundidades entre 100 y 200 m dependiendo del tipo de suelo.

El grado de saturación del suelo, inclusive en la capa localizada inmediatamente por encima del nivel freático, es cercano al 100%. Lo anterior se explica por el alto valor de la presión de succión necesario para provocar la desaturación del suelo (punto de entrada de aire) que caracteriza a los suelos de la ciudad de Bogotá. Esto no excluye que en ciertos puntos de la zona blanda se encuentren arcillas desecadas en superficie por el fenómeno de evapotranspiración.

2.3.3 *Compresibilidad del subsuelo de Santafé de Bogotá*

La compresibilidad del subsuelo de Santafé de Bogotá se estudió fundamentalmente mediante ensayos de consolidación con esfuerzos controlados. Sin embargo, se complementó el estudio con pruebas de consolidación isotrópica realizadas en cámara triaxial y pruebas de consolidación con velocidad de deformación controlada siguiendo la metodología recomendada por el Instituto Geotécnico Noruego NGI.

Con base en los resultados de los ensayos de consolidación se obtuvieron los valores de índice de compresibilidad, índice de recompresión, esfuerzo de preconsolidación y coeficiente de consolidación en los suelos de las zonas de la ciudad que presentan mayores problemas de compresibilidad.

2.3.3.1 *Compresión isotrópica*

El comportamiento de los suelos sometidos a trayectorias de carga en compresión isotrópica tiene gran importancia ya que su conocimiento permite representar las curvas esfuerzo - deformación de los suelos mediante modelos elastoplásticos. Cuando se representan las curvas de compresión isotrópica en un plano logarítmico es posible distinguir dos rectas: una en el dominio cuasi elástico y la otra en el dominio elastoplástico.

El valor del punto inicial de la recta de comportamiento cuasi-elástico y el valor del límite elástico son parámetros que no dependen del suelo sino de su estado inicial y por consiguiente no es posible correlacionarlos con propiedades índice tales como los límites de Atterberg.

2.3.3.2 *Compresión unidimensional u oedométrica*

En las gráficas realizadas con resultados de algunos de los ensayos realizados, se observa la siguiente tendencia, que está en acuerdo con lo reportado ampliamente en la literatura; a medida que el límite líquido aumenta, se incrementa la compresibilidad, es decir, que aumenta el índice de compresión Cc.

2.3.3.3 *Análisis estadístico del índice de compresión*

El índice de compresión es un parámetro de suma importancia ya que está relacionado con la magnitud de la deformación del suelo bajo cargas externas y depende principalmente de la plasticidad del suelo. En la Figura 2.12 se observa que en efecto existe una buena correlación entre el límite líquido y el índice de compresión. Esta correlación ha sido investigada por diferentes autores alrededor del mundo y la mas aceptada es la de Skempton quien plantea la correlación Cc=0.009(Wl-10). La correlación que se encuentra para la ciudad de Bogotá es Cc = 0.0089*(wl - 14) con un coeficiente de correlación de 0.62, algo bajo. Esta correlación es bastante cercana a la de Skempton y además tiene una justificación que concuerda con los análisis de valores límites que se presenta en el parágrafo 2.3.3.6.

2.3.3.4 *Análisis estadístico del índice de recompresión*

El índice de recompresión es el equivalente al índice de compresión pero en el dominio preconsolidado del suelo o pseudo-elástico. Puesto que estos dos parámetros dependen de las mismas variables (plasticidad del suelo principalmente) es usual encontrar una correlación entre ellos. Las correlaciones propuestas por diferentes autores varían entre Cr = Cc/4 y Cr = Cc/10. Con base en los valores obtenidos para los suelos investigados se encuentra la correlación Cr = Cc/8 con un coeficiente de correlación de 0.83.

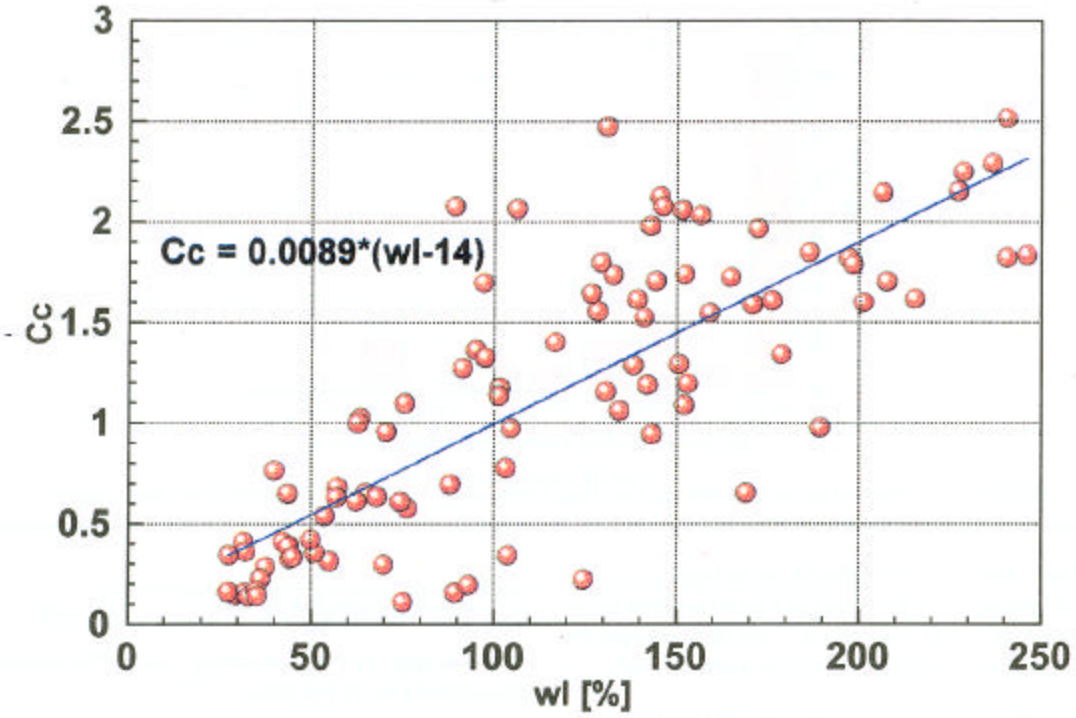


FIGURA 2.12 GRÁFICO DE ÍNDICE DE COMPRENSIÓN EN FUNCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

2.3.3.5 Esfuerzos de preconsolidación

Tal como ya se anotó el esfuerzo de preconsolidación obtenido a partir de los ensayos de compresión unidimensional es un parámetro que depende de la historia de esfuerzos a la que se ha sometido al suelo y no de sus propiedades índice. Por tal motivo este parámetro varía con la profundidad y con la localización de la muestra de suelo estudiada.

En la zona de arcillas blandas se observa que existe una capa preconsolidada en superficie cuyo espesor varía alrededor de 10 m. La presencia de esta capa puede ser debida a esfuerzos internos de succión producto de la baja del nivel freático y/o evapotranspiración, llegando a unos esfuerzos de preconsolidación del orden de 1.5 kg/cm^2 . En la zona de arcillas duras por el contrario se encuentra que en superficie el esfuerzo de preconsolidación es muy alto, del orden de 2 kg/cm^2 y aumenta con la profundidad hasta valores del orden de 4 kg/cm^2 a los 50 m.

2.3.3.6 Análisis de valores límites

Los resultados obtenidos permiten observar que la localización y la pendiente de la curva de consolidación unidimensional está fuertemente relacionada con la plasticidad del suelo entendiendo plasticidad como límites de Atterberg. En el parágrafo 2.3.3.3 se presentó la correlación entre el índice de compresión y el límite líquido. Sin embargo, para poder localizar la recta correspondiente al dominio normalmente consolidado en el plano (e - log σ'_v) es necesario conocer el punto inicial o final de dicha recta.

Con el fin de plantear un modelo estadístico de compresibilidad para los suelos de la ciudad de Bogotá se trató de establecer los valores del esfuerzo efectivo vertical correspondientes a los límites líquido y plástico.

En la Figura 2.13 se muestra el histograma de frecuencias del esfuerzo efectivo vertical que corresponde al límite líquido σ_{wl}. Se observa que el valor promedio se encuentra para un valor de 0.2 kg/cm^2 .

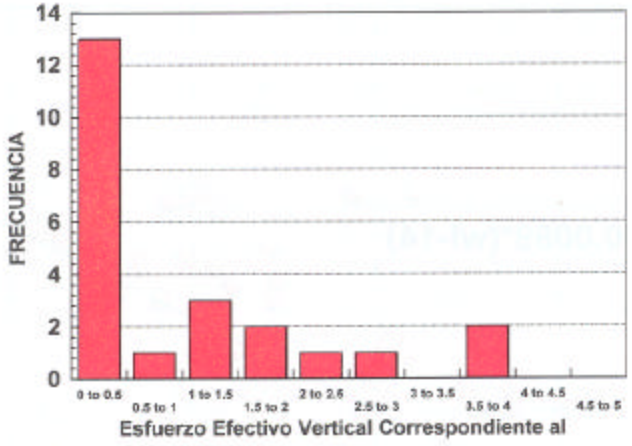


FIGURA 2.13 GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL CORRESPONDIENTE AL LÍMITE LÍQUIDO.

Al igual que con el límite líquido en la Figura 2.14 se muestra el histograma del esfuerzo efectivo vertical correspondiente al límite plástico σ_{wp}. Se observa que en este caso el valor medio corresponde a 24 kg/cm^2.

Los valores límites obtenidos concuerdan bastante bien con la correlación entre el coeficiente de compresibilidad y el límite líquido.

Tomando el valor promedio de Gs para Bogotá y utilizando la correlación encontrada entre el índice de plasticidad y el límite líquido, en la ecuación 2.3, se obtiene:

$$Cc = 0.0094\ (wl - 15.2) \qquad \text{Ec. 2.4}$$

relación que es muy próxima a la de Skempton y a la encontrada en el parágrafo 2.3.3.3.

Con base en la correlación obtenida entre el coeficiente de compresibilidad y los puntos extremos de las rectas en el dominio normalmente consolidado es posible plantear una recta de consolidación normal de un suelo conociendo únicamente su límite líquido. En general se observa una buena correspondencia entre los resultados experimentales y el modelo propuesto.

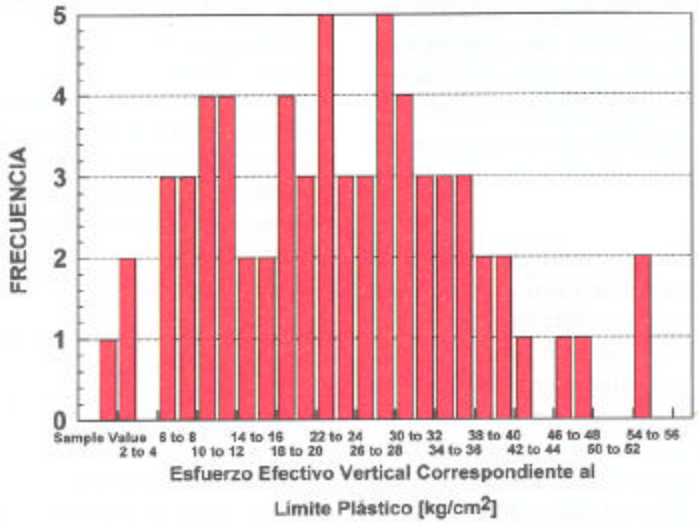


FIGURA 2.14 GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL CORRESPONDIENTE AL LÍMITE PLÁSTICO.

2.3.4 *Resistencia al corte*

La resistencia al corte de los suelos de Santafé de Bogotá se estudió principalmente con base en pruebas de compresión triaxial consolidada no drenada. Para complementar estas medidas principalmente en lo que se refiere a la resistencia al corte en esfuerzos totales se realizaron numerosas pruebas de compresión simple y de veleta de laboratorio.

Los ensayos de resistencia al corte en pruebas de compresión triaxial, se realizaron siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 4767-88 para pruebas de compresión triaxial consolidadas no drenadas con medida de presión de poros.

La gran cantidad de pruebas realizadas constituyen una base de datos de considerable importancia para el desarrollo futuro de la ciudad. Es por ello que para su interpretación se utilizaron las teorías modernas de resistencia al corte con las cuales es posible modelar en computador el comportamiento de los suelos arcillosos.

La línea de estado crítico representa la envolvente de falla en plasticidad perfecta de todas las pruebas realizadas con suelos normalmente consolidados. Esta envolvente se manifiesta en dos de los planos utilizados para interpretar los resultados: en el plano de invariantes isotrópico y desviador (p', q') la línea de estado crítico se manifiesta como una recta que pasa por el origen (siempre y cuando no exista cementación) cuya pendiente es M. En el plano de volumen específico en función del esfuerzo isotrópico (v,p') la línea de estado crítico aparece como una curva que al ser representada en escala logarítmica se convierte en una recta paralela a la línea de compresión isotrópica.

A manera de ejemplo en la Figura 2.15 se representan los resultados obtenidos para un suelo localizado en Suba a una profundidad de 41.5 m, consolidado a 1.0, 2.5 y 5.0 kg/cm².

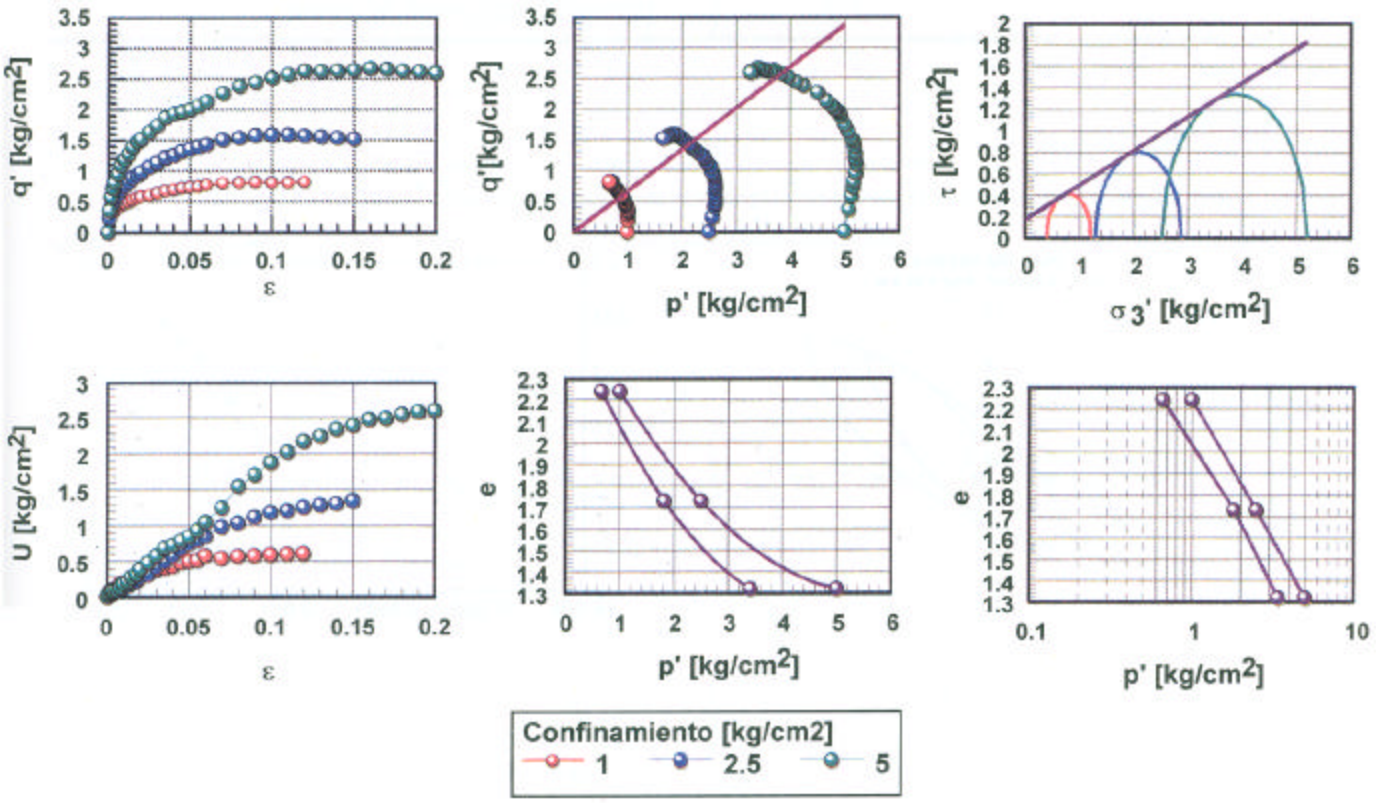


FIGURA 2.15 GRÁFICO DE RESULTADO ENSAYO TRIAXIAL CU (MUESTRA N14 - 18, PROFUNDIDAD 41.5m).

2.3.5 *Comportamiento del subsuelo de Santafé de Bogotá bajo cargas cíclicas*

El estudio del comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Santafé de Bogotá se realizó por medio de ensayos triaxiales cíclicos, ensayos con elementos piezoeléctricos para encontrar la velocidad de onda cortante en el laboratorio y ensayos in situ como el Down Hole y el Presiómetro de Menard cíclico. Debido a la gran variedad de suelos y condiciones que pueden afectar la respuesta dinámica de estos y el área de la ciudad (650 km² aproximadamente), sería económicamente imposible pensar en la posibilidad de realizar un estudio determinístico de las propiedades dinámicas de los suelos en toda la extensión de la ciudad, por lo que se decidió utilizar un modelo de comportamiento para simular el comportamiento dinámico.

En las Figuras 2.16 a 2.18 se encuentran los resultados típicos de un ensayo triaxial cíclico, los ciclos de histéresis de esfuerzo cortante τ contra deformación por corte γ_c, la curva de degradación del módulo cortante G contra la deformación por corte γ_c y la curva de amortiguamiento contra deformación por corte γ_c.

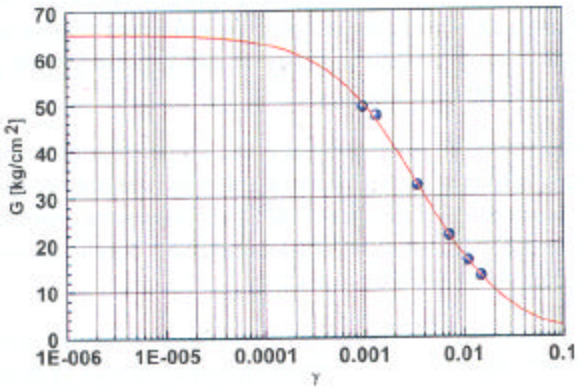


FIGURA 2.17 GRÁFICO DE RESULTADO TÍPICO DE ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO. CURVA DE MÓDULO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN.

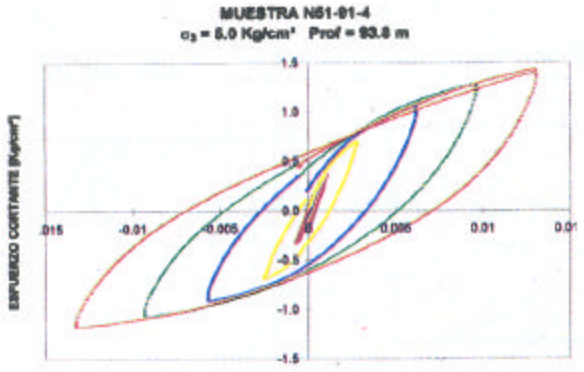


FIGURA 2.16 GRÁFICO DE LOS CICLOS DE HISTÉRESIS ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO

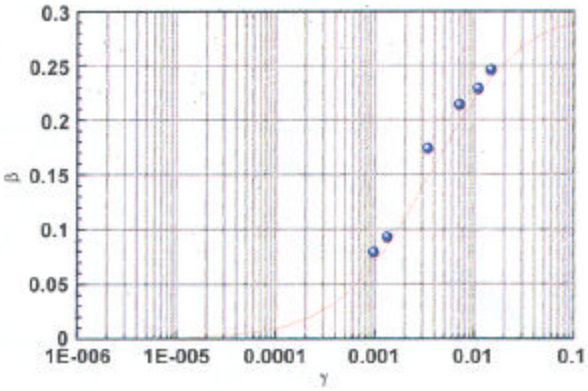


FIGURA 2.18 GRÁFICO DE RESULTADO TÍPICO DE ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO CURVA DE AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN

2.3.5.1 *Estudio del módulo de cortante máximo*

En un equipo triaxial cíclico es difícil obtener el módulo en pequeñas deformaciones ya que éstas son difíciles de medir con la instrumentación convencional. Por este motivo para obtener el módulo máximo se recurrió a otro tipo de ensayo denominado "bender element" desarrollado en el Instituto Geotécnico Noruego. Este ensayo está basado en la medida en laboratorio de la velocidad de una onda de cortante generada por un elemento piezoeléctrico. A manera de ejemplo en las Figuras 2.19 y 2.20 se muestran algunos resultados de estas medidas.

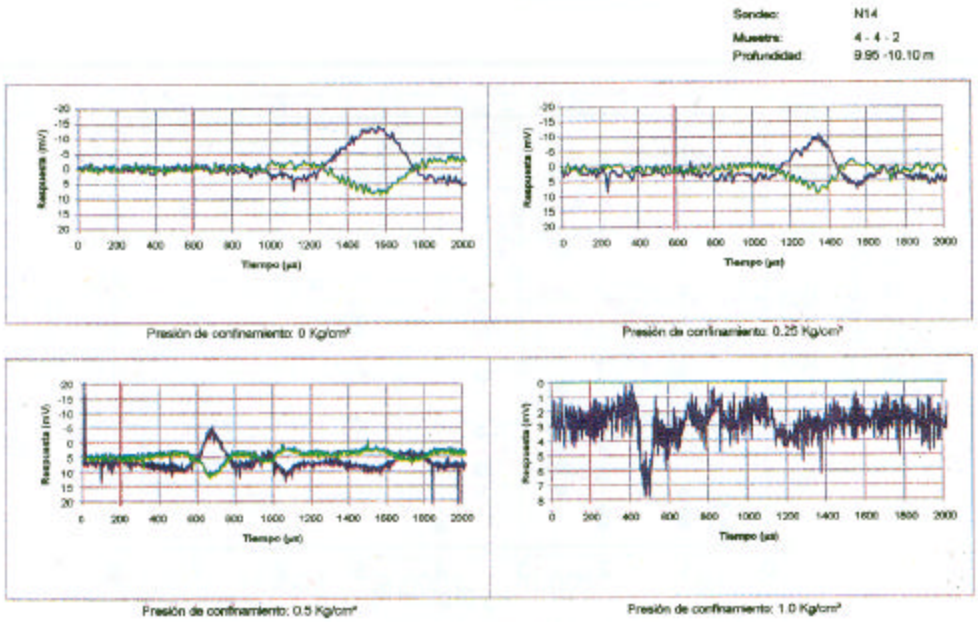


FIGURA 2.19 VELOCIDAD DE ONDA CORTANTE PARA DIFERENTES PRESIONES DE CONFINAMIENTO.

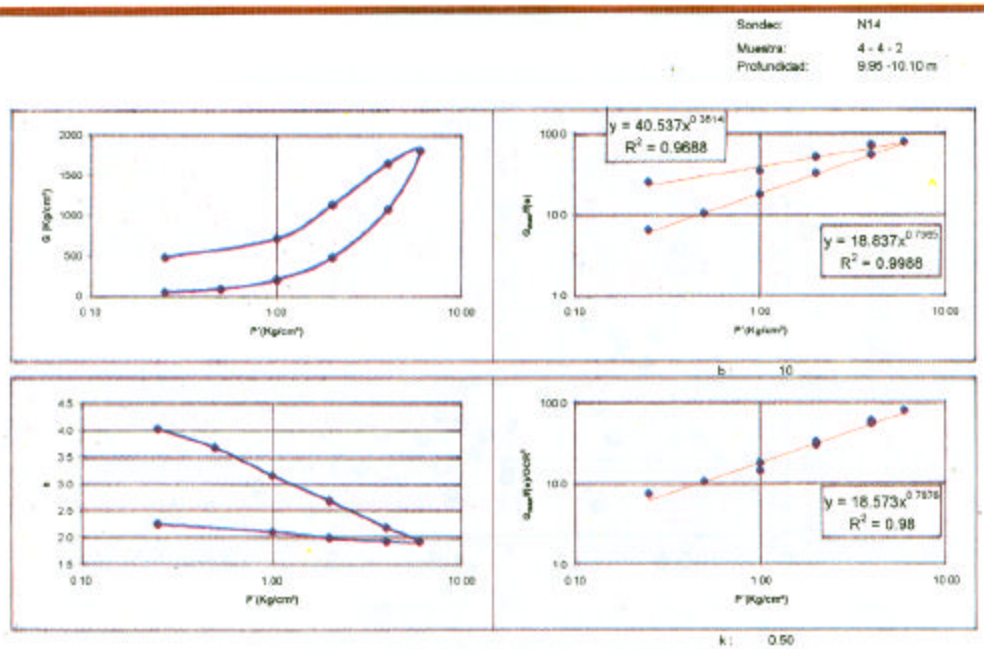


FIGURA 2.20 GRÁFICAS DEL MÓDULO DE CORTANTE MÁXIMO

Se estudiaron por separado cada una de las variables que se consideraron importantes en el comportamiento dinámico del suelo, las cuales fueron el esfuerzo de confinamiento σ_3, la relación de vacíos *e* y la plasticidad (entendida como límites de Atterberg).

El módulo de cortante tangente en pequeñas deformaciones G_{max} depende fuertemente del esfuerzo de confinamiento. En las Figuras 2.21 y 2.22 se observa la tendencia que se encuentra con base en los ensayos realizados.

La influencia del índice de plasticidad está incluida en las dos variables ya estudiadas: esfuerzo de confinamiento y relación de vacíos de tal manera que para un esfuerzo de confinamiento y una relación de vacíos dados el índice de plasticidad no afecta el valor de G_{max}. Sin embargo, el índice de plasticidad sí afecta de manera importante la forma en que se degrada el módulo con la deformación.

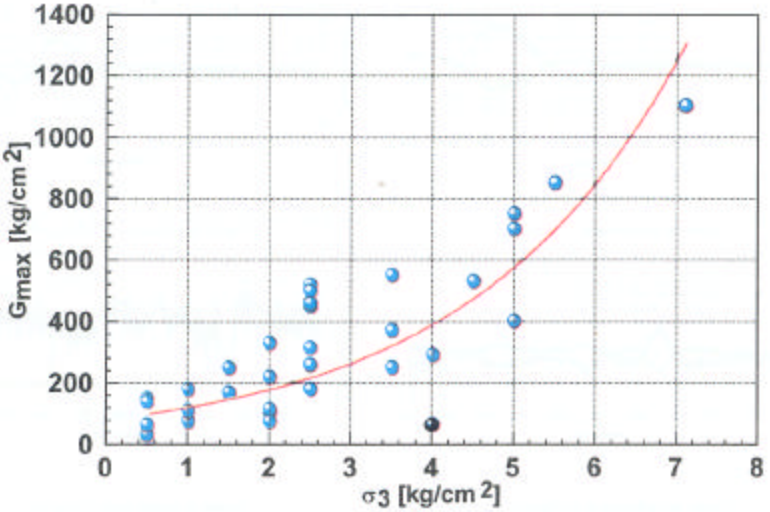


FIGURA 2.21 GRÁFICO DE G_{max} EN FUNCIÓN DEL ESFUERZO DE CONFINAMIENTO σ_3

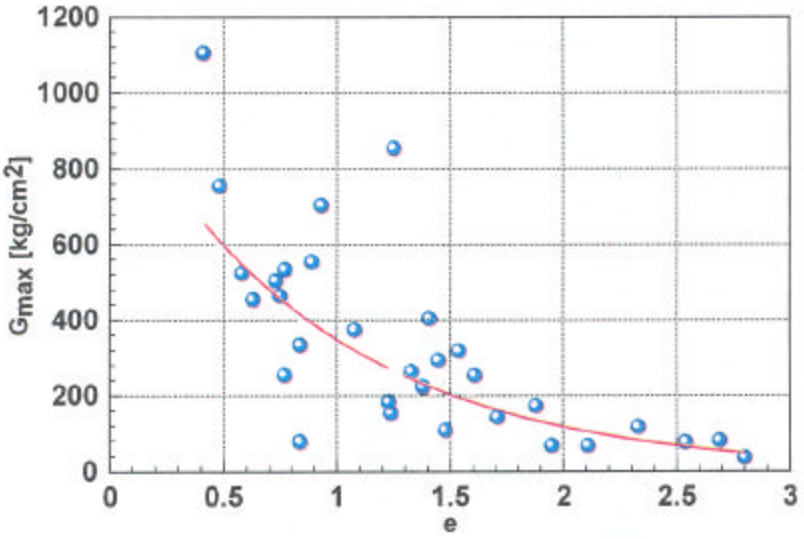


FIGURA 2.22 GRÁFICO DE G_{max} EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE VACÍOS e

2.3.5.2 *Definición de la curva de módulo G y amortiguamiento β contra γ_c*

La forma de la curva de degradación del módulo en función de la deformación por corte, representado en la curva G/G_{max} contra γ_c, depende fuertemente de la plasticidad del suelo. Ver Figura 2.23.

Para integrar los valores de módulos de cortante máximos obtenidos con la metodología del "bender element" y el resto de la curva obtenidas utilizando el aparato triaxial cíclico se utilizó una función de interpolación propuesta por la cual solo necesita dos parámetros α y β.

Para calibrar los resultados obtenidos del modelo, se comparó contra un resultado obtenido de un ensayo realizado en el laboratorio (Figura 2.24), en el que se observa que la proximación es buena tanto en la forma de la curva como el en valor de G_{max}.

Para el amotiguamiento se adoptó una metodología similar a la propuesta por Hardin y Drnevich. De esta forma el amortiguamiento también queda ligado al valor de la plasticidad.

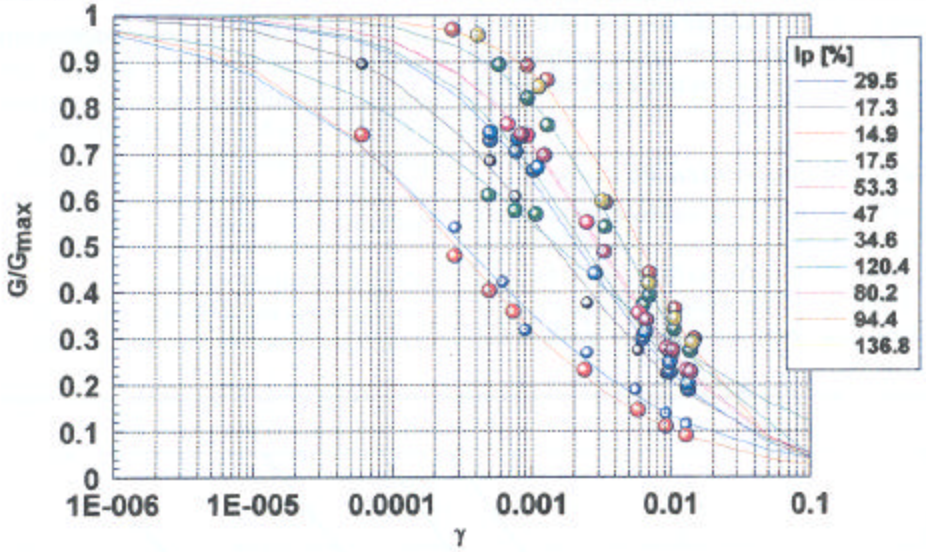


FIGURA 2.23 GRÁFICO DE CURVAS G/G max EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN CORTANTE PARA DIFERENTES Ip.

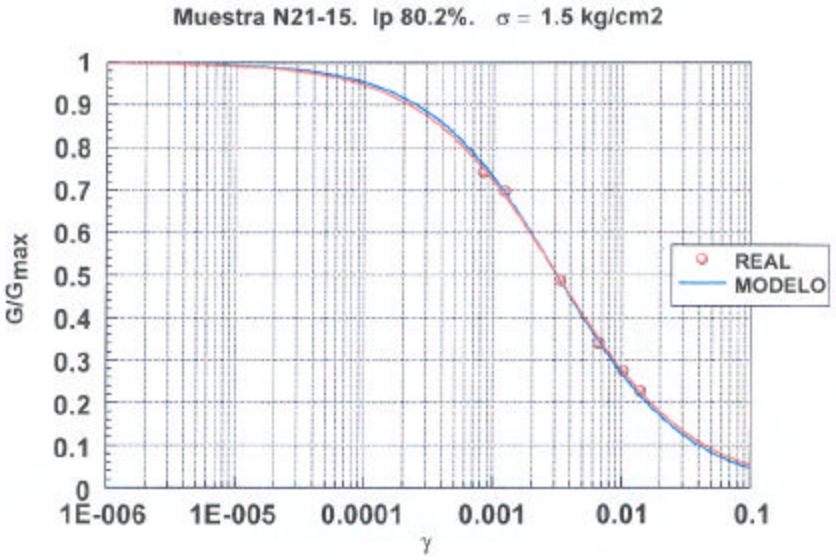


FIGURA 2.24 GRÁFICO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO CONTRA ENSAYO DE LABORATORIO

2.3.5.3 *Ensayos in situ*

En las Figuras 2.25 y 2.26 se muestran los resultados de algunos de los ensayos in situ: en la Figura 2.25 se muestra la curva obtenida a partir de un ensayo presiométrico cíclico en la cual se observa claramente la degradación del módulo a medida que aumenta la amplitud de los ciclos. Para interpretar estos resultados es necesario realizar un análisis inverso utilizando un método numérico. Esto debido a que la deformación alrededor de la sonda presiométrica no es homogénea. Estos resultados plantean una esperanzadora posibilidad de reducción del costo de los estudios de microzonificación sísmica. En la Figura 2.26 se muestran las medidas obtenidas en los ensayos Down Hole. Cabe anotar que los resultados de estos ensayos fueron comparables a las medidas directas en laboratorio realizadas con la metodología del "bender element".

2.3.6 *Zonificación geotécnica de síntesis*

En la zonificación Geotécnica de síntesis se tuvieron en cuenta los estudios geológicos realizados por INGEOMINAS, la zonificación geotécnica (INGEOMINAS, 1988) y los estudios de Martínez et al (1990,1992). Además, se incluyeron en los análisis los resultados de la investigación geotécnica de este estudio concretamente en lo referente a propiedades índice predominantes en cada zona y su variación con la profundidad, mapa de valores de la correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido y los mapas de zonificación analítica presentados en el informe del subproyecto número 10 del presente estudio (Universidad de los Andes e INGEOMINAS, 1996). Finalmente se consultó a Ingenieros Geotecnistas con conocimiento del subsuelo de la ciudad, obteniendo como resultado el Mapa de Zonificación Geotécnica de la ciudad de Santafé de Bogotá (Figura 2.27 - Mapa No. 2).

Los límites de las zonas establecidas concuerdan en general con los de estudios realizados con anterioridad. El límite más significativo es el que separa la zona de arcillas duras con la de arcillas blandas, el cual se ubica aproximadamente al sur de la Avenida de los Comuneros. Las zonas en las que se dividió la ciudad son las siguientes:

- Zona montañosa caracterizada por la presencia de arenis cas duras resistentes a la erosión y arcillolitas cuya resistencia y deformabilidad dependen de su humedad.

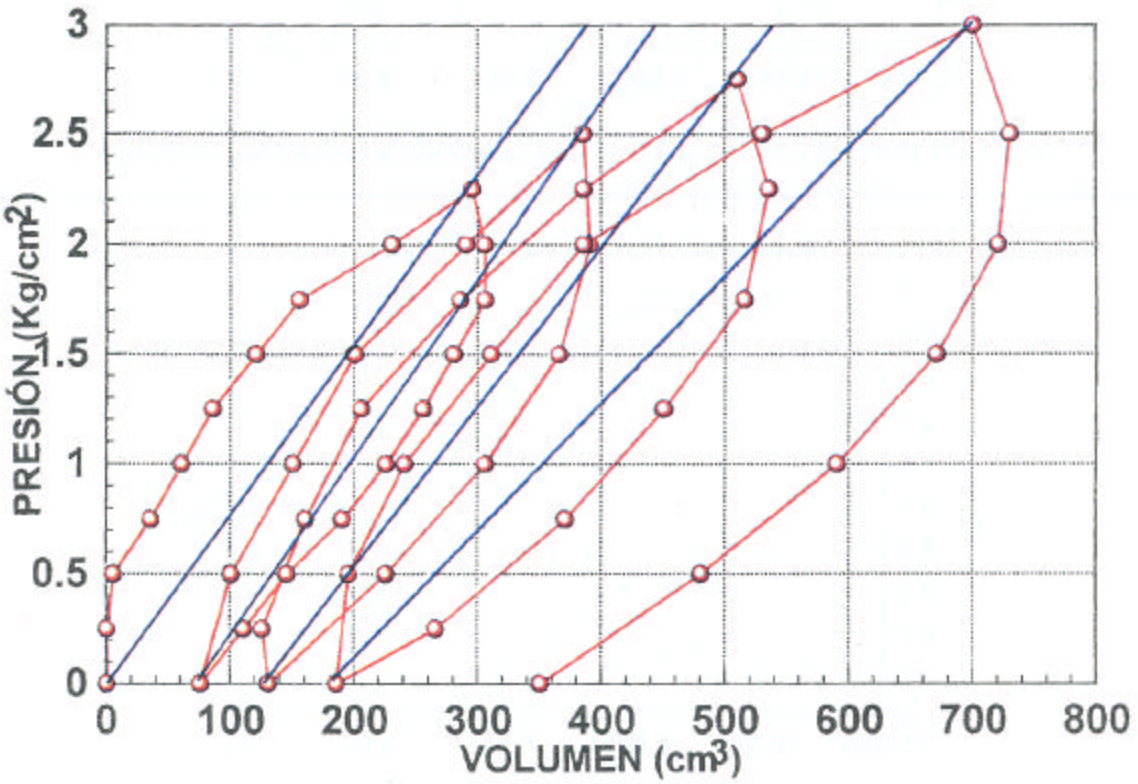


FIGURA 2.25 RESULTADOS TÍPICOS DE UN ENSAYO PRESIOMÉTRICO CÍCLICO

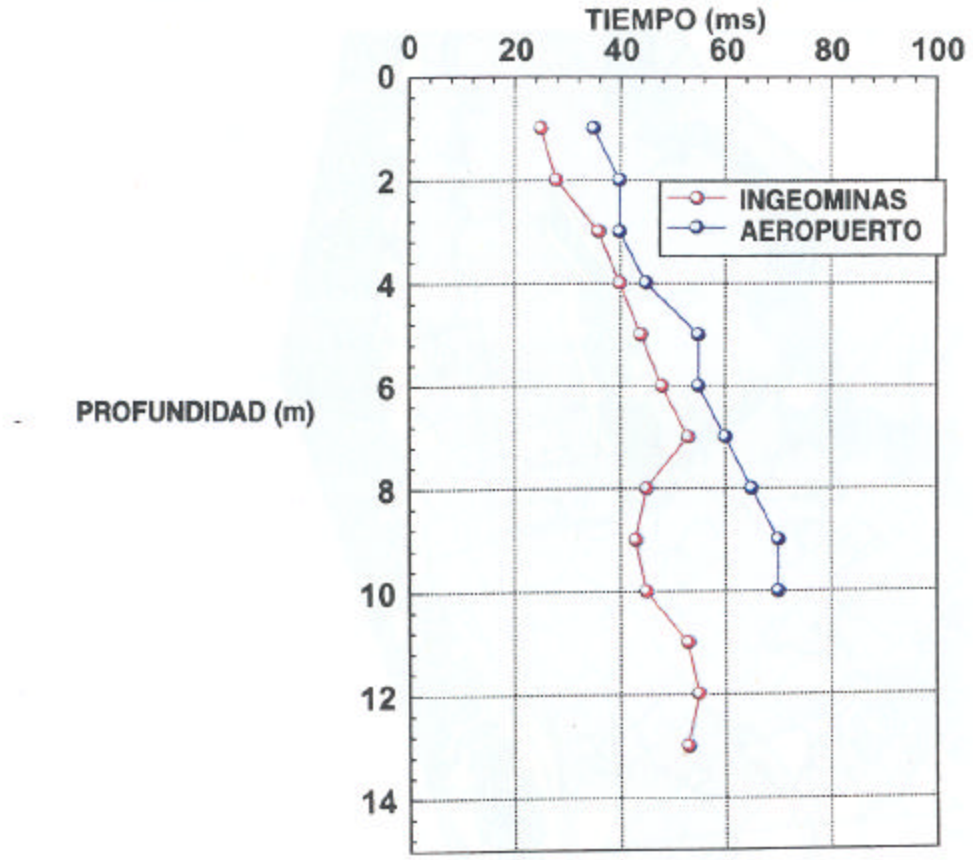


FIGURA 2.26 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DOWN HOLE

- Zona de piedemonte o de conos de deyección conformada por materiales que bajo el efecto de la gravedad han sufrido movimientos y se han depositado en forma de cono o abanico.

- Zona de suelos duros en donde predominan las arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosos de origen aluvial. La zona arcillosa se caracteriza por su baja plasticidad, encontrándose el limite líquido en un rango entre 20% y 70 % en los primeros 30 m. En profundidad la arcilla tiende a volverse más arenosa y presenta un límite líquido de alrededor del 30 %. Adicionalmente, se encuentra una capa de turba aproximadamente a 30 m de profundidad con un espesor de 4 m en promedio. La parte occidental de esta zona, se caracteriza principalmente por la presencia de arenas de grano fino a muy fino, con poca presencia de arcillas.

- Zona de suelos blandos caracterizada por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad. Se encuentra que en los primeros 60 m de profundidad es posible encontrar límites líquidos en un amplio rango que varía de 30 % a más de 200 %, disminuyendo en profundidad a un valor del orden de 30%. Hacia la parte sur oriental de la zona se encuentran suelos preconsolidados en un espesor del orden de 10 m; espesor que disminuye hacia la parte nor-occidental. En esta zona es común encontrar una pequeña capa de arena a una profundidad aproximada de 50 m e intercalaciones de capas de turbas que en su mayoría no superan los 5 m de espesor.

- Zona de Rondas de ríos y humedales a la cual pertenecen los cuerpos de agua de la ciudad: humedales, antiguos lagos y zonas de inundación.

Con respecto al Mapa de Zonificación Geotécnica es importante hacer las siguientes anotaciones:

- Los límites de las zonas son aproximados y solamente constituyen una guía. Es probable encontrar discrepancias importantes en los límites de las zonas.

- En ningún caso la información tanto del Mapa como de este estudio deberá utilizarse para diseños.

Las descripciones y las características de cada zona solo son válidas para propósitos de esta zonificación.

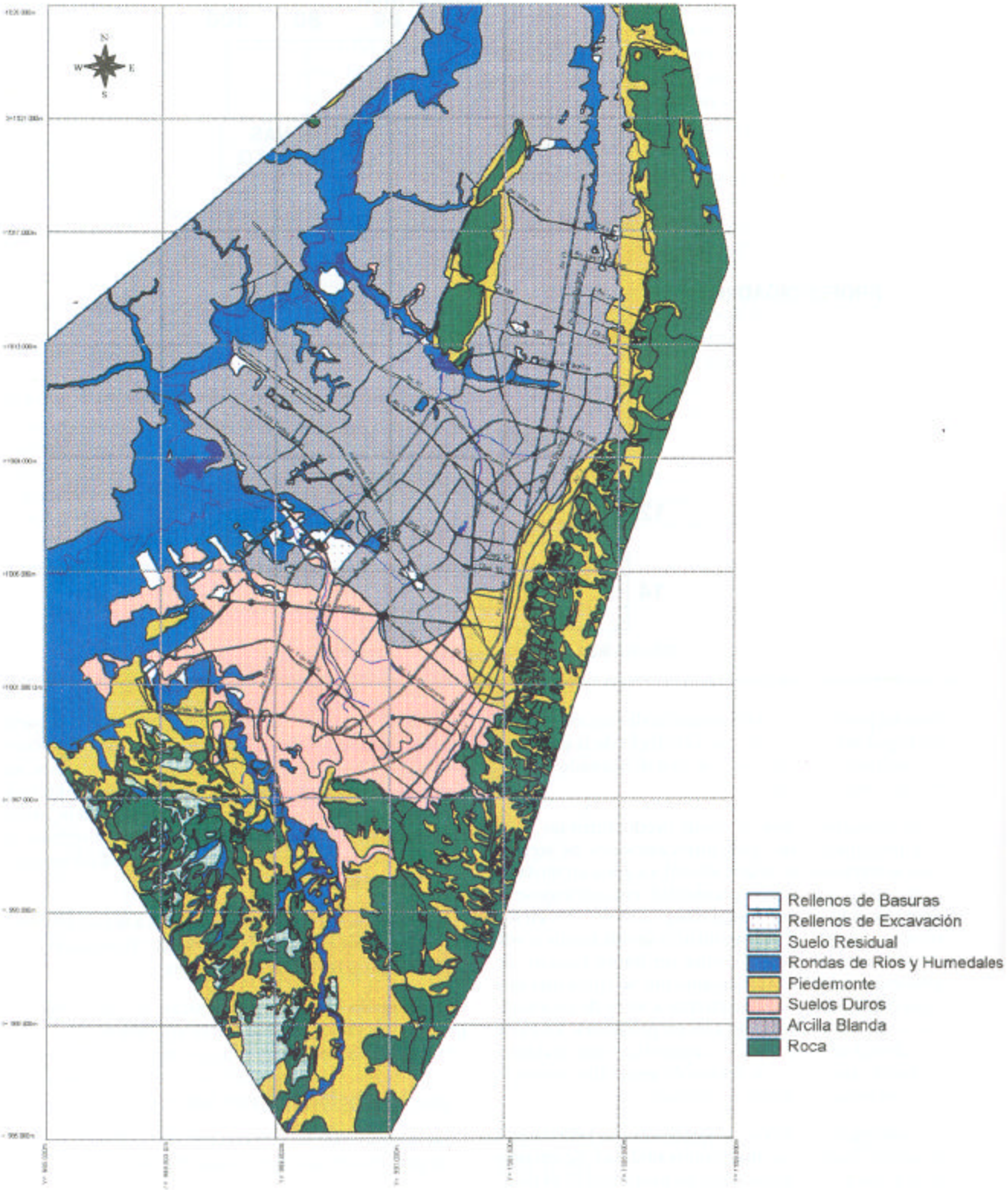


FIGURA 2.27 MAPA DE ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

2.4 *Referencias*

Arévalo G.S.R y Pinzón V.I.D, 1989. *"Análisis Sedimentológico de núcleos extraídos del pozo estratigráfico Funza II, Municipio de Funza"*. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional. Santafé de Bogotá.

Caro P., Padilla J., Vergara H, 1996. *"Mapa Geológico de Santafé de Bogotá"*. VI Congreso Colombiano de Geología. Sociedad Colombiana de Geología - INGEOMINAS. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS - Departamento de Planeación Distrital, 1988. *"Zonificación Geotécnica del Distrito Especial de Bogotá"*. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS, 1990. *"Proyecto Base de Datos Hidrogeológica"*. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS, 1995-a. *"Estudios Geológicos"* . Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto No. 2. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS, 1995-b. *"Recopilación de Información Geotécnica"*. Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto No. 8. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS - Universidad de los Andes, 1996-a. *"Microtrepidaciones"*. Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyectos No. 6. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS, 1996-b. *"Estudios Geofísicos"*. Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto No. 7. Santafé de Bogotá.

Universidad de los Andes e INGEOMINAS, 1996. *"Ensayos de laboratorio y Zonificación Geotécnica"* . Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyectos Nos. 10 y 11. Santafé de Bogotá.

Martínez J.M., Piñeros J. y Rubiano D.M., 1990. *"Propuesta preliminar de zonificación geotécnica para Bogotá"*. VI Jornadas Geotécnicas. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Sociedad Colombiana de Geotécnica. Bogotá.

Martínez J.M. y Prieto J.C., 1992. *"Características de las arcillas blandas de Santafé de Bogotá"*. VII Jornadas Geotécnicas y I Foro sobre la Geotecnia de la Sabana. Sociedad Colombiana de Ingenieros-Sociedad Colombiana de Geotecnia. Santafé de Bogotá.

Pérez R, 1988. *"Modelo Gravimétrico de la Cuenca de la Sabana de Bogotá, en los alrededores de Funza, Mosquera y Madrid"*. Tesis de Grado. Universidad Nacional. Santafé de Bogotá.

Rivera A., Pérez R., Vásquez L., 1996. *"Modelación por prospección geofísica hecha para Santafé de Bogotá"*. VI Congreso Colombiano de Geología. Sociedad Colombiana de Geología - INGEOMINAS. Santafé de Bogotá.

CAPITULO 3

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

La microzonificación sísmica de una ciudad consiste en establecer zonas de comportamiento geomecánico esperado similar; de manera que puedan establecerse allí recomendaciones específicas para el diseño y construcción de edificaciones. En varios terremotos recientes se ha demostrado que los efectos de un evento dado sobre las construcciones existentes en la zona dependen fundamentalmente de la respuesta de sitio que se obtenga, la cual a su vez depende de las características topográficas y geotécnicas existentes (Seed et al, 1969).

De esta manera en las zonas montañosas es de esperarse amplificaciones de los movimientos sísmicos dependiendo de las características topográficas locales del sitio bajo estudio. Las consecuencias más importantes en este tipo de configuración son las fallas de taludes, avalanchas o similares, además de la natural amplificación de aceleraciones máximas por efectos topográficos. Por otro lado, en los sitios donde la topografía es plana y donde se presentan depósitos de suelo relativamente blandos, predomina la posibilidad de resonancia entre el depósito y la señal de entrada, obteniéndose como resultado grandes amplificaciones del movimiento; esta señal se registra en especial en rangos específicos de contenidos frecuenciales que dependen de las características mismas del depósito y del movimiento de entrada. Cuando el depósito está formado principalmente por materiales arenosos, en especial cuando se trata de arenas limpias ubicadas cerca a la superficie (menos de 15 m) con niveles freáticos cercanos a la superficie, existen posibilidades que se presente el fenómeno llamado licuación, en el cual el suelo pierde toda capacidad de soporte por un aumento considerable en la presión de poros. De esta manera la zona que se vea afectada por este fenómeno presentará altas deformaciones superficiales con fallas generalizadas del terreno, edificaciones hundidas o con grandes asentamientos diferenciales y grandes asentamientos en el terreno con posible presencia de volcanes de arena.

Cualquier ciudad o zona de interés puede subdividirse en subzonas donde se espera un comportamiento sísmico similar, con base en el cual se establecen requisitos mínimos de diseño sismoresistente. Para cada una de ellas, además de especificarse el nivel de fuerza sísmica que puede esperarse para efectos de adelantar el diseño de las estructuras que se construyan, deben identificarse los tipos de fenómenos asociados que pueden esperarse como son una eventual falla de un talud, la amplificación desmesurada en las aceleraciones de respuesta, la posibilidad de resonancia en un rango específico de períodos o la posibilidad de licuación de un depósito dado de suelo.

En la delimitación de zonas con comportamiento sísmico similar deben quedar definidas claramente las zonas que conforman las rondas de los ríos, las zonas inundables, la ubicación de zonas especiales de reserva como son humedales, pantanos y lagos, las zonas de rellenos, y en términos generales cualquier zona que implique una restricción especial en cuanto a su uso futuro.

Con base en un mapa de microzonificación sísmica, una ciudad puede adelantar la planificación de su desarrollo hacia el futuro teniendo en cuenta las restricciones a los tipos de construcción y los parámetros de diseño definidos para las diferentes zonas de la ciudad.

Adicionalmente a lo anterior, la microzonificación sísmica puede utilizarse para estudiar posibles escenarios de daños durante sismos futuros esperados tanto sobre edificaciones como sobre líneas vitales y en general para evaluar los efectos sobre la infraestructura existente en la ciudad.

El presente capítulo representa el corazón del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad, ya que se sintetiza la información geológica, sismológica, neotectónica, geofísica, geotécnica y de amenaza sísmica regional y local.

Utilizando como base los anteriores estudios y considerando la información de sismos recientes de magnitud intermedia se plantea un mapa de microzonificación sísmica de la ciudad. En primer lugar se establece un mapa con curvas de igual período predominante de vibración determinado con base en un buen número de mediciones de microtremores estratégicamente distribuidos en la ciudad y que sirve de base para realizar una primera aproximación a un mapa de zonas de respuesta sísmica esperada similar.

En seguida se utiliza la información sísmica existente y registrada en los acelerógrafos de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia para comprender algunos aspectos básicos de la sismicidad regional de la zona bajo estudio y para realizar una calibración general de los modelos de respuesta unidimensional que se utilizarán en la respuesta dinámica de los diferentes depósitos.

Posteriormente se estudia la respuesta dinámica de las diferentes estratigrafías típicas según la información geotécnica existente utilizando los modelos unidimensionales de propagación de onda. Con base en esto se determinan las zonas de respuesta sísmica similar en la parte plana de la ciudad.

En el siguiente numeral se estudia la respuesta dinámica considerando efectos bidimensionales de elementos finitos para una sección típica del depósito de oriente a occidente en la zona norte de la ciudad, entre los cerros orientales y los cerros de Suba.

En forma complementaria se estudia la estabilidad de los taludes en los cerros orientales de la ciudad, ante el efecto sísmico, principalmente para establecer una zonificación de acuerdo con el riesgo esperado.

Finalmente, se establece la microzonificación sísmica de la zona bajo estudio incluyendo tanto la parte plana como la parte correspondiente a la zona montañosa, así como, las recomendaciones para estudios futuros que se realicen con objetivos de complementar y mejorar la información presentada.

Por otra parte, según la información histórica existente son absolutamente claros los efectos de sitio por cuanto se asegura que los movimientos de 1917 y de 1928 se sintieron más fuertemente en barrios como Chapinero y Liévano que en zonas centrales. Por otro lado son evidentes los daños recurrentes en las catedrales de Monserrate y Guadalupe que han sido destruídas en cada uno de los sismos históricos con intensidades reportadas de VIII (1785, 1827, 1917) y en uno de los sismos con intensidad reportada de VII (1743).

En años recientes han ocurrido sismos en diferentes zonas del país que han tenido implicaciones de consideración en Santafé de Bogotá. Tal es el caso de los sismos de Murindó, ocurridos el 17 y el 18 de Octubre de 1992, el primero con magnitud 6.6 y el segundo con 7.2, profundidad media del foco de 20 km y con epicentro en el Urabá Antioqueño y el sismo de Tauramena del 19 de enero de 1995 con $M_L = 6.5$ y profundidad de foco estimada en 50 km.

A pesar de las distancias significativas desde Bogotá hasta los focos de estos sismos, se alcanzaron a detectar intensidades de hasta IV o V en la escala de Mercalli Modificada. Esto de por si es una demostración de los efectos de sitio que pueden llegar a producirse en la ciudad por su ubicación y por las características de los depósitos donde se asienta. En las Figuras 3.1 y 3.2 se presentan los mapas de isosistas levantados con motivo de los sismos mencionados.

Como puede observarse a partir de los mapas mencionados, se hace evidente la ocurrencia de efectos de sitio de consideración ya que mientras en las zonas de suelos firmes y montañosas las intensidades alcanzan apenas los grados I ó II, en determinadas zonas de depósitos más blandos estas intensidades pueden alcanzar valores de hasta IV y V. Estos mapas se utilizan más adelante como sustentación a los mapas de microzonificación que se proponen en el presente estudio.

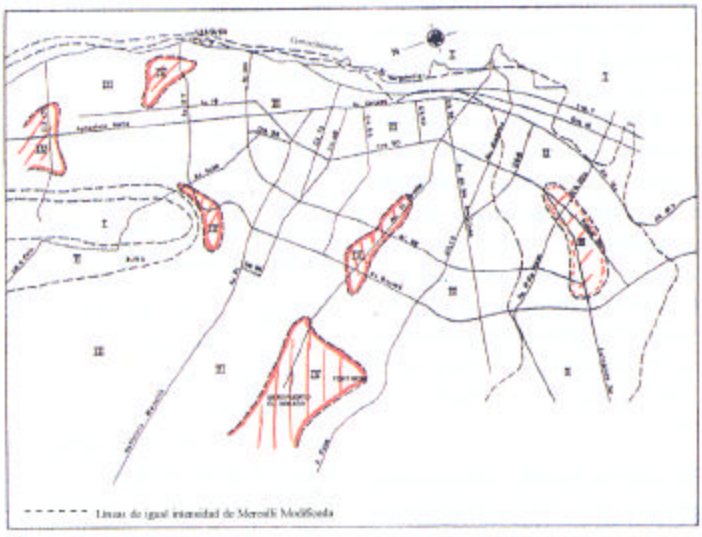


FIGURA 3.1 MAPA DE ISOSISTAS DE BOGOTÁ PARA EL SISMO DE MURINDÓ

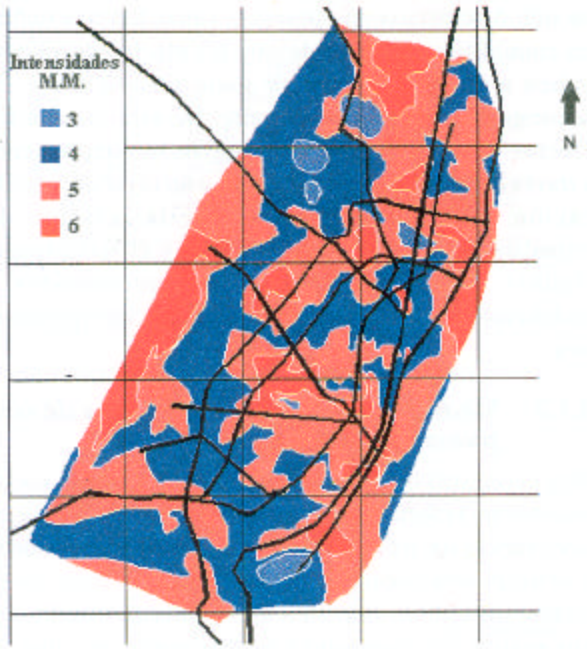


FIGURA 3.2 MAPA DE ISOSISTAS DE BOGOTÁ PARA EL SISMO DE TAURAMENA

3.1 *DETERMINACIÓN DE ZONAS CON RESPUESTA DINÁMICA*

Para la determinación de zonas con respuesta dinámica similar se pueden utilizar los métodos empíricos basados en la medición de señales provenientes de sismos pequeños y que sean registrados tanto en roca como en los suelos relativamente más blandos dentro de la zona de estudio. Con esta información se puede conocer confiablemente, aunque sea a pequeñas amplitudes y por lo tanto probablemente en el rango elástico y de bajo amortiguamiento del suelo, las características dinámicas de la respuesta de sitio. Esta información sirve de base entonces para predecir de manera confiable la respuesta sísmica del subsuelo ante sismos de mayor intensidad.

En el presente caso no se dispone de información suficiente de sismos pequeños dado que no existe una instrumentación sísmica suficiente y adecuada. Por esta razón se recurre a la utilización de registros de ruido sísmico ambiental, llamados comúnmente 'microtrepidaciones' o 'microtremores'.

Los estudios de microtrepidaciones o microsismos fueron iniciados por Omori (1908) y luego continuados por Kanai et al (1961) y por Aki (1988). Hoy en día las aplicaciones prácticas de las microtrepidaciones en el campo de la ingeniería han avanzado en forma importante, especialmente hacia aplicaciones en microzonificación sísmica.

Utilizando conjuntos de estaciones algunos investigadores han demostrado que las microtrepidaciones de período corto (en general menores de 1 segundo) consisten principalmente de ondas Rayleigh excitadas localmente a partir de ruidos artificiales como son el tráfico, plantas industriales, maquinaria, etc. Nakamura ha demostrado (Nakamura, 1989) que este tipo de microtrepidaciones tiene un parecido importante a las características de las ondas S. Por otro lado Tamura (Tamura et al, 1989) ha demostrado que el período dominante del terreno está influenciado primordialmente por las ondas Love. La dificultad en la utilización de las microtrepidaciones de período corto en la estimación de períodos predominantes de sitios con suelos blandos radica principalmente en la dificultad de separar los efectos de la fuente de los efectos de sitio. De hecho, mientras más corto sea el período de la microtrepidación, más fuerte será la dependencia de las fuentes locales que las excitan haciendo muy difícil interpretar las variaciones de sitio a sitio.

Por otro lado, las microtrepidaciones de largo período o microsismos que se propagan principalmente como ondas Rayleigh y Love, son debidas a excitaciones naturales como son las ondas de mar, las variaciones en las presiones del aire y en el viento y en casos particulares a excitaciones artificiales tales como maquinarias especiales, voladuras, etc. Investigaciones recientes (Lermo et al, 1994-a) han demostrado que las microtrepidaciones de largo período permiten obtener un estimativo de los efectos de sitio y de la magnitud de las amplitudes de las relaciones espectrales entre suelo blando y duro, las cuales correlacionan bien con el espesor de los sedimentos. Sin embargo, estiman que este procedimiento no puede dar un buen estimativo del factor de amplificación debido a que no se conocen los efectos de la fuente. Considerando todo lo anterior se sigue sin comprender bien la verdadera naturaleza y forma de generación de las microtrepidaciones.

A pesar de los problemas existentes relacionados con su interpretación, las microtrepidaciones se convierten en una interesante herramienta para evaluar efectos de sitio en virtud a su bajo costo y a la rapidez en las operaciones de campo. Tal es el caso de los trabajos de microzonificación que se han llevado a cabo en México (Lermo et al, 1994-b; Singh et al, 1988), Japón (Jeon et al, 1992), Estados Unidos y en el Perú (Meneses, 1991;

Nishimura et al, 1991) por mencionar algunas. De especial interés son los resultados obtenidos por Lermo y Chávez-García en cuanto a períodos dominantes en diferentes puntos de Ciudad de México obtenidos mediante interpretación de microtrepidaciones y su excelente correlación con períodos determinados en algunos puntos coincidentes a partir de las funciones de transferencia empíricas de eventos sísmicos de magnitud intermedia a alta (M_s de 4.8 a 8.1).

En el presente contexto se desea establecer una diferenciación clara entre los depósitos de suelos blandos y los depósitos de material más competente. De esta manera mediante la interpretación de los registros de microtrepidaciones puede caracterizarse cada sitio mediante el período predominante de vibración. Este período predominante de vibración no necesariamente coincide con el período de vibración fundamental del depósito, debido principalmente a que la fuente de excitación de las microtrepidaciones al igual que su energía y contenido frecuencial difiere totalmente de la fuente proveniente de un sismo en la cual es más probable que se logre una vibración más uniforme del depósito.

Finalmente y como objetivo principal se plantea una microzonificación de la zona plana de la ciudad con base en isoperíodos predominantes de vibración determinados a partir de registros de microtrepidaciones. Debe resaltarse que aún si los períodos predominantes mantienen diferencias con los correspondientes determinados a partir de sismos de magnitudes intermedias, la zonificación propuesta al menos geométricamente obedece a diferentes comportamientos dinámicos de las zonas y por lo tanto se convierte en un resultado de importancia a la hora de proponer un mapa de zonificación sísmica de un área determinada.

3.1.1 *Técnicas utilizadas en el análisis de señales sísmicas*

Se han propuesto en la bibliografía, varias maneras o tratamientos numéricos para analizar e interpretar señales aleatorias como son las que corresponden a eventos sísmicos y a mediciones de microtrepidaciones.

Las más utilizadas son la interpretación directa del espectro de Fourier o de la densidad espectral de potencia, el cálculo de relaciones espectrales con respecto a una estación de referencia en suelo firme y finalmente el cálculo de las relaciones espectrales entre las componentes horizontales del movimiento relativo a la componente vertical en el mismo sitio (Nakamura, 1989; Lachet et al, 1995).

Cada una de estas técnicas implica una interpretación de la naturaleza de las microtrepidaciones y su validez ha sido demostrada en diferentes casos. Las tres tienen en común la suposición de que los efectos de sitio se deben a un solo estrato de suelo blando sobre un semiespacio infinito competente. De esta manera los efectos de sitio pueden caracterizarse simplemente a través de un período dominante y un nivel de amplificación que queda definido por la relación de impedancias entre el estrato blando y el semiespacio rígido. Todos los efectos bidimensionales y tridimensionales se desprecian en dichas interpretaciones.

3.1.2 *Mediciones realizadas y zonas de respuesta dinámica similar*

Para el registro de las microtrepidaciones en los suelos blandos de la Sabana de Bogotá se utilizó un sensor de aceleración de tres componentes de alta sensibilidad y de respuesta lineal entre 0.15 y 200 Hz. Este sensor tridimensional se conectó a un sistema de adquisición automática de datos con una frecuencia máxima de barrido de 100 kHz. En cada sitio se realizaron varios registros a diferentes horas para poder estudiar la estabilidad de los resultados. Se registraron y grabaron ventanas de aproximadamente 25 seg tratando de seleccionar zonas de baja amplitud en las aceleraciones verticales. A cada uno de estos registros se le realizó el proceso de corrección por línea base y se calculó el espectro de Fourier de aceleraciones aplicando previamente un proceso de filtrado y suavizado. Finalmente se graficaron y se seleccionaron aquellos que indican consistencia para la interpretación final de relaciones espectrales o del método de Nakamura (1989).

3.1.3 *Mediciones e interpretación de microtrepidaciones en Bogotá*

Siguiendo la metodología explicada anteriormente se procedió a tomar registros de microtrepidaciones en varios puntos de la ciudad. Se realizaron un total de 72 mediciones. A cada uno de los registros obtenidos se le calculó el espectro de Fourier y se realizó complementariamente la interpretación de los espectros siguiendo la técnica de Nakamura. Se incluyen interpretaciones a diferentes horas del día para verificar la estabilidad de los registros.

En la Figura 3.3 se presenta un plano básico de la ciudad donde se indican los puntos seleccionados para el registro de microtrepidaciones. La información disponible fue completada por 45 puntos adicionales que fueron tomados directamente por INGEOMINAS.

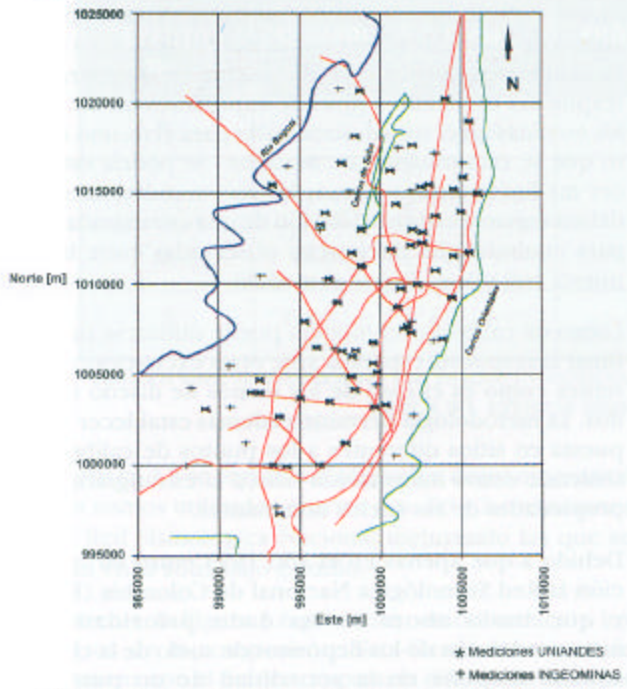


FIGURA 3.3 PLANO BÁSICO DE LA CIUDAD DONDE SE INDICAN LOS PUNTOS SELECCIONADOS PARA EL REGISTRO DE MICROTREPIDACIONES

Considerando la información geológica y geotécnica disponible dentro del marco del presente proyecto se elaboró un mapa donde se identifican las zonas de respuesta dinámica similar para la zona de estudio definida. Este mapa reúne informaciones geológicas, geotécnicas y mediciones directas de microtrepidaciones en diferentes puntos de la ciudad. Como se explicó anteriormente, los períodos indicados en cada una de las zonas propuestas no corresponde necesariamente al período de vibración fundamental del depósito sino que corresponde a alguno de los modos de vibración superiores del depósito. Sin embargo, la forma de las diferentes zonas sí obedece a un cambio claro en el comportamiento dinámico del depósito y por lo tanto la información consignada en dicho mapa resulta vital a la hora de realizar el mapa general de zonificación sísmica de la ciudad. Naturalmente este es un mapa base que debe trabajarse en el futuro de manera que se pueda ir complementando y mejorando con base en la información que esté disponible en cada momento (Figura 3.4)

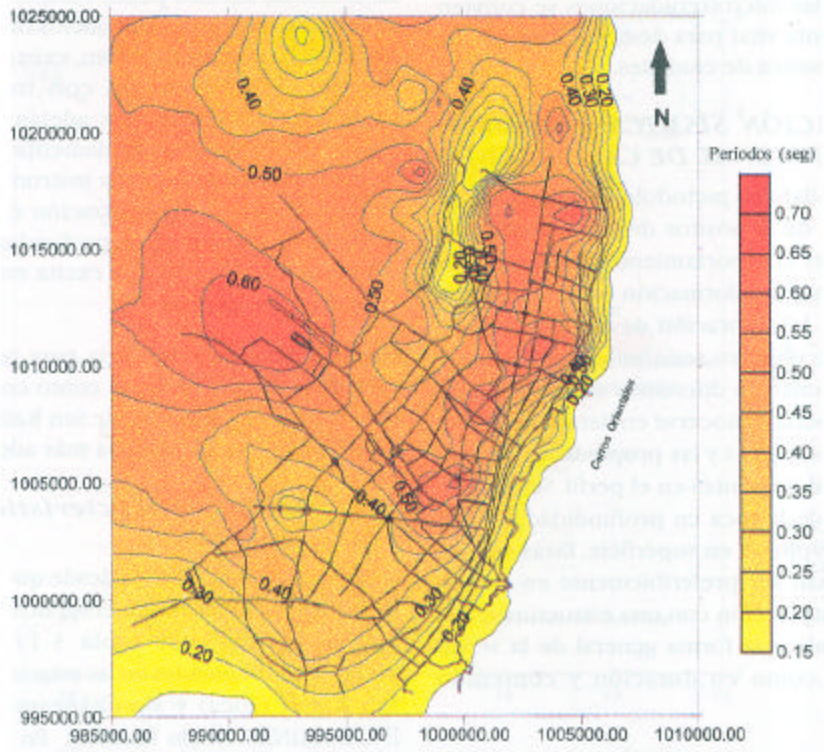


FIGURA 3.4 PERÍODOS DE VIBRACIÓN DOMINANTES A PARTIR DE MICROTREPIDACIONES

3.1.4 *Observaciones finales*

Las microtrepidaciones demuestran ser una herramienta versátil para determinar principalmente el período de vibración predominante de depósitos de suelo blando no muy profundos cuyo comportamiento se asemeje al de un estrato blando uniforme sobre un semiespacio infinito de suelo competente. Para el caso de Bogotá las suposiciones básicas no se cumplen del todo por lo cual hay que recurrir a una interpretación especial de los resultados que se obtienen.

Considerando que la energía de las fuentes que producen las microtrepidaciones (como son el tráfico y demás fuentes posibles) es limitada y dada la considerable profundidad de los depósitos de suelo, en el caso de Bogotá, el período de vibración predominante determinado a partir de las mediciones de microtrepidaciones resulta en general menor que el período de vibración fundamental de los depósitos mismos. La eventual modelación de las microtrepidaciones se complica por los aspectos mencionados y por el origen y características de la fuente. Este problema requiere mucha más investigación en el futuro.

La información que se puede obtener a partir de la interpretación de los registros de microtrepidaciones es útil de todas maneras para establecer zonas con diferente respuesta dinámica. De esta manera aún con las limitaciones planteadas las microtrepidaciones se convierten en una herramienta vital para desarrollar mapas de microzonificación sísmica de ciudades.

3.2 *INFORMACIÓN SÍSMICA Y MODELO UNIDIMENSIONAL DE CALIBRACIÓN*

Con el fin de desarrollar una metodología de análisis de la respuesta sísmica de depósitos de suelo basada en modelos teóricos del comportamiento del mismo, es necesario contar con una información básica confiable que permita realizar la calibración de los modelos. Lo ideal para lograr este objetivo sería un conjunto de registros de acelerogramas en diferentes sitios de la ciudad en los cuales debería conocerse en detalle las características geotécnicas básicas y las propiedades dinámicas de los suelos predominantes en el perfil. Se requerirían señales a nivel de la roca en profundidad al igual que las señales de respuesta en superficie. Estas señales en superficie deberían ser preferiblemente en campo libre para evitar la interacción con una estructura dada, la cual tiende a cambiar la forma general de la señal, tanto en amplitud como en duración y contenido frecuencial.

Una vez conformado el modelo del perfil estratigráfico en los diferentes sitios de la ciudad y habiendo asignado las propiedades estáticas y dinámicas a cada uno de los suelos característicos, puede excitarse el modelo con alguna de las señales disponibles a nivel de la roca base. La calibración consistiría básicamente en comparar las respuestas obtenidas a nivel de superficie con las señales medidas en el sitio determinado para el mismo evento que se está tratando de modelar. Se podría establecer mediante ensayo y error las recomendaciones que deben seguirse en la modelación de una estratigrafía dada para minimizar las diferencias observadas entre la respuesta real y la dada por el modelo.

Luego de calibrado, el modelo puede utilizarse para estimar la respuesta esperada ante otras excitaciones diferentes como es el caso de los sismos de diseño definidos. La metodología permitiría además establecer la respuesta en sitios diferentes a los puntos de calibración teniendo como información básica la estratigrafía y las propiedades de los suelos dominantes.

Debido a que apenas en el año 1993 entró en operación la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) y que hasta ahora se ha dado prioridad a la instrumentación de los depósitos de suelo de la ciudad, sólo se dispone en la actualidad de un punto de calibración, en el cual se han registrado hasta el momento 4 eventos de alguna importancia. El punto en mención se trata de la estación de INGEOMINAS ubicada en la sede de esta entidad en la zona centro-oriental de la ciudad. En este punto caracterizado desde el punto de vista geotécnico por suelos blandos hasta una profundidad del orden de 180m, existe un acelerógrafo en superficie y se cuenta con toda la información geotécnica necesaria para adelantar el modelo antes mencionado. Desafortunadamente era el único punto de suelo blando que estaba instrumentado en la ciudad en el momento de la realización del proyecto y no se disponía de un aparato en profundidad para conocer en detalle la señal de roca que excita, en un momento dado, el perfil estratigráfico.

Como puntos de referencia para tener una aproximación de la señal de roca se contó con las estaciones del Rosal cerca a Facatativá y de San Rafael cerca a la Calera, a las que se hace referencia más adelante.

3.2.1 *Datos y características de eventos sísmicos*

De los eventos ocurridos desde que inició la operación de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNA), apenas cuatro (ver Tabla 3.1) han excitado los acelerógrafos ubicados en las estaciones del Rosal (roca), San Rafael (roca) y simultáneamente la estación de INGEOMINAS (suelo blando). En la Tabla 3.1 se resumen las características principales de los cuatro eventos mencionados.

EVENTO No.	NOMBRE	FECHA	PROFUNDIDAD	MAGNITUD	DISTANCIA EPICENTRAL (KM)*
1	Páez	6/6/94	Superficial	6.4	292.5
2	Tauramena	1/19/95	15	6.5	141.8
3	Calima	2/8/95	100	6.6	297.3
4	Ecuador	10/21/95	33	6.1	879.0

*Distancia epicentral aproximada a la Estación INGEOMINAS

TABLA 3.1 EVENTOS SÍSMICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

En la Figura 3.5 se presenta la ubicación de los epicentros de los sismos utilizados en este estudio y las estaciones de la Red Sismológica Nacional incluyendo las que se ubican en la zona bajo estudio.

Finalmente, la Figura 3.6 presenta como ilustración los registros de la componente Este-Oeste del sismo de Tauramena con el fin de comparar la diferencia entre las dos eventuales señales en roca que estarían produciendo la respuesta registrada en la superficie del suelo blando. Además, se incluye en dicha figura la comparación de los espectros de respuesta correspondientes.

Del análisis visual de los registros disponibles se obtienen algunas observaciones preliminares de importancia :

Es evidente la amplificación que se presenta en los registros de suelo blando con respecto a los de roca. Se observan factores de amplificación de 3 a 10 o más

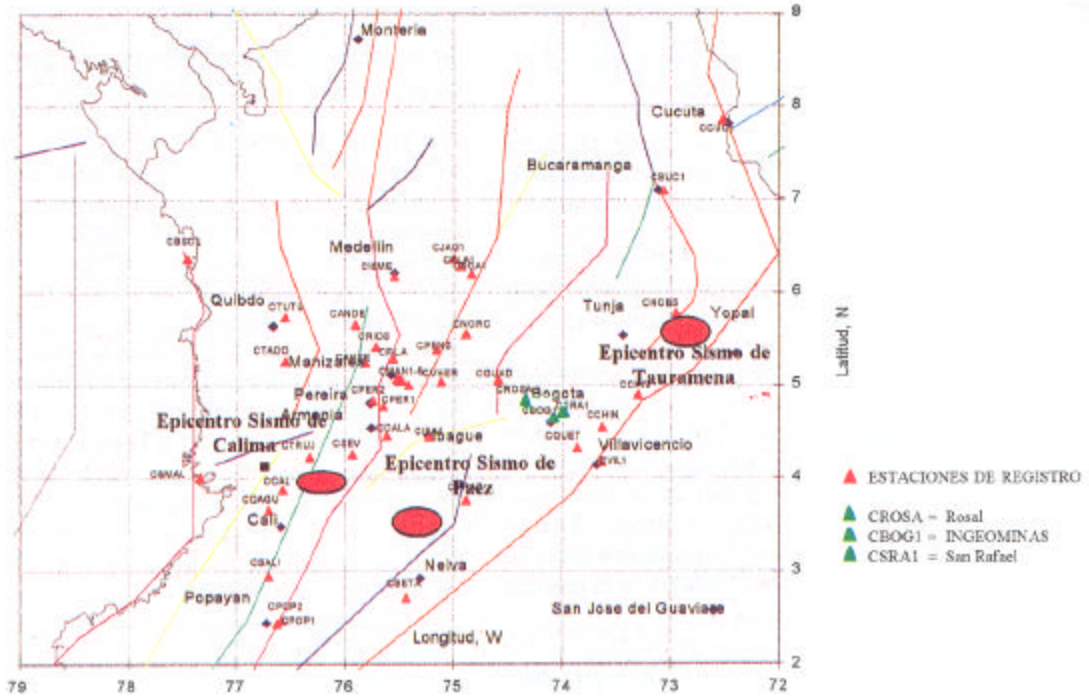


FIGURA 3.5 UBICACIÓN DE LOS EPICENTROS DE LOS SISMOS UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO Y LAS ESTACIONES DE LA RED SISMOLÓGICA NACIONAL

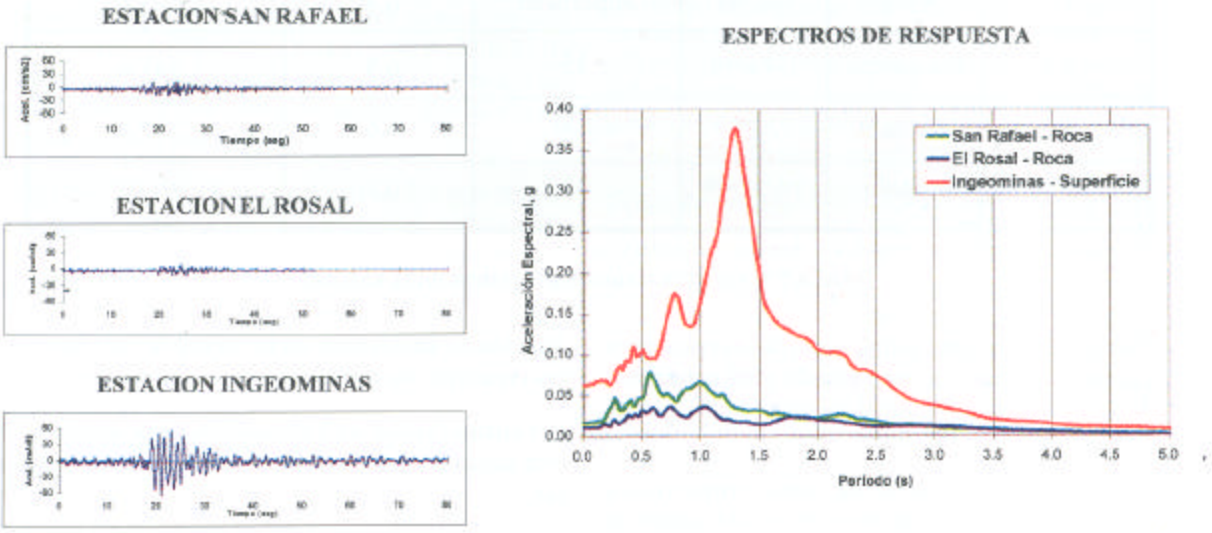


FIGURA 3.6 COMPARACIÓN DE LAS COMPONENTES EW REGISTRADAS EN EL SISMO DE TAURAMENA Y SUS RESPECTIVOS ESPECTROS DE RESPUESTA

en la aceleración máxima registrada en suelo blando con respecto a la de roca equivalente.

- Las señales horizontales predominan sobre las verticales en los cuatro eventos analizados tanto para la señal en roca como para la señal en suelo blando.
- La duración de las señales en suelo blando, al menos para un cierto umbral de aceleración mínima, resulta mucho mayor que aquella para suelo firme o roca.
- La señal en roca cambia significativamente, tanto en amplitud como en contenido frecuencial de una estación a otra. Esto implica que no es posible conocer en forma confiable la señal que estaría entrando en la roca base del depósito de suelo blando, en este caso particular en la estación de INGEOMINAS. Este aspecto genera unas variaciones importantes entre las señales de respuesta dada por el modelo y la registrada, tal como se presenta más adelante.

3.2.2 Caracterización geotécnica y propiedades dinámicas

Para efectos del análisis de respuesta dinámica mediante un modelo unidimensional de la estratigrafía y para poder calibrar los modelos analíticos se realizó una caracterización geotécnica detallada del perfil estratigráfico en el sitio de INGEOMINAS.

El depósito de suelo está dominado por arcillas blandas típicas de la sabana con capas localizadas de turbas, intercalados por una capa de arena que se presenta entre los 30 y 37 m de profundidad. A mayores profundidades las arcillas van ganando consistencia y rigidez y además se hace más frecuente la aparición de limos y arenas finas en combinación con las arcillas. Hacia los 70m de profundidad el depósito pierde plasticidad y la rigidez aumenta a medida que aumentan las presiones de confinamiento. A 180 m de profundidad aparece una arcillolita que pertenece a la Formación Bogotá y que se toma como estrato rocoso para efectos de la señal sísmica de entrada. En el capítulo anterior se presentaron las características principales del depósito mencionado tales como la estratigrafía según la clasificación unificada de suelos, la variación de la plasticidad con la profundidad, la variación de propiedades básicas con la profundidad como son la densidad, los límites líquido y plásticos, el índice de plasticidad, el índice de liquidez, los resultados de medición de resistencia al corte con el método de la veleta y los puntos donde se realizaron ensayos especiales como son triaxiales cíclicos y medición de velocidades de onda en Laboratorio.

Además, en la Figura 3.7 se presentan las curvas resultantes de degradación de la rigidez y de amortiguamiento con respecto al crítico en función de la deformación a cortante.

3.2.3 *Respuesta frecuencial en la estación INGEOMINAS*

Los datos disponibles se analizan en relación con la amplificación que ocurre en los depósitos de suelo blando de la ciudad y con los cambios de contenido frecuencial que sufre la señal.

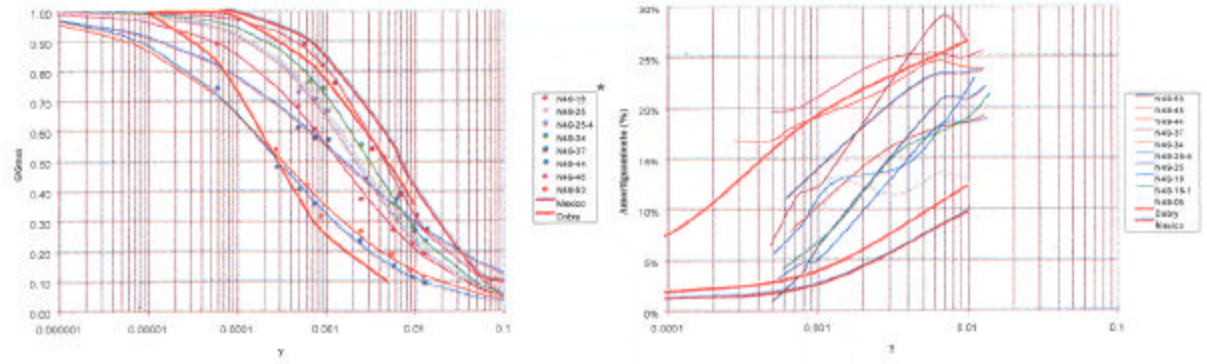
La caracterización estratigráfica en el sitio de INGEOMINAS se utiliza para determinar la respuesta teórica del modelo ante la señal de entrada en roca. Para el efecto se empleó el programa de computador SHAKE91 (Idriss et al, 1992) el cual se basa en la propagación vertical de ondas de cortante en un medio semi-infinito y utiliza un procedimiento iterativo lineal equivalente para las propiedades dinámicas del suelo de tal forma que estas sean compatibles con el nivel de deformación por cortante impuesto por el sismo.

Existe una concordancia aceptable entre los períodos predominantes que representarían los períodos de vibración de los modos fundamentales obtenidos mediante el análisis del factor dinámico de amplificación del modelo unidimensional desarrollado y las funciones de transferencia empíricas basadas en los espectros de Fourier suavizados y filtrados para cada uno de los sismos anteriormente presentados.

Para el análisis de la respuesta del modelo se utilizaron las señales disponibles en la estación del Rosal y las existentes en la estación de San Rafael. La Figura 3.8 compara las respuestas teóricas obtenidas mediante el modelo unidimensional con los espectros de los registros disponibles en la estación de INGEOMINAS para cada uno de los cuatro sismos analizados. Como puede verse no se logran resultados comparables en todos los análisis realizados pero puede afirmarse que el modelo refleja las tendencias generales en cuanto al comportamiento previsto del depósito. Una de las incógnitas importantes en los análisis es la señal de entrada que debe utilizarse para comparar con la señal en superficie. A esta incertidumbre definitiva se atribuyen buena parte de las diferencias observadas.

CURVAS DE G/Gmax CONTRA DEFORMACIÓN POR CORTANTE OBTENIDAS A PARTIR DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO CONTRA DEFORMACIÓN POR CORTANTE OBTENIDAS A PARTIR DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO



** Muestras del sondeo de Ingeominas (N49). El siguiente número indica el número de la muestra*

FIGURA 3.7 GRÁFICAS DE DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ Y DE AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACION POR CORTANTE

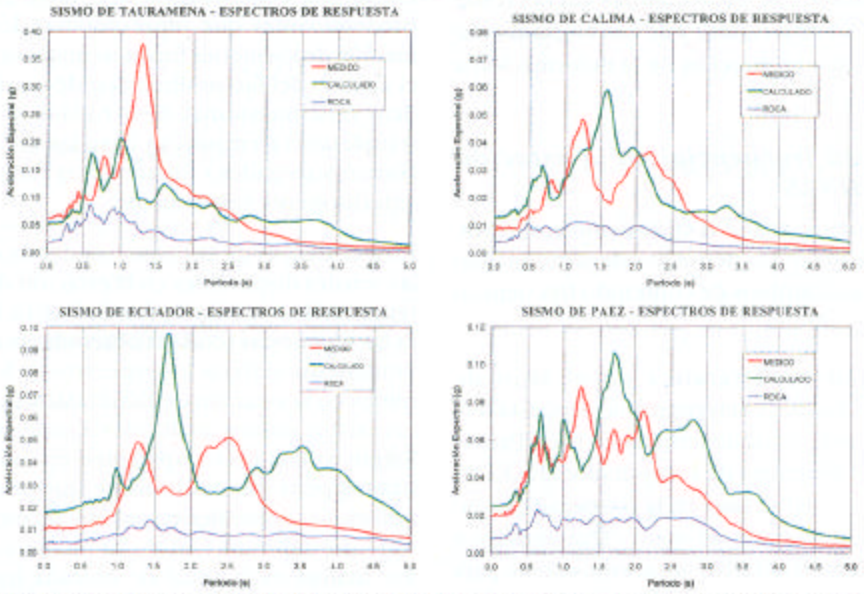


FIGURA 3.8 COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS TEÓRICAS OBTENIDAS MEDIANTE EL MODELO UNIDIMENSIONAL

La amplificación de la aceleración, que era una de las inquietudes principales por resolver, se observa principalmente en los estratos superiores más blandos del depósito. La Figura 3.9 presenta la variación de la aceleración máxima de respuesta con la profundidad del depósito para los cuatro sismos de calibración. Como se indica en la gráfica, para profundidades mayores de 40 m a 60 m, el valor de la aceleración máxima permanece esencialmente constante y la amplificación ocurre principalmente en los estratos más superficiales.

Utilizando el modelo desarrollado, se realizaron análisis de respuesta utilizando los sismos de calibración con diferentes aceleraciones máximas del terreno. El análisis de las curvas de aceleración máxima en superficie contra la aceleración máxima de la señal de roca para las corridas realizadas, muestran claramente que hasta un nivel dado de aceleración se produce amplificación relativa pero de ahí en adelante el suelo trata de amortiguar la señal produciendo una deamplificación de la aceleración máxima. Para la señal del sismo de Tauramena

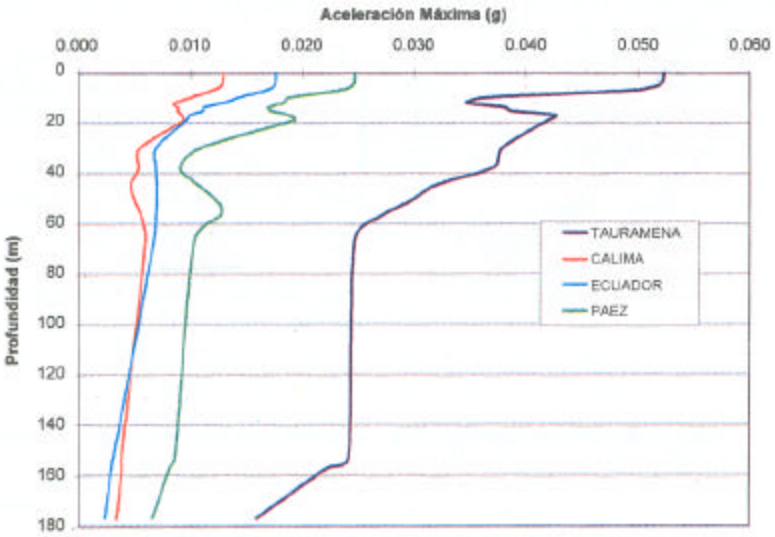


FIGURA 3.9 VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA DE RESPUESTA CON LA PROFUNDIDAD PARA LOS CUATRO SISMOS DE CALIBRACIÓN

la aceleración límite resulta del orden de 0.22g, para la señal del sismo de Calima es del orden de 0.21g, para la señal del sismo de Ecuador y del sismo de Páez es del orden de 0.30g. En términos generales puede afirmarse que señales con aceleraciones máximas por encima de 0.20g sufrirán una deamplificación en la aceleración máxima cuando pasen a través del depósito de suelo blando, caracterizado por la estratigrafía de la estación de INGEOMINAS.

3.3 RESPUESTA MEDIANTE MODELOS UNIDIMENSIONALES

3.3.1 Perfiles de análisis

La microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá se estudió principalmente desde el punto de vista de la respuesta unidimensional del depósito. La forma de la cuenca o sea el perfil del basamento rocoso en la zona bajo estudio está caracterizada por ser relativamente uniforme y con profundidades inferiores a los 300 m. Considerando las dimensiones aproximadas de la cuenca tanto en dirección este-oeste como norte-sur (por lo menos unos 30 km en cada dirección) o si se toma la zona más angosta que sería la correspondiente a un corte entre los cerros orientales y los cerros de Suba hacia la Calle 170, el ancho total para el análisis sería de al menos 6 km. Al comparar esta dimensión longitudinal con la profundidad máxima (300 m) resulta prácticamente un perfil en el cual es válida la suposición básica para utilizar un modelo unidimensional.

Con base en la información geotécnica disponible y en casos de análisis similares (véase por ejemplo el caso de México, Seed et al, 1988) se considera que la respuesta del subsuelo de Bogotá puede estudiarse esencialmente mediante los modelos unidimensionales descritos.

De acuerdo con ésto el análisis se planteó mediante la respuesta dinámica unidimensional de los sitios donde se realizaron los sondeos y en otros donde se conocía la estratigrafía.

Como se mencionó anteriormente se realizaron 38 perforaciones estratégicamente escogidas en distintas zonas de la ciudad y a profundidades que variaron entre 20 m y 250 m. Dentro de éstas 3 llegaron a roca (Calle 170 con Autopista, Calle 127 con Autopista, INGEOMINAS) y al suroccidente (Timiza) se llegó a un estrato de grava arenosa muy compacta, de baja plasticidad.

A partir de cada perfil estratigráfico disponible se construyó un modelo unidimensional compuesto por varias capas de suelo y un semiespacio elástico infinito en la parte inferior representando la roca base. Cuando los sondeos no llegaron hasta la profundidad de la roca se construyó una estratigrafía estimada con base en la información estratigráfica de sondeos cercanos y según la forma estimada de la cuenca.

3.3.2 Caracterización geotécnica y propiedades dinámicas

En cada una de las perforaciones se tomaron muestras inalteradas de suelo y se caracterizaron mediante ensayos de laboratorio, tales como triaxiales estáticos y dinámicos, consolidaciones unidimensionales, compresiones inconfinadas, mediciones de velocidad de onda cortante (Bender Element) y de propiedades índice. Todos estos ensayos permitieron establecer un modelo de comportamiento para los suelos arcillosos de la ciudad.

3.3.3 Sismos de diseño

Tal como se mencionó en el Capítulo 1, para efectos del diseño, en el estudio de la respuesta sísmica de los depósitos de suelos de la parte plana de la ciudad se establecieron tres señales que representan sismos hipotéticos (cercano, regional o frontal y lejano). Los sismos de diseño sirvieron de base para analizar todos los modelos unidimensionales de los perfiles de suelo utilizados en el proyecto.

3.3.4 Análisis de respuesta dinámica

Con el procedimiento descrito anteriormente se realizó el análisis de respuesta dinámica en todos los sitios disponibles, utilizando los sismos de diseño.

En la Figura 3.10 se presenta un mapa de isoperíodos fundamentales del depósito. Debe tenerse en cuenta que éste corresponde al período fundamental calculado con base en la hipótesis de comportamiento elástico y unidimensional mencionado. Este período sufrirá una reducción a medida que la señal de entrada produce deformaciones y degradación de la rigidez del depósito. A partir de estos períodos fundamentales pueden estimarse los armónicos de cada sitio dividiendo por números impares (3, 5, 7, etc.). Esta es una manera de identificar los períodos de máxima posibilidad de respuesta de acuerdo con las características del depósito. Además, para que se produzca el fenómeno de resonancia la señal de entrada debe traer también energía suficiente en alguno de los períodos del depósito. La resonancia será crítica para el período fundamental, pero puede producir respuestas de consideración para los períodos cercanos al fundamental (segundo o tercer períodos).

Cada una de las señales de los sismos de diseño excitará períodos de vibración predominantes del depósito en proporciones diferentes de manera que la respuesta para cada una de las señales será diferente. Se tendrá pre-

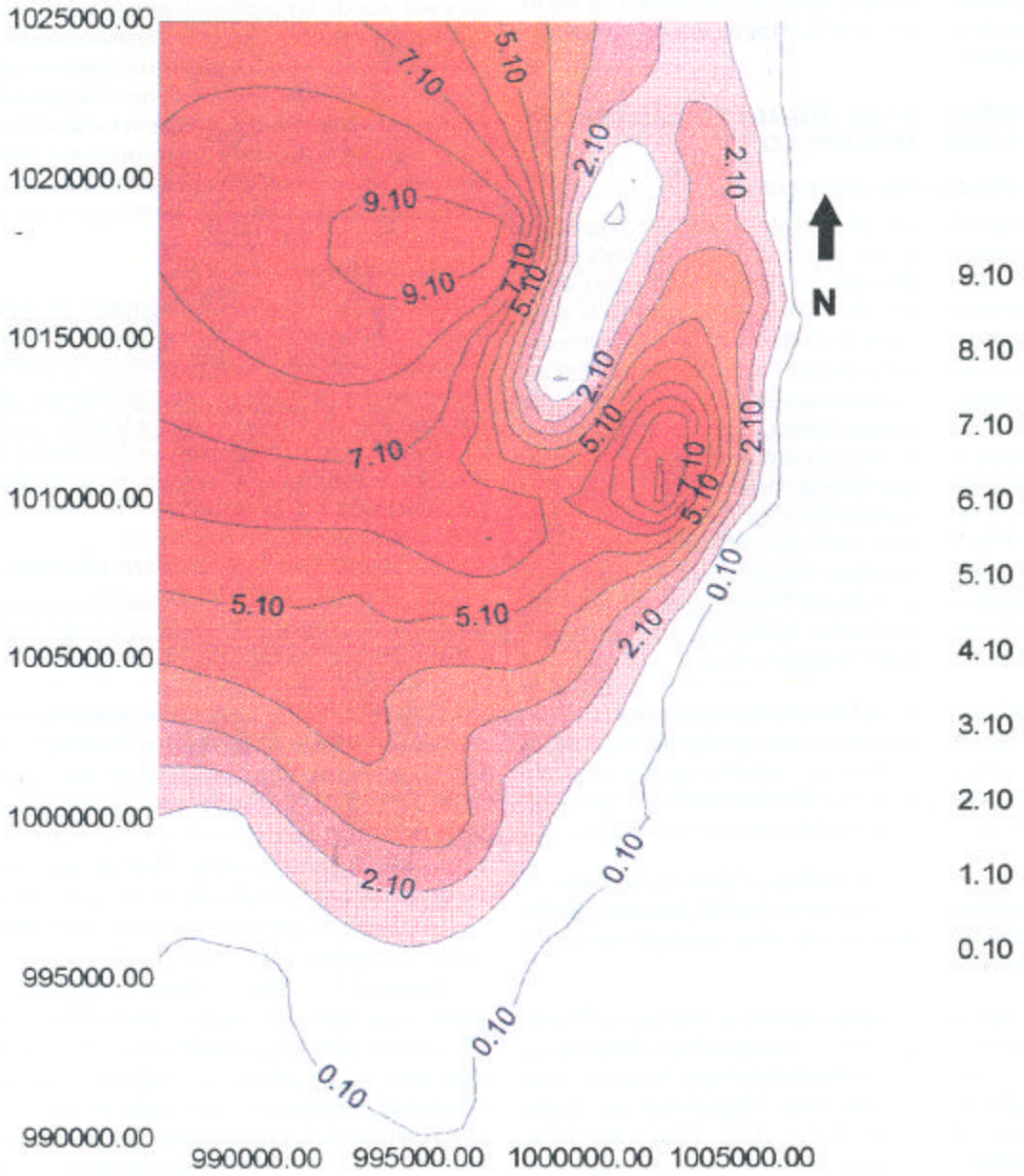


FIGURA 3.10 MAPA DE ISOPERIODOS FUNDAMENTALES DEL DEPÓSITO

dominio de la respuesta para los períodos (o frecuencias) en los cuales la señal de entrada traiga más energía. Para esta interpretación se recurre a los espectros de respuesta en cada sitio, los cuales indican claramente los períodos de vibración de máxima respuesta en cada caso.

3.3.5 *Tipificación de la respuesta dinámica por zonas*

Con el fin de tratar de tipificar la respuesta para cada una de las zonas que presenta un comportamiento dinámico diferente, se seleccionaron los sondeos más representativos de cada zona y aquellos que llegaron a mayores profundidades.

Los sondeos seleccionados como típicos de las diferentes zonas de la ciudad se muestran en la Tabla 3.2.

Para cada uno de estos sondeos se realizó un análisis de sensibilidad con la profundidad de la roca base.

La Figura 3.11 presenta a manera de ilustración los resultados obtenidos en términos de espectros de respuesta para los tres sismos de diseño establecidos y para las diferentes profundidades identificadas como representativas para la zona asociada al sondeo de INGEOMINAS. Como puede apreciarse en términos muy generales la respuesta de los depósitos profundos no es muy sensible a la profundidad de la roca base siempre y cuando se mantengan dentro de ciertos límites. Esto trae como consecuencia directa que la respuesta de toda una zona estará controlada más por el tipo de suelo de los estratos superficiales (tal vez los primeros 30 a 50 m) que por la profundidad de la roca base, cuando esta esté por encima de un valor dado.

CÓDIGO DEL SONDEO	LOCALIZACIÓN	PROFUNDIDAD (M)
N9A	Cll. 126 - Cra. 29	190
N14	Av. Cundinamarca - Cll. 139	246
N48	Universidad Agraria	130
N49	Cra. 30 - INGEOMINAS	180
N33	Monumento los Héroes	100
N43	Av. 1 de Mayo - Cra. 30	100
N27	Parque Timiza	130
N51	Aeropuerto El Dorado	250

TABLA 3.2 SONDEOS SELECCIONADOS COMO TIPICOS

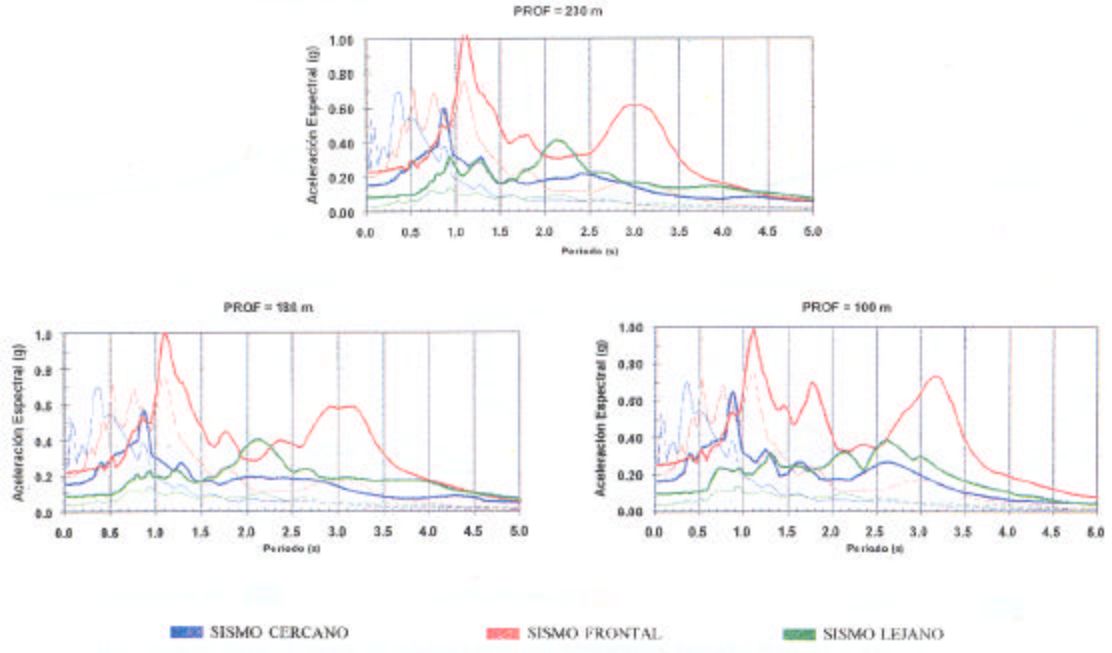


FIGURA 3.11 ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL SONDEO No.49 - INGEOMINAS

Finalmente y para estudiar lo que pasa a medida que la profundidad del depósito disminuye, es decir en cercanías a los cerros y suponiendo que el tipo de suelo se mantiene similar a los existentes en las zonas de mayor profundidad (lo cual se ha encontrado que no es del todo cierto), se seleccionó el sondeo de INGEOMINAS para adelantar corridas suponiendo que el basamento rocoso se encuentra a muy poca profundidad (20 m, 40 m, 60 m y 80 m). La Figura 3.12 presenta los resultados correspondientes.

Estas figuras dan una idea de los efectos que pueden presentarse, cuando un depósito de suelo se va encontrando con la formación rocosa inferior y el depósito va disminuyendo en espesor. Estos resultados se utilizan más adelante al momento de elaborar un mapa de microzonificación de la ciudad.

3.4 *RESPUESTA SÍSMICA MEDIANTE MODELOS BIDIMENSIONALES*

La respuesta dinámica de los depósitos en la zona plana de la ciudad debería estudiarse en realidad mediante modelos tridimensionales dada la forma de la cuenca y la posible interacción de formaciones particulares como la de los cerros de Suba. Las metodologías actualmente disponibles, sin considerar por supuesto las técnicas de modelación física que implican de por sí complicaciones considerables, están basadas principalmente en el método de los elementos finitos. Una modelación tridimensional de la cuenca de Bogotá mediante elementos finitos implicaría un número bastante grande de elementos, considerando por un lado la necesidad de modelar al menos los cambios importantes en la estratigrafía de las diferentes zonas y por otro la limitación de no definir elementos muy deformados geométricamente. Estas dos limitaciones implican de por sí, o bien una pérdida casi total de la precisión en la modelación de la estratigrafía o una red de muchos cientos de miles de elementos, lo cual está por fuera del alcance del presente proyecto.

Ante esta situación se recurrió de manera simplificada a los modelos unidimensionales, que como se demostró en el numeral anterior arrojan resultados bastante aceptables que pueden utilizarse en la generación de recomendaciones prácticas muy concretas.

Como etapa intermedia entre los modelos unidimensionales y tridimensionales están los modelos bidimensionales. Estos son aplicables cuando la hipótesis de estado plano de deformaciones resulta válida. Para el caso de la geometría de la cuenca de Bogotá, podría

FIGURA 3.12
ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL SONDEO N49 - INGEOMINAS
SUPONIENDO BASAMENTO ROCOSO A POCA PROFUNDIDAD

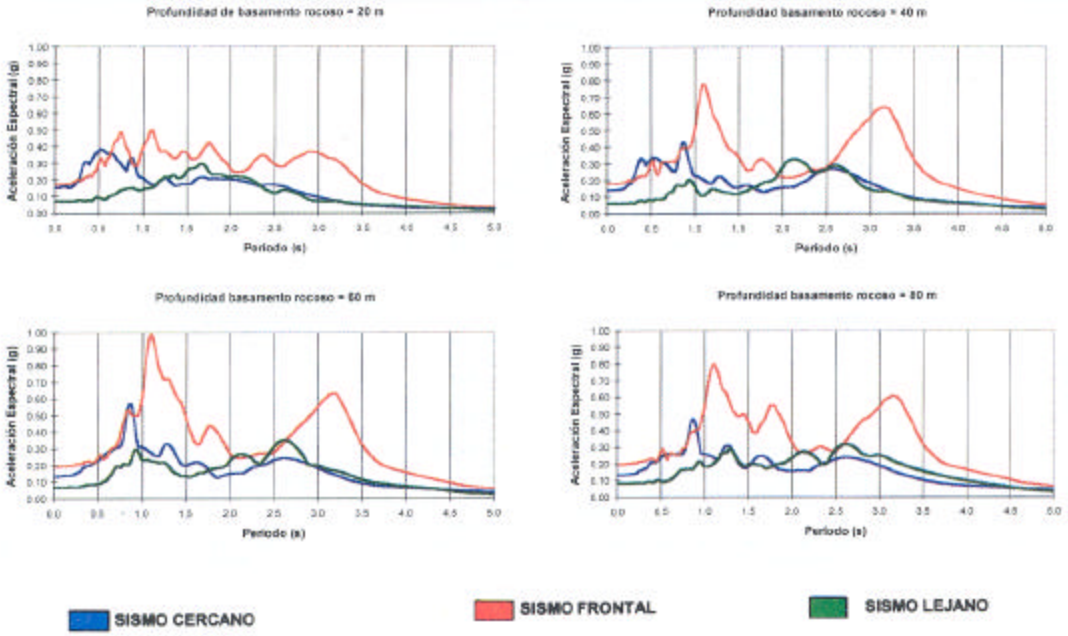


FIGURA 3.12 RESULTADOS OBTENIDOS CON ESPESORES DE PROFUNDIDAD 20,40,60, 80M. MANTENIENDO LAS CARACTERÍSTICAS DEL SONDEO DEL INGEOMINAS

pensarse en la posibilidad de estudiar modelos bidimensionales tomando secciones en la dirección oriente-occidente. Hacia la zona central de la ciudad (Calle 26), la hipótesis deja de ser válida, no por la forma de la cuenca, sino por el cambio drástico que se presenta en el tipo de suelo, lo que implica de entrada un problema tridimensional. Por lo anterior, la única zona donde estrictamente podría pensarse en la realización de modelos bidimensionales es en la zona norte de la ciudad, entre calle 127 y la Quebrada Torca aproximadamente.

3.4.1 Forma de la cuenca y secciones para el análisis

Usando el corte realizado de oriente a occidente por la calle 170 entre los cerros orientales de la ciudad y los cerros de Suba, se procedió a elaborar un modelo de "Elementos Finitos" del depósito de suelo utilizando el generador de mallas del programa ANSYS. El análisis se llevó a cabo mediante el programa de computador QUAD4M. Este programa utiliza un esquema de solución de las ecuaciones de movimiento paso a paso en el tiempo y mediante un proceso iterativo en las propiedades del suelo, teniendo en cuenta las no-linealidades en el proceso de propagación ondulatoria. El programa incorpora amortiguamiento independiente en cada uno de los elementos del continuo, fronteras absorbentes de manera que el semiespacio infinito por debajo de la malla no necesita suponerse como rígida sino que efectivamente se incluyen sus propiedades en el modelo y puede incluso especificarse las velocidades de onda de compresión y de corte y la densidad de este material. El programa involucra además un nuevo método para la formulación de las matrices de amortiguamiento lo que resulta en una reducción significativa en el amortiguamiento para las altas frecuencias lo que se asociaba comúnmente a la formulación de amortiguamiento tipo Rayleigh.

3.4.2 Análisis de respuesta dinámica y resultados

El análisis de la respuesta se llevó a cabo para los sismos de diseño establecidos (Sismo Frontal con aceleración máxima de 0.20g y el Sismo Cercano con aceleración máxima de 0.25g).

La Figura 3.13 presenta la forma de la cuenca utilizada en el análisis y las aceleraciones máximas de respuesta en superficie para cada uno de los sismos. En esta figura pueden evidenciarse las amplificaciones locales que ocurrirían en la aceleración máxima en superficie por aspectos bidimensionales.

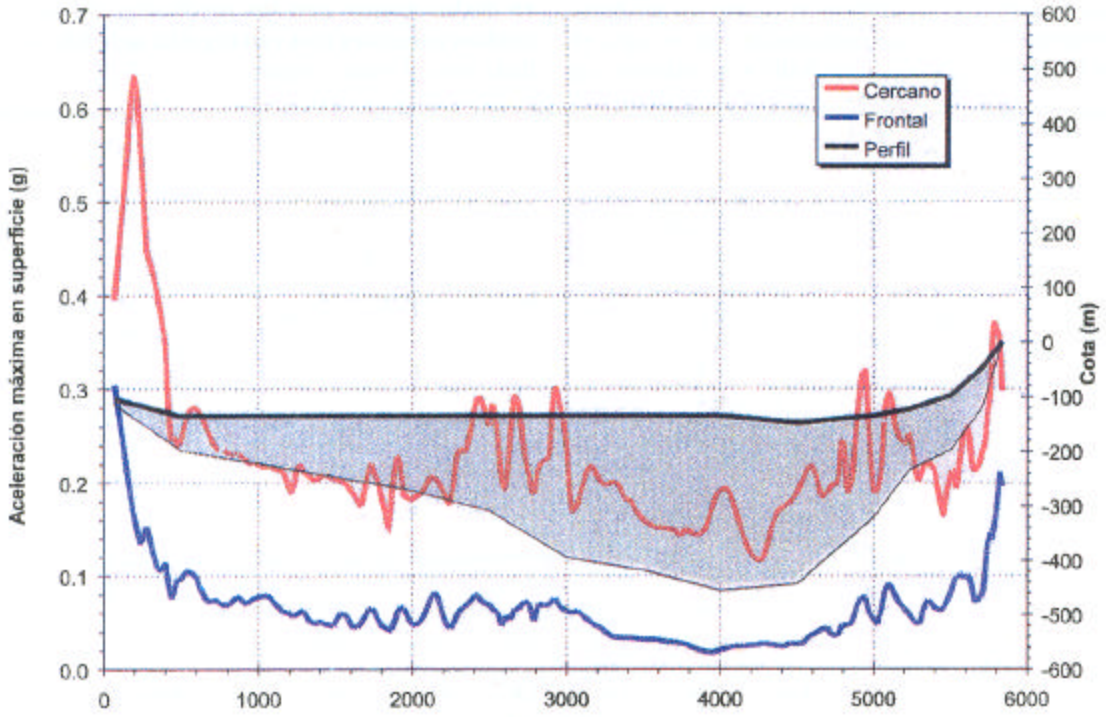


FIGURA 3.13 FORMA DE LA CUENCA UTILIZADA EN EL ANÁLISIS Y LAS ACELERACIONES MÁXIMAS DE RESPUESTA EN SUPERFICIE PARA CADA UNO DE LOS SISMOS

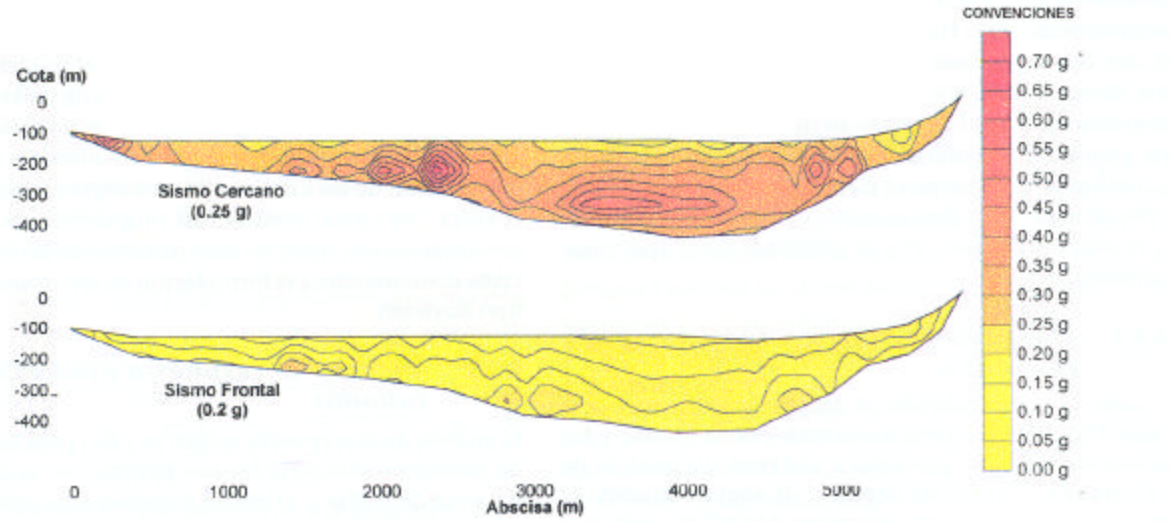


FIGURA 3.14 MAPAS DE ISOACELERACIONES HORIZONTALES MÁXIMAS EN LA SECCIÓN DE ANÁLISIS PARA CADA UNO DE LOS SISMOS

Por otro lado en la Figura 3.14 se presentan los mapas de isoaceleraciones horizontales máximas en la sección de análisis para cada uno de los sismos. De nuevo se mantiene la escala en la figura para efectos comparativos.

3.4.3 Efectos bidimensionales en la respuesta

Para poder establecer las diferencias entre los modelos unidimensionales y los bidimensionales, se escogió el sitio de UNIAGRARIA (sondeo N48) y se elaboró un modelo unidimensional simplificado (utilizando las mismas capas de suelo del modelo bidimensional para este sitio). Con base en esta corrida con estratigrafía simplificada y la corrida original con la estratigrafía detallada se elaboró la Figura 3.15 en la cual se comparan las tres respuestas, es decir la dada por el modelo bidimensional en dicho punto, con los resultados de las corridas unidimensionales con estratigrafía simplificada y detallada para el sismo cercano.

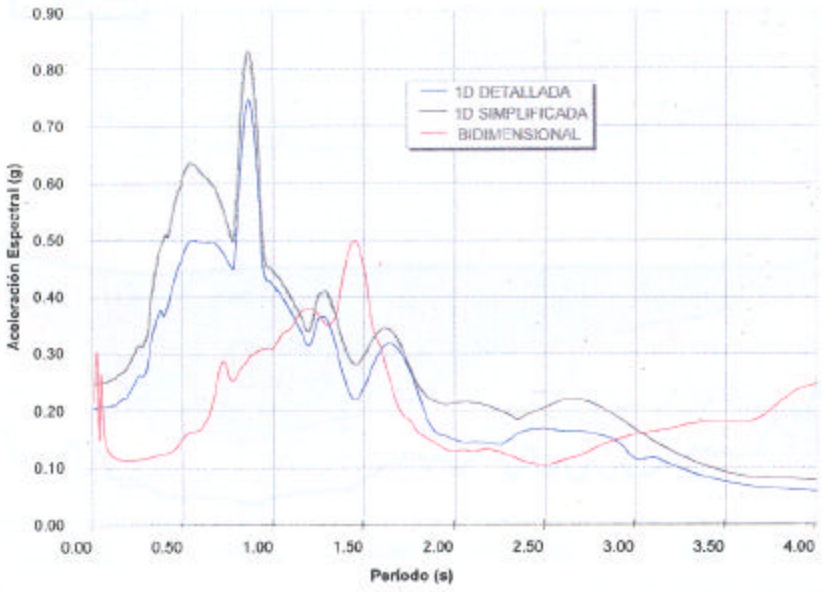


FIGURA 3.15 ESPECTROS DE RESPUESTA SONDEO N48 UNIAGRARIA SISMO CERCANO (0.25g)

3.4.4 *Amplificaciones locales en zonas de los cerros*

Con el fin de conocer las amplificaciones locales, los efectos topográficos y en general los llamados efectos de sitio en las zona de los cerros se seleccionaron tres secciones típicas denominadas Corte 1 - Vereda Torca, al norte de la ciudad, Corte 2 - Parque Nacional y Corte 3 - Quebrada Bolonia en la zona sur de la ciudad.

Cada una de estas secciones se modeló mediante elementos finitos suponiendo un empotramiento en la base y estimando la pendiente del talud posterior (flanco oriental) de acuerdo con consideraciones geológicas, tomando la pendiente promedio de las formaciones correspondientes. El material se consideró, suponiendo un comportamiento elástico para lo cual se estimaron unos valores típicos de los módulo de corte Go con base en valores reportados en la literatura (véase por ejemplo Jumikis, 1983) . La densidad del material se estimó en 2400 kg/m^3. A partir de estos valores se estimaron las velocidades de onda de cortante, Vs. Se conformaron así tres modelos diferentes con aproximadamente 300 elementos cada uno. El análisis se realizó utilizando el programa de computador QUAD4M, para los tres sismos de diseño establecidos. En las Figuras 3.16 a 3.18 se presentan los resultados para el Corte 3 (Quebrada Bolonia), estos incluyen una gráfica con la aceleración máxima horizontal para todos los puntos superficiales de la red, una gráfica de isoaceleraciones en el cuerpo del cerro y una figura donde se presenta la variación de la forma de los espectros de respuesta en diferentes puntos superficiales del modelo.

Con base en los resultados presentados pueden establecerse las siguientes conclusiones con respecto a los efectos topográficos en los cerros de la ciudad:

La aceleración máxima es muy sensible a pequeños cambios en la topografía local. Normalmente cualquier protuberancia o saliente topográfica tiende a producir una amplificación considerable mientras que cualquier valle o depresión tiende a deamplificar la aceleración máxima.

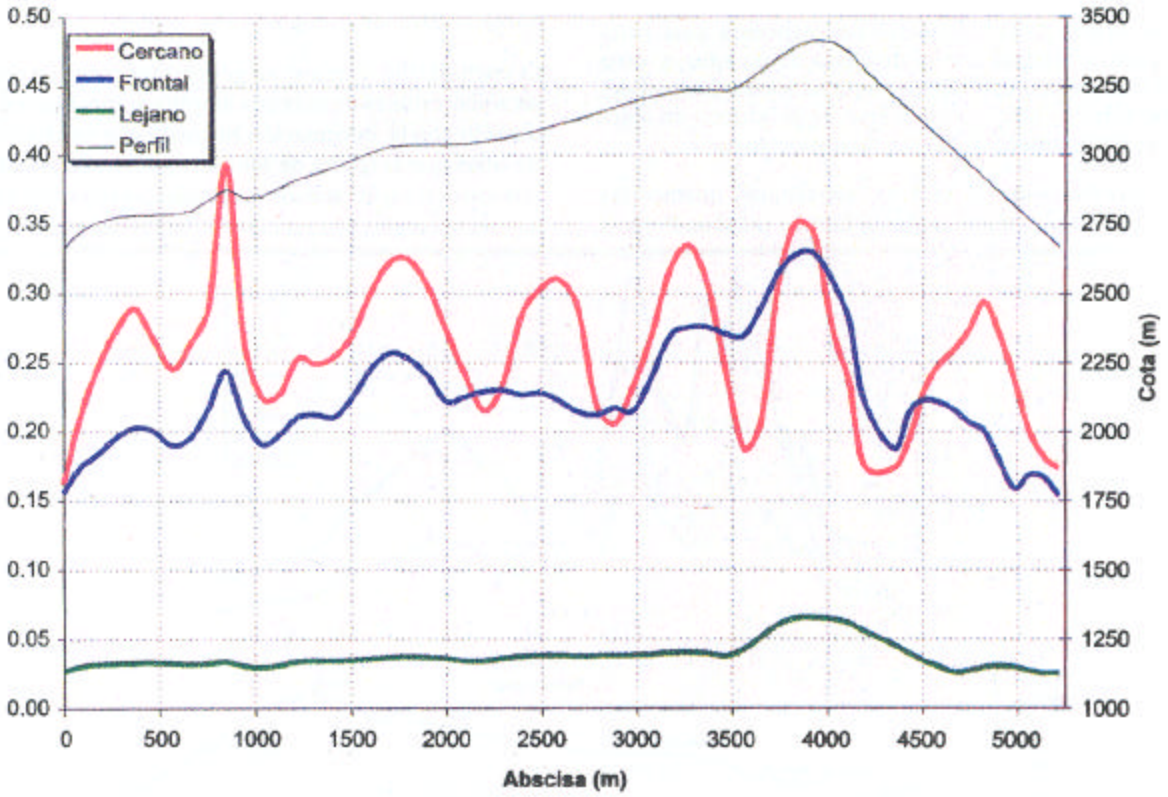


FIGURA 3.16 CORTE No. 3 QUEBRADA BOLONIA ACELERACIONES MÁXIMAS EN SUPERFICIE PARA SISMO DE DISEÑO

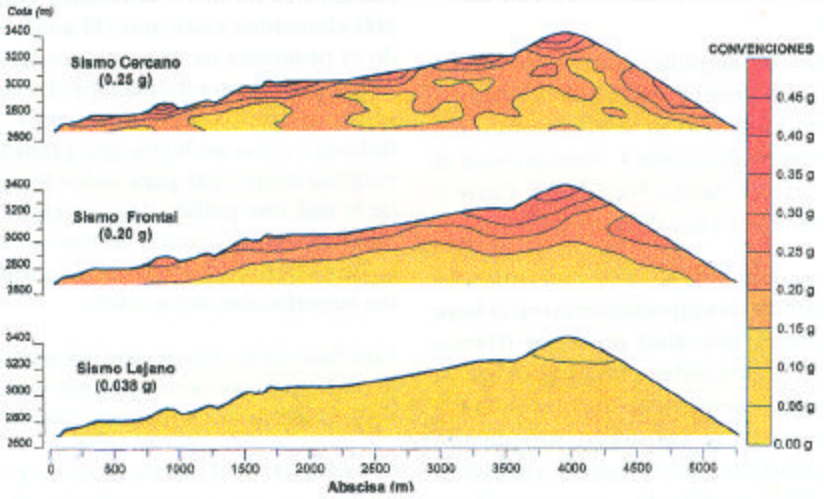


FIGURA 3.17 CORTE No. 3 QUEBRADA BOLONIA MAPAS DE ISOACELERACIONES MÁXIMAS PARA SISMOS DE DISEÑO

Los sismos Cercano y Frontal dominan la respuesta sísmica de los cerros. Es claro que el sismo Lejano no tendría efectos de consideración en las construcciones de los cerros y el diseño de las mismas en esta zona queda controlado por sismos cercanos o regionales intensos.

Las formas de los espectros de respuesta van cambiando a medida que se desplaza de un sitio a otro del cerro bajo estudio. Aunque la forma general del espectro tiende a mantenerse, se producen en algunos casos amplificaciones de importancia.

Para efecto del diseño de los taludes mismos, las aceleraciones de entrada en la roca pueden llegar a amplificarse considerablemente. Por ejemplo una aceleración máxima en la señal de roca de 0.20g, puede llegar a producir una aceleración máxima en la superficie del orden de 0.30g. Una aceleración del orden de 0.25g puede llegar a producir por su parte una aceleración máxima en sitios específicos del talud del orden de 0.30g ó 0.35g.

La cuchilla del cerro y en general los picos presentan las zonas críticas de máxima amplificación. Esto está de acuerdo con la información histórica que establece entre otras que la iglesia de Monserrate ha sufrido daños intensos en varios sismos en el pasado, por estar ubicada esta construcción en el sitio crítico del perfil.

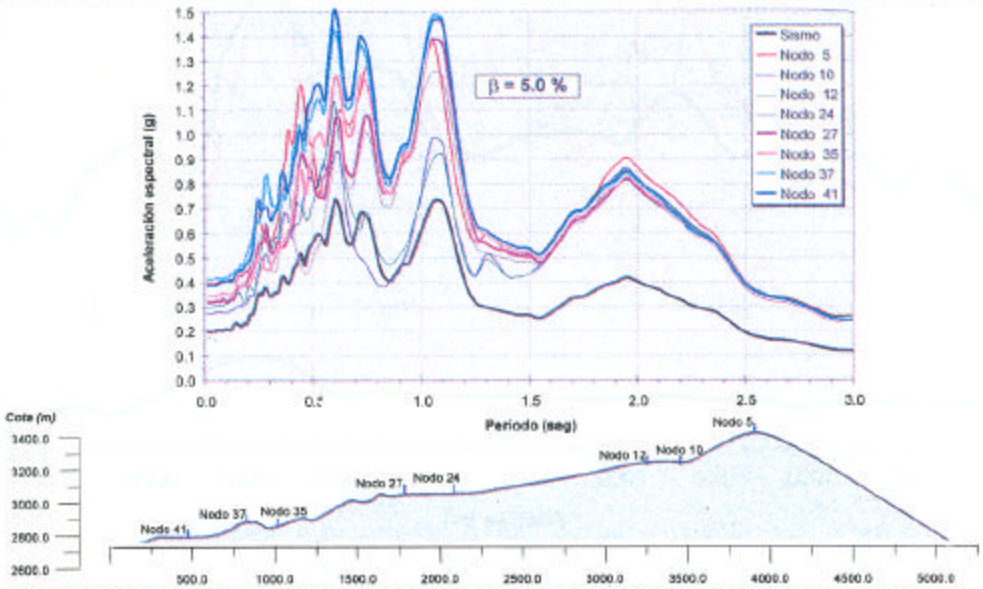


FIGURA 3.18 CORTE No. 3 QUEBRADA BOLONIA SISMO FRONTAL (0.20g) ESPECTROS DE RESPUESTA

3.5 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y RECOMENDACIONES

Con base en la información disponible en el estudio y en especial en la presentada en los numerales anteriores se procedió a elaborar el Mapa de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá (Figura 3.19 - Mapa No.3 a escala 1:50.000).

La ciudad se dividió en cinco zonas principales a saber :

3.5.1 Zona 1 - Cerros

La zona de los cerros se caracteriza por la presencia de formaciones rocosas de suelos con capacidad portante relativamente mayor. Puede presentar amplificaciones locales de aceleración por efectos topográficos lo cual deberá evaluarse en cada caso específico. Existen zonas de inestabilidad por efectos de las pendientes, afectadas por lluvias, fuentes de aguas locales y sismos. Debe utilizarse el mapa de susceptibilidad al deslizamiento que se encuentra en la Figura 3.20. Requiere estudios especiales de amplificación y estabilidad para la construcción de obras.

3.5.2 Zona 2 - Piedemonte

Está conformada por la zona de transición entre los cerros y la zona plana y consta principalmente de depósitos coluviales y conos de deyección de materiales con una elevada capacidad portante en general, pero con estratigrafías heterogéneas con predominio de gravas, arenas y limos y depósitos ocasionales de arcillas de poco espesor.

3.5.3 Zona 3 - Lacustre A

Está conformada principalmente por depósitos de arcillas blandas con profundidades mayores que 50 m. Pueden aparecer depósitos ocasionales de turbas y o arenas de espesor intermedio a bajo. Presentan una capa superficial preconsolidada de espesor variable y no mayor a 10 m.

3.5.4 Zona 4 - Lacustre B

Tiene las mismas características de la Zona 3 - Lacustre A pero los depósitos superficiales (los primeros 30 a 50 m) son consistentemente más blandos que los anteriores. Además, corresponde a la zona en que la profundidad hasta la roca base es mucho mayor (del orden de 200 m hasta 400 m o más)

3.5.5 Zona 5 - Terrazas y Conos

Se presenta predominantemente en la zona sur de la ciudad y está conformada por suelos arcillosos secos y preconsolidados de gran espesor, arenas o limos o combinaciones de ellos, pero con capacidad portante mayor que los depósitos de las zonas Lacustres A y B. El límite entre las zonas 4 y 5 no está muy bien definido por lo cual se requiere de una mejor delimitación de la zona de transición.

Se ha denominado la **Zona 5A - Terrazas y Conos potencialmente licuables** a una subdivisión de esta zona, con los mismos espectros de diseño que la Zona 5, pero en la cual las características predominantes de las arenas limpias, finas y superficiales, combinadas con la posibilidad de niveles freáticos altos redundan en una alta susceptibilidad a la licuación ante la ocurrencia de un sismo intenso. Debe evaluarse específicamente el potencial de licuación cuando se deseen adelantar construcciones en esta zona.

La caracterización presentada de cada una de las zonas está relacionada directamente con las características de los depósitos de los primeros 30 a 50 m de profundidad que son los que en últimas controlan la respuesta sísmica de cada sitio en particular. Se encontró que el parámetro que define claramente cuando un depósito pertenece a una zona u otra es el módulo de corte inicial Go.

Cada zona se caracteriza por una respuesta sísmica diferente al considerar el espectro de diseño que se recomienda para cada una de ellas. En las Figuras 3.21 a 3.25 se han agrupado los espectros de respuesta de los sondeos que quedan ubicados en cada una de las zonas 1 a 5 mencionadas. En las mismas figuras se han graficado los espectros recomendados para diseño en cada zona. Como puede verse se han despreciado algunos picos puntuales y se ha establecido un comportamiento muy normalizado tal como debe ser una recomendación de diseño.

En la Figura 3.26 se presenta la recomendación final de diseño conformada por los espectros de las diferentes zonas 1 a 5 mencionadas. En la Figura se incluye como referencia el espectro de diseño considerando un suelo S4 (AIS, 1996), o sea un coeficiente de suelo igual a 2.0.

La zona con períodos superiores a 2.5 seg que corresponde en general a estructuras muy especiales, de alto período de vibración fundamental, se presenta achurada de manera que se indica que en esta zona deben hacerse estudios de respuesta especiales. El tipo de estructura que tenga estas características amerita la realización de un estudio específico. La información dada por el espectro para estructuras en este rango debe utilizarse apenas como un indicativo de la fuerza que podría esperarse.

Por otro lado los espectros propuestos para cada una de las 5 zonas pueden plantearse en términos de ecuaciones. Para este efecto se utilizan las recomenda-

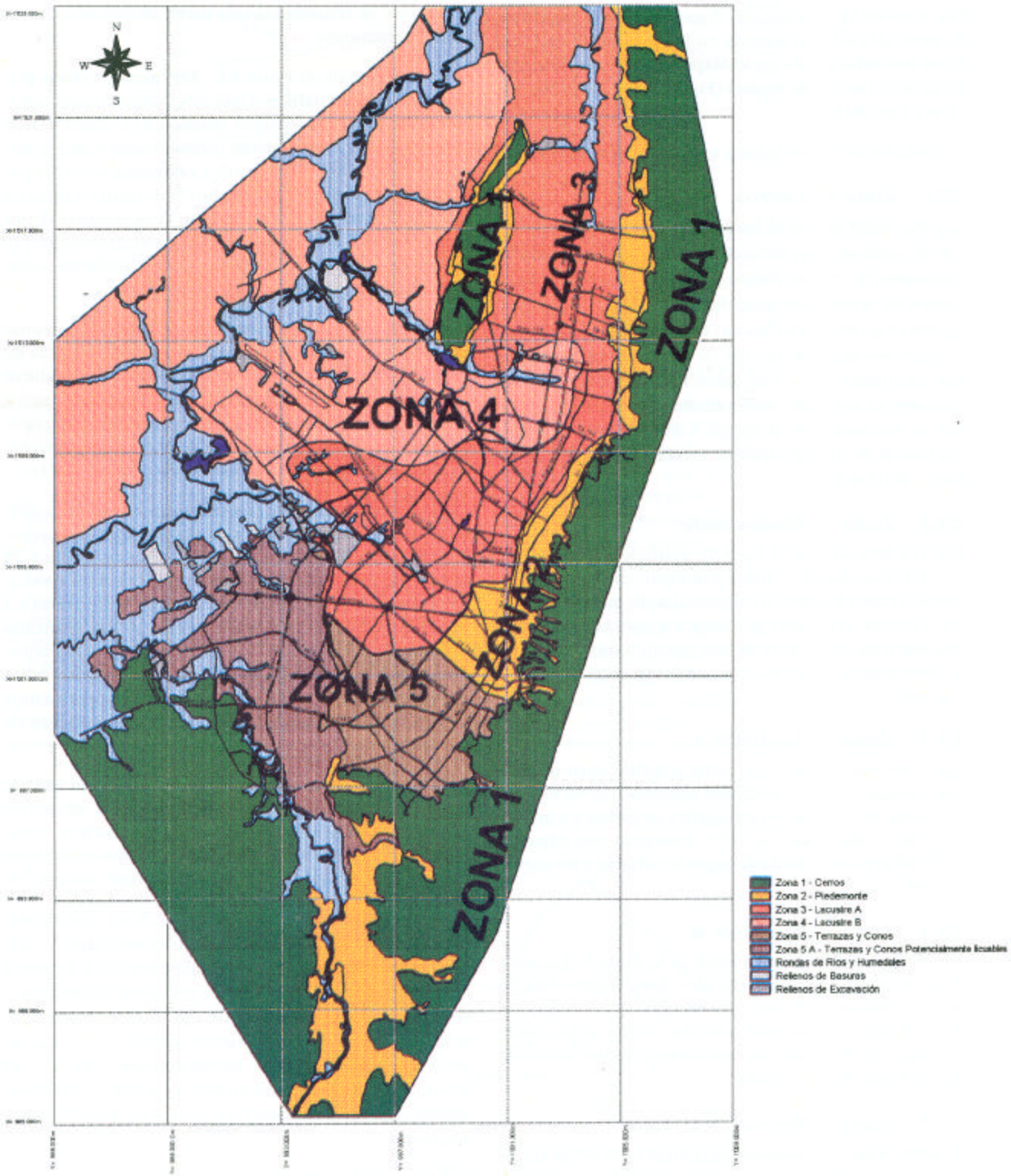


FIGURA 3.19 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

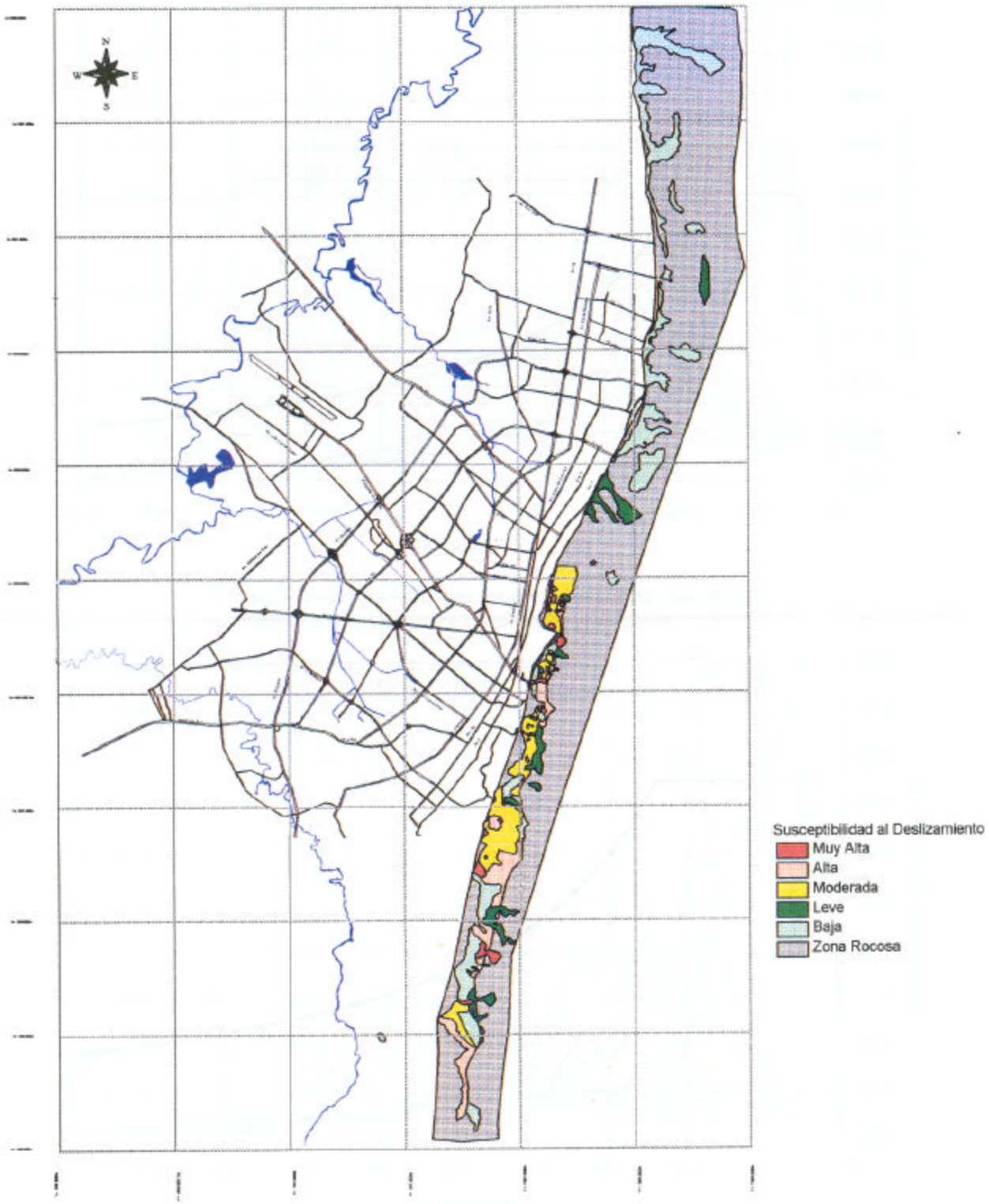


FIGURA 3.20 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO TALUDES NO INTERVENIDOS

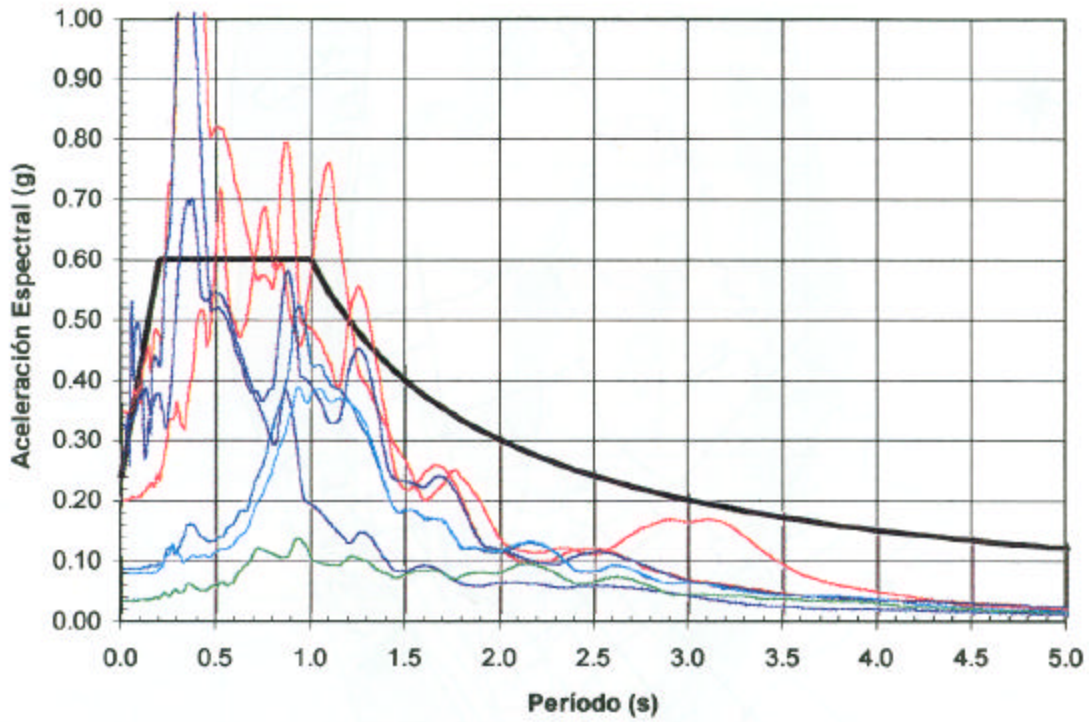


FIGURA 3.21 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO ZONA 1-CERROS

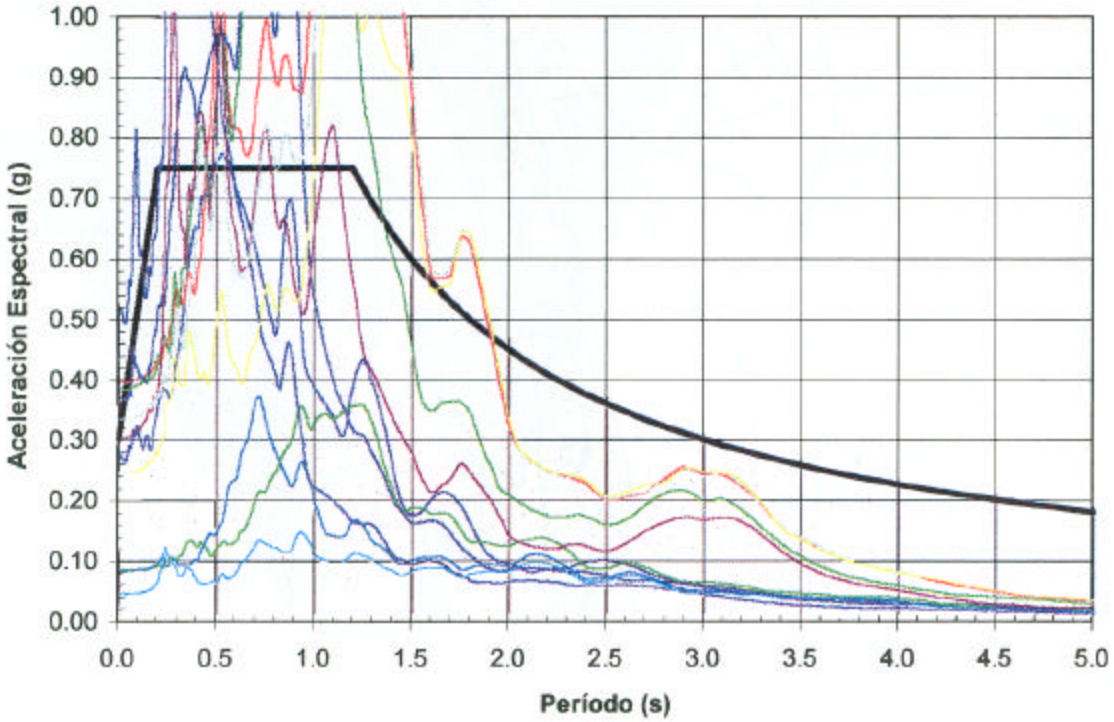


FIGURA 3.22 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO ZONA 2 - PIEDEMONTE

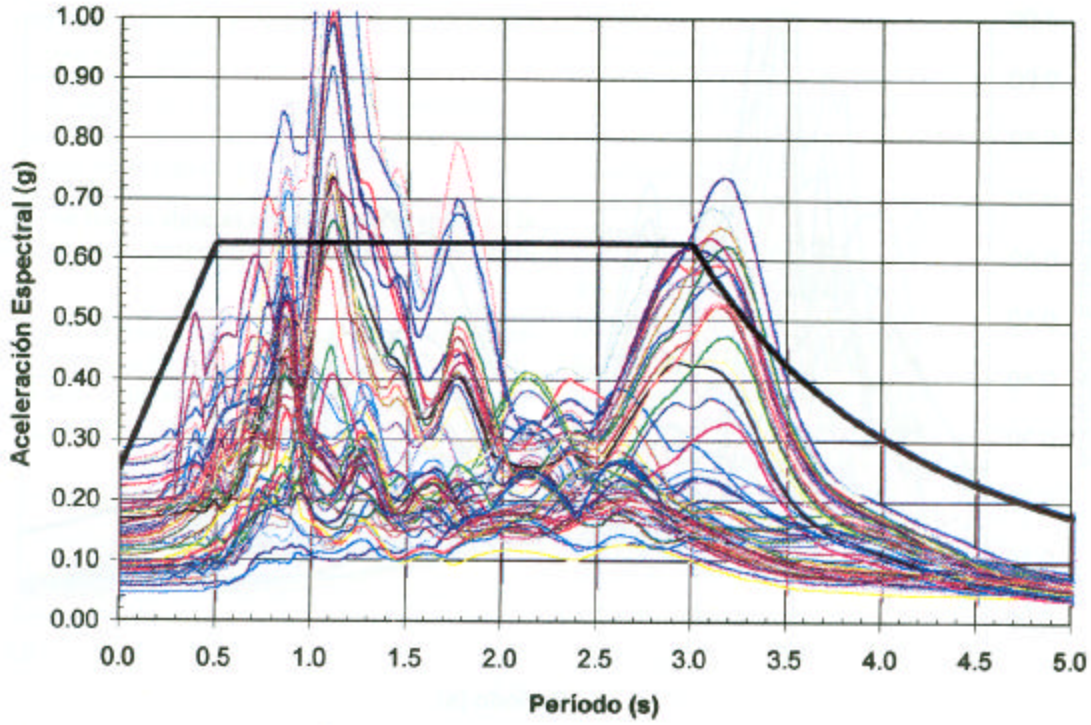


FIGURA 3.23 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO ZONA 3 - LACUSTRE A

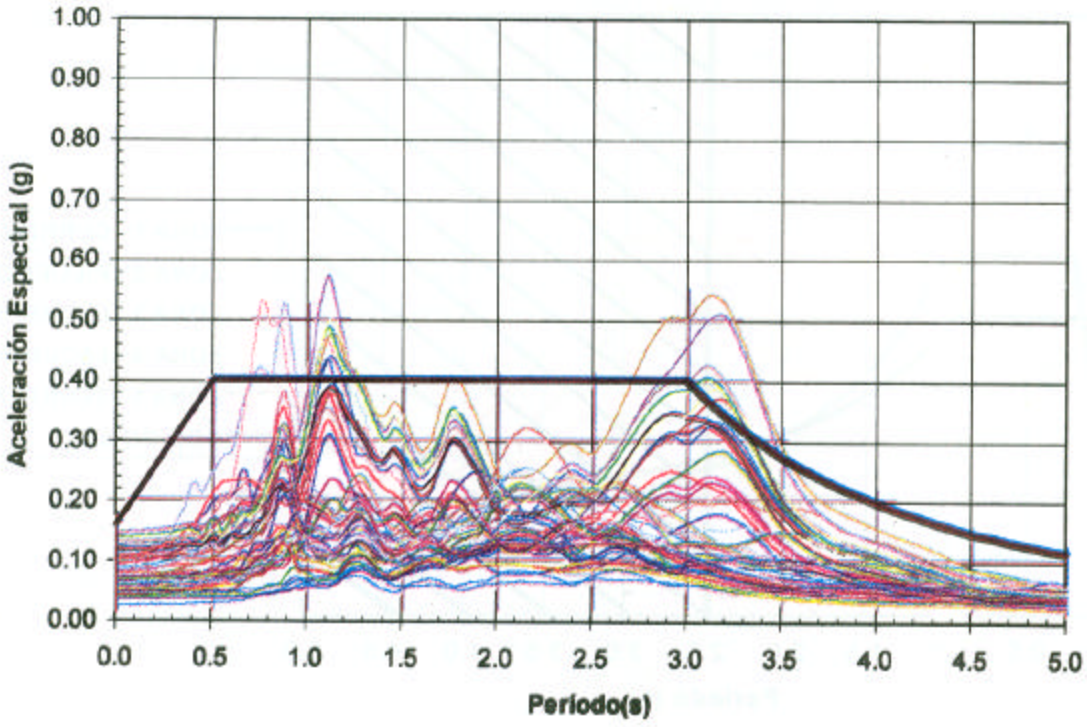


FIGURA 3.24 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DESEÑO ZONA 4 - LACUSTRE B

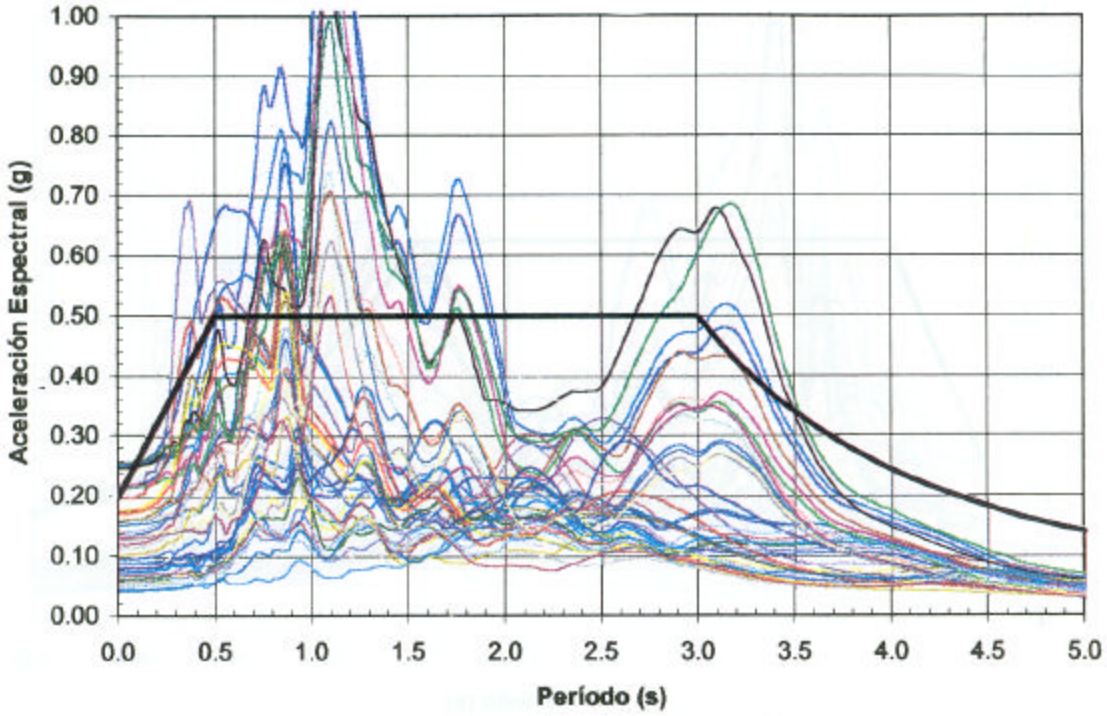


FIGURA 3.25 ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO ZONA 5 - TERRAZAS Y CONOS

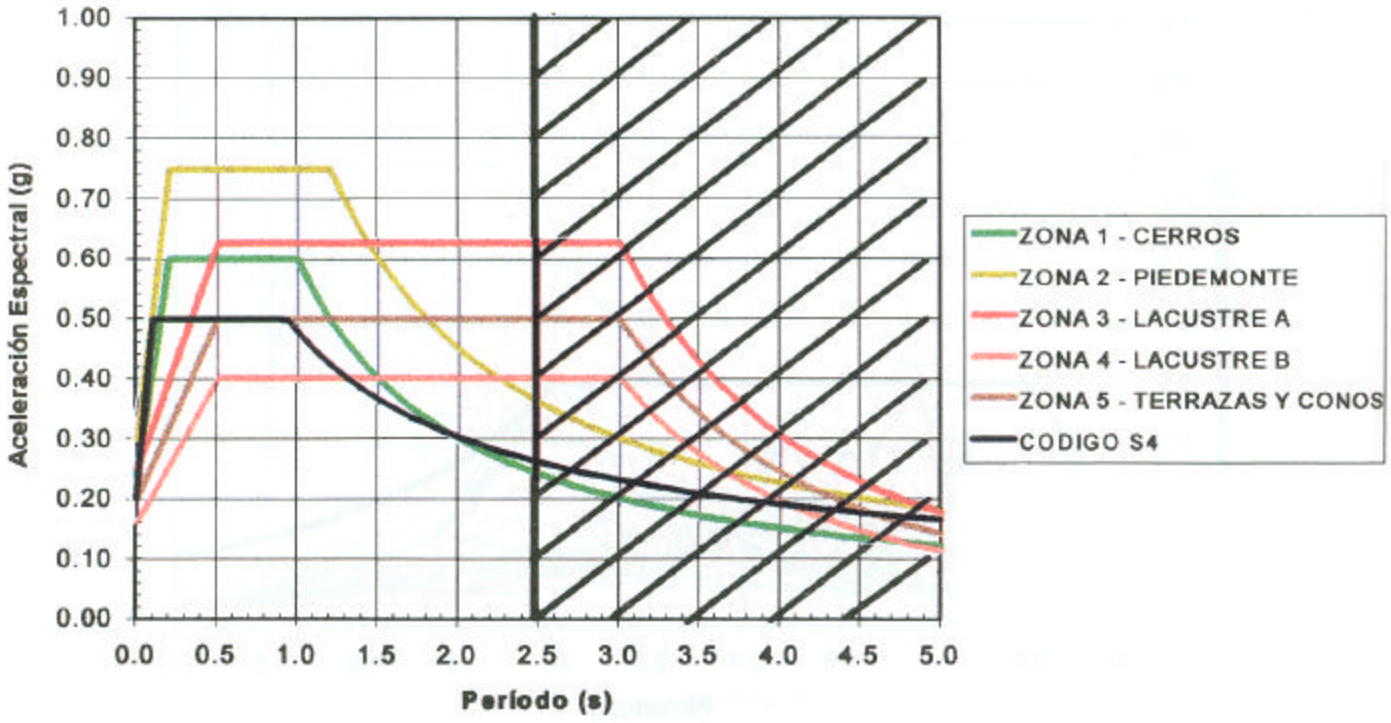


FIGURA 3.26 ESPECTROS DE DISEÑO ZONA 6 - LACUSTRE B

ciones generales dadas por Dobry et al (1987) y que probablemente harán parte de muchos códigos de construcción de otros países en el futuro, incluido probablemente los Estados Unidos.

La propuesta adaptada a los resultados del presente estudio está conformada por las ecuaciones y parámetros que se indican en la Figura 3.27.

Finalmente se hacen algunas aclaraciones respecto a la aplica-bilidad de las anteriores recomendaciones de diseño:

- En la Zona 1 - Cerros, debe consultarse en forma complementaria el Mapa de Susceptibilidad al Deslizamiento. Además deben realizarse estudios particulares de amplificación local y estabilidad para la construcción de obras.

- En la Zona 5A debe evaluarse el potencial de licuación para la construcción de obras.

- Para la zona de períodos mayores que 2.5 seg y que corresponde a estructuras especiales deben realizarse estudios locales de respuesta para determinar la forma del espectro de diseño en ese rango de períodos.

- En todos los límites de las zonas debe establecerse una franja de transición de unos 500 m a cada lado. En estas zonas de transición se debe tomar la aceleración de diseño más exigente que resulte de los espectros de diseño de las zonas adyacentes.

- Podrán utilizarse fuerzas de diseño menores a las que resultan de los espectros de diseño recomendados, siempre y cuando estos valores se demuestren mediante análisis de respuesta de perfiles debidamente estudiados.

- Para efectos de la aplicación de los requisitos complementarios del Código Colombiano, la ciudad sigue perteneciendo a una zona de Amenaza Sísmica Intermedia.

- Los valores de Aa y Av dados por el Código no deben emplearse si se va a utilizar el Mapa de Microzonificación propuesto para determinar los espectros de diseño. En ese caso deben utilizarse los coeficientes Am y An equivalentes.

- Deberá tenerse especial cuidado para el diseño de estructuras de corto período en la selección del valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía para el sistema estructural, R. En algunos casos, este valor ha sido incrementado artificialmente en el Código para balancear la forma supuesta del espectro por el Código en este rango de períodos. Se recomienda utilizar un valor de R compatible con el sistema estructural y los materiales que se utilicen.

- Cada una de las Zonas Sísmicas en que se ha dividido la ciudad involucra un valor diferente de Am, que corresponde a la aceleración máxima del terreno para dicha zona. Estos valores de aceleración pueden utilizarse en el diseño de estructuras muy rígidas (de bajo período) o en el diseño de obras geotécnicas como excavaciones, muros de contención, terraplenes y otros.

3.6 REFERENCIAS

Aki, K., 1988. *"Local Site Effects on Ground Motions, Earthquake Engineering And Soil Dynamics II- Recent Advances in Ground motion Evaluation"*. J.L. Von Thun (Editor). Geotechnical Special Publication No.20, Am. Soc. Civil Eng, New York.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 1996. *"Actualización del Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes"*. Estudio presentado al Congreso Nacional para su aprobación. Santafé de Bogotá.

Dobry, R., Vucetic M., 1987. *"Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits"*. In proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of soft soils, Vol. 2, Manual J. Mendoza y Luis Montañez (eds), Mexico.

Idriss I., Sun J., 1992. *"SHAKE91"*. Berkeley, California.

INGEOMINAS, 1993. "Informe del sismo del 18 de Octubre de 1992". Revista de Marzo de 1993. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS - Universidad de los Andes, 1996. *"Microzonificación sísmica"*. Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto No. 11. Santafé de Bogotá.

Leon, G., Minami, T., 1992. *"Estimation of Response Spectrum by Strong Ground Motion and Microtremors at Ashigara Valley"*. International Symposium, The Effect of Surface Geology on Seismic Motion. ESG. Odawara, Japan.

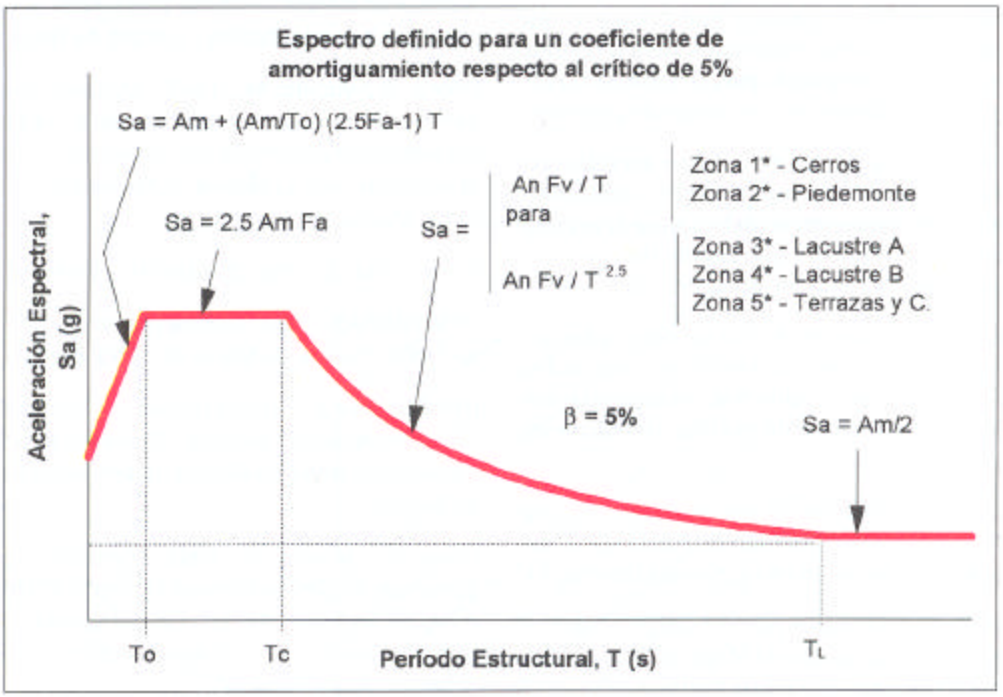
Jumikis, A.R., 1983. *"Rock Mechanics"*. 2nd. Edition, Tinas Tech Publications.

Kanai, K., Tanaka, T., 1961. *"On Microtremors"*. VIII, Bull. Earthquake research Institute. Tokyo University, Japan.

Lachet, C., Bard, P., Y., 1995. *"Theoretical Investigations on the Nakamura's Technique"*. Proceedings : Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Volume II. St.Louis, Missouri.

COEFICIENTES ESPECTRALES PARA DISEÑO

	ZONA 1 CERROS	ZONA 2 PIEDEMONTE	ZONA 3 LACUSTRE A	ZONA 4 LACUSTRE B	ZONA 5 TERRAZAS
To	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50
Tc	1.00	1.20	3.00	3.00	3.00
TL	5.00	6.00	5.71	5.71	5.71
Am	0.24	0.30	0.25	0.16	0.20
An	0.30	0.40	0.30	0.20	0.30
Fa	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fv	2.00	2.25	32.48	31.18	25.98



PARAMETROS

To : Período Inicial
T_c : Período Corto
T_L : Período Largo
Sa : Aceleración Espectral
Am : Aceleración Máxima
An : Aceleración Nominal
Fa : Factor de amplificación de la Aceleración
Fv : Factor de Amplificación de la Aceleración en el rango de velocidades constantes

*NOTA: Las zonas corresponden al mapa de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá

FIGURA 3.27 ECUACIONES Y PARÁMETROS DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO PARA LAS ZONAS SÍSMICAS DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

Lermo, J., Chávez-García, J., 1994-a. *"Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?"*. Bulletin of Seismological Society of America, Vol.84, No.5.

Lermo, J., Chávez-García, J., 1994-b. *"Site Effect Evaluation at Mexico City : Dominant Period and Relative Amplification from Strong motion and Microtremor Record"*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

Meneses, J., 1991. *"Microtrepidaciones : fundamentos y análisis"*. Seminario Internacional sobre Microzonificación. CISMID. Lima, Perú.

Nakamura, Y., 1989. *"A Method for Dynamic Characteristic Estimation of Subsurface Using Microtremors on Ground Surface"*. QR of RTRI 30, No.1.

Nishimura, T., Meneses, J., 1991. *"Aplicaciones de las Microtrepidaciones"*. Seminario Internacional sobre Microzonificación. CISMID. Lima, Perú.

Omori, F., 1908. *"On Microtremors"*. Res. Imp. Earthquake Inv. Comm.

Presidencia de la Republica, 1984 *"Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes"*. Decreto 1400 de 1984.

Seed, H., B., M., Romo, M.,P., Sun, J., I., Jaime, A., Lysmer, J., 1988. *"The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - Relationships between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions"*. Earthquake Spectra, Vol.4.

Seed H. B. & Idriss Y., 1969. *"Influence of Soil Conditions on Ground Motions during Earthquakes"*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Div. SM(1)

Singh, S., K., Lermo, J., Dominguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J., M., Mena, E., Quaas, R., 1988. *"The Mexico Earthquake of September 19,1985 - A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone"*. Earthquake Spectra, Vol.4.

Tamura et al., 1990 ."*Characteristics of Wave Group of Microtremors obtaines by array measurements"*. Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ, 449: 83-91 (in Japanese).

Yamin L., Ojeda. A., 1995. *"Evaluación de Efectos de Sitio en Bogotá : Períodos Dominantes y Amplificaciones Relativas a Partir de Registros Sísmicos y Microtrepidaciones"*. Seminario sobre Microzonificación Sismogeotecnica y Vulnerabilidad de Ciudades , Universidad de los Andes. Jornadas Geotécnicas, Sociedad Colombiana de Ingenieros.

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 en 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 analizar 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 empleando 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.
- 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, 1988).

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 aso-

ciadas 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 tienen un especial significado 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 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.

[1] Un factor de 5 puede interpretarse para el caso de una buena estimación de 1000, como que el valor puede encontrarse dentro de un rango de sobre o infra estimación de 400 a 2000.

- 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.

Esta información se analizó cuidadosamente en conjunto con la suministrada por la Secretaría de Plancación 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.

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

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 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 un área de 405 km^2 sobre un perímetro de la ciudad del orden de 92 km. Algunas tomas 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.

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.

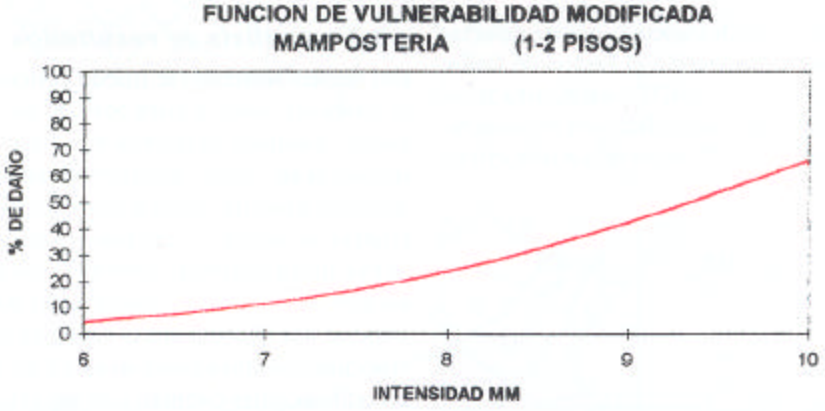
Estos valores de probabilidad de daño para cada valor de intensidad sísmica propuestos por el método ATC-13/FEMA, son basados en las matrices de probabilidad de daños desarrolladas por Whitman et al (1973) y Martel (1964), aplicando la técnica estadística del Método Delphi, en el cual se utilizó el criterio 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 de Trifurnac 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 et al (1984), Steinbrugge (1982), Sauter et al (1978), Petrovsky et al (1985) y 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 permitió 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.



FACTOR DE DAÑO	RANGO	FACTOR CENTRAL	INTENSIDAD MERCALLI MOIFICADA				
			6	7	8	9	10
Leve	(1-10)	0.5	9.1	0.6	0	0	0
Ligero	(1-10)	5	90.5	55.5	10.9	0.5	0
Moderado	(10-30)	20	0.4	43.4	66	22.4	2
Fuerte	(30-60)	45	0	0.5	22.9	65.9	35
Severo	(60-100)	80	0	0	0.2	11.2	62.5
Destrucción	100	100	0	0	0	0	0.5
		%=	4.65	11.68	24.21	43.12	66.65

FIGURA 4.1 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

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 microzonificación 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 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:

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

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 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

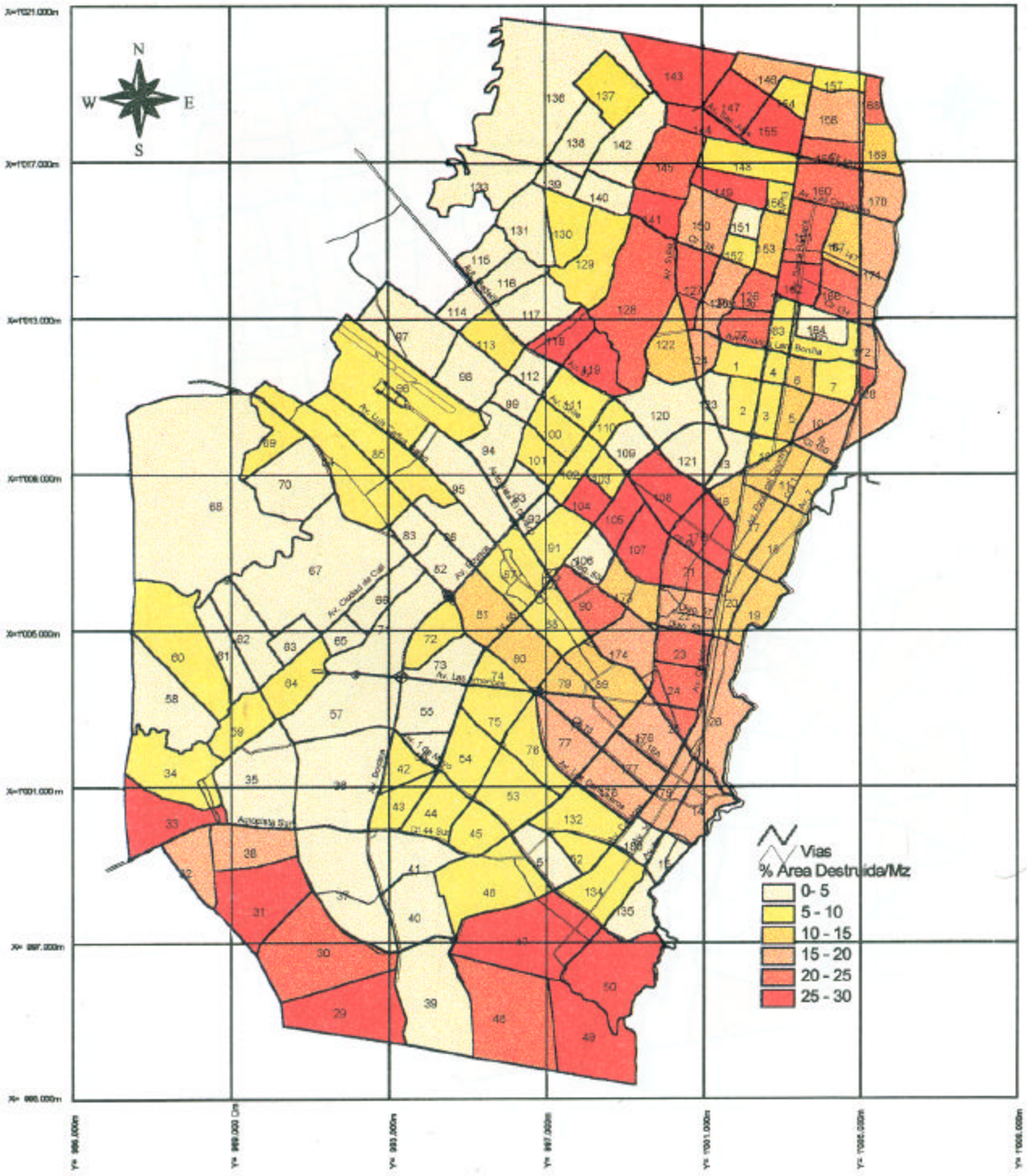


FIGURA 4.2 PORCENTAJE DE ÁREA DESTRUÍDA POR MANZANA SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)

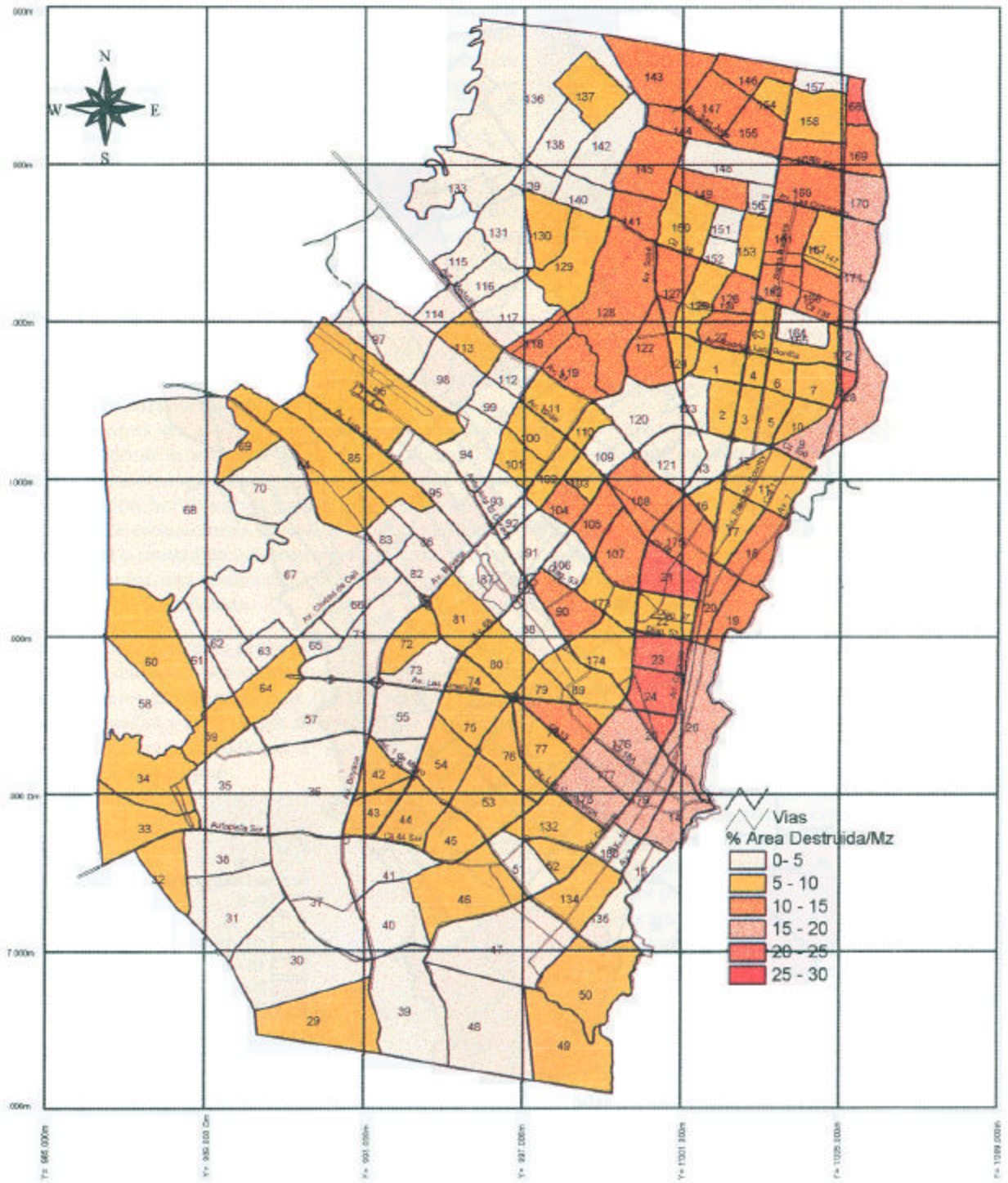


FIGURA 4.3 PORCENTAJE DE ÁREA DESTRUÍDA POR MANZANA SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)

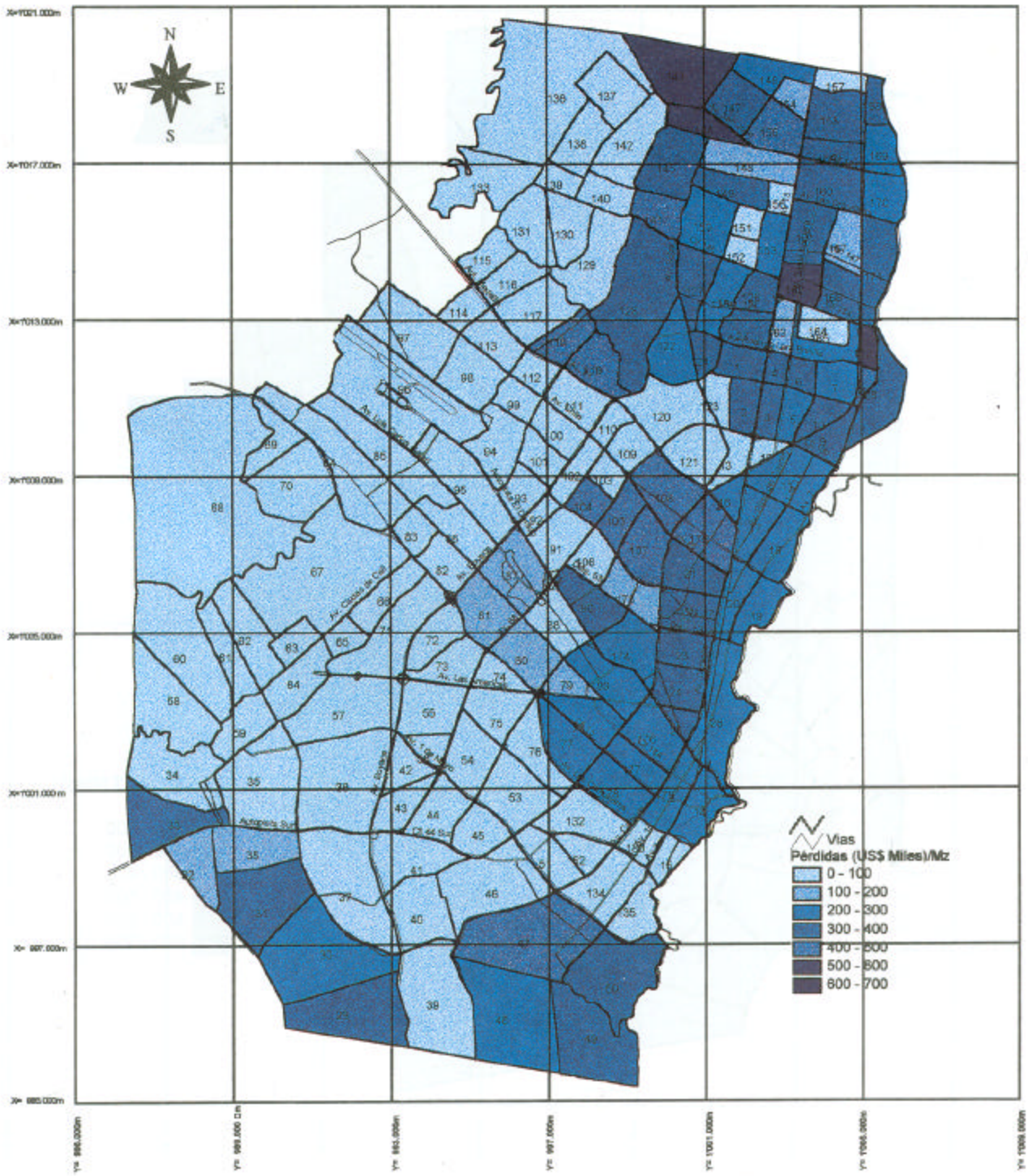


FIGURA 4.4 PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR MANZANA SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)

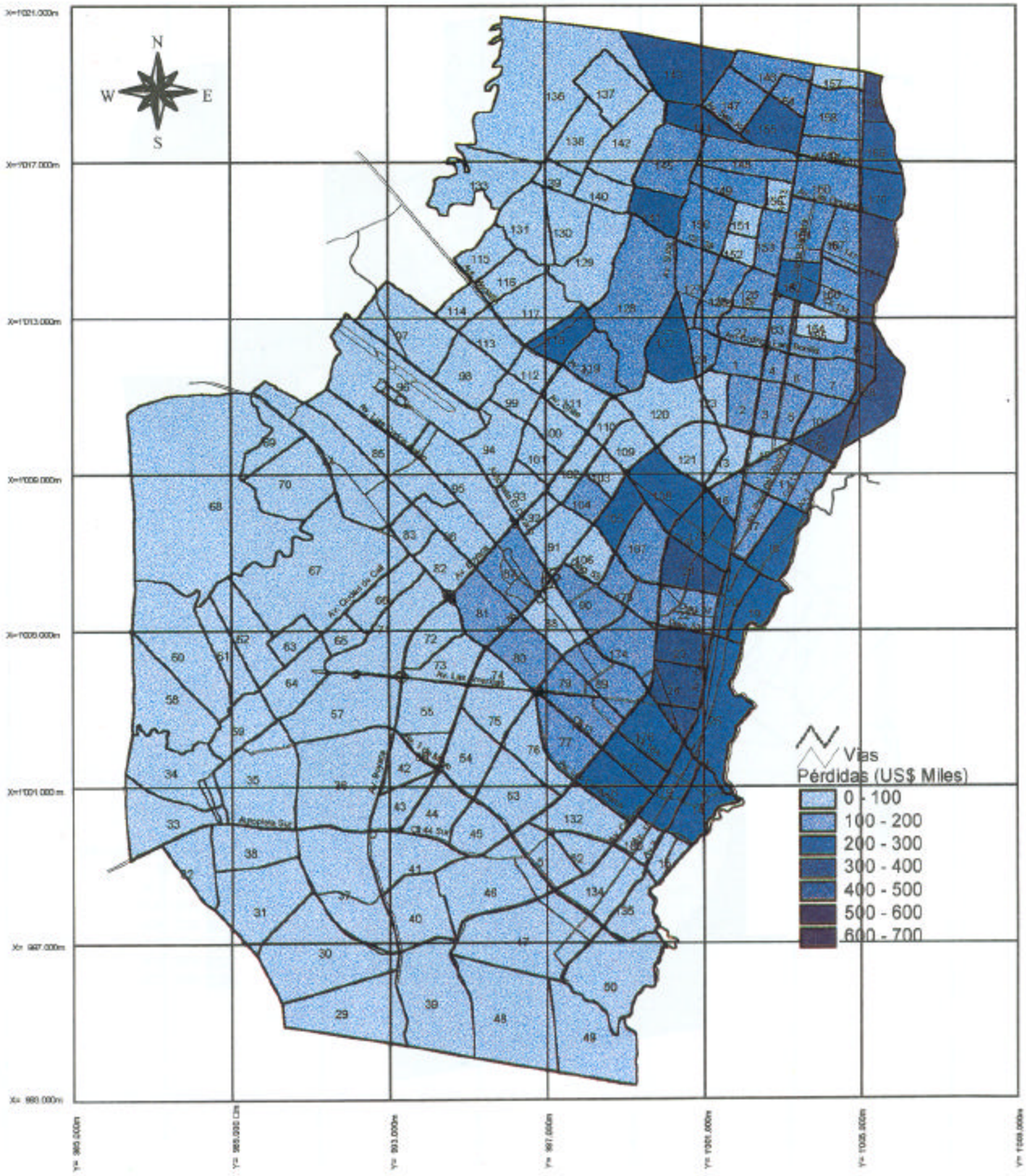


FIGURA 4.5 PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR MANZANA SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)

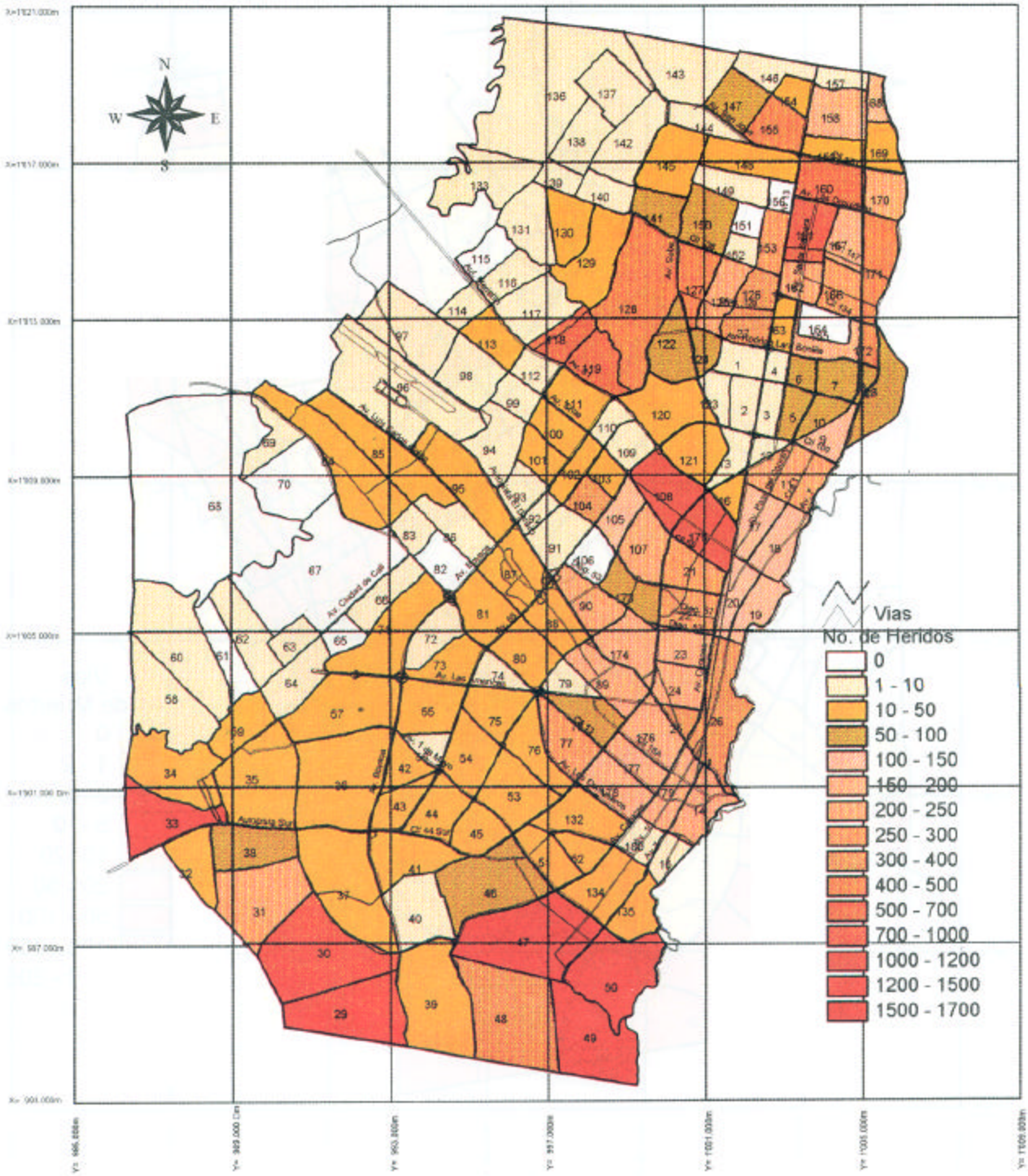


FIGURA 4.6 NUMERO DE HERIDOS SISMO CERCANO FUERTE (NOCHE) (0.20g)

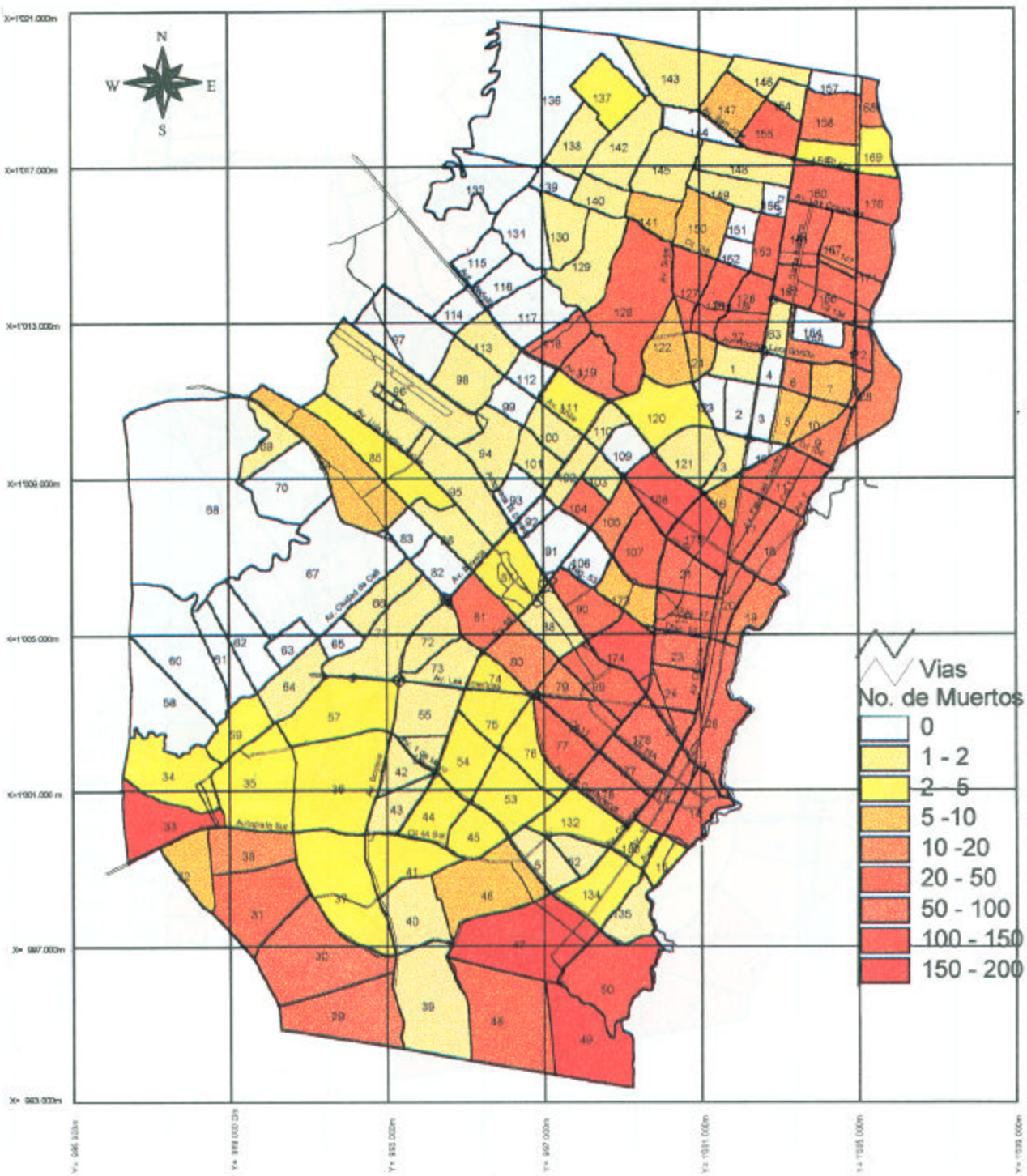


FIGURA 4.7 NÚMERO DE MUERTOS SISMO CERCANO FUERTE (NOCHE) (0.20g)

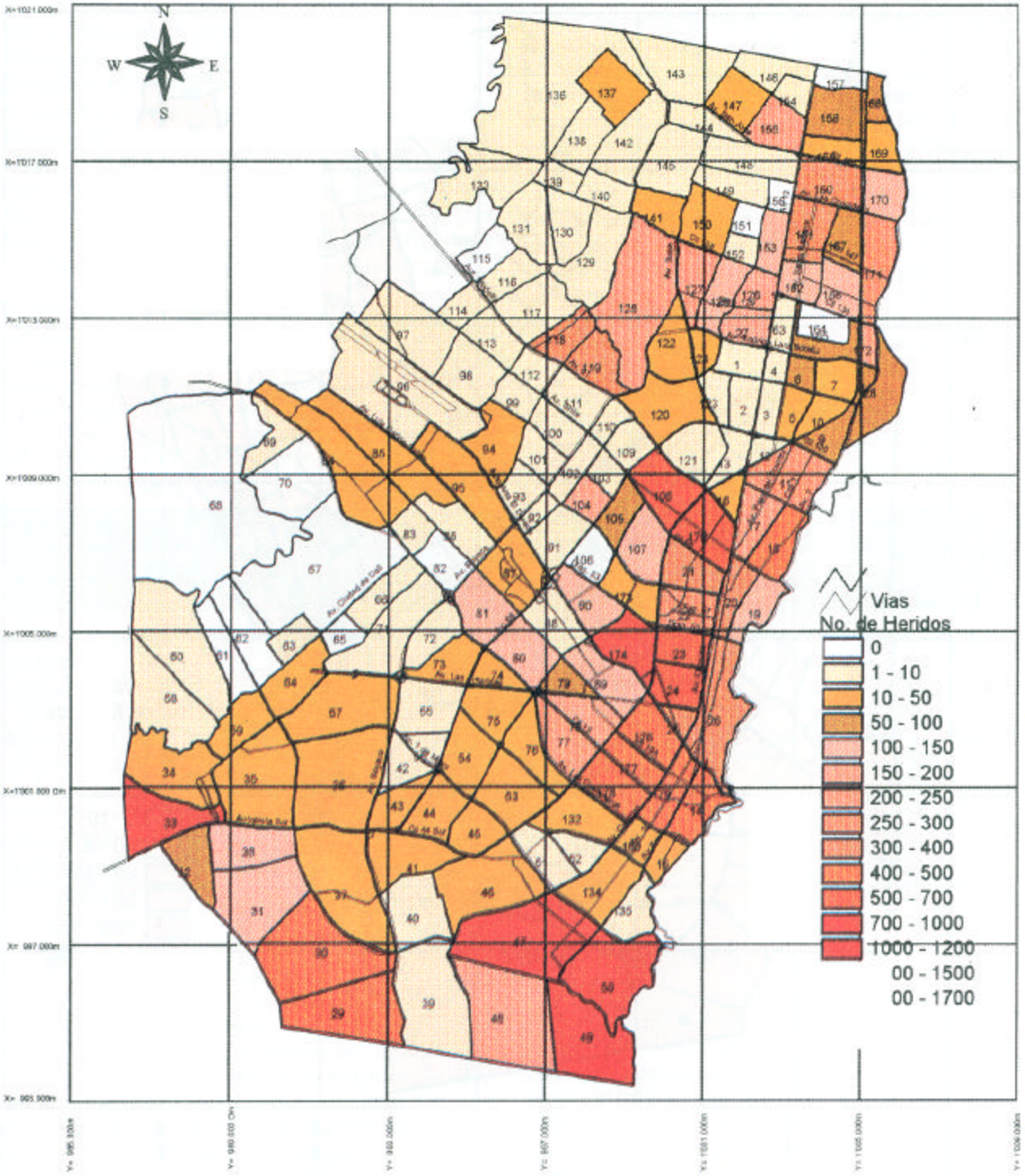


FIGURA 4.8 NÚMERO DE HERIDOS SISMO CERCANO FUERTE (DIA) (0.20g)

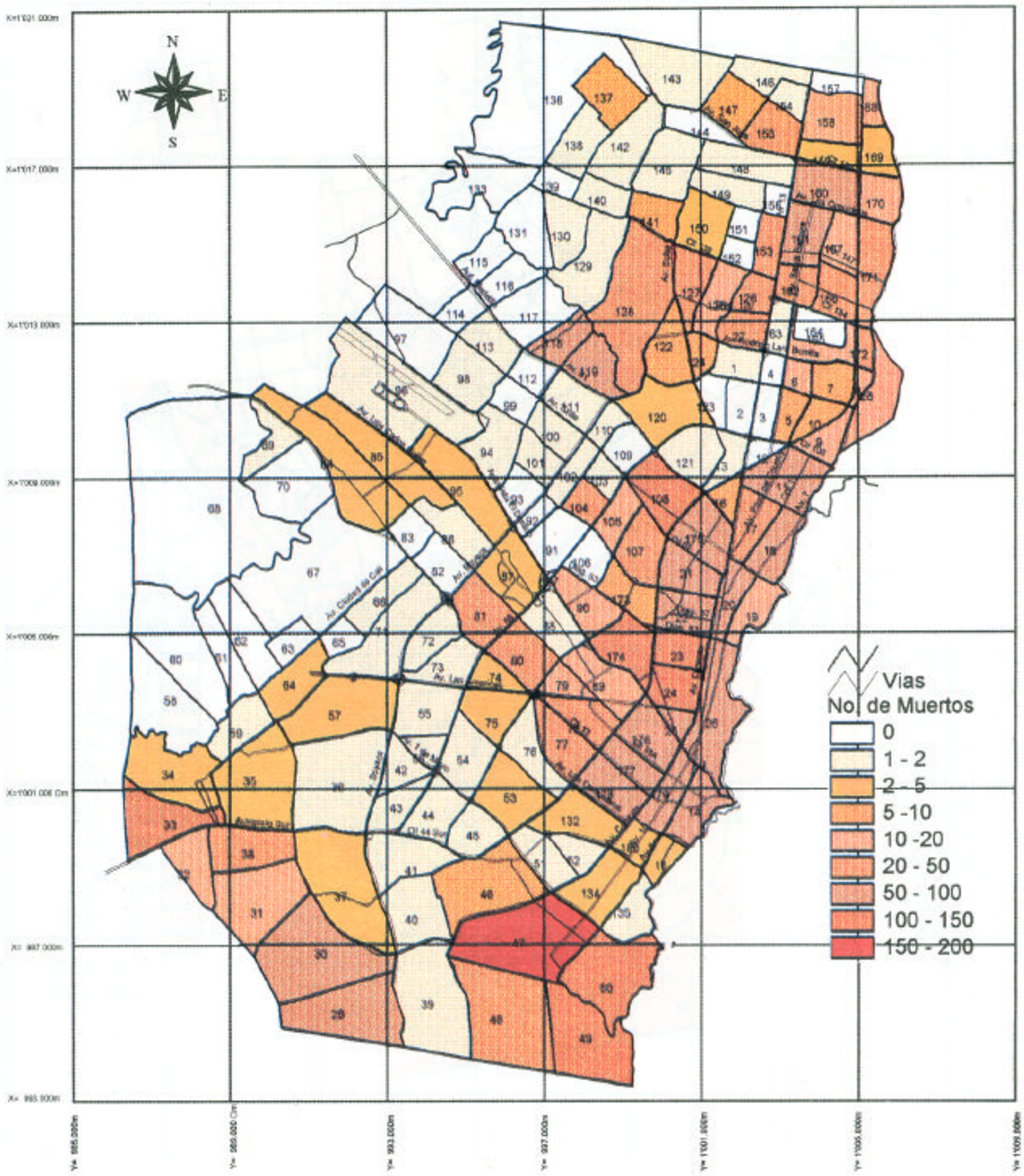


FIGURA 4.9 NÚMERO DE MUERTOS SISMO CERCANO FUERTE (DÍA) (0.20g)

menos en parte, los bienes. Al respecto la nueva versión de la Norma AIS -100-95 (AIS,1996), 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.

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.

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

ESCENARIO SISMICO HIPOTETICO	EN EL DIA		EN LA NOCHE		SIN VIVIENDA (10% de afectados Habitantes)	AREA DESTRUIDA (millones m²)	COSTO (US $ Millones)
	Muertos	Heridos	Muertos	Heridos			
SISMO CERCANO FUERTE (0.20g)	3.500	20.000	4.500	26.000	74.000	33.8	14.000
SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)	1.600	9.000	1.400	7.700	44.000	20.6	8.800
SISMO LEJANO (0.038g)	300	1.600	350	1.900	27.000	12.3	5.100

Tabla 4.2 RESULTADOS DE PÉRDIDAS TOTALES-ESCENARIOS SÍSMICOS

Además de las dificultades de acceso e interrupción del tránsito los cuales impedirían 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

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

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

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 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 Cristóbal, 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 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 las fallas locales como puede ser la Cajita, la de Usaquén - Los Lagartos, la de 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 las 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 ruptu-

ra 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 líneas de agua y desagüe 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 MM						
	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	0.0
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 con 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.

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

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.

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

donde :

$SI_{m,j}$ = Intensidad sísmica (MM - 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).

PDSI = Probabilidad de daño para un estado de daño del sistema *S* a intensidad *I*

DRDS = Relación de daño (damage ratio) por un estado de daño.

Obteniendo así, la matriz MDF:

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

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).

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

donde:

$D_{s,i}$ = Daño del Sistema S en el i-ésimo tramo

$MDF_{S,Ie}$ = 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 Sismoresistentes, 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 presenta los daños esperados para un sismo hipotético en la falla Frontal con una aceleración de 0.20g. 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. Las Figuras 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 lo 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.

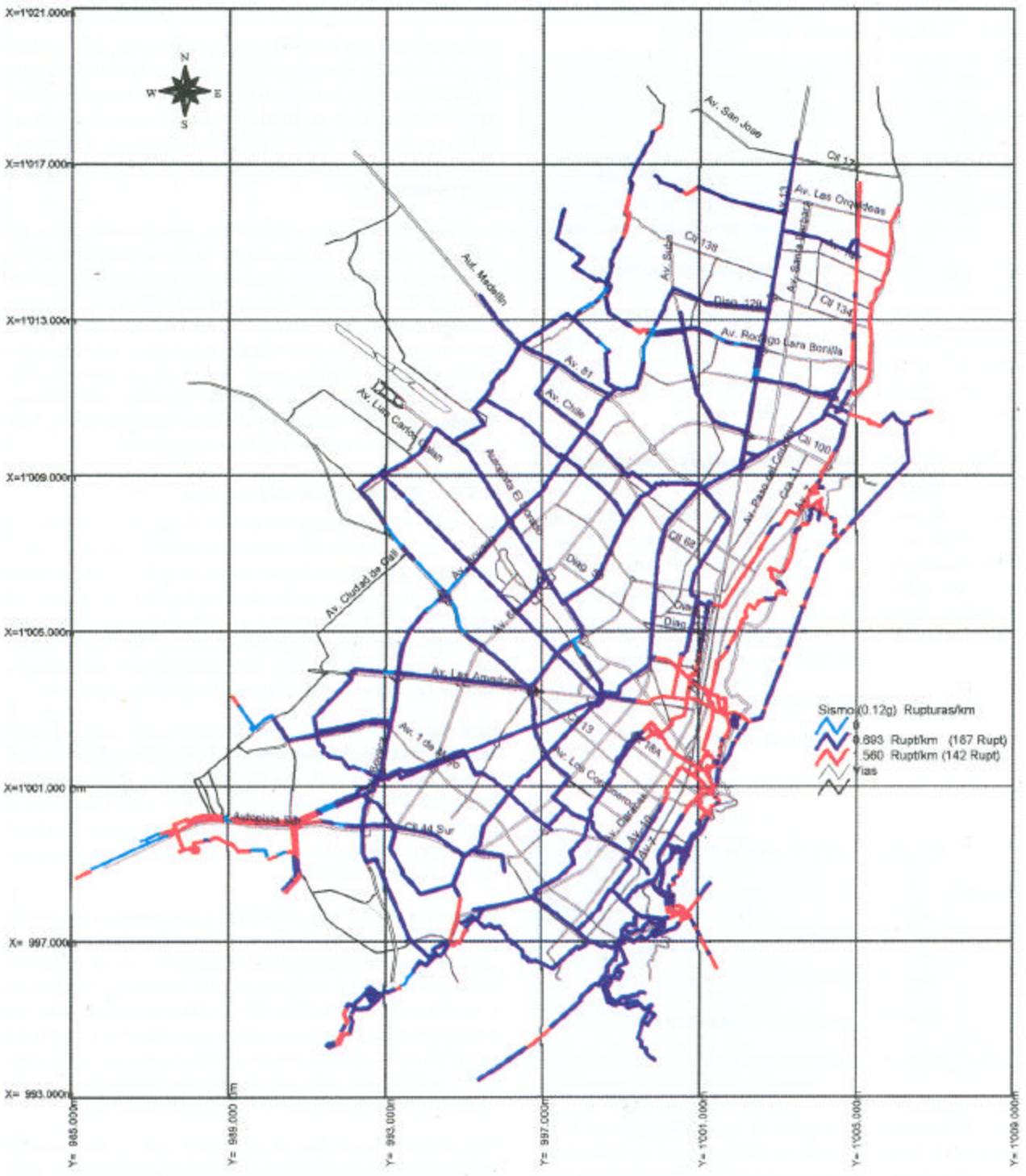


FIGURA 4.10 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE ACUEDUCTO DEBIDOS AI SISMO CERCANO MODERADO (0.12g).

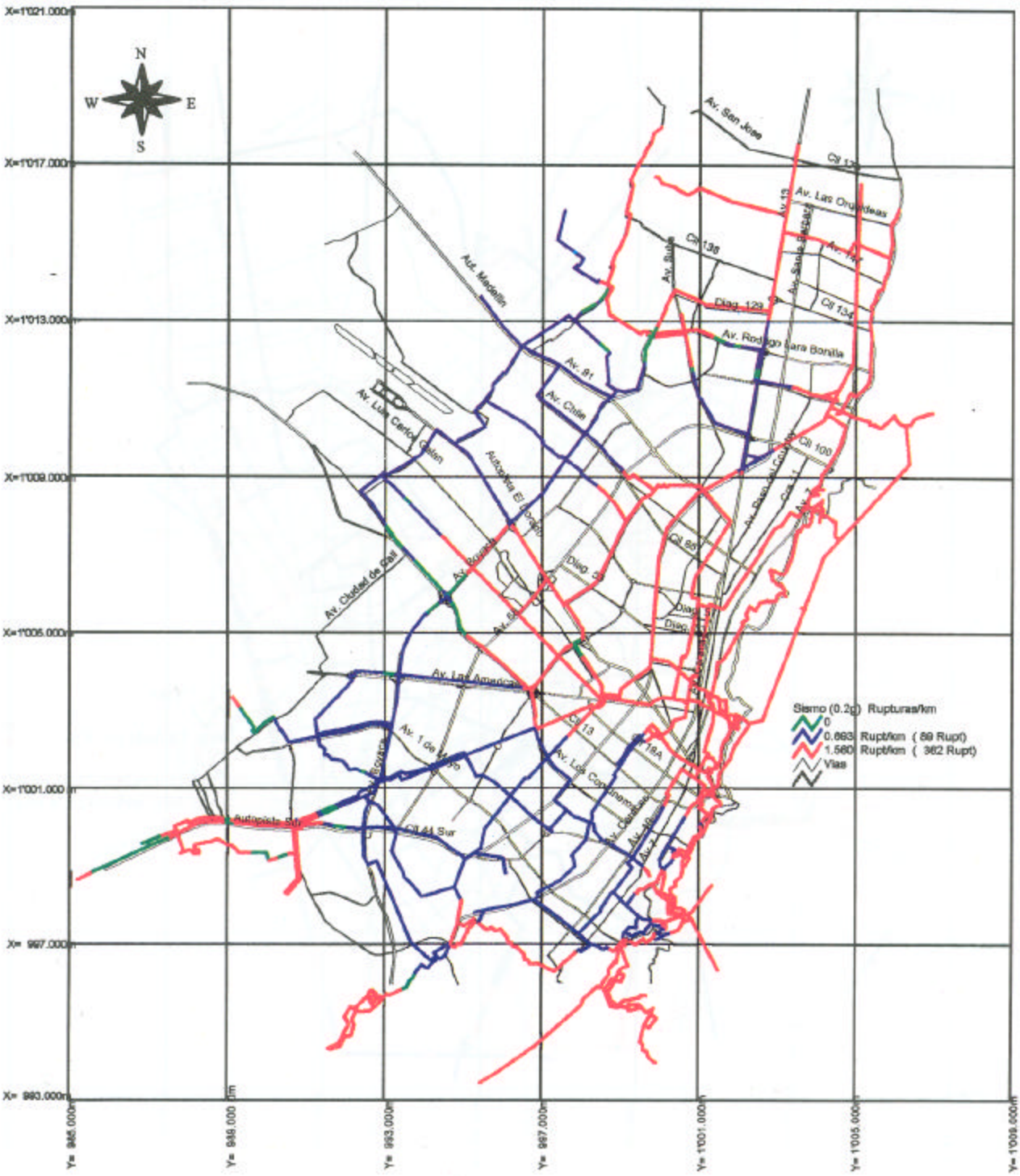


FIGURA 4.11 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE ACUEDUCTO DEBIDOS AL SISMO CERCANO FUERTE (0.20g).

FIGURA 4.12 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE ALTA TENSIÓN PARA EL SISMO CERCANO MODERADO (0.12g).

FIGURA 4.13 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE ALTA TENSIÓN PARA EL SISMO CERCANO FUERTE (0.2g).

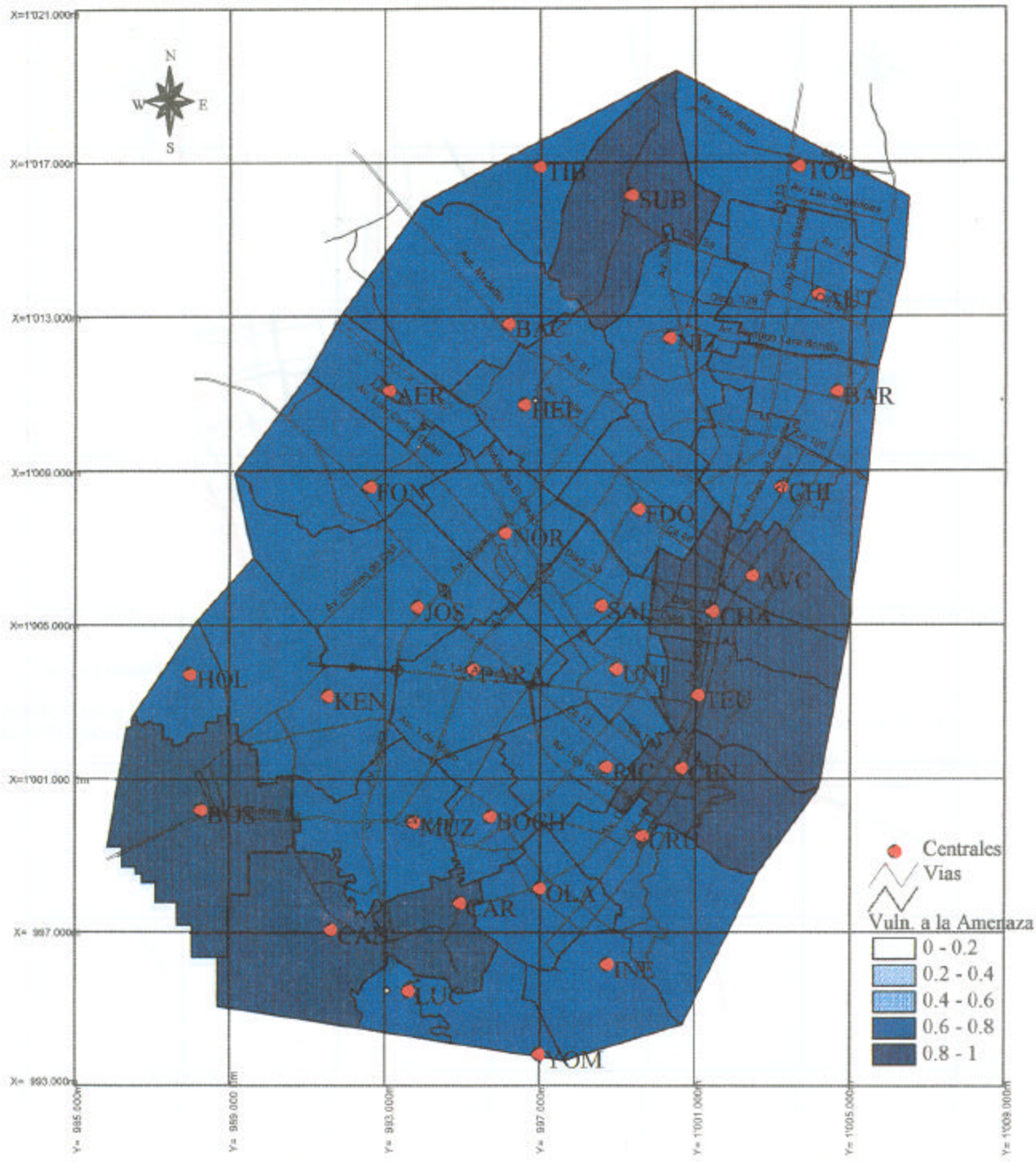


FIGURA 4.14 VULNERABILIDAD DE CENTRALES TELEFÓNICAS A LA AMENAZA SISMO CERCANO MODERADO (0.12g).

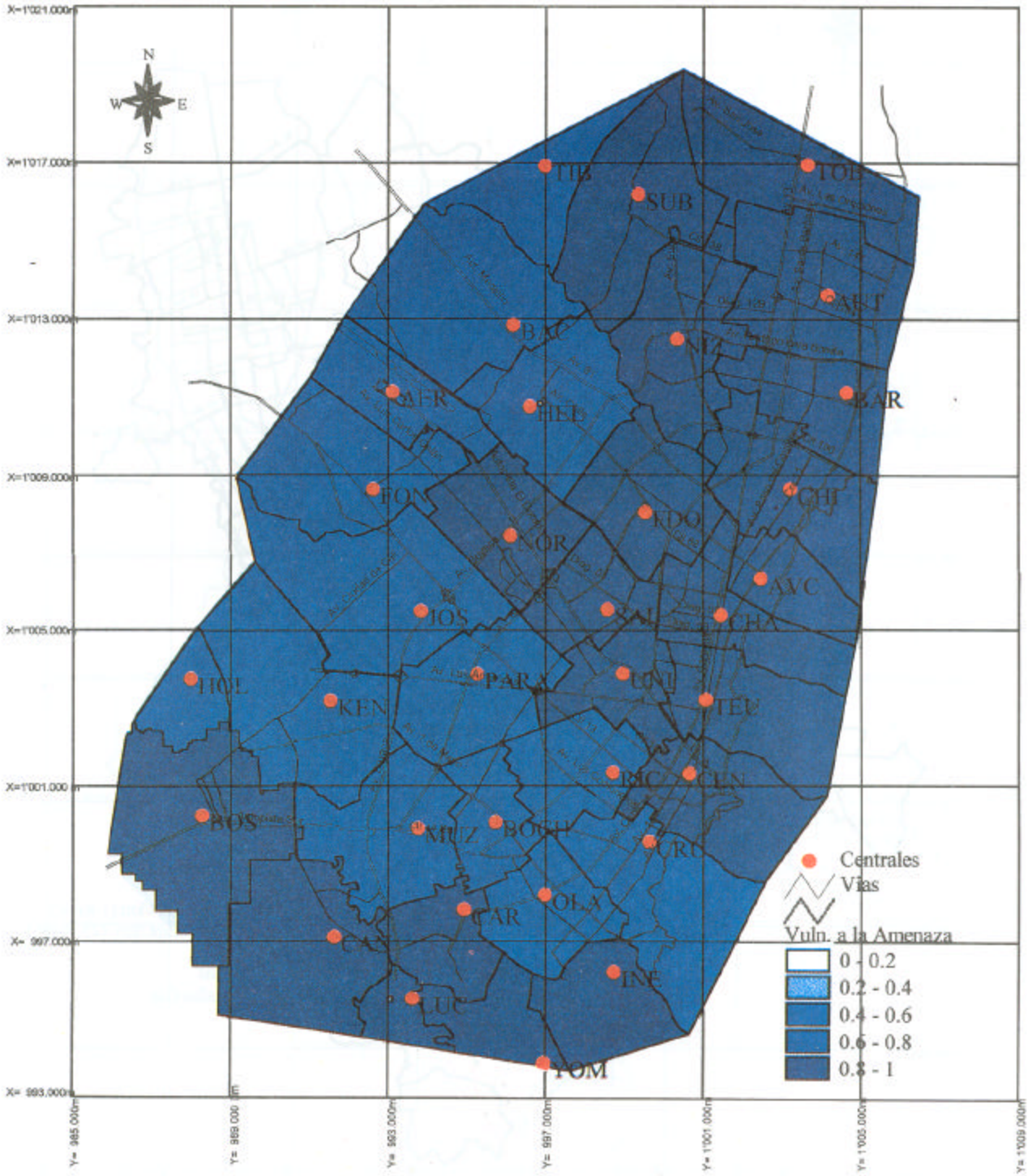


FIGURA 4.15 VULNERABILIDAD DE CENTRALES TELEFÓNICAS A LA AMENAZA SISMO CERCANO FUERTE (0.2g).

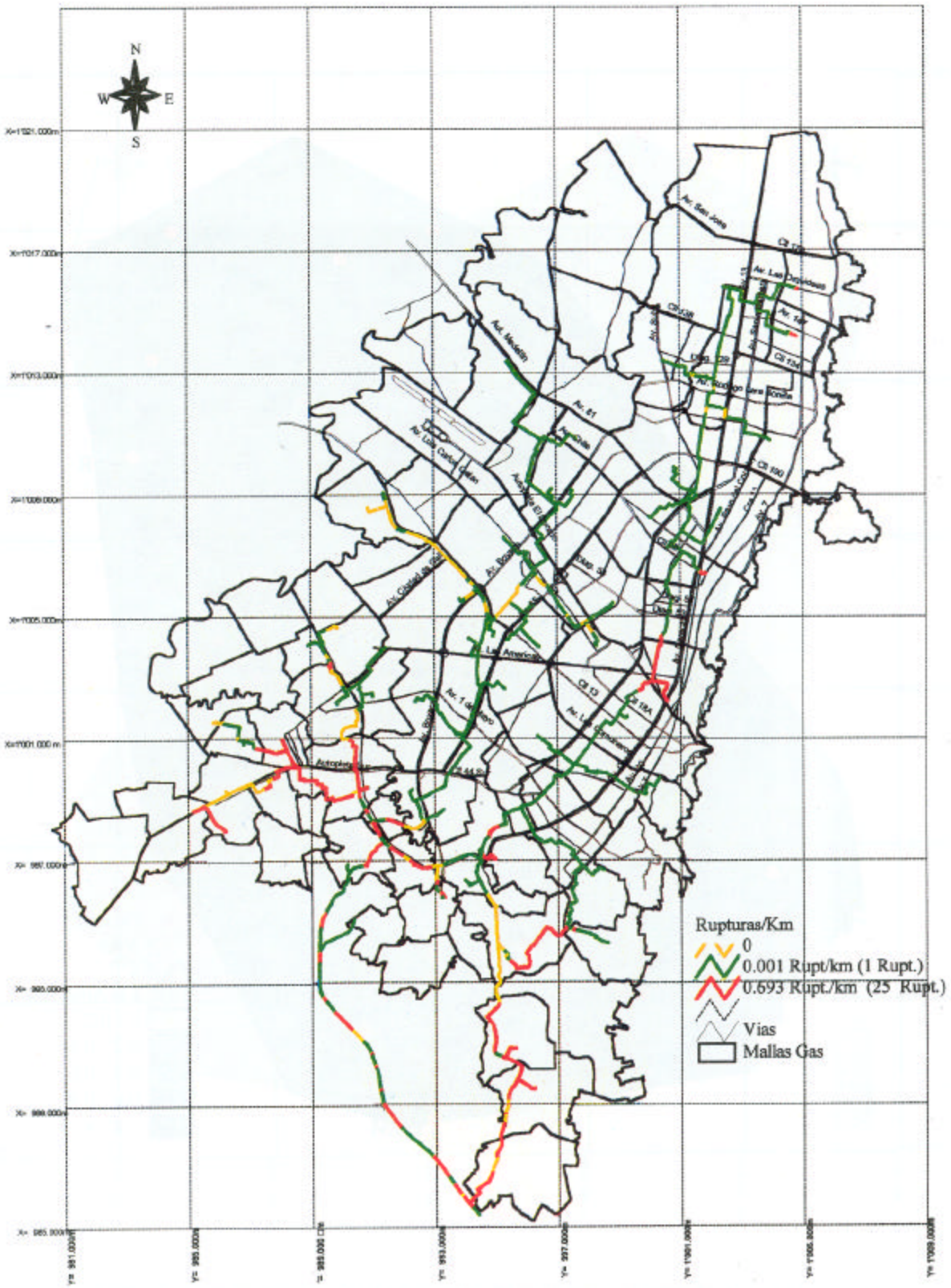


FIGURA 4.16 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE GAS PARA EL SISMO CERCANO MODERADO (0.12g)

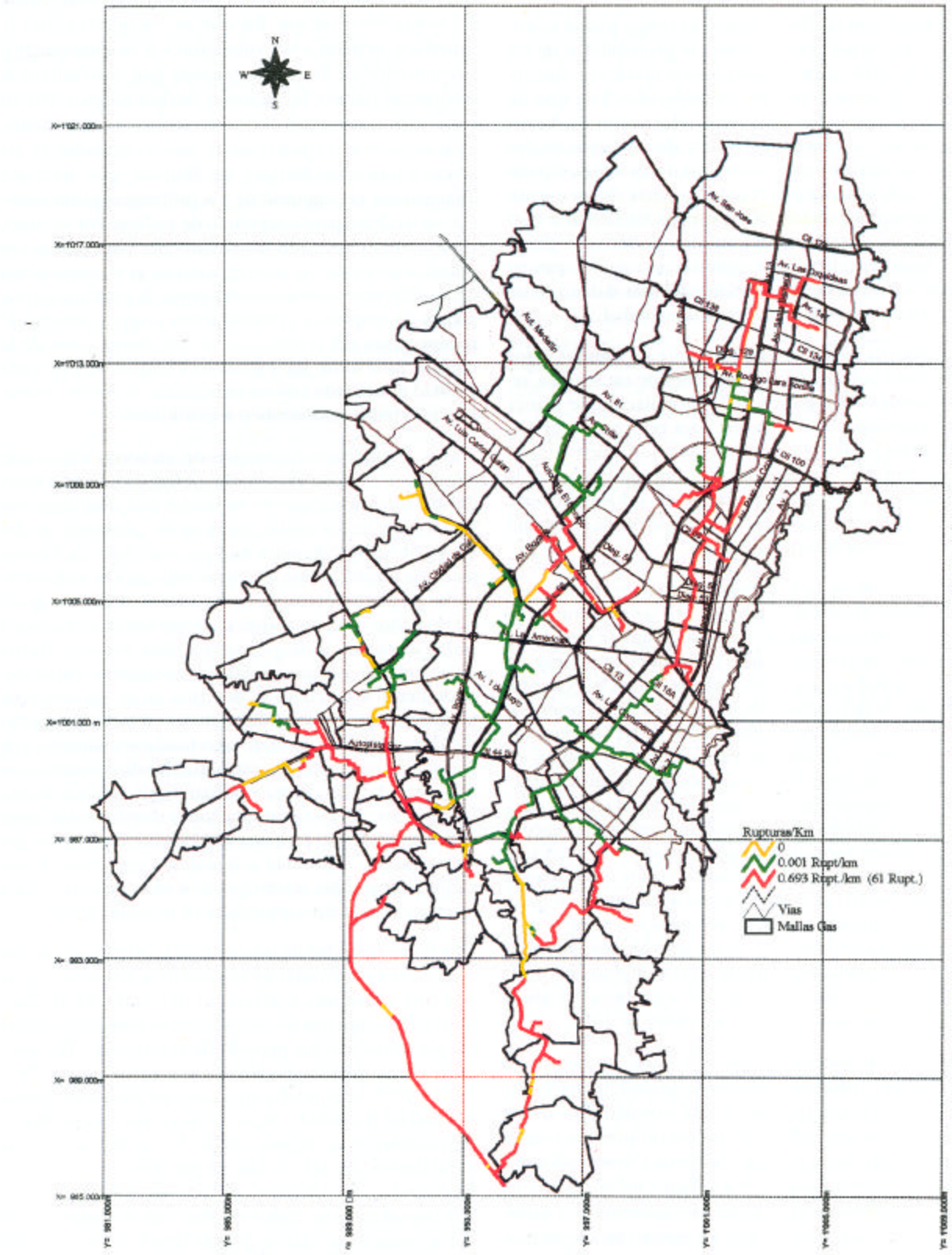


FIGURA 4.17 DAÑOS ESPERADOS EN LA RED DE GAS PARA EL SISMO CERCANO FUERTE (0.2g)

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 numeral 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 numeral 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 externos al perímetro de la ciudad, que también pueden ser afectados 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.

- 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.

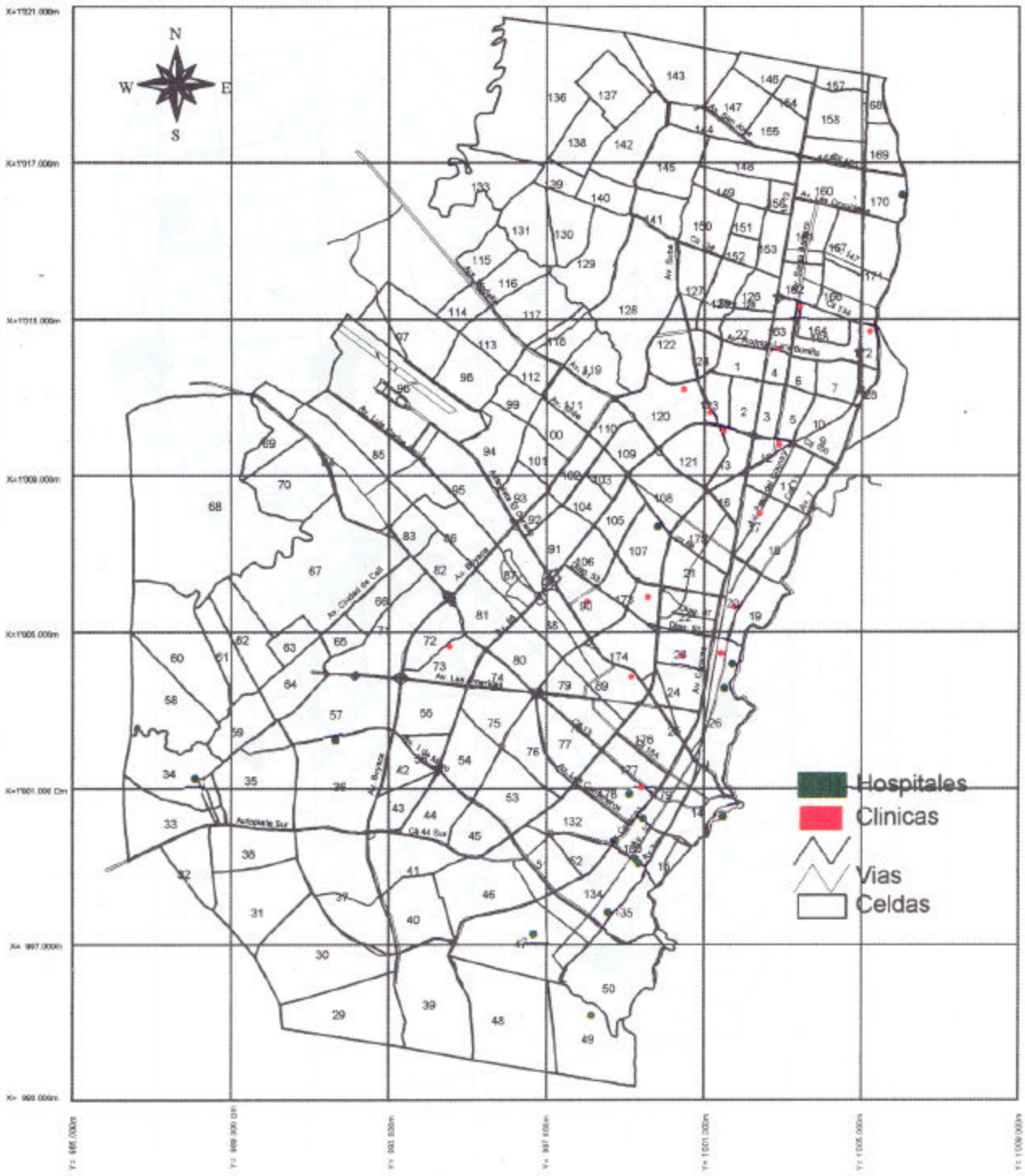


FIGURA 4.18 CLINICAS Y HOSPITALES CLAVES PARA LA CIUDAD EN CASO DE SISMO

FIGURA 4.19 ESCENARIOS DEPORTIVOS Y PARQUES ÚTILES PARA ALOJAMIENTO TEMPORAL EN CASO DE SISMO

- 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 acerca 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 réplicas.

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

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

- 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 Steinbrugge, K.V. 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.

Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica -Als, 1996 *"Actualización del código colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes"*. Estudio presentado al Congreso Nacional para su aprobación. Norma Als-100-95. Santafé de Bogotá.

ATC - 13, Applied Technology Council, 1985. *"Earhtquake Damage Evaluation Data for 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. *"Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings: Supporting Documentation "*, Redwood City, CA.

ATC - 25, Applied Technology Council, 1991. *"Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States "*, 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, 1993. *«Diagnóstico - Localidad Usme»*. Subgerencia de Planeamiento. Santafé de Bogotá D.C.

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-a. *«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-b. *«Informe Anual de Desempeño»*. Gerencia de Operación. Enero-Abril 1995. Santafé de Bogotá D.C.

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santafé de Bogotá, 1995-c. *«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, 1995. *«Manual Básico para Atención de Emergencias»*. Santafé de Bogotá.

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

Horney J, 1994. *«Bogotá Desde el Aire»*. Villegas Editores. 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, 1978. *"ATC-13"*. (FEMA), Redwood City, CA.

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

Secretaría 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.

Whitman R.V., 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.

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones geocientíficas obtenidas durante el desarrollo del estudio.

- Las fallas de mayor potencial sismogénico están situadas en la región Suroriental y hacen parte del sistema de Piedemonte Llanero. Varios segmentos de las fallas de Servitá - Santa María, Guaicáramo y Yopal presentan valores estimados de Magnitudes Máximas Probables (MMP) superiores a 7 M_s con tasa de actividad alta, lo cual sugiere períodos de retorno del orden de 600 años (suponiendo una tasa de movimiento de 3 mm/año). Cabe resaltar los segmentos activos de Guayuriba y Servitá cuya ubicación coincide con una zona de sismicidad anormalmente baja a lo largo del sistema del Piedemonte.

- La Región Noroccidental presenta fallas cuyas magnitudes máximas probables no exceden el valor de 7 M_s. Se destaca la falla de Ibagué, considerada como la más activa de este sector, cuyos indicios y evidencias de actividad lateral derecha se siguen practicamente a lo largo de toda la traza. Otras fallas de importancia en esta región son las de Honda, Doima, Cocora y Cucuana, con valores de MMP superiores a 6.0 y tasa de actividad moderada - alta.

- La región central está caracterizada porque la mayoría de las fallas presentan actividad baja moderada, con magnitudes estimadas inferiores a 6.5 M_s. Se destaca la Falla de la Cajita por su característica de falla activa (MMP = 6.4 M_s) y un sismo histórico asociadado. Sin embargo, no debe descartarse algún tipo de actividad de la falla de Bogotá, ya que el tramo que atraviesa la ciudad está cubierto por diferentes tipos de construcciones y por lo tanto no se pudo hacer una análisis detallado de ésta.

- La cinemática de las fallas activas es coherente con el campo de esfuerzos determinado a partir de observaciones microtectónicas. El contexto sismo-tectónico regional es intermedio entre fallamiento inverso y fallamiento de rumbo, y está caracterizado por un eje compresivo horizontal σ_1 de dirección E-SE y W-NW. Los esfuerzos tectónicos son compatibles con el movimiento inverso de los cabalgamientos que limitan ambos flancos de la Cordillera Oriental. Adicionalmente, se observan movimientos de rumbo a lo largo de fallas inclinadas de direcciones SE-NE (lateral derecho) y SE-NW (lateral izquierdo).

- Según los datos históricos, en los últimos quinientos años la sismicidad en Bogotá y su área cercana ha sido importante. En la capital, tres sismos han causado destrucción parcial de la ciudad (1785, 1827, 1917) alcanzando intensidad VIII, y cuatro han causado daños serios (1743, 1826, 1923, 1967) con intensidad VII.

- Durante el período histórico la recurrencia de los eventos de intensidad VIII es irregular (cuarenta y dos y noventa años). La de los sismos de intensidad VII también lo es, oscilando entre cuarenta y seis y noventa y tres años. Mirada globalmente, la sismicidad de Bogotá en los últimos quinientos años se caracteriza por largos períodos de quietud los cuales llegan a superar el siglo. Entre 1500 y 1743 y entre 1827 y 1917 no ocurrió ningún sismo de intensidad mayor de VI. Por otra parte, se observa una acumulación de sismos en ciertos períodos, como 1826-1827 con dos sismos de intensidad VII y VIII, y 1917-1928 con tres sismos de intensidad VIII, VII y VI.

- Los sismos destructores en Bogotá en los últimos quinientos años se originaron todos en la Cordillera Oriental, tomando como límites de esta el río Magdalena y el piedemonte llanero. Se observan dos particularidades: a) a más de 50 kilómetros hacia el norte, en Boyacá y los Santanderes, no se ha originado ningún sismo destructor de la capital, b) hacia el sur sí se han producido sismos destructores, y a distancias que llegan a 350 kilómetros. La zona comprendi-

da en una faja de treinta kilómetros de ancho, de orientación S-SW y N-NE, situada al oriente de la ciudad, se ha generado la mayoría de los eventos de intensidad VII y VIII.

- Bogotá, ha sido destruída o averiada no sólo por sismos de campo lejano sino también por sismos de campo cercano. De los tres sismos de intensidad VIII, dos se originaron a unos cuarenta kilómetros de la ciudad y uno a trescientos cincuenta kilómetros. Los de intensidad VII están todos, exceptuando 1923 cuyo epicentro es cuestionable, dentro de un radio de 40 kilómetros. De especial interés son los eventos de 1616 (Cajicá), 1644 (Tunjuelo) y 1826 (Sopó), localizados en un radio de 20 kilómetros alrededor de Bogotá, prueba de la existencia de fuentes cercanas que hay que tener en cuenta en los análisis de amenaza.

- Los efectos locales en la Sabana de Bogotá han sido bastante claros en los sismos históricos. Los más notables son: comportamiento diferencial de la capital, bien detectados en 1917 y en 1928; efecto de acumulación de daños por sismos sucesivos, en 1928; licuación de suelos en la Sabana, identificada en Tunjuelo en 1644; efectos topográficos muy claros en los cerros de Guadalupe y Monserrate en 1743, 1785, 1826 y 1917.

- La versión del Catálogo Sísmico de Colombia resultado de una recopilación de manera sistemática, unifica la información de diversos catálogos que cubrían diferentes períodos y regiones geográficas e incluye la información histórica de estudios recientes y la información instrumental hasta 1995, presentando una serie homogénea respecto a la magnitud M_s y discriminando las réplicas y premonitorios. Se obtiene como resultado un catálogo que proporciona datos más robustos para el cálculo de las tasas de recurrencia sísmica a nivel regional.

- En el estudio de microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá D.C. se establecieron tres fuentes sismogénicas principales. La primera corresponde a la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano, la cual es significativa únicamente por las características de respuesta de algunas partes del subsuelo de la ciudad; el acelerograma representativo para esta zona fué registrado en el sismo de México, 1985. La segunda fuente corresponde a la fuente Frontal de la Cordillera Oriental la cual resulta dominante en el caso de la ciudad; para esta zona se hizo un acelerograma sintético, usando como base el sismo de Tauramena, 1995. La tercera corresponde a las fuentes locales; como acelerograma característico se tomó el registrado en California por el sismo de Loma Prieta en 1989.

- De acuerdo con el modelo utilizado para evaluar la aceleración horizontal máxima probable sobre la cuenca rocosa de Santafé de Bogotá, se obtuvo un valoar igual a 0.19g que para efectos de análisis posteriores se tomó como 0.20g, tal como se encontró en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, donde se ubica a Santafé de Bogotá en zona de amenaza sísmica intermedia.

- Se establecieron tres fuentes sismogénicas principales. La primera corresponde a la Zona de Subducción del Pacífico Colombiano, la cual es significativa únicamente por las características de respuesta de algunas partes del subsuelo de la ciudad. La segunda corresponde a la fuente Frontal de la Cordillera Oriental la cual resulta dominante en el caso de la ciudad. La tercera corresponde a las fuentes locales.

- La Sabana de Bogotá es una cuenca sedimentaria en la cual sobre un basamento de rocas antiguas constituídas por arcillolitas y areniscas se depositó un gran espesor de sedimentos en un ambiente fluvio lacustre, litológicamente compuesto por arcillas, limos, lentes de arenas y gravas y locamente cenizas volcánicas y turbas.

- El modelo geológico-geofísico del perímetro urbano de Santafé de Bogotá y sus alrededores, está conformado por dos subcuencas principales: la cuenca occidental, ubicada hacia el NW del área de estudio; la cuenca oriental ubicada dentro del perímetro urbano, y ramificada en la parte norte por los cerros de Suba, dando lugar a otras dos cuencas secundarias, una en la parte occidental de los cerros de Suba y otra entre estos últimos y los cerros Orientales.

- Los mayores espesores de sedimentos calculados en el presente modelo se encuentran en la cuenca occidental, donde sobrepasan los 780 m. Para la cuenca oriental se calcularon espesores del orden de 540 m en la parte occidental de los cerros de Suba y 240 entre los cerros de Suba y los cerros orientales.

- Los métodos geofisicos aplicados permitieron establecer, no sólo la geometría de la cuenca de la Sabana de Bogotá, sino también determinaron información tectónica nueva como son las fallas de Molinos-Sasaima y San Cristóbal, ésta última corroborada en superficie por campaña especial de campo.

- La zonificación geotécnica de síntesis definió cinco áreas de comportamiento homogéneo:

  I. Zona montañosa caracterizada por la presencia de areniscas duras resistentes a la erosión y arcillocitas cuya existencia y deformabilidad dependen de su humedad.

  II. Zona de piedemonte o de conos de deyección conformada por materiales que bajo efecto de la gravedad han sufrido movimientos y se han depositado en forma de cono o abanico.

  III. Zona de suelos duros en donde predominan arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosos de origen aluvial. La zona arcillosa se caracteriza por su baja plasticidad, encontrándose el límite líquido en un rango entre 20% y 70% en los primeros 30m. A mayores profundidades la arcilla tiende a volverse más arenosa y presenta un límite líquido de alrededor del 30 %. Adicionalmente,se encuentra una capa de turba aproximadamente a 30 m de profundidad con un espesor de 4 m en promedio. La parte occidental de esta zona, se caracteriza principalmente por la presencia de arenas de grano fino a muy fino,con poca presencia de arcillas.

  IV. Zona de suelos blandos caracterizada por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad. En los primeros 60 m de profundidad es posible encontrar límites líquidos en un amplio rango que varía de 30% a más de 200% disminuyendo en profundidad a valores del orden de 30%. Hacia la parte sur oriental de la zona se encuentran suelos preconsolidados en un espesor del orden de 10 m; espesor que disminuye hacia la parte nor-occidental. En esta zona es común encontrar una pequeña capa de arena a una profundidad aproximada de 50 m e intercalaciones de capas de turbas que en su mayoría no superan los 5 m de espesor.

  V. Zona de Rondas de ríos y humedales a la cual pertenecen los cuerpos de agua de la ciudad: humedales,antiguos lagos y zonas de inundación.

- La mictrozonificación sísmica de Bogotá definió 5 zonas homogéneas de acuerdo con la respuesta sísmica del subsuelo. Los parámetros de diseño en cada zona son los siguientes:

  Zona 1. Cerros: Caracterizada por la presencia de formaciones rocosas de suelos con capacidad portante relativamente mayor. La aceleración máxima (Am) es de 0.24g.

  Zona 2. Piedemonte: Conformada por la zona de transición entre los cerros y la zona plana. Consta principalmente de depósitos coluviales y conos de deyección de materiales con una gran capacidad portante en general. La aceleración máxima es de 0.30g.

  Zona 3. Lacustre A: Conformada principalmente por depósitos de arcillas blandas con profundidades máximas de 240 m. Pueden presentarse depósitos ocasionales de turbas y/o arenas de espesor intermedio a bajo. La aceleración máxima es de 0.25g.

  Zona 4. Lacustre B: Tiene la mismas características de la Zona 3, pero los depósitos superficiales son más blandos que los anteriores. Además, la profundidad hasta la roca es mucho mayor (del orden de 200m a 400m o más). La aceleración máxima es de 0.16g.

Zona 5. ***Terrazas y Conos:*** Se presenta predominantemente en la zona sur de la ciudad y está conformada por suelos arcillosos secos y preconsolidados de gran espesor, arenas o limos o combinaciones de ellos. El límite entre las zonas 4 y 5 no está muy bien definido por lo cual se requiere la definición de zonas de transición. La aceleración máxima es e 0.20g. Se ha denominado la ***Zona 5A "Terrazas y Conos con potencial de Licuación"*** a una subdivisión esta zona, la cual tiene los mismos espectros de diseño que la Zona 5. Sin embargo, las características predominantes de las arenas limpias, finas y superficiales, combinadas con la posibilidad de niveles freáticos altos, redundan en la posibilidad que presenten licuación ante la ocurrencia de un sismo intenso. Debe evaluarse específicamente el potencial de licuación cuando se deseen adelantar construcciones en esta zona.

- De la evaluación de la vulnerabilidad 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 construídas sin tener en cuenta criterios sismoresistentes. Infortunadamente, con anterioridad 1984 no existían requerimientos claros para evaluar solicitaciones dinámicas y cargas laterales, razón por la cual las edificaciones diseñadas y construídas 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. Dentro del estudio se analizaron tres escenarios hipotéticos: ante un sismo lejano originado en la Zona de Subducción con aceleración del orden de 0.038g a nivel del basamento rocoso, ante un sismo moderado proveniente de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental que cause una aceleración del orden de 0.12g a nivel de basamento rocoso y ante un sismo fuerte 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. Cada uno de estos escenarios revelan los posibles efectos que puede ocasionarse a la ciudad indicando para cada uno de ellos las zonas de mayor riesgo en términos de potencial de daños y pérdidas en edificaciones, líneas vitales, y el número de heridos y muertos en caso de que ocurra el sismo durante el día o la noche; información que es fundamental para la elaboración de los planes de emergencia y contingencia.

RECOMENDACIONES

Es importante destacar que este estudio ha sido uno de los más completos sobre el tema a nivel internacional. Sin embargo, todavía quedan puntos sobre los cuales se debe continuar trabajando.

Con base en los resultados encontrados se pueden establecer las siguientes recomendaciones generales :

- Resulta importante adelantar estudios de dataciones sobre las fallas que se encontraron como de mayor actividad, para poder corroborar en detalle tasas de movimiento y períodos de retorno para eventos sísmicos.

- Se deben hacer estudios de microsismicidad en algunas fallas ubicadas en el Piedemonte, para establecer con claridad profundidades asociadas a la actividad.

- Los datos disponibles hasta el momento referentes a acelerogramas de eventos sísmicos registrados en estaciones ubicadas en los suelos blandos de Santafé de Bogotá resultan vitales para adelantar los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad pero son aún insuficientes para poder proponer modelos de comportamiento. Se requiere en general mucha más instrumentación especialmente en las zonas de suelos blandos y de piedemonte para lograr captar las señales de sismos que ocurran en el futuro. Esta instrumentación debe hacerse mediante acelerógrafos distribuidos en toda la ciudad, con el fin de calibrar el modelo propuesto por este proyecto. Los datos que se obtengan serán de vital importancia para poder verificar el estado del arte en este tema.

- Para efectos de conocer el comportamiento global del depósito es imperativo tratar de instalar instrumentos en profundidad, en especial para conocer la señal en la roca base y contar simultáneamente con registros en superficie.

- Otro aspecto que requiere mayor estudio es la caracterización geotécnica en profundidad de las zonas delimitadas. Hasta el presente se cuenta con información geotécnica de calidad en muy pocos sitios y debe pensarse hacia el futuro en mejorar la cantidad y calidad de esta información. El bajo número de sondeos realizados no permite identificar los límites de las zonas con precisión ni evaluar de manera detallada las variaciones al interior de cada zona. Por este motivo, es conveniente continuar densificando la exploración realizando principalmente ensayos in sitú Down Hole o cono sísmico y presiómetro de Menard cíclico.

- Las microtrepidaciones demuestran ser una herramienta versátil para determinar principalmente el período de vibración natural de depósitos de suelo blando no muy profundos cuyo comportamiento se asemeje a un estrato blando uniforme sobre un semiespacio infinito de suelo competente. Para el caso de Bogotá las suposiciones básicas no se cumplen del todo por lo cual se requiere más investigación para depurar la interpretación de sus resultados.

- La información que se puede obtener a partir de la interpretación de los registros de microtrepidaciones es útil de todas maneras para establecer zonas de diferente comportamiento, lo cual es vital para complementar la información geotécnica disponible. De esta manera aún con las limitaciones planteadas, las microtrepidaciones se convierten en una herramienta vital para desarrollar mapas de microzonificación de ciudades. Pueden desarrollarse programas más intensos de mediciones en la ciudad para delimitar de mejor manera las zonas propuestas.

- Los aspectos de modelación bidimensional y tridimensional requieren definitivamente mucha más información y desarrollo. Es necesario adaptar programas de computador avanzados en máquinas mucho más potentes que los computadores personales. Se requiere en este campo la participación de grupos internacionales de apoyo.

- Los problemas de estabilidad en los cerros deben estudiarse con más detalle. Se sugiere la realización de estudios detallados caso por caso, considerando las áreas críticas definidas. Esto requiere la instrumentación de algunos taludes y su seguimiento respectivo.

- Con respecto al comportamiento dinámico de las arcillas es importante continuar estudiando la influencia de la velocidad de deformación, la frecuencia de la carga cíclica y el número de ciclos de carga. Este es un tema sobre el cual no existen muchas referencias y se ha podido comprobar que esta variable es de importancia en el suelo de Bogotá.

- De acuerdo con el comportamiento de las arenas de la zona sur, es necesario continuar con los estudios de licuación utilizando equipos que permitan obtener muestras inalteradas.

- Mediante un acto administrativo se debe llevar a cabo, la reglamentación urbana y la normativa sismo resistente que se debe aplicar en cada una de las zonas definidas por la microzonificación sísmica.

- Es urgente que se formulen medidas de mitigación del riesgo sísmico en la ciudad, particularmente interviniendo la vulnerabilidad de las edificaciones esenciales (tales como hospitales y centrales telefónicas, entre otras) y de las redes de servicios, para lo cual es necesario llevar a cabo estudios específicos de vulnerabilidad sísmica y de rehabilitación que mejoren el comportamiento de los sistemas de líneas vitales y de las estructuras de las principales edificaciones de la ciudad en caso de un movimiento sísmico moderado o intenso.

- Teniendo en cuenta las estimaciones de daños, pérdidas y en general de las consecuencias de un sismo moderado o fuerte en la ciudad, deben elaborarse planes de emergencia y contingencia para la atención de la población. Igualmente, se debe prever la manera como se atenderán los requerimientos de los servicios públicos interrumpidos y la forma como se llevará a cabo su rehabilitación y recuperación.

- Es necesario iniciar un intenso programa de información pública y educativa a través de medios de comunicación, colegios y mediante capacitación a nivel comunitario que sin alarmar socialice la información y la forma de actuar en caso de terremoto. Este programa debe ser sostenible y continuo para que sea efectivo.

DIRECTIVAS DEL CONVENIO

ADOLFO ALARCÓN GUZMÁN
Director General del INGEOMINAS

BERNARDO GRAU ARIAS (1993 - 1995)
JOSÉ FIDEL TORRES (1995 - 1996)
DORA PATRICIA HOYOS RAMÍREZ (1996 - 1997)
Unidad para la Prevención y Atención de Emergencias - UPES

OMAR DARIO CARDONA ARBOLEDA (1993 - 1995)
LUIS FERNANDO VELASCO CHÁVES (1995)
ANUAR YAVER CORTÉS (1995 - 1997)
Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres - DNPAD

EJECUTORES DEL PROYECTO

INGEOMINAS

JUAN MANUEL MARTÍNEZ ROGRÍGUEZ (1993 -1994)
EDGAR EDUARDO ROGRÍGUEZ GRANADOS (1995 -1997)
Subdirector Area de Ingeniería Geoambiental

DIANA MARCELA RUBIANO VARGAS
Jefe de Proyecto

JACOBO OJEDA MONCAYO
Coordinador de Zonificación Geotécnica y de Riesgos Geológicos

ALVARO JAIME GONZÁLEZ GARCÍA
Asesor Técnico

Arturo Bermúdez Gómez
Pablo Caro Peña
Eduardo Castro Marín
Cristina Dimaté Castellanos
Julian Escallón Silva
Armando Espinosa Baquero
Rodrigo Esquivel Ramírez
Alberto Garcia Blanco
Sandra Garzón Cabrera
Hugo Gravini Escorcia
Anibal Ojeda Carriazo
Justo Padilla Acosta
Gabriel Paris Quevedo
Rosalbina Pérez Cerón
Nelson Pulido Hernández
Alfredo Rivera Ortega
Jaime Romero León
Rafael Silva Pedroza
Luis Fernando Urrego Lara
Germán Vargas Cuervo
Luis Vásquez Avila
Heyley Vergara Sánchez

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

ALBERTO SARRIA MOLINA
Ex-Decano de la Facultad de Ingeniería

LUIS YAMIN LACOUTURE
Director Departamento de Ingeniería Civil

BERNARDO CAICEDO HORMAZA
Director del Laboratorio de Suelos de Ingeniería Civil

OMAR DARIO CARDONA ARBOLEDA
Profesor de Cátedra del Departamento de Ingeniería Civil

ALFREDO TABOADA HOYOS
Profesor Asistente Departamento Ingeniería Civil

Carlos Eduardo Bernal Latorre
Augusto Espinosa Silva
Luis Enrique Garcia Reyes
Luis Alberto Rivera Giraldo
Joaquin Olarte Barrera
Carlos Arboleda Audrito
Javier Camacho Tauta
Leonardo Cano Saldaña
Carlos Cortes Zamora
Jaime Andrés Estrada Galindo
María José Garcés Rodríguez
Fernando López Caballero
Carlos Martínez Gómez
Shirly María Merlano Rivera
Javier Morales Londoño
Claudia Patricia Mutis Duque
Oscar Javier Reyes Ortiz
Ana María Rodríguez Carrasco
Leonardo Ruiz Cendales
Hugo Salamanca Hernandez
Alvaro Antonio Torres Laguna
Vladimir Torres Torres