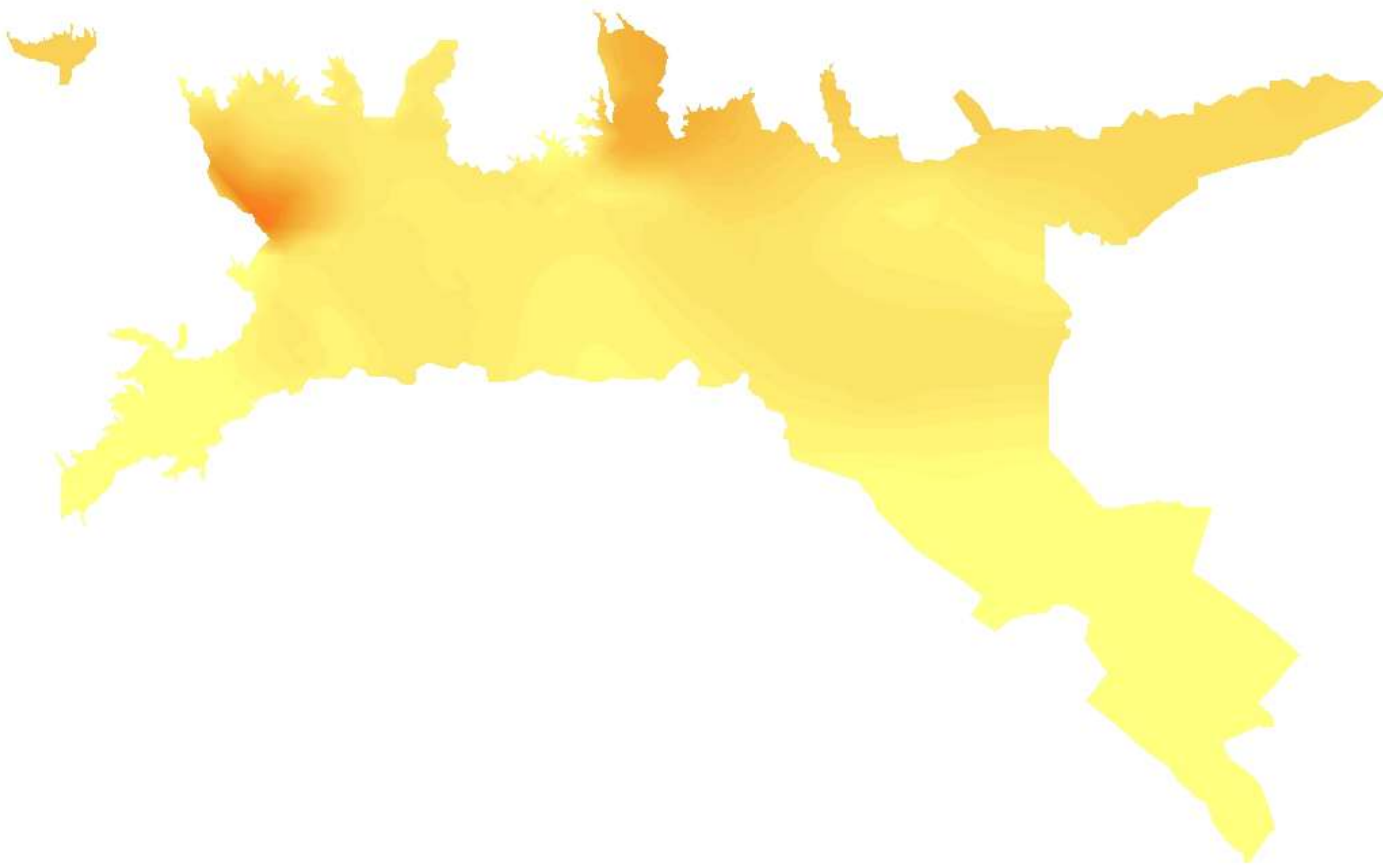


MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO



CAPÍTULO 5 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO

5.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de este proyecto consiste en la elaboración del mapa de microzonificación sísmica del área urbana de la ciudad de Ibagué y el desarrollo de las recomendaciones para el diseño sismorresistente de estructuras en la zona estudiada. Estas recomendaciones serán complementarias a las dadas en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente, NSR-98, Ley 400 de 1997 y Decretos Reglamentarios 33 de 1998, 34 de 1999, 2809 de 2000 y 52 de 2002. Las recomendaciones que se presentan se enmarcan dentro del literal A.2.9 “Estudios de Microzonificación” del Decreto 33 de 1998.

El mapa de microzonificación sísmica sirve para establecer los requisitos mínimos de diseño sísmo resistente. Para cada punto que se encuentre en el perímetro urbano o en la zona de expansión de la ciudad, la microzonificación sísmica establece una especificación de diseño de tipo espectral (para todas las variaciones posibles de edificaciones dentro de ciertos límites) de manera que cualquier edificación, diseñada con la especificación proporcionada, tendrá en general la misma probabilidad de sufrir daño o colapso ante un evento sísmico futuro. De esta manera no se establecen, en principio, limitaciones a las características generales de las edificaciones a diseñar. Sin embargo, es claro que edificaciones con características dadas, tendrán especificaciones de diseño más exigentes que otras, dependiendo de su ubicación geográfica. Teniendo en cuenta las exigencias mínimas de la NSR-98, existe la posibilidad de no poder utilizar ciertos sistemas estructurales tradicionales en algunas zonas del municipio, casos en los cuales el calculista deberá recurrir a sistemas estructurales que ofrezcan mayor rigidez y/o resistencia a las fuerzas horizontales.

Los requisitos de diseño sísmo resistente que se especifican incluyen el nivel de fuerza sísmica de diseño a nivel de la superficie del terreno para diferentes tipos estructurales (desde casas de uno y dos pisos hasta edificaciones de mayor altura, o construcciones como bodegas, edificios industriales, tanques y otros). También se tiene en cuenta la posible ocurrencia de amplificaciones en la respuesta, consecuencia de las condiciones del subsuelo. Los resultados del presente proyecto de investigación pueden complementarse en el futuro con información recolectada posteriormente. Ésta podría incluir las zonas en las cuales existe posibilidad de presentarse fenómenos especiales asociados al sísmo tales como eventuales fallas de taludes, amplificación topográfica o similares. De esta manera se establece la necesidad de adelantar estudios particulares, en especial, cuando la magnitud del proyecto lo amerite.

No obstante su aparente similitud en comportamiento sísmico, las zonas que conforman las rondas de los ríos, las zonas inundables, las zonas especiales de reserva (humedales, pantanos y/o lagos), los rellenos, las zonas de fallamientos superficiales, entre otras, deben ser estudiadas por aparte. Esto se debe a que pueden tener un comportamiento sísmico diferente al esperado o a que en el futuro pueden presentar una restricción especial en cuanto a su uso.

Con base en un mapa de zonificación sísmica, una ciudad puede adelantar la planificación de su desarrollo definiendo claramente las políticas de uso de la tierra y las restricciones

necesarias a ciertos tipos de construcción. Paralelamente, puede adelantarse un proyecto de mitigación del riesgo sísmico a través del diseño de construcciones teniendo en cuenta los efectos que un sismo máximo probable pueda producir en la zona que se encuentre. Como consecuencia, se minimizan los efectos de eventos sísmicos futuros, como las pérdidas de vidas humanas, el número de personas afectadas por el fenómeno natural y las pérdidas económicas asociadas.

Adicionalmente, la zonificación sísmica puede utilizarse para estudiar posibles escenarios de daños en sismos futuros esperados, tanto a nivel de las estructuras como en las líneas vitales. Solo después de muchos años de utilización de las especificaciones de diseño sísmo resistente, la vulnerabilidad sísmica a nivel municipal irá disminuyendo hasta alcanzar los estándares aceptables para la sociedad.

A cada punto que se encuentra dentro del perímetro urbano o en la zona de expansión de la ciudad se le asigna un espectro de diseño el cual se define de acuerdo con los parámetros establecidos por la norma NSR – 98 para edificaciones y que corresponden a los siguientes:

- Espectros de respuesta en términos de aceleración.
- Periodos de retorno de análisis: 475 años.
- Amortiguamientos con respecto al crítico: 5%
- Espectros a nivel de superficie del suelo o en terreno firme en función del tipo de cimentación en que se apoye el edificio y a criterio del ingeniero geotecnista.

Los espectros del análisis de respuesta dinámica (ver Capítulo 4) se someten a un suavizado por incertidumbre en el periodo estructural, para llegar a espectros de diseño. El presente capítulo resume los análisis realizados para llegar a los espectros de diseño finales recomendados y presenta el mapa de microzonificación propuesto.

5.2 SUAVIZADO DE ESPECTROS

Para efectos de definir los espectros de diseño, los espectros resultantes del análisis de respuesta dinámica se someten a un proceso de suavizado asociado a la incertidumbre que existe en el cálculo del periodo estructural. Gracias a este proceso se logran suavizar los picos y los valles del espectro de amenaza uniforme que se presentan en la zona de periodos cortos (periodos inferiores a 0.5 seg).

5.2.1 Proceso de suavizado

Partiendo de los espectros que resultan de los análisis de respuesta dinámica (ver Capítulo 4), se aplica un proceso de suavizado gracias al cual se tiene en cuenta la incertidumbre asociada con el cálculo del período estructural.

El proceso de suavizado incluye los siguientes pasos:

1. Seleccionar el espectro asociado a un periodo de retorno de 475 años para cada uno de los puntos de control.
2. Se aumenta el número de ordenadas del espectro seleccionado mediante un procedimiento tipo Bezier
3. Para cada ordenada del espectro se establece un rango comprendido entre el 80 % y el 120 % del periodo de análisis. Es decir para un período de 1 segundo se selecciona simultáneamente periodos de 1.2 y de 0.8 y así para todos los periodos.
4. Se calcula la aceleración espectral promedio y la desviación estándar de los valores comprendidos dentro del rango seleccionado.
5. Se calcula el valor promedio más una desviación estándar y este valor se asigna a la aceleración espectral de la ordenada espectral seleccionada.
6. Se continúa el proceso para todos los puntos del espectro.

El proceso se realiza para todos los espectros asociados a un periodo de retorno de 475 años encontrados para los puntos de control.

En la Figura 5.1 se presentan los resultados de realizar el proceso de suavizado descrito anteriormente sobre la forma de los espectros de amenaza uniforme en cada uno de los puntos de control de la ciudad.

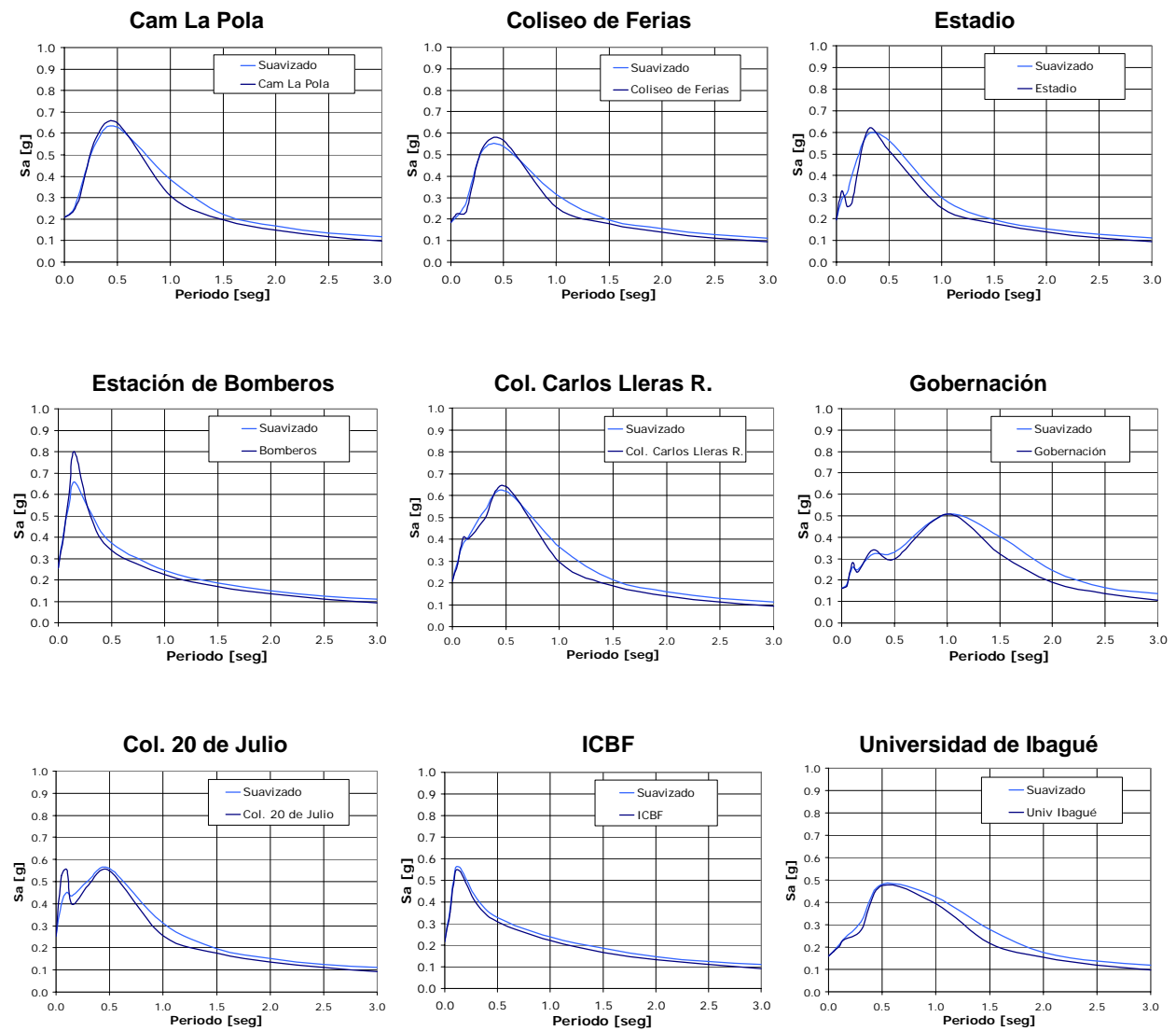
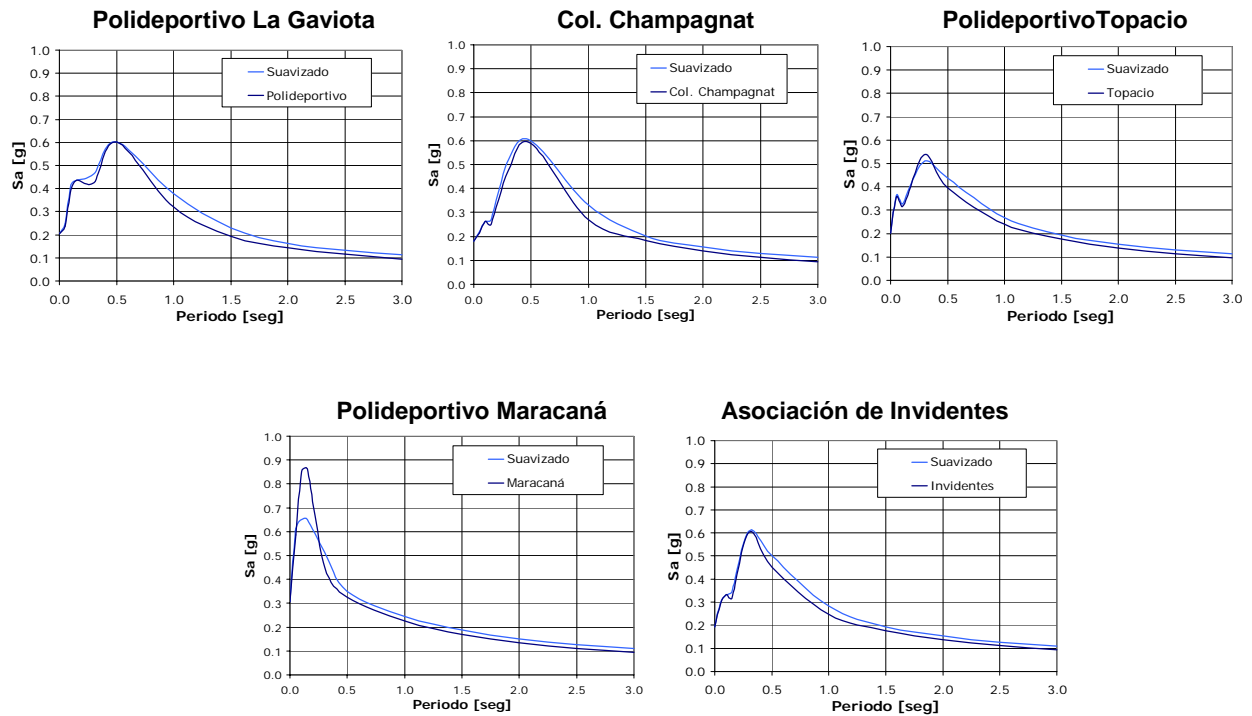


Figura 5.1 Ajuste de espectros por incertidumbre en el periodo estructural.



Continuación Figura 5.1 Ajuste de espectros por incertidumbre en el periodo estructural.

5.3 ESPECTROS DE DISEÑO

La mayor parte de la ciudad de Ibagué se encuentra asentada sobre depósitos de suelos variables conformados principalmente por intercalaciones de estratos de arenas y limos arcillosos con algunos estratos de arcillas o arcillas limosas, todos de poca profundidad en la mayoría de su área urbana, tal como se verificó en la exploración geotécnica realizada (ver Capítulo 3). Adicionalmente, los espectros resultantes del análisis de respuesta dinámica, presentados en el Capítulo 4 de este informe, exhiben una gran heterogeneidad en la respuesta sísmica principalmente para periodos estructurales bajos (menores a 0.5 segundos). Con el fin de uniformizar esta respuesta, y considerando la poca profundidad a la que se encuentran los estratos competentes, se normalizaron los espectros con relación al especificado en la norma NSR-98 (Ley 400 de 1997), sección A.2.4, para suelo firme (perfil S1) y un nivel de aceleración máxima del terreno de 0.20 g. La Figura 5.2 muestra los espectros de diseño recomendados, comparativamente con los espectros originales de amenaza uniforme obtenidos del análisis de respuesta dinámica y el espectro de la NSR - 98 para suelo firme, para los puntos de control analizados.

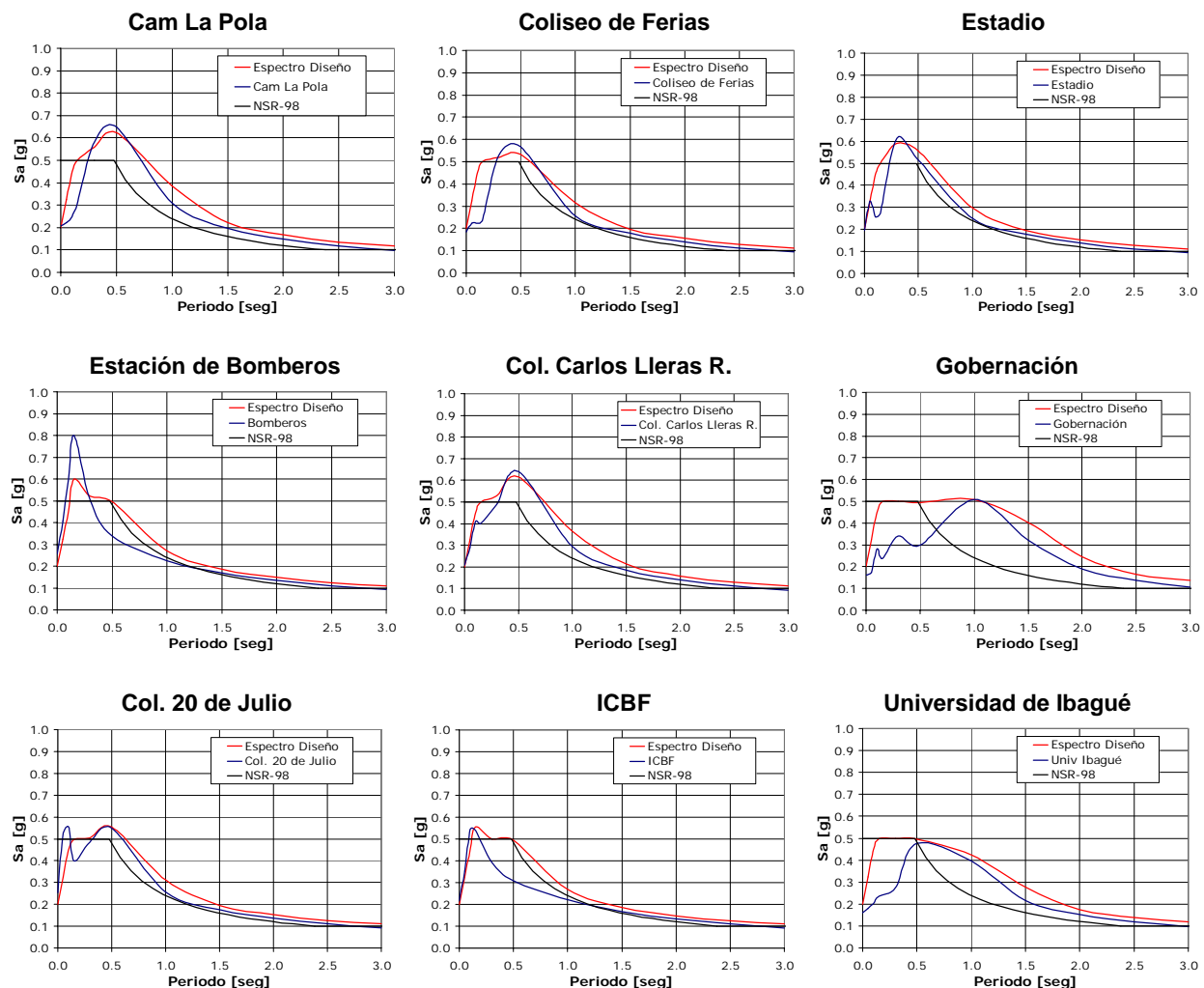
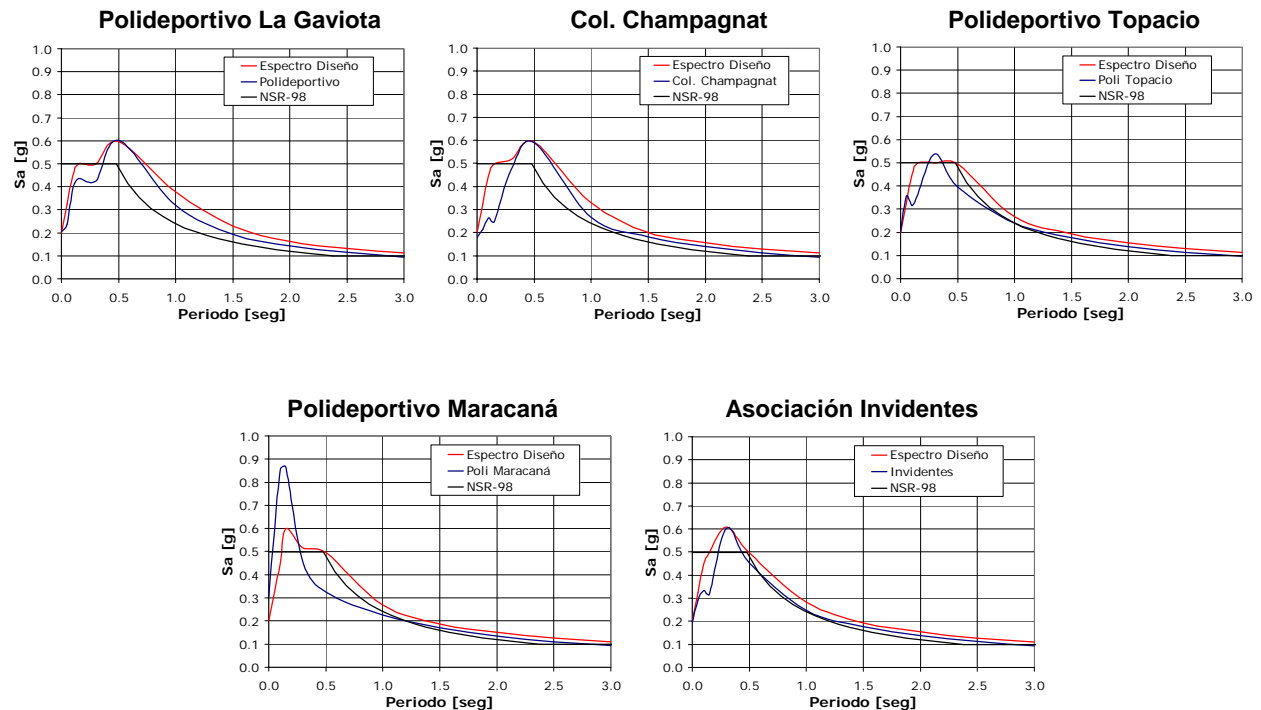


Figura 5.2 Espectros de diseño recomendados para la ciudad de Ibagué.



Continuación Figura 5.2 Espectros de diseño recomendados para la ciudad de Ibagué.

5.4 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

5.4.1 Generalidades

A partir de los espectros de diseño recomendados, se procede a la zonificación sísmica de la ciudad, teniendo en cuenta la respuesta esperada en los sitios de exploración, junto con el origen geológico y periodos dominantes de vibración de los suelos de la ciudad.

La mayor parte de la ciudad de Ibagué se encuentra localizada sobre depósitos de consistencia media a alta de poca profundidad, pertenecientes en gran porcentaje a la misma formación geológica (Abanico de Ibagué) como se expuso en el Capítulo 3 de este informe. Por lo anterior, la respuesta dinámica esperada para las diferentes zonas de la ciudad es en buena medida homogénea. A pesar de esta aparente uniformidad, se presentan particularidades que deben tenerse en cuenta en la especificación de diseño ya que generan variaciones que pueden llegar a ser significativas. Teniendo en cuenta dicha necesidad, en este numeral se presenta la zonificación propuesta para la ciudad de Ibagué complementada con la metodología propuesta para llevar a la práctica los resultados obtenidos.

Aunque en un principio se intentó dividir la ciudad en zonas homogéneas con su correspondiente espectro de diseño, esto no fue posible debido principalmente a la dificultad de definir los límites de cada una de las zonas y a las variaciones continuas en la respuesta dinámica de un sitio a otro. Teniendo en cuenta esta dificultad se decidió realizar una interpolación de los espectros de diseño encontrados en los puntos de control (un punto de

control corresponde a la ubicación de cada uno de los sondeos geotécnicos realizados) siguiendo el procedimiento de kriging [Golden Software, 2002]. Mediante este procedimiento se encuentra el espectro de diseño para cualquier punto que se encuentre al interior del perímetro urbano o de las zonas de expansión de la ciudad, logrando lo siguiente:

- a) Representar en forma confiable la respuesta obtenida en cada uno de los puntos de control, logrando con esto una optimización del diseño.
- b) Lograr una transición bidimensional (en el plano) suave y uniforme entre todos los espectros de los puntos de control disponibles dentro del perímetro urbano de la ciudad
- c) Evitar especificaciones muy conservadoras al tratar de proponer zonas de comportamiento sísmico uniformes que al parecer no son de fácil delimitación.
- d) Permitir la adopción de nuevos puntos de control en el futuro sin necesidad de modificar todos los resultados del estudio.

Las principales limitantes del procedimiento implementado para la zonificación sísmica de Ibagué radican en el número de puntos de control y la falta de puntos adicionales en las zonas de expansión de la ciudad. A medida que se cuente con un mayor número de puntos de control se disminuirá considerablemente la incertidumbre con respecto a los espectros de diseño en puntos lejanos a los puntos de control. Sería conveniente que en estudios posteriores se realicen nuevas perforaciones (principalmente en las zonas de expansión y en la ronda de los ríos) que ayuden a complementar los resultados de los trabajos realizados en la presente investigación.

5.4.2 Procedimiento práctico para definir el espectro de diseño

Para efectos de definir los espectros de diseño en un predio específico de la ciudad que tenga en cuenta la metodología anterior, se ha desarrollado un sistema de visualización (SISIbagué V 1.1) en el cual se han incluido los espectros interpolados, según lo explicado anteriormente, cada 50 m. El sistema indicará al usuario el espectro de diseño suavizado recomendado en cada punto de la ciudad, mediante la selección visual (o con coordenadas) del predio exacto a estudiar con ayuda de todo el sistema de visualización disponible. En el Capítulo 6 se explica en detalle el funcionamiento del sistema y el procedimiento para obtener los espectros de diseño en cualquier punto de la ciudad.

5.4.3 Mapa de Microzonificación sísmica

La metodología de microzonificación propuesta no establece como tal zonas homogéneas o sectores de igual comportamiento. Por esta razón, no es posible adoptar como tal un mapa de microzonificación sísmica. Se tiene más bien un mapa de variación continua de espectros de respuesta de diseño en toda la ciudad. Para efectos de ilustración únicamente se presentan mapas de microzonificación sísmica con tendencias de variación en los espectros.

El área urbana de Ibagué presenta una relativa homogeneidad en la respuesta sísmica esperada. Sin embargo, los estudios adelantados muestran la existencia de zonas cuyos depósitos de suelos son más profundos y de menor resistencia relativa en comparación con otras; por consiguiente, se tienen variaciones sensibles en las formas espectrales de diseño. La

Figura 5.3 presenta en forma ilustrativa las variaciones en las formas espectrales de diseño para la ciudad.

Para efectos de ilustrar la variación continua en la forma de los espectros de un punto a otro, se ha seleccionado como factor de graficación en la Figura 5.3 la aceleración espectral correspondiente a un periodo estructural de $T=1$ seg en espectros con un amortiguamiento con respecto al crítico del 5%. Se ha seleccionado este factor ya que se trata de las aceleraciones espectrales que mayor variación presentan geográficamente de punto a punto en comparación con las aceleraciones espectrales para otros períodos estructurales.

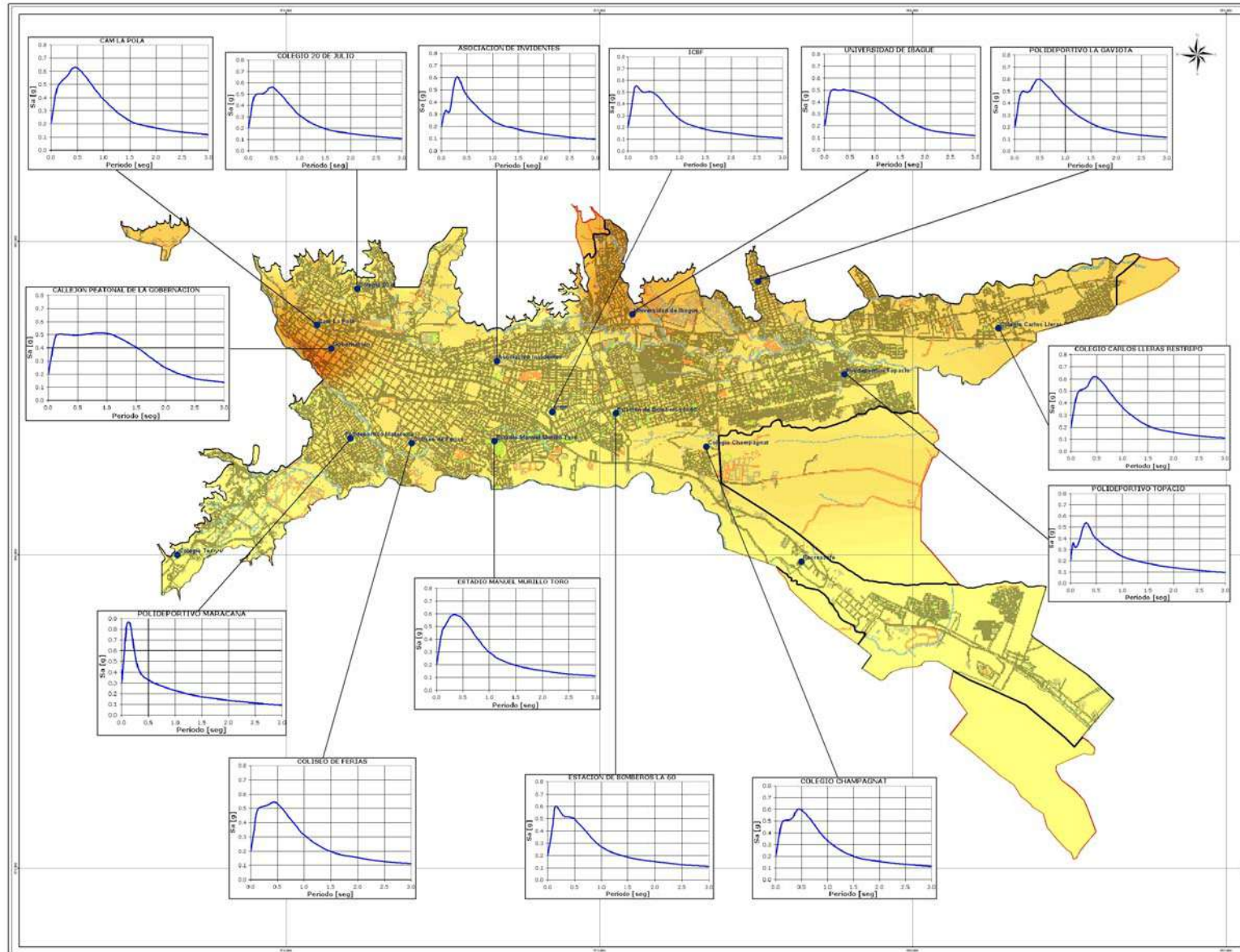


Figura 5.3 Mapa variación formas espectrales de diseño para la ciudad de Ibagué

5.5 MAPAS DE AMENAZA REPRESENTATIVOS

Con base en el sistema SISibagué V 1.1 (ver detalles del mismo en el Capítulo 6), se presentan una serie de mapas de amenaza representativos para la ciudad de Ibagué. En las Figuras 5.4 a 5.10 se presentan los siguientes mapas de amenaza para el área urbana de Ibagué:

- Aceleración en superficie del terreno para $T=475$ años
- Velocidad máxima del terreno para $T=475$ años
- Desplazamiento máximo del terreno para $T=475$ años.
- Juego de mapas de aceleración espectral en superficie del terreno para $T=475$ años y para varios períodos estructurales ($T=0.5$, $T=1.0$ y $T=1.5$ segundos).
- Aceleración máxima en superficie del terreno para $T=2500$ años.

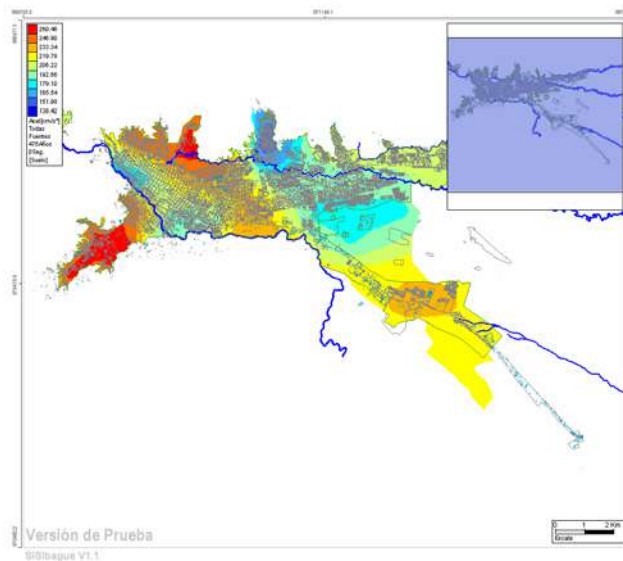


Figura 5.4 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 475$

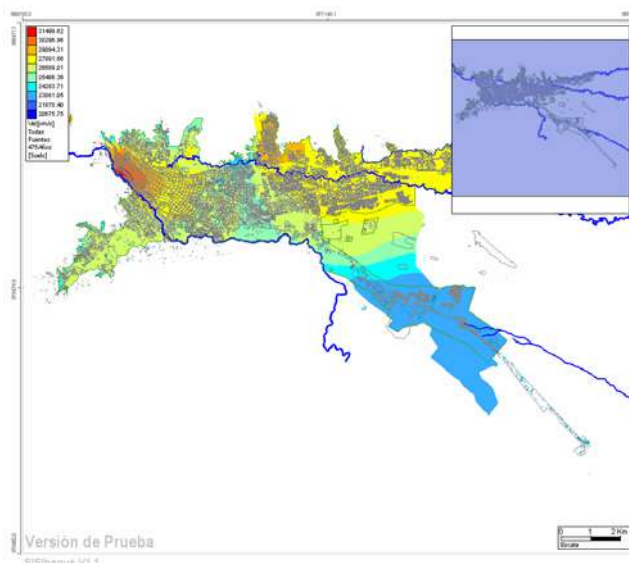


Figura 5.5 Velocidad máxima en terreno, $T_r = 475$

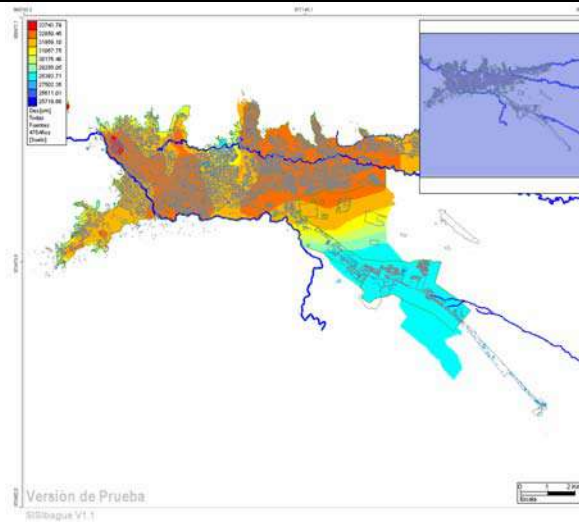


Figura 5.6 Desplazamiento máximo en terreno, $T_r = 475$ años

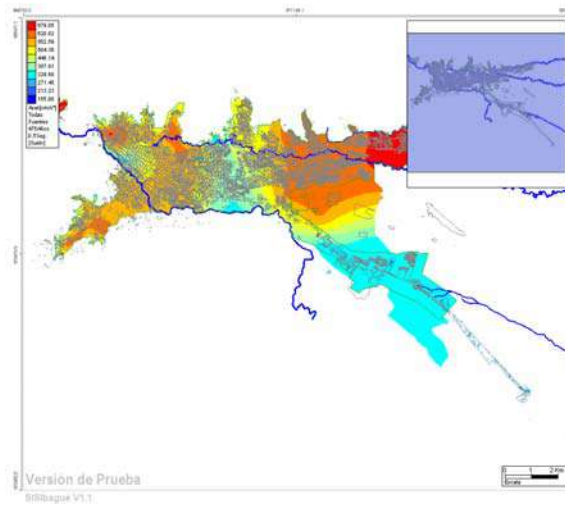


Figura 5.7 Aceleración espectral en terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.5 seg

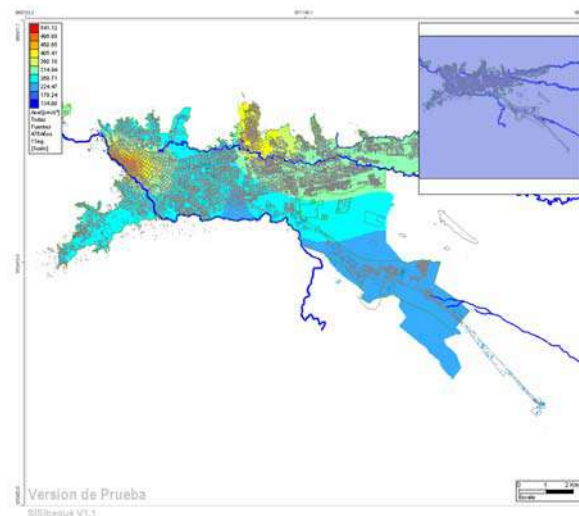


Figura 5.8 Aceleración espectral en terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 1.0 seg

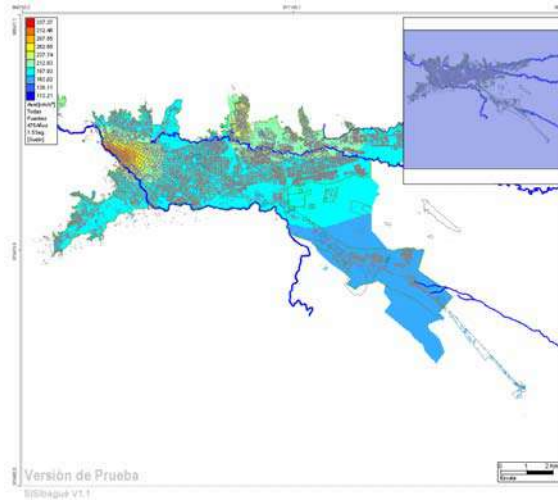


Figura 5.9 Aceleración espectral en terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 1.5 seg

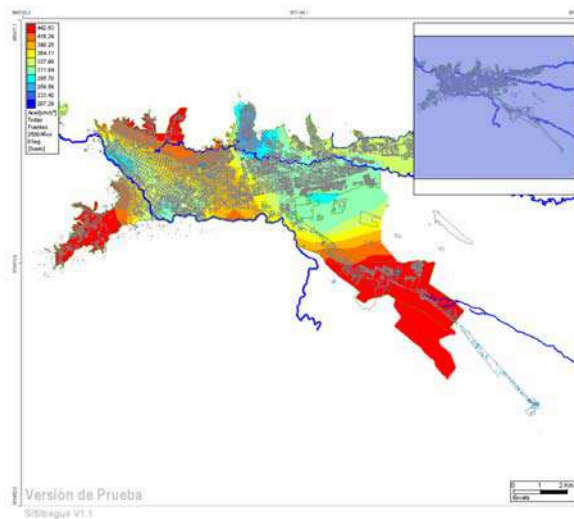


Figura 5.10 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 2500$

5.6 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA ADOPCIÓN DEL ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN COMO NORMATIVA LOCAL

La adopción por parte de la administración municipal de la reglamentación que ponga en práctica obligatoria los resultados del estudio de microzonificación debe tener en cuenta una serie de consideraciones técnicas que se explican a continuación:

- (a) Los nuevos espectros de diseño propuestos incluyen la respuesta dinámica del subsuelo en cada sector de la ciudad, Estos espectros reemplazan integralmente los espectros dados por las NSR-98 incluyendo los factores de amplificación del subsuelo, por lo cual al adoptar estos nuevos espectros no es necesario considerar los coeficientes de sitio especificados en el numeral A.2.4 de la NSR-98.
- (b) Los coeficientes de importancia especificados en el numeral A.2.5 de las NSR-98 deben seguirse aplicando sobre los espectros de diseño propuestos.
- (c) Todos los demás requerimientos de la NSR-98 relacionados con estabilidad sísmica de taludes, problemas de licuación, interacción dinámica suelo-estructura, coeficientes de disipación de energía, restricciones a los sistemas estructurales y otros temas deben seguirse aplicando normalmente, excepto que, cuando se requiera, el espectro a utilizar debe ser el especificado por los estudios de microzonificación y no el dado por la NSR-98.
- (d) La metodología finalmente propuesta para la aplicación de los espectros de diseño (ver numeral 5.4) no define como tal zonas sísmicas específicas, sino que plantea una variación paulatina de un sector de la ciudad a otro. Por esta razón no existen límites de zonas ni zonas de transición de un sector a otro. Las variaciones internas de un sector a otro de la ciudad se han definido con base en la geología superficial y en la respuesta dinámica de los sondeos característicos de cada sector, mediante interpolaciones entre los valores espectrales lo cual genera una variación suave de los mismos.
- (e) Resulta evidente de mediciones y análisis de respuesta dinámica que los diferentes accidentes topográficos tales como taludes, colinas, cambios de pendiente, rellenos, asimetrías en profundidad de los depósitos de suelo, cambios bruscos en la geometría de un depósito y otros aspectos geométricos generan amplificaciones en las aceleraciones para ciertas ubicaciones específicas en el accidente topográfico. Se han reportado amplificaciones en el orden de 2 o mas en ciertas zonas específicas. Sin embargo, considerando las altas incertidumbres asociadas con estos fenómenos no son aún susceptibles de normalización y se deja a criterio del ingeniero geotecnista de cada proyecto la eventual especificación de dichos factores.
- (f) Para efectos de los movimientos sísmicos del umbral de daño (literal A.12.2 de las NSR-98) se recomienda comparar el espectro especificado en la norma (con probabilidad del 80% de ser excedido en 15 años y amortiguamiento del 2%, según la norma) con los espectros dados por el sistema SISlbagué para la ubicación específica, para un periodo de retorno de 100 años y un amortiguamiento del 2%. En ningún caso se debe utilizar un espectro menor que el dado por la NSR-98.

En particular para la adopción de un instrumento jurídico se deben tener las siguientes consideraciones de manera explícita:

1. Todas las recomendaciones de diseño aquí establecidas son complementarias a las dadas en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes, Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998 y Decreto 34 de 1999 y en ningún caso podrá tomarse un requisito inferior al establecido por la Norma.
2. Todos los espectros de diseño recomendados son a nivel de la superficie del terreno para un amortiguamiento con respecto al crítico del 5%.
3. En las zonas con efectos topográficos de consideración como son las zonas cercanas a los bordes de los taludes deben aplicarse, factores de amplificación de acuerdo con las recomendaciones del ingeniero geotécnico.
4. Para estructuras con períodos de vibración fundamental mayores o iguales a 2.0 seg deben adelantarse análisis sísmicos especiales que se salen del alcance de las presentes recomendaciones.
5. Podrán utilizarse fuerzas de diseño diferentes a las que resultan de la utilización de los espectros de diseño recomendados siempre y cuando se justifique el valor empleado con análisis de respuesta de perfiles debidamente estudiados, utilizando hipótesis equivalentes a las dadas en el presente estudio y atendiendo los requisitos mínimos establecidos en las NSR-98 (Capítulo A.2). Para el efecto deberán utilizarse en el análisis al menos los tres (3) acelerogramas de diseño establecidos en el presente estudio y que se incluyen en formato digital anexo. En ningún caso la fuerza sísmica de diseño adoptada podrá ser inferior al 80% de la fuerza que resulta utilizando los espectros dados en el presente estudio.
6. Para efectos de aplicación de requisitos complementarios de las NSR-98, el municipio de Ibagué sigue perteneciendo a una zona de Amenaza Sísmica Intermedia.
7. Para el caso de estructuras de período corto (viviendas de uno y dos pisos y edificaciones de muros de pocos pisos), la selección del valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía para el sistema estructural, R, deberá realizarse de acuerdo con lo establecido en el numeral A.2.9.4 del Decreto 34 de 1999.
8. En Terrenos con pendiente superior a 10 grados (17%), deben realizarse estudios de estabilidad de taludes, geotécnicos y estudios adicionales de amenaza por fenómenos de remoción en masa que incluyan los efectos sísmicos. Para este efecto se deben aplicar tanto lo contenido en la sección A.2.4.1.6 y el Título H del Decreto 33 de 1998.
9. Podrán considerarse en el diseño los efectos de la interacción dinámica suelo estructura de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Apéndice A-2 de la NSR-98.

5.7 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS

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

1. La calibración del modelo de comportamiento propuesto solo puede realizarse mediante el registro de una serie de eventos sísmicos que puedan ser registrados en las estaciones acelerográficas instaladas en diferentes puntos de la ciudad. Para una adecuada calibración se requiere además que los registros disponibles tengan amplitudes significativas ya que para señales de baja amplitud los ruidos locales no permiten una adecuada interpretación. Por otro lado se pretende calibrar el comportamiento en el rango inelástico de los suelos para lo cual se requieren de señales sísmicas significativas (en general señales que se clasifican como de movimientos fuertes).
2. Analizando la densidad de instrumentos instalados en otras ciudades y de acuerdo con las variaciones observadas en la respuesta sísmica de un sector a otro, se estima que Ibagué debería contar con unos 12 a 15 instrumentos instalados de manera estratégica. En particular se recomienda la instalación de instrumentos en profundidad, en especial para conocer la señal en la roca base y contar simultáneamente con registros en superficie.
3. Otro aspecto que requiere mayor estudio es el de la caracterización geotécnica de los suelos de la ciudad. Hasta el presente se cuenta con información geotécnica de calidad en muy pocos sitios y debe pensarse en el futuro en mejorar la cantidad y calidad de esta información. Además deben realizarse perforaciones adicionales en las diferentes zonas de la ciudad con el fin de confirmar la delimitación de cada una de ellas y definir si las estratigrafías típicas propuestas en este estudio se mantienen o deben modificarse. Debe darse prioridad a los métodos de investigación de campo y a ensayos básicos como son la medición de la velocidad de onda de cortante en el sitio con métodos como el Down Hole o similares. En cuanto a la ubicación de posibles nuevos puntos de investigación deberá darse prioridad a las zonas de expansión de cada uno de los municipios y las zonas de la ciudad en que los puntos de control se encuentren más alejados.
4. Los aspectos de modelación bi y tridimensional requieren definitivamente mucha más información y desarrollo para poder ser aplicados al caso de Ibagué. La instrumentación resulta vital para conocer mejor las características de amplificación de diferentes depósitos y el comportamiento de los efectos topográficos.
5. Los efectos geométricos locales, asociados a la heterogeneidad de los depósitos de suelo o a cambios topográficos en superficie (como el caso de taludes o colinas) deben evaluarse en detalle para efectos de complementar la normativa de diseño. Para esto se recomienda igualmente adelantar una instrumentación básica que permita el dimensionamiento de estos efectos.

6. Con los resultados de este estudio, la ciudad puede emprender una serie de actividades complementarias tales como escenarios de riesgo por terremoto para elaborar los planes de contingencia en los diferentes sectores (salud, atención de emergencias, seguridad, defensa civil, rescate, etc), alternativas de reducción y mitigación del riesgo en edificaciones (públicas y privadas), retención y transferencia del riesgo sísmico de la ciudad, evaluación del riesgo de los sistema de líneas vitales (energía, acueducto, alcantarillado, comunicaciones, gas y otros) y elaboración de los planes de contingencia respectivos y otros.

5.8 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Aguilar, R., A. Arciniega, M. Ordaz, L.E. Pérez-Rocha, E. Reinoso, y F.J. Sánchez-Sesma.** 1991. Respuesta sísmica del Valle de México: Aplicaciones y teoría, Informe final de actividades del Centro de Investigación Sísmica A.C. a la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.
- Alcaldía de Manizales & Universidad de los Andes.** 1998. Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales - Caldas, Universidad de los Andes, Marzo de 1998
- Berg, Glen V.** 1982. Seismic Design Codes and Procedures. Earthquake Engineering research Institute.
- Chopra Anil. K.** 1982. Dynamics of Structures. Earthquake Engineering Research Institute.
- Corporación Autónoma Regional del Quindío, CRQ.** 1997. Microzonificación Sísmica Preliminar de la Ciudad de Armenia - Quindío", Universidad de los Andes, Julio de 1997
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, Municipios de Palmira, Tulúa y Buga, UNIANDÉS,** 2005. Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo Sísmico para las Ciudades de Palmira, Tulúa y buga.
- García L. E.** 1996. Dinámica Estructural y Diseño Sismorresistente. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería.
- Golden Software.** 2002. SURFER, Surface Mapping System Version 8.00, February 2002.
- Housner G.W & Jennings P.C.** 1982. Earthquake Design Criteria. Earthquake. Engineering research Institute.
- Hudson D.E.** 1982. Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms. Earthquake Engineering research Institute.
- INGEOMINAS & Universidad de los Andes.** 1992. Microzonificación Sísmogeotectónica de Popayán.
- INGEOMINAS.** 1999. Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999) Informe Técnico-Científico.”.
- Meli, R.** 1986. Evaluación de los efectos de los sismos de 1985 en los edificios de la Ciudad de México (3 volúmenes y 7 anexos), *Informe Interno DE/ESTV2/ 1*, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Meli, R. & Avila, J. 1988.** Analysis of building response, Earthquake Spectra, 5, 1-18.
- Miranda E.** 1991. Seismic and Upgrading of existing structures. Tesis Doctoral. Universidad de California en Berkeley- Berkeley, CALIFORNIA, Estados Unidos de América
- National Earthquake Hazards Reduction Program.** 1994. Recommended provisions for seismic regulation for building”. Part 1 and 2. 1994 Edition.

Newmark N.M. & Hall W.J. 1982. Earthquake Spectral and Design. Earthquake Engineering Research Institute.

Ordaz, M, Reinoso E. y Pérez Rocha L. E. 1996. Criterios de diseño sísmico: consideraciones para suelos blandos, Ingeniería Sísmica, (53) 25-35.

Ordaz M. & Perez-Rocha L. E. 1998. Estimation fo strength reduction factors for elastoplastic systems: a new approach, Earthquake Engineering Structural Dynamics 27 – 99-901.

República de Colombia. 1998. Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes – NSR-98, Ley 400 de 1997. Decreto 33 de 1998.

Rosas H. & Ruiz, S (1990), Factor de amplificación de la respuesta de estructuras con resistencia asimétrica, Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, No. 39, pp. 15-26

Sarria A. 1996. Ingeniería Sísmica. Ediciones UNIANDES.

Seed H. B, Idriss & I.M Lysmer. 1982. Ground motions and soil liquefaction during Earthquake. Earthquake Engineering Research Institute, 1982.

Universidad de los Andes & INGEOMINAS.1997. Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá.

Universidad de los Andes. 2002. Microzonificación Sísmica de la ciudad de Manizales.

Veletsos A. S. & Newmark N. M. 1960. Effect of inelastic behavior on the response of simple system to earthquake motion. Proceedings of second world conference on earthquake engineering 895 – 912.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 5 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO	5-1
5.1 INTRODUCCIÓN	5-1
5.2 SUAVIZADO DE ESPECTROS	5-3
5.2.1 Proceso de suavizado	5-3
5.3 ESPECTROS DE DISEÑO	5-6
5.4 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA	5-7
5.4.1 Generalidades	5-7
5.4.2 Procedimiento práctico para definir el espectro de diseño	5-8
5.4.3 Mapa de Microzonificación sísmica	5-8
5.5 MAPAS DE AMENAZA REPRESENTATIVOS	5-11
5.6 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA INSTRUMENTO JURÍDICO DE ADOPCIÓN DEL ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN	5-14
5.7 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS	5-16
5.8 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	5-18
ANEXO 5.1 - MAPA VARIACIÓN FORMAS ESPECTRALES DE DISEÑO PARA LA CIUDAD DE IBAGUÉ	

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 Ajuste de espectros por incertidumbre en el periodo estructural.....	5-4
Figura 5.2 Espectros de diseño recomendados para la ciudad de Ibagué.....	5-6
Figura 5.3 Mapa variación formas espectrales de diseño para la ciudad de Ibagué.....	5-10
Figura 5.4 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 475$	5-11
Figura 5.5 Velocidad máxima en terreno, $T_r = 475$	5-11
Figura 5.6 Desplazamiento máximo en terreno, $T_r = 475$ años.....	5-12
Figura 5.7 Aceleración espectral en terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 0.5 seg.....	5-12
Figura 5.8 Aceleración espectral en terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 1.0 seg.....	5-12
Figura 5.9 Aceleración espectral en terreno, $T_r = 475$ años, periodo estructural 1.5 seg.....	5-13
Figura 5.10 Aceleración máxima en superficie del terreno, $T_r = 2500$	5-13