

2.1 Análisis No-Lineal

La variación de las propiedades dinámicas de los suelos provoca que las FT varíen con la intensidad. Así, se presenta comportamiento lineal para bajos niveles de deformación (es decir la FT es constante), pero conforme estas aumentan, la no linealidad de los materiales comienza a actuar, de manera que para las mayores intensidades posibles en un sitio se presentarán los más fuertes efectos no lineales. En el presente trabajo se estudian los diferentes puntos de la ciudad para los cuales se tiene información suficiente.

Las FT para cada nivel de intensidad (en este caso aceleración) se generan usando los perfiles de suelo con sus respectivas propiedades dinámicas y los EAF se generaron a partir de la teoría sismológica del espectro radiado para suelo firme (Gallego, 2000) suponiendo que estos son los movimientos incidentes en la roca base en el modelo de propagación unidimensional de ondas SH. Una vez realizado el proceso para cada EAF en todos los puntos de análisis, fue posible construir las FT para cada nivel de intensidad. Por ejemplo, en la Figura 6 se presentan las FT para un sitio de estudio seleccionado denominado CAD .

En las FT de la Figura 6 se observa claramente el efecto de la no linealidad de los suelos blandos con el incremento de la aceleración. En todos los casos la función de mayor amplitud corresponde a una aceleración de 0.05g (que corresponde a una combinación de magnitud y distancia). Conforme la intensidad aumenta, las amplitudes de las FT disminuyen sistemáticamente. Además, los picos de las mismas se van corriendo hacia las bajas frecuencias, es decir, se produce un incremento en los períodos fundamentales del depósito. Lo anterior se debe a la degradación de rigidez que sufren los suelos a grandes deformaciones.

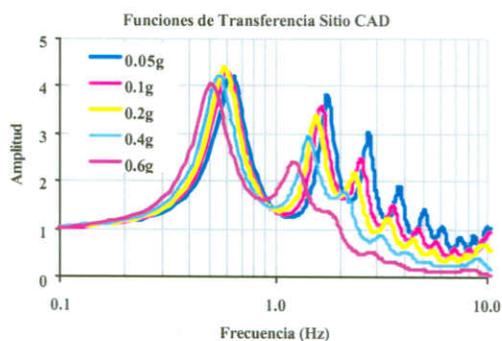


Figura 6: FT en sitios de estudio de la ciudad de Bogotá.

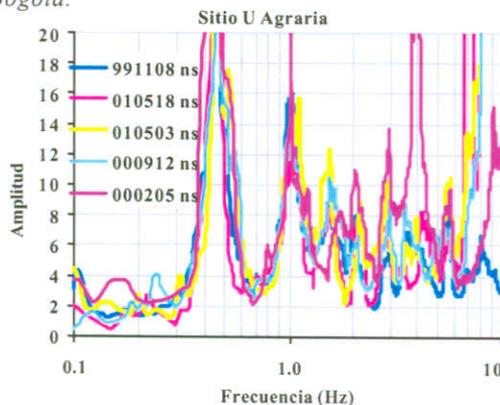


Figura 7: FT empíricas en ambas direcciones de la estación U agraria para diferentes eventos

El fenómeno se vuelve más relevante a medida que la aceleración aumenta hasta el valor máximo de 0.6g, donde los efectos de la no linealidad llevan las amplitudes de la FT a los niveles más bajos. Así mismo, el desfase de los períodos con respecto a los iniciales también es máximo. En muchos de los casos se presenta deamplificación (amplitudes menores que 1) en las altas frecuencias, lo cual significa que la amplitud de las ondas que llegan a la superficie en los bajos períodos será menor que la incidente en la base del depósito debido al alto amortiguamiento y baja rigidez que exhiben dichos suelos para altas intensidades.

2.2 Funciones de transferencia empíricas

Bogotá cuenta con una red de acelerógrafos desde 1999 que ha recopilado información valiosa desde su instalación. Las FT anteriores también puede evaluarse a partir de los registros acelerográficos de la red de la ciudad.

En la figura 7 se presentan las FT s empíricas, es decir, generadas a partir de los registros sísmicos en la base y en la superficie del depósito del sitio Universidad Agraria para varios eventos en diferentes fechas sobre su componente norte sur. En general se observa similar comportamiento para sismos diferentes.

Estas FT s revelan las características dinámicas del depósito, a partir de las cuales es posible identificar el período dominante del sitio de 2.5 seg (frecuencia de 0.4 Hz).

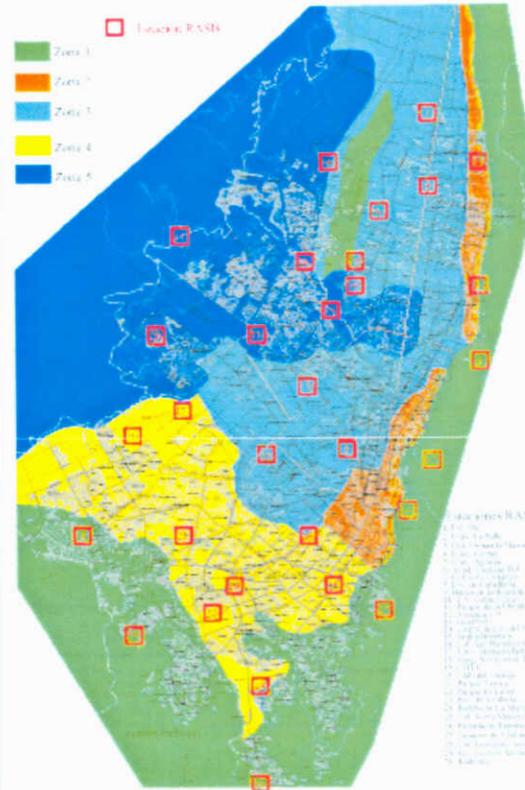


Figura 8: Distribución de sitios con acelerografos de la red de Bogotá sobre la microzonificación geotécnica de la ciudad.

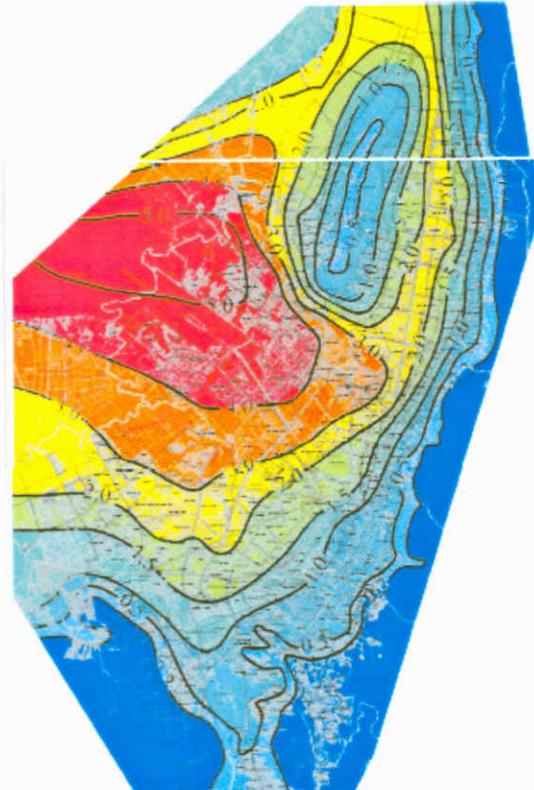


Figura 9 Distribución de periodos fundamentales de depósitos (seg.) en la sabana de Bogotá.

2.3 Períodos fundamentales de los depósitos de suelos blandos

Con base en los 40 sondeos adelantados en el estudio de MZSB (1997) en sitios de suelo blando de la ciudad, en los 25 puntos de los estudios para el proyecto Metro, en la información de las *FT* empíricas generadas a partir de registros de la red acelerográfica cuya distribución de equipos se observa en la Figura 8, y en la información de más de una docena de estudios de efectos locales realizados por particulares y entidades públicas es posible mediante interpolación bidimensional y teniendo en cuenta condiciones de frontera consistentes encontrar la *FT* en cualquier sitio de interés dentro del perímetro urbano de la ciudad.

Obviamente la precisión dependerá de la densidad de información. Para sitios lejanos a los sondeos la incertidumbre será mayor que en sitios cercanos. Al realizar todas las *FT* de los sondeos es posible identificar el periodo dominante de los depósitos en condición lineal, simplemente identificando el primer pico de la *FT* de menor intensidad. Una vez realizado el proceso en todos los sondeos y colocando objetivamente las respectivas condiciones de fronteras fue posible obtener la Figura 9 donde se muestra la distribución de periodos dominantes del suelo en la ciudad de Bogotá. El periodo del suelo es de suma importancia para diversos análisis de respuesta dinámica.

2.4 Duración de la fase intensa de movimientos en suelos blandos

Como se mencionó anteriormente, las *FT* se multiplican por los *EAF* para cada nivel de aceleración y es posible obtener las leyes de atenuación siguiendo los conceptos definidos en Gallego (2000). Sin embargo, la duración de la fase intensa de los movimientos, necesaria para aplicar la *TVA* deja de estar controlada por el criterio de frecuencia de esquina del modelo ² como en el caso de suelo firme (Herrman, 1985).

En Bogotá no existen estudios sobre la estimación de la duración de la fase intensa de los movimientos, fundamentalmente por la escasa red instalada hasta hace poco tiempo y también por la falta de un número considerable de eventos. Por esta razón para el presente caso se usan las aproximaciones de Reinoso *et. al.*

(2000) para depósitos lacustres basada en la fracción de duración de 2.5 hasta el 97.5% de la intensidad de Arias.

2.5 Construcción de leyes de atenuación espectral

Las estructuras civiles mantienen cierto margen de seguridad sísmica siempre y cuando su capacidad límite exceda la demanda sísmica de los movimientos. Sin embargo, es mucho lo que aun se desconoce para la determinación precisa de la capacidad sísmica de las estructuras. Investigaciones a principios del siglo XX concluyeron que una resistencia lateral de 10% del peso harían sobrevivir estructuras ante sismos severos. Los sismos en cambio superan muy frecuentemente la aceleración de 0.1g; el primer evento sísmico bien registrado en California en 1933 llegó hasta 0.3g, muchas estructuras resistieron hasta el triple de la resistencia de diseño, los investigadores entonces atribuyeron el efecto a las condiciones no-lineales de las estructuras durante fuertes movimientos sísmicos.

A pesar de ello, en el caso de sismos con muy grandes aceleraciones del suelo, A_{max} tales como: Morgan Hill-California, 1984, $A_{max}=1.3g$; North Nahani River, Canada, 1985, $A_{max}=1.35g$; Chile, 1985, $A_{max}=0.67g$; San Salvador, 1986, $A_{max}=0.78g$; Armenia, Colombia, 1999, $A_{max}=0.6g$; estructuras diseñadas con el 10 % de peso propio o menos como resistencia lateral colapsarían al no poder desarrollar capacidades dúctiles tan elevadas como para absorber la demanda impuesta, la mayoría de estructuras no poseen dichas capacidades, ¿entonces como llegan a resistir muchas estructuras ante eventos tan severos?. La respuesta salta a la vista; la aceleración máxima del suelo es una muy pobre variable para el diseño sísmico de estructuras. Lo necesario en diseño sísmico es la ordenada espectral tanto de aceleración como de desplazamiento para tener conocimiento claro de resistencia y rigidez. Por ello este estudio se enfoca en derivar la amenaza uniforme para cada ordenada espectral de cualquier intensidad; ya sea aceleración, velocidad o desplazamiento.

Gran parte de los reglamentos se basan en consideraciones inerciales de diseño sísmico, por lo cual presentan espectros de aceleraciones para el diseño. Los espectros elásticos dependen de las características del movimiento y del amortiguamiento. Sin embargo, en realidad los espectros usados para fines de diseño son espectros de resistencia. Básicamente en un diseño sismorresistente se evalúa la resistencia de una estructura con período conocido y se somete a una carga dinámica en la búsqueda de una distorsión de entrepiso que es la variable típica que controla el daño.

Los espectros de desplazamientos permiten por su parte determinar rápida y precisa una estimación de la rigidez lateral de una estructura para unos desplazamientos máximos o distorsiones de entrepiso prescritas para un cierto estado límite.

Como se ha mencionado, con base en los *EAF* de cada sitio de sondeo y con la estimación de la duración de la fase intensa de los movimientos, es posible obtener los valores máximos esperados o espectros de respuesta de cada *EAF*. Al repetir el proceso para cada magnitud, distancia epicentral, período estructural y mecanismo focal es posible derivar leyes de atenuación espectral en condiciones no lineales de suelo. El uso de las *FT* de osciladores permite encontrar el *EAF* representativo de estructuras con diferente período y amortiguamiento, lo que automáticamente admite el cálculo de relaciones de atenuación de ordenadas espectrales y la construcción de espectros para cualquier magnitud y distancia deseada.

La Figura 10 presenta las leyes de atenuación de osciladores de varios períodos estructurales en un sitio de suelo blando conocido como *CAD* en Bogotá. El método presenta compatibilidad espectral por lo cual al calcular por ejemplo el espectro de respuesta de seudoaceleraciones es posible evaluar los de seudovelocidad y desplazamiento espectral, mediante las simples relaciones espectrales conocidas.