RESUMEN EJECUTIVO

MODELO GEOTÉCNICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ Y CARACTERIZACIÓN DINÁMICA BIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS DE BOGOTÁ

El presente informe corresponde a los resultados del convenio 460 de 2006 Realizado entre la Sociedad Colombiana de Geotecnia (SCG) y el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá, FOPAE, como parte de las actividades que realiza la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito, DPAE, tendientes a hacer una revisión de las recomendaciones de diseño de la Microzonificación Sísmica de Bogotá con base en la información de estudios de respuesta sísmica local recopilada como parte del presente trabajo. La metodología y alcances de este trabajo se definió por parte de la DPAE con el apoyo del comité creado por la DPAE mediante resolución 058 del 11 de marzo de 2005 con el propósito de realizar la actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá, aprovechar la información disponible de los estudios de respuesta local para revaluar las propiedades geotécnicas de los suelos, los análisis de respuesta y las recomendaciones de diseño de la microzonificación sísmica de la ciudad. Esta información es significativamente mayor que la que se tenía cuando se hizo el estudio inicial, y se asumió que esta información podría utilizarse para mejorar los estimativos de al respuesta dinámica y las recomendaciones de diseño. No se pretendió generar nueva información ni reformular el estudio de la microzonificación en otros aspectos tales como la amenaza sísmica, neotectónica u otros. Únicamente se incorporó información adicional de sismos para análisis de respuesta obtenidos de estudios realizados por el Ingeominas y que la DPAE ha adoptado como alternativos para la realización de estudios de respuesta local, con base en los disposiciones del Decreto 193 de 2006.

El alcance del trabajo realizado por al SCG incluyó tres objetivos específicos a saber:

- Proponer un modelo geotécnico de la Sabana de Bogotá a partir de la información existente con el fin de establecer los parámetros necesarios para poder hacer análisis de respuesta dinámica en la ciudad

- Evaluar mediante análisis de respuesta dinámica bidimensional la respuesta dinámica a lo largo de cuatro secciones características de la s diferentes zonas de la microzonificación sísmica de la ciudad

- Hacer una revisión de la microzonificación sísmica y presentar una propuesta sustentada de actualización considerando espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento.

En el marco del convenio se buscó de manera lo más exhaustiva posible recopilar la información disponible, identificar los factores que afectan la información y los resultados obtenidos y dar las recomendaciones pertinentes teniendo en cuenta la información existente los resultados de análisis generados dentro del presente estudio y sus limitaciones. El estudio fue realizado por un grupo de especialistas e ingenieros de apoyo con experiencia en dinámica de suelos, análisis de respuesta dinámica, geología, geoestadística y análisis numérico. Los resultados del estudio fueron presentados a los miembros de la SCG que quisieron participar y sus observaciones y recomendaciones se tuvieron en cuenta para la elaboración del presente informe.

Como se ha mencionado el propósito del trabajo fue revaluar la respuesta dinámica calculada para la ciudad de Bogotá teniendo en cuenta la información obtenida de los estudios de respuesta local realizados en la ciudad con posterioridad a la realización del estudio de microzonificación sísmica. La recopilación, revisión y catalogación de la información disponible que se realizó en el marco del primer alcance del convenio indica que estos estudios corresponden a unos 100 estudios localizados principalmente en el norte y nor-oriente en sitios donde recientemente se han venido desarrollando construcciones en la ciudad. Esta información por lo tanto no está uniformemente distribuida y no es representativa de todas las zonas de la ciudad. Existen áreas muy grandes donde aún no se tiene información y es evidente que zonas tales como los piedemontes de los cerros son de altísima variabilidad en donde, a pesar de que se tenga relativamente abundante información, aún no es posible precisar con algún grado de detalle las condiciones particulares. Por lo tanto no es posible a partir de esta información precisar de manera significativa la zonificación sísmica de la ciudad, a excepción de los limitados sectores donde se tiene relativamente buena información de estos estudios y las condiciones del subsuelo no tienen grandes variaciones.

Por otra parte la información de los estudios de respuesta local corresponde a datos de estratigrafía, ensayos dinámicos de laboratorio y datos de velocidad de onda de corte (Vs) en general de los primeros 50 m de profundidad, con muy pocos casos en los que se tienen datos a profundidades de hasta 100 m. En general el espesor de los depósitos en la Sabana es de mucho más de 100 m, típicamente entre 150 y más de 400m, excepto hacia los bordes de los cerros. Por lo tanto la información real disponible es sólo de una pequeña proporción de los espesores totales de los depósitos, lo que implica que existe significativa incertidumbre con respecto a las propiedades de los depósitos y por lo tanto de la respuesta dinámica calculada, en especial para periodos mayores a 1.0 seg., que está asociada en gran medida con las propiedades de los depósitos por debajo de 50m.

La información disponible a partir de los estudios de respuesta local sin embargo es significativamente mayor que la utilizada para el estudio original de microzonificación sísmica de la ciudad, que se limitó a datos de Vs de muy pocos sondeos a no más de 30 m de profundidad. Los valores de Vs son el factor más importante en el cálculo de la respuesta dinámica y por lo tanto esta información es muy importante en el avance del conocimiento de las condiciones dinámicas de los suelos de la ciudad. Para los suelos arcillosos de la Formación Sabana se han podido establecer correlaciones bastante precisas entre los valores de Vs, la plasticidad y los niveles de esfuerzos y preconsolidación de manera consistente con lo reportado en la literatura internacional. Esto permite evaluar de manera confiable y precisa los valores de Vs si se tienen buena información de caracterización geotécnica de los suelos. Los

estudios científicos realizados en perfiles de suelos de la ciudad muestran que las propiedades de los suelos pueden variar significativamente en espesores de menos de 1.0m debido a variaciones de composición y estado asociados con cambios climáticos durante la formación de los depósitos. Sin embargo, en los estudios geotécnicos normales que se hacen en la ciudad muy pocas veces se tienen datos de caracterización con ese grado de detalle. A pesar de estas limitaciones, las relaciones obtenidas indican que los rangos de variación de los valores de Vs para estos suelos se pueden acotar con precisión a partir de la información disponible.

En el caso de los suelos de los piedemontes o depósitos aluviales (zonas 2, estratos de la zona 3, zona 5 y formación Subachoque) se tienen datos que muestran una amplia variación de los valores de Vs, aún localmente o en una misma perforación, que puede estar correlacionada de manera general con otros datos como los de SPT, pero cuya característica fundamental es la alta variabilidad y valores relativamente más altos que en los suelos de la formación Sabana. Las correlaciones pueden dar una idea de los posibles rangos de variación, pero estas variaciones se deben tener en cuenta en los análisis.

En el caso de los suelos de la formación Subachoque, que conforman la parte inferior de los depósitos de la Sabana, estos son de origen aluvial, con alto porcentaje de materiales granulares. Por su profundidad, típicamente mayor a 50 m, hay muy poca información de mediciones directas de Vs de los estudios realizados. A partir de estos pocos datos se identificaron tendencias y rangos de variación con la profundidad de los valores de Vs con el propósito de establecer recomendaciones para determinar parámetros dinámicos para los modelos. En estos materiales es imposible obtener muestras inalteradas representativas para realizar ensayos de laboratorio, por lo que la única opción es adoptar valores de referencia de la literatura. Estas condiciones implican que aún existe gran incertidumbre con respecto a la caracterización dinámica de estos suelos. A partir de los pocos datos que permiten conocer la profundidad del contacto superior de la formación Subachoque, incluyendo información recopilada de pozos profundos, y teniendo en cuenta consideraciones geomorfológicas, se estimó la profundidad del contacto entre las formaciones Subachoque y Sabana, lo cual es importante para establecer los modelos completos del perfil de suelos hasta la roca para poder realizar análisis de respuesta.

En estos estudios se tienen también datos de laboratorio del orden de 300 muestras realizados en los dos laboratorios que hacen este tipo de ensayos en la ciudad. Esta información es significativamente mayor que la utilizada en el estudio de microzonificación. Los resultados de los ensayos de laboratorio proveen información de la variación de la rigidez y el amortiguamiento con la deformación y los niveles de esfuerzos. Existe consenso internacional sobre factores que afectan la respuesta dinámica de los suelos tales como el nivel de esfuerzos, la relación de sobreconsolidación, la relación de vacíos (estructura interna), el nivel de deformación, la tasa de carga y el número de ciclos de carga (asociado con el cambio de estructura interna). Sin embargo este conocimiento es empírico y hay diferentes aproximaciones al problema sin que se haya dado la última palabra al respecto, en particular se ha tratado de establecer correlación entre el índice de plasticidad y las propiedades dinámicas, pero aún no es claro que esta correlación exista, al menos para todos casos, o si más bien estos aspectos están relacionados con la estructura interna que sería una condición particular en cada caso. Estos factores se tuvieron en cuenta para el análisis de la información disponible en Bogotá a partir de la comparación de los datos locales con referencias internacionales. El análisis de la

información y los factores que determinan estos resultados muestran que la incertidumbre asociada con la calidad de los resultados es muy grande, por lo que este aspecto del problema se mantiene casi con el mismo grado de incertidumbre que al comienzo del estudio de microzonificación. En particular se han identificado los siguientes aspectos que han afectado desfavorablemente la calidad de la información disponible:

- La calidad de las muestras ensayadas en cuanto a los muestreadores y procedimientos de muestreo, extracción y conservación de las muestras.

- Las grandes deformaciones que se presentan por los cambios en niveles de esfuerzos al sacar las muestras del terreno, y su progresión en el tiempo por disipación de presiones de poros inducidas por el proceso.

- El efecto de la saturación y restablecimiento de los niveles de esfuerzos en los ensayos que afectan la estructura de los suelos blandos.

- Las limitaciones del montaje y procedimiento de ensayo para medir muy bajas deformaciones, en particular cuando se hacen ensayos de deformación controlada.

- La imposibilidad de correlacionar valores de bender elements, columna resonante y triaxial cíclico realizados sobre muestras que no sean la misma en un solo procedimiento de ensayo.

- La limitación de hacer un ensayo pseudoestático en lugar de un ensayo dinámico debido a la sensibilidad de la rigidez dinámica a la tasa de carga en suelos finos.

Todos estos factores hacen que los resultados obtenidos en el laboratorio con respecto a los medidos en el terreno, comparados con datos reportados en la literatura, sean muy inferiores. Esto implica, por una parte o que la calidad de las muestras no es buena, o que la degradación de los suelos de Bogotá con la deformación es mucho mayor que la de otros suelos reportados en la literatura. Esto último tendría efectos importantes en la reducción de la respuesta dinámica de la ciudad. Sin embargo, teniendo en cuenta que hay evidencia que parece indicar que la calidad de los resultados no es confiable, no se consideró seguro recomendar una reducción significativa de la rigidez de los suelos finos para los análisis de respuesta.

Afortunadamente, el peso relativo de estos factores es mucho menor que el de los valores de Vs con respecto a los resultados de los análisis de respuesta, pero en todo caso se constituyen en factores importantes de incertidumbre que se deben considerar en la interpretación de los análisis de respuesta. Es necesario establecer programas especiales de investigación que permitan obtener de manera controlada y estándar muestras de alta calidad que se ensayen bajo protocolos establecidos, y que se puedan caracterizar además en gran detalle en todos sus aspectos de caracterización, estructura y composición, que permiten controlar las fuentes de incertidumbre y poder obtener información básica real del comportamiento dinámico de estos

suelos. Estas condiciones no se pueden dar en estudios locales de respuesta como están establecidos, por lo que es recomendable que se incorporen previsiones en la normativa que permitan hacer estas investigaciones.

En síntesis, como resultado del primer alcance del convenio, y teniendo en cuenta las limitaciones ya mencionadas, se hizo una base de datos georeferenciada con los datos de los estudios geotécnicos y dinámicos de respuesta recopilados. Esta incluyó la elaboración de un mapa estimativo de las profundidades de la formación Sabana que junto con el mapa de espesor de sedimentos, complementado con la información disponible recopilada, permite establecer la estratigrafía general del depósito hasta la roca en toda la ciudad. Adicionalmente se establecieron las tendencias y rangos de variación estimados, así como correlaciones con datos de clasificación básicos de suelos finos para poder estimar los valores de Vs en las diferentes formaciones con el fin de poder tener criterios de extrapolación en los sitios y a profundidades donde no se tenga información detallada de mediciones directas de Vs en el terreno. Adicionalmente se establecieron recomendaciones con respecto a la selección de propiedades dinámicas de los suelos basados en ajustes realizados a correlaciones de referencia de la literatura. De esta manera es posible realizar con criterio uniforme análisis de respuesta dinámica similares a los realizados en el estudio original de microzonificación sísmica de la ciudad, lo cual es uno de los propósitos del proyecto de la DPAE para la revisión de la normativa existente. Se debe tener en cuenta que la SCG considera que las limitaciones de la información existente aún son muy grandes, por lo que estas recomendaciones se deben tomar como indicativas con base en dicha información, pero no se pueden considerar como definitivas ni exhaustivas, por lo que en la revisión que se haga de la normativa se deben prever mecanismos para reducir los niveles de incertidumbre que aún existen en estos aspectos.

El segundo aspecto del convenio tuvo como propósito la realización de análisis de respuesta dinámica bidimensional a lo largo de tres secciones características en la ciudad, una en la zona norte entre los cerros orientales y el cerro de Suba, otra aproximadamente a nivel de la calle 72 en dirección oriente occidente, otra en dirección sur-occidente a partir de los cerros orientales a nivel del Parque Nacional hasta la intersección de la avenida Jorge Eliecer Gaitán con avenida de las Americas y otra desde el cerro del tanque de Casablanca hasta la Avenida Boyacá con diagonal 43S. Estas secciones se seleccionaron con el propósito de considerar cuatro situaciones típicas que tuvieran en cuenta la variación topográfica y estratigráfica y evaluar el efecto de cuenca sobre la respuesta dinámica bidimensional. La justificación de este tipo de análisis es el hecho de que el efecto de cuenca al acuñarse los depósitos en los bordes de la Sabana hacia los cerros produce efectos bi y tridimensionales en los patrones de propagación de las ondas inducidas por los sismos y de la respuesta natural o formas naturales de vibración de los depósitos que pueden ser muy importantes en la naturaleza de la respuesta en estas condiciones y que no se pueden tener en cuenta en análisis unidimensionales de respuesta.

Para la realización de estos análisis se definieron las secciones de análisis con base en la información topográfica y estratigráfica disponible obtenida en la fase inicial y las recomendaciones respectivas con respecto a la caracterización dinámica de los suelos. Una vez definidas las condiciones de las secciones de análisis se procedió a definir los modelos numéricos para análisis de respuesta dinámica. Para esto se utilizaron los Programas QUAQUE, QUAD4M, PLAXIS, FLAC2D y FLAC3D, correspondientes a programas comerciales para los cuales los especialistas participantes en el proyecto contaban con las licencias

correspondientes a los programas o sus pre y post procesadores. Estos son los programas normalmente utilizados para este tipo de análisis a nivel internacional.

Para el análisis de respuesta se hicieron análisis paramétricos con el fin de definir el nivel de detalle necesario en los modelos para representar con confianza los resultados esperados, y al mismo tiempo optimizar el uso de los modelos, ya que al ser de gran extensión los requerimientos de análisis en términos de capacidad de los equipos y tiempo de cálculo son muy grandes y se hacen de hecho las limitantes de los análisis. Por otra parte, se encontró con los primeros resultados que hay diferencias significativas en sus resultados debido a que hay factores numéricos asociados con la implementación de los programas, en especial en lo que se relaciona con los esquemas de amortiguamiento, que producen diferentes resultados para los diferentes programas. Esta situación hizo necesario establecer estos efectos para poder estimar la representatividad de los resultados. Los análisis paramétricos que se hicieron incluyeron los siguientes:

- A partir de modelos unidimensionales simplificados representando las formaciones Sabana y Subachoque, en las que los valores de Vs varían con la profundidad dentro de rangos establecidos, se estudió el efecto de variaciones puntuales de Vs a diferentes profundidades y con diferentes espesores. A partir de estos análisis se determinaron también los espesores de estratos que se deben utilizar para representar adecuadamente la variación de Vs con la profundidad. En esta etapa se evaluó también la sensibilidad de los resultados a las posibles variaciones de las propiedades dinámicas (rigidez y amortiguamiento) de los suelos con lo que se verificó la importancia relativa de estos factores y el efecto determinante de los valores de Vs en la respuesta.

- Con base en los resultados de los análisis anteriores y teniendo en cuenta la información estratigráfica disponible en las diferentes secciones analizadas, se hicieron análisis tendientes a buscar el nivel mínimo de refinación de las mayas de los modelos para obtener resultados consistentes con el fin de optimizar las mallas de elementos finitos utilizadas.

- Se hicieron análisis de un modelo simplificado representando un borde de cuenca con el fin de entender e ilustrar los aspectos básicos del problema y establecer comparaciones sobre los diferentes modelos utilizados.

- Se hicieron análisis para identificar los efectos de escalamiento de sismos, lo cual ha sido un factor de discusión frente a los requerimientos de la norma de respectar los niveles de amenaza en términos de niveles de aceleración máxima del terreno a nivel de roca. Los análisis se hicieron con los registros de sismos reales sin escalar y escalados. Los resultados, sustentados por información reportada en la literatura, muestran que al modificar los sismos mediante un escalamiento lineal produce efectos que no son uniformes sobre los espectros de respuesta, y en particular producen amplificaciones mucho mayores (más del doble) para los períodos de interés para el diseño de estructuras, entre 0,2 y 1,5 seg que las de los factores de escalamiento utilizados. Por otra parte, no se conoce ninguna razón física, sismológica o matemática que justifique hacer escalamiento lineal de los registros. Este tipo de modificación de los registros tiene un inmenso efecto sobre los resultados que podría aumentar fácilmente al doble o más los valores de aceleración de diseño, de una forma que se considera totalmente

arbitraria y artificial. Por lo tanto es la posición de la SCG que si es necesario escalar los registros para análisis de respuesta dinámica, esto se debe hacer con algún método sismológico o matemático consistente con la realidad física del problema y que no introduzca los efectos indeseables que produce el escalamiento lineal.

- Luego de realizar los análisis de las secciones previstas con todos los sismos considerados Finalmente se hicieron análisis adicionales de verificación de un caso reportado en la literatura para el cual se contaba con información de mediciones reales, y se realizaron análisis con el programa FLAC.

Los resultados de los modelos realizados permiten identificar aspectos básicos de la respuesta dinámica de los depósitos en la cuenca de la Sabana, en particular se estableció que el efecto del borde de cuenca se concentra hacia el borde de estas, en lo que corresponde a las zonas 2 y 3 de la microzonificación actual en donde el movimiento presenta componentes tanto verticales como horizontales importantes y una fuerte amplificación a períodos cortos similares a los del mayor contenido de energía de sismos de fuentes cercanas o intermedias. Este efecto depende de la profundidad e inclinación del contacto entre la roca y el suelo de depósito, y es menos evidente a medida que la profundidad del depósito aumenta. Por otra parte es evidente que en la respuesta dinámica se pueden diferenciar dos efectos, uno es la vibración forzada por efecto del tránsito de las ondas del sismo incidente. En el caso de sismos de fuentes cercanas e intermedias este componente de energía se concentra para periodos menores a 0,75 seg. El otro componente es la vibración natural del depósito que depende de su espesor y rigidez. En lo que corresponde a las zonas 2, 3 y 5 los periodos naturales de vibración están por debajo de 1.0 seg., lo cual coincide con el mayor contenido de energía de sismos de fuente cercana e intermedia lo que produce amplificación de los movimientos en este rango. En las partes más profundas de los suelos de la zona 3 y en la zona 4 la respuesta natural ocurre a periodos cada vez mas largos que corresponden al contenido de energía de sismos lejanos por lo que para estos sismos se produce amplificación importante para períodos de más de 1.0 seg., dependiendo de la profundidad de la roca.

Las secciones se analizaron con todos los 36 sismos que el Ingeominas seleccionó como representativos de la amenaza sísmica para la ciudad. Los resultados se presentan en términos de espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamientos. También en la forma de espectros tripartitas con el fin de verificar la consistencia de las condiciones control de fuerzas, velocidad y desplazamientos en diferentes regiones del espectro lo cual es básico para obtener espectros consistentes para diseño estructural. Finalmente, también se presentan como relaciones espectrales entre las ordenadas espectrales a nivel del terreno y de la superficie. Los análisis se hicieron a nivel de la superficie libre y además a nivel del subsuelo donde usualmente corresponde al nivel de cimentación de edificaciones.

Los resultados de los análisis de respuesta de los diferentes programas muestran diferencias importantes, especialmente para períodos por fuera de los periodos de mayor contenido de energía de los sismos de fuente cercana e intermedia que corresponden a los periodos de interés para los sismos fuertes y condiciones de suelos duros o blandos de poco espesor que son las condiciones más frecuentemente encontradas en el mundo y de mayor interés en ingeniería sísmica. Este sin embargo no es el caso de los suelos blandos de gran espesor de la

Sabana de Bogotá. Las grandes diferencias para periodos muy bajos o largos hacen que la interpretación de estos resultados sea difícil, en particular para determinar recomendaciones de diseño.

Con el fin de establecer la representatividad de los resultados se considera que la única opción confiable es comparar con datos reales de sismos registrados. En el caso de la Sabana de Bogotá a la fecha hay muy pocos datos registrados por la red de acelerógrafos y estos se limitan básicamente a dos sismos de muy baja intensidad que produjeron algunos registros en varios acelerógrafos en la ciudad. Esta información fue suministrada por la DPAE para poder ser utilizada en la calibración de los modelos. Al tratarse de sismos de baja intensidad los efectos de degradación de rigidez por la no linealidad y amortiguamiento por histéresis de los suelos es mínima y por lo tanto las funciones de amplificación de estos sismos corresponde a los máximos valores que se deben esperar y sirven por lo tanto como acotación o factor de calibración de los resultados de los modelos. Para los sismos de diseño los valores de respuesta se reducen significativamente por los efectos de no linealidad, lo cual se puede evaluar con los modelos y calibrar los resultados en el rango en que los resultados de los diferentes modelos es consistente. Para este efecto se analizaron los datos de dos de los sismos registrados en diferentes zonas de la ciudad para obtener los espectros de respuesta y las relaciones de amplificación espectrales que se utilizaron para acotar los resultados de la modelación.

Los resultados de los análisis y la validación que se ha hecho permiten hacer consideraciones sobre los resultados de los análisis realizados que muestran que hay una buena correspondencia entre lo medido y lo calculado en términos de los picos de respuesta que se obtienen asociados con la respuesta a las vibraciones inducidas por el sismo directamente y la respuesta de vibración natural de los depósitos, aunque se presentan distorsiones que muestran respuestas muy altas especialmente para periodos largos. Esto puede estar relacionado, además de los aspectos numéricos de la implementación y con la forma como se consideran las condiciones de frontera en los modelos.

Como resultado del tercer aspecto del convenio se hizo la revisión de la microzonificación sísmica y se presenta una propuesta sustentada de actualización considerando espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Para la determinación de los espectros de diseño propuestos se hizo una revisión detallada de toda la información disponible, incluyendo la revisión de la amenaza sísmica y se estudió en detalle la forma como combinar los resultados de los análisis de respuesta de las diferentes fuentes para poder definir unos espectros de aceleración, velocidad y desplazamientos de diseño propuestos para cada zona. Además se hizo un análisis con base en relaciones espectrales obtenidas de registros de sismos aplicadas al espectro de amenaza uniforme propuesto por la Universidad de Los Andes, teniendo en cuenta los efectos de no linealidad de sismos fuertes comparados con sismos de baja intensidad. A partir de este análisis se establecieron espectros envolventes de referencia para validar los resultados de los análisis de respuesta y que sirven con referencia adicional con respecto a los resultados de presente estudio y otros que se hayan realizado con otras metodologías.

Como resultado de la evaluación detallada y crítica de la amenaza sísmica de la ciudad con el fin de poder ponderar los resultados de los análisis realizados para las diferentes fuentes de manera que sean consistentes con los periodos de retorno para diseño se encontró que la amenaza sísmica por las fuentes cercanas es la más importante, y que al amenaza sísmica de al fuente lejana está muy sobreestimada, por lo que sería necesario revisar los sismos de análisis que se han utilizado para dicha fuente. Los resultados se analizaron en diagramas tripartitas para asegurar coherencia con las necesidades de análisis y diseño estructural. Con base en estos resultados se presenta la propuesta de la Sociedad Colombiana de Geotecnia para al revisión de los parámetros de diseños que se presenta en detalle en el capítulo 6 del informe.

Como resultado del estudio, y teniendo en cuenta el conocimiento de las limitaciones anotadas, se considera que es posible ajustar los espectros de diseño de la microzonificación de la ciudad. Los resultados del estudio indican que hay una fuerte correlación entre la profundidad del depósito y la forma y valores de las ordenadas espectrales de diseño. El otro factor determinante es la rigidez del depósito que está definida por los valores de Vs y directamente asociada con las condiciones geomorfológicas y geotécnicas del área. Los espectros de respuesta de aceleraciones presentan el efecto de las vibraciones forzadas por el sismo y la respuesta del depósito la cual se diferencia de la anterior en función de la profundidad de la roca y la rigidez de los suelos dando lugar a dos picos de respuesta. El primero corresponde a la excitación directa del sismo y corresponde con la distribución de energía del sismo, especialmente los de fuente cercana e intermedia que son los de mayor energía que pueden afectar la ciudad y que tienen alta energía entre 0,2 y 0,75 seg., y el segundo pico se va diferenciando y corriendo a periodos mayores también en función de la profundidad del depósito, en lo que corresponde a las zonas 3 y 4, asociado con espesores grandes de suelos blandos. Por lo tanto parece lógico establecer los espectros de diseño en función de la profundidad estimada del depósito. La diferenciación por zonas puede mantenerse como una forma de identificar las condiciones geomorfológicas y geotécnicas, en particular en lo que corresponde a las zonas 1, 2 y 5.

En la definición de los parámetros de diseño se deben tener en cuenta todas las incertidumbres que se han identificado en lo que corresponde a las propiedades de los suelos con la profundidad, especialmente en las zonas 2, 3 y 5 y para profundidades mayores a 50 m, así como la incertidumbre que se mantiene con respecto al comportamiento dinámico de los suelos. Igualmente se debe tener en cuanta el efecto de la modificación de sismos para el análisis y selección de parámetros de diseño.

Con la información disponible se puede precisar el mapa de profundidad de la roca y se pueden actualizar las zonas desde el punto de vista geotécnico en algunas zonas de la ciudad. Como parte del presente trabajo se presenta una propuesta de modificación de estos planos. Sin embargo es notoria la falta de información en especial en todo el centro, sur y occidente de la ciudad, incluyendo el occidente del cerro de Suba, en donde la definición de parámetros de diseño resulta altamente incierta.

RECOMENDACIONES GENERALES

Para el análisis de respuesta dinámica se deben determinar los parámetros geotécnicos y dinámicos del perfil de suelos entre la roca y la superficie del terreno. Para esto es necesario extrapolar la información a profundidades entre la máxima de exploración, usualmente 50m, y el espesor total del depósito que puede alcanzar hasta 450 m en el área urbana. En la actualidad aún existe muy poca información para profundidades mayores a 50m y hay grandes áreas de la ciudad donde prácticamente no se cuenta con información, en particular al sur de la calle 26. Es muy importante que se complemente la información en estas zonas que corresponden aproximadamente al 50% de al ciudad mediante investigaciones especiales y la realización de estudios locales de respuesta.

A pesar de que se ha hecho un buen número de estudios de respuesta local con ensayos de laboratorio, el presente estudio indica que la calidad de la información no es buena y aún existe gran incertidumbre con respecto a la determinación de las curvas de degradación dinámica de la rigidez y el amortiguamiento de los suelos de la ciudad. Se considera que se deben realizar estudios de investigación detallada y controlada en los que se puedan obtener muestras de alta calidad con un protocolo estricto de custodia y ensayo, para verificar verdaderas tendencias de comportamiento y poder validar o ajustar las recomendaciones adoptadas en el presente estudio u otras como las que reciente han sido propuestas por Díaz y Alarcón (2007).

Se ha identificado que la principal contribución de la amenaza sísmica para la ciudad es de fallas cercanas, particularmente las localizadas en el sur de la ciudad. Existen evidencias de fallas con rumbo aproximadamente este-oeste, que no aparecen en los planos geológicos del EMZSB. Estas fallas parecen coincidir con sismos históricos e instrumentales, por lo que es posible que sean fuentes sismogénicas activas que pueden ser las más importantes para la ciudad. Dada la importancia de estos hallazgos, y la falta de información al respecto, se considera muy importante realizar estudios detallados de neotectónica de estas fallas, y aprovechar la información de estudios geológicos y de estabilidad que hace la DPAE para obtener información que permita hacer un modelo tectónico más completo de la ciudad.

El presente estudio ha puesto de manifiesto limitaciones en los modelos utilizados hasta la fecha para el cálculo de respuesta dinámica, tanto 1D por no ser representativos de las condiciones de la Sabana, por lo menos en lo que corresponde a las zonas 1, 2 y 3 de la MZSB debido a los efectos topográficos del contacto roca sedimentos, y de los modelos 2D por efectos numéricos y de condiciones de frontera. Este tema por lo tanto se considera que se debe seguir investigando con base en la información y técnicas computacionales más recientes desarrolladas para estos análisis.

Por otra parte, los registros de sismos de la red de acelerógrafos de la ciudad, aunque de sismos pequeños, probaron ser muy útiles para entender la respuesta del depósito, validar los estudios de respuesta y como medio para poder estimar mejor los parámetros de respuesta dinámica de los suelos. Sin embargo la información que se tiene es limitada, y ha habido sismos recientes que se pueden haber registrados pero cuya información no se conoció. Se recomienda que se implemente procedimientos que permitan el uso efectivo y oportuno de la información de la red, aunque sea de sismos pequeños, para los estudios de respuesta y la definición y actualización de los parámetros de diseño.

Finalmente, dado que el problema de la amenaza sísmica, la estimación de la respuesta y la definición de los parámetros de diseño es un tema complejo, para el cual las personas que han participado en estos temas en el país no tienen la suficiente experiencia e idoneidad para poder valorar en su justa proporción todos los aspectos relacionados, incluyendo los técnicos, los socio económicos y políticos y las limitaciones de la información disponible, se recomienda que se consulte con expertos internacionales idóneos, o por lo menos con más experiencia, que puedan valorar la información disponible y asesorar a la DPAE con sus apreciaciones antes de proceder a hacer la definición de los parámetros de diseño revisados para la ciudad.