



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

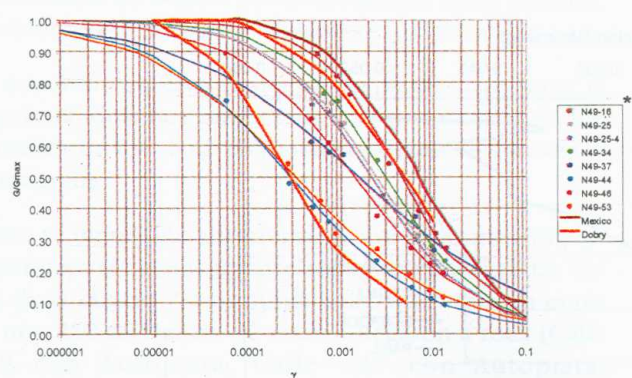
Los datos disponibles se analizan en relación con la amplificación que ocurre en los depósitos de suelo blando de la ciudad y con los cambios de contenido frecuencial que sufre la señal.

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.

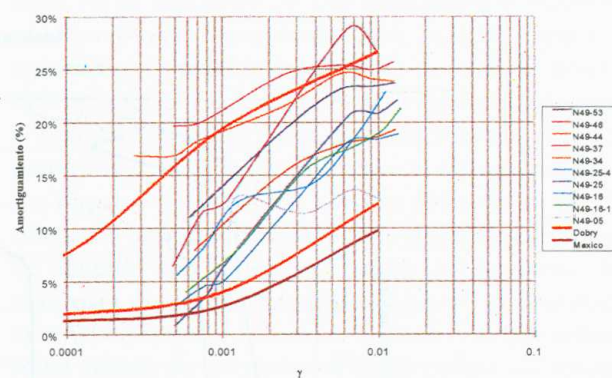
Existe una concordancia aceptable entre los períodos predominantes que representarían los períodos de vibración de los modos fundamentales obtenidos mediante el análisis del factor dinámico de amplificación del modelo unidimensional desarrollado y las funciones de transferencia empíricas basadas en los 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/G_{max} 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 DEFORMACIÓN POR CORTANTE

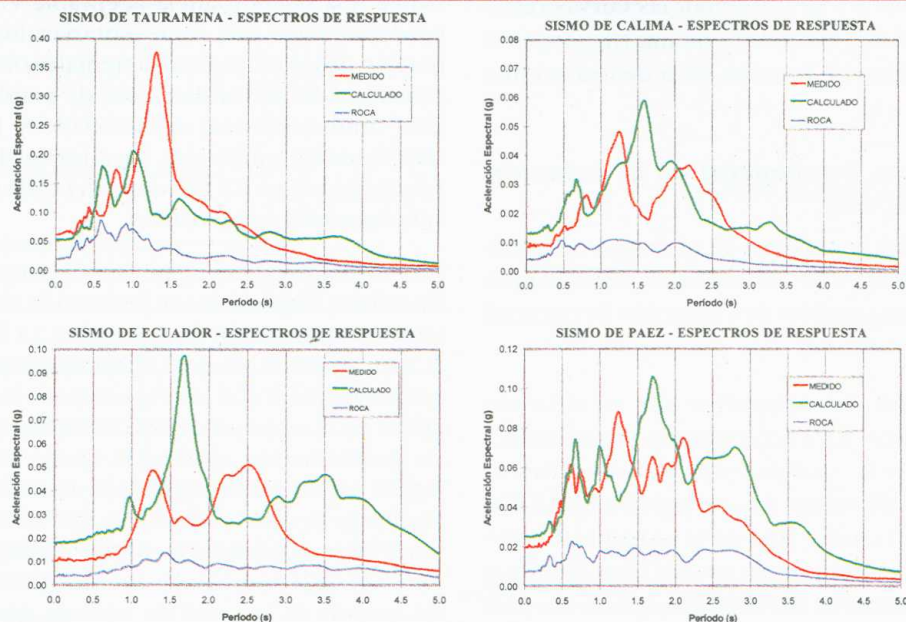


FIGURA 3.8 COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS TEÓRICAS OBTENIDAS MEDIANTE EL MODELO UNIDIMENSIONAL

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

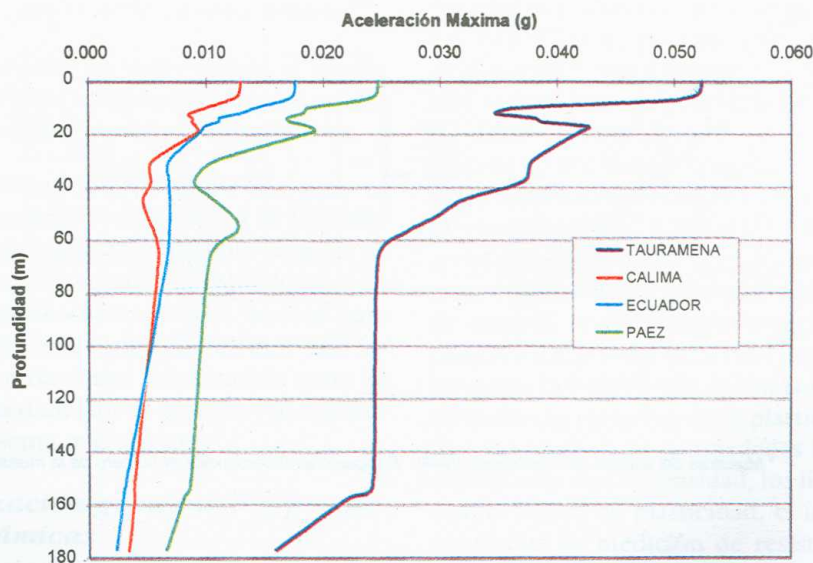


FIGURA 3.9 VARIACIÓN DE LA ACCELERACIÓN MÁXIMA DE RESPUESTA CON LA PROFUNDIDAD PARA LOS CUATRO SISMOS DE CALIBRACIÓN

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 esto 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 confinadas, 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-

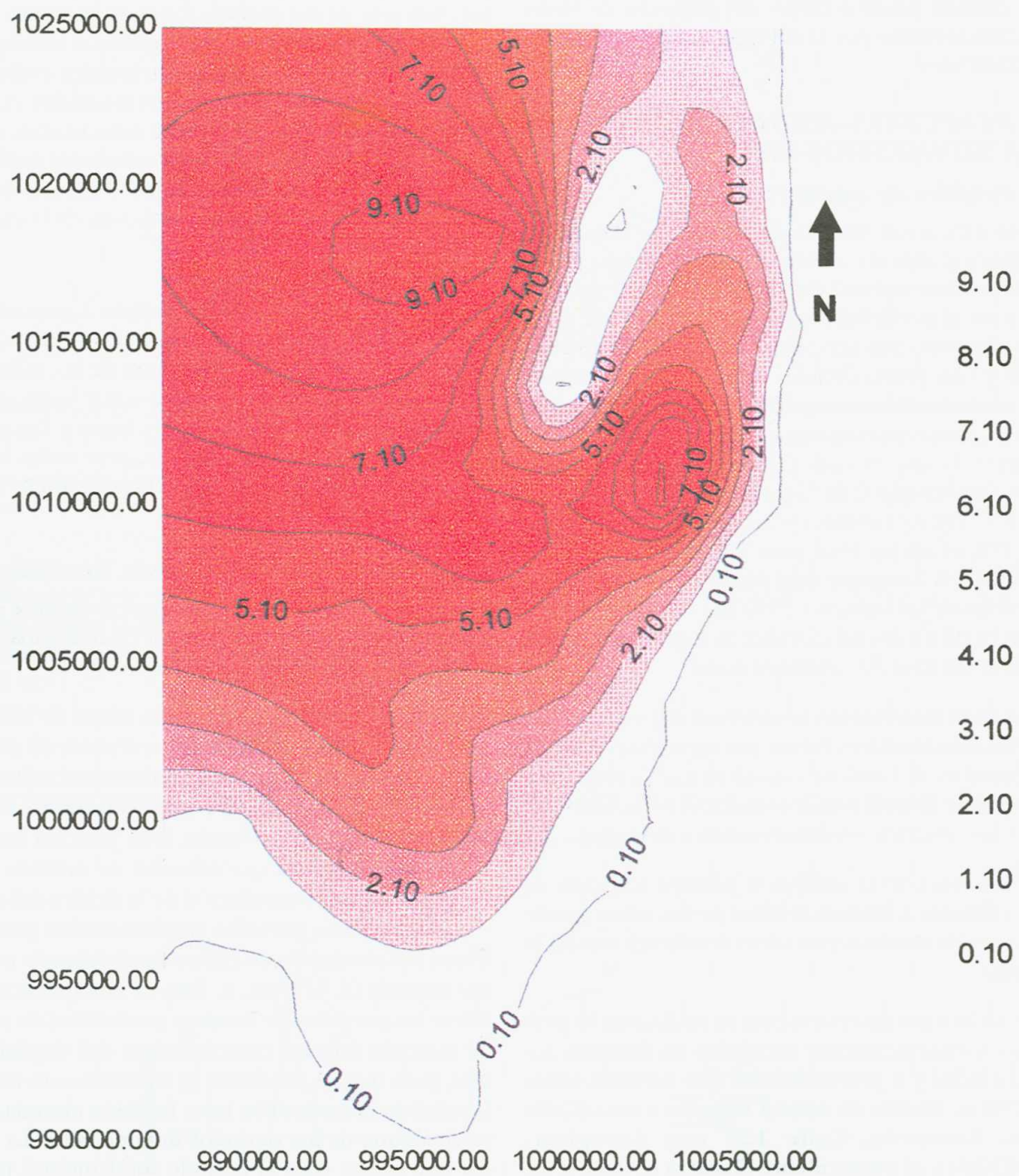


FIGURA 3.10 MAPA DE ISOPERIODOS FUNDAMENTALES DEL DEPÓSITO