

13. UN MODELO PRELIMINAR

13.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto partió de la percepción de dos fenómenos que indicaban una anomalía singular en el comportamiento dinámico de los suelos en el área de estudio: la excitación de respuestas estructurales sensibles a distancias aparentemente muy grandes, por espectáculos musicales en escenarios masivos, y la concentración de daños por terremoto en edificaciones del área. Mientras que las manifestaciones macrosísmicas cabían, en principio, en una interpretación de tipo “efecto local” estándar, las vibraciones inducidas – al ser generadas por una fuente puntual a distancia – parecían evadir una explicación en términos de simple modificación espectral por interferencia constructiva de ondas.

Resultaba, pues, de interés básico y práctico entender las causas de estos fenómenos, en términos de una estructura geológica y de unos procesos de propagación de ondas. El enfoque habitual para problemas de modificación espectral por efecto de suelos, el modelamiento unidimensional mediante procedimientos como el SHAKE³³ (que incorpora el efecto de cambios de impedancia, reflexión interna y atenuación inelástica) no parecía apropiado en

³³ Idriss & Sun (1992)

este caso, porque está concebido para ondas tipo S de polarización horizontal incidentes desde la base del sustrato modificador, lo cual evidentemente no aplica para el caso de las vibraciones inducidas. Por otro lado, desde principios del proyecto se sabía que no se iba a disponer de suficiente información geotécnica para la parametrización de un modelo de este tipo.

Como preguntas que el modelo para la dinámica sísmica de los depósitos del área de Cañaveralejo tenía que responder, al menos preliminarmente, se consideraron las siguientes:

- ¿Qué tipo de proceso hidrogeológico podía haber creado depósitos en el área de estudio significativamente diferentes a los otros conos aluviales del área urbana de Cali?
- ¿Cuáles son las condiciones estructurales y geomecánicas relevantes de los depósitos?
- ¿Cuáles son las componentes espectrales – frecuencias o períodos – transmitidos o amplificados por los depósitos del Cono de Cañaveralejo?
- ¿Qué condiciones estructurales o materiales pueden explicar la magnitud del fenómeno de las vibraciones inducidas en los depósitos?

Idealmente, un problema como el que enfoca este proyecto, en el cual la tridimensionalidad es evidente desde el principio al menos para algunos aspectos, se modela mediante la solución de la ecuación de ondas específica en un medio 3D. Sin embargo, la información para parametrizar un modelo de este tipo – desde la geometría en profundidad – no estaba disponible.

Con base en las anteriores limitaciones, se diseñó un enfoque centrado en el acopio y análisis de la mayor cantidad posible de información geológica y geotécnica (incluyendo información histórica, para conocer la condición natural, pre-urbanización, de los terrenos), la realización de algunas mediciones geofísicas puntuales para determinar parámetros geométricos y elásticos de los

suelos, así como la medición en superficie de ondas transmitidas por el material que compone el Cono. En este contexto, y bajo la limitación de recursos mencionada, era casi ineludible que el proyecto llevaría, además de algunas explicaciones satisfactorias de los fenómenos observados también a la identificación de aquellos aspectos estructurales y materiales de los depósitos que – más adelante – orientarán el diseño de mediciones y análisis para complementar eficazmente la información disponible.

Por otro lado, tanto las mediciones como la elaboración de un modelo explicativo se orientaron con base en aquello que está establecido en la Física de las ondas elásticas en medios continuos inhomogéneos como fenómenos que caracterizan su generación y transmisión:

- la reflexión y refracción, en discontinuidades de la velocidad y/o densidad;
- la atenuación de amplitudes y energías, por efecto de crecimiento del frente de ondas con la distancia (divergencia geométrica), y de la atenuación intrínseca (inelástica);
- la interferencia constructiva y destructiva de ondas reflejadas por discontinuidades de la impedancia;
- la conducción de ondas por reflexión múltiple en medios confinados.

13.2 SÍNTESIS DE RESULTADOS

La síntesis de **reportes de macrosísmica** se puede describir así:

- Los daños por sismos en los últimos 30 años están concentrados en el área de estudio está concentrada, en su porción NW: al norte del río Cañaveralejo y al W de la calle 9, coincidiendo con la zona donde hay mayor concentración de edificios.

- Los sismos que han ocasionado efectos en la zona de estudio incluyen las diversas fuentes sismogénicas de amenaza para Cali y están distribuidas al N, S, E y W, y en un rango grande de profundidades focales.

Los resultados de las **condiciones geoambientales** y geotécnicas muestran que:

- Geomorfológicamente los depósitos de la zona de estudio están limitados al N por el Cono de Cali, al E por la llanura aluvial del Cauca, al W por las rocas del Terciario y por el S, de manera menos definida, por los depósitos del Meléndez y de la Quebrada Puente Palma.
- La forma general de los depósitos es alargada en sentido E-W.
- Los Depósitos están conformados estratigráficamente por arcillas con intercalaciones de arenas y gravas. Las capas superficiales de arcilla aumentan de espesor hacia el E, desde pocos metros hasta 28 m. Los espesores aledaños son nulos sobre el cono de Cali y menores de 10 m en el de Meléndez. (Hacia el río Cauca la estratigrafía es diferente, conformada desde los primeros metros por intercalaciones de arenas, gravas y arcillas).
- En el área principal del cono se distingue, a partir de los perfiles geotécnicos, una división en dos sub-conos, con un área de menor espesor de arcillas alargada a partir de la terminación de la cuenca hacia ENE, siguiendo el antiguo cauce del río.

Los resultados de las **mediciones geofísicas** mostraron lo siguiente:

- El método de refracción sísmica indica un primer refractor somero, similar (C_P alrededor 1500 m/s) en los depósitos del Cañaveralejo y del cono de Meléndez, probablemente asociado con el nivel freático.
- La longitud de los perfiles de refracción, hasta 290 m, con profundidad de exploración estimada en unos 50 m, no fue suficiente para encontrar un segundo refractor en Cañaveralejo.

- Las velocidades medidas C_s fueron 194 y 208 m/s en la zona de estudio y 232 m/s en Biblioteca (Cono Meléndez), lo que coloca los depósitos de la zona de estudio y del cono de Meléndez en la porción inferior de los suelos rígidos (180 a 360 m/s) según la clasificación de Dobry *et al* (2000).
- Las velocidades de P y de S similares entre los puntos de medición, permitieron calcular la relación de Poisson encontrando valores similares para la zona del Cañaveralejo y la de Meléndez, alrededor de 0,49. Lo que usualmente se asocia con arcillas saturadas.
- Los periodos naturales de vibración obtenidos en la zona de estudio con el método del cociente espectral H/V de Nakamura, aumentan desde el piedemonte hacia el Este, y son muy similares en el sitio Colegio (cercano al piedemonte de rocas del Terciario) y Univalle sobre el cono de Meléndez. En San Antonio sobre suelos muy rígidos, como era esperable, no se encontró una frecuencia dominante. A continuación se relacionan los periodos naturales fundamentales determinados en cada sitio evaluado en el área de estudio:

Sitio	Colegio	Coliseo	Iglesia	Alcalá
T fundamental (s)	0,5	1,1	1,8	1,7

En Univalle (Biblioteca) el periodo fundamental fue de 0,6 s.

Los **reportes y mediciones de vibraciones inducidas** mostraron:

- Las distancias más largas (fuente - "receptor") de los reportes de vibraciones inducidas ocurren al norte del río Cañaveralejo, en sentido S-N para los reportes de Plaza de Toros y en sentido E para los reportes del Coliseo El Pueblo.
- Del conjunto de seis edificaciones con reportes de vibraciones inducidas, cuatro han reportado daños por sismos.

- Las mediciones de vibraciones inducidas (por concierto) realizadas en el Coliseo El Pueblo y a 1000 metros de distancia indican que en ambos sitios se obtuvo registro de la fuente de excitación asociada a cada canción, con las frecuencias fundamentales y armónicas similares.
- La diversidad de frecuencias fundamentales de vibración resultantes del conjunto de mediciones en Coliseo (a 30 m de la fuente), sugieren que guardan relación con la diversidad de formas (y, por ende, modos fundamentales) de los segmentos de gradería, adicionales a las diferencias en los ritmos de excitación.
- La atenuación de las ondas, fue anómalamente baja, unas 20 veces sobre 1000 metros.

Entre los métodos geofísicos aplicados a los objetivos de este trabajo, las microtrepidaciones (método de Nakamura, 1989) mostraron su capacidad para la caracterización directa de suelos en términos de su periodo de vibración dominante. Pero, en coherencia con la literatura revisada, el método no permitió obtener información robusta (porque dependía del procesamiento) sobre los factores de amplificación espectral en los diversos sitios de medición.

13.3 MODELO

En los últimos años algunos autores han propuesto que la velocidad C_S promedio hasta 30 metros de profundidad es suficiente para definir zonas con igual respuesta sísmica. Sin embargo, otros consideran que no lo es y sugieren, en vez, tener en cuenta otros factores, como la profundidad a basamento y la rigidez de los suelos, o la profundidad a un cambio significativo de la impedancia. La similitud de valores de C_S en la zona de estudio y en Univalle, por un lado, y por el otro, la concentración de daños por sismos en la zona de estudio en las tres últimas décadas, sugieren en primera instancia que C_S no juega el papel determinante en el comportamiento sísmico de los depósitos.

Adicionalmente, en la zona de estudio ni las mediciones de refracción sísmica (hasta 50 metros), ni los perfiles estratigráficos de pozos (hasta 90 m) indican que se haya tocado basamento. En conjunto con lo que se presentará mas adelante, esto sugiere que debe haber otras condiciones estructurales o del material, responsables del comportamiento sísmico de los depósitos del área de estudio.

El aumento de los periodos fundamentales de vibración hacia el E es coherente con el aumento del espesor de suelos no consolidados, y lo sería también con una mayor profundidad del basamento en esta dirección. Los periodos de vibración natural del suelo pueden jugar también un rol importante en la caracterización del comportamiento sísmico de los depósitos.

Los periodos determinados en conjunto con la velocidad medida permiten estimar el espesor resonante (H) de los depósitos sedimentarios, el cual relaciona C_s con el periodo natural de vibración (T) mediante la relación (p. ej. Field *et al*, 2001):

$$H = C_s * T / 4$$

Para ello se asumió que la C_s en los sitios Alcalá e Iglesia es igual a la C_s medida en Coliseo (208 m/s).

Sitio	Colegio	Coliseo	Iglesia	Alcalá
C_s [m/s]	208	194	208	208
T [s]	0,5	1,1	1,8	1,7
H [m]	24	57	93	88

En Univalle (Biblioteca) con $C_s = 232$ m/s y $T=0,6$, el espesor resonante H es de 34 metros.

En todos los casos el espesor calculado es una expresión directa del período dominante, ya que la otra variable, C_s , es muy similar en todos los puntos de medición.

El “efecto local” es, principalmente y en cuanto al período dominante, un fenómeno de interferencia constructiva de las ondas y de resonancia de los estratos de suelo; el periodo fundamental jugaría un papel tanto más importante cuando coincide con el periodo dominante de las ondas.

Comparando los espesores de resonancia resultantes con la profundidad estimada de exploración en Coliseo, y con la profundidad del refractor hallado en Biblioteca, se tiene que hay una concordancia (en los depósitos no se encontró refractor hasta los 50 metros, menor que el espesor de la capa resonante). No ocurre lo mismo al comparar la información de los pozos (primera capa de arcillas de 28 m) con el espesor resonante estimado (93 m). Una de las explicaciones de esta discordancia podría radicar en que el estado del arte en la metodología de Nakamura (aún pendiente de una explicación teórica robusta), y en particular su capacidad de resolución, funciona para casos de estratigrafía simple, asimilables a una sola capa homogénea.

Calculando el periodo a partir del espesor de 28 metros de arcillas y la C_s medida (208 m/s), se obtiene que el periodo sería 0,6 segundos.

En cuanto al fenómeno de las vibraciones inducidas y su particular manifestación en los Depósitos se infiere, por ahora y con la información disponible, que no tiene una relación directa con las condiciones que, por otro lado, determinan el comportamiento de los depósitos durante movimientos sísmicos. Se reconoce una diferencia fundamental entre los dos fenómenos: el “efecto de sitio” es producto – en su componente aquí analizada – de la incidencia de ondas sísmicas desde la base de un depósito. Aquí son las propiedades estructurales y mecánicas de una “columna” vertical las que determinan el resultado. En cambio,

en el fenómeno de las vibraciones inducidas la fuente de ondas es puntual y está dentro (sobre, más exactamente) del depósito, de tal manera que el ó los modos de propagación y vibración pueden ser de “columna vertical” (es decir, un cuerpo oscilante con un extremo libre), pero también de propagación horizontal, en cual caso los límites que confinan el depósito actúan como guía de ondas, disminuyendo la divergencia geométrica y, posiblemente, causando fenómenos de interferencia (constructiva y destructiva) por reflexión múltiple a lo largo de su propagación. Se infiere que el factor determinante en el alcance anómalamente grande de las vibraciones está en el confinamiento y la reducida divergencia geométrica que conlleva; las mediciones de vibraciones inducidas durante el concierto del grupo de rock en español “Los Fabulosos Cadillacs” mostraron una atenuación anómalamente baja (20 veces en 1000 metros) para depósitos geológicamente jóvenes. Esto también podría explicar la ausencia de reportes “lejanos” al sur y sur oriente de las fuentes, o sea, fuera de los ejes (antiguo cauce) del Cono.

La selectividad en las vibraciones inducidas (conciertos en la Plaza de Toros excitan edificios en ciertas áreas y aquellos en el Coliseo en otras) podría encontrar su explicación en diferencias de los modos que una y otra estructura excita, pero esto solamente se podrá verificar con mediciones futuras. Por otro lado, las vibraciones excitadas por el concierto en el Coliseo no fueron suficientemente bajas ($f_0 \Rightarrow 1.75$ Hz) para verificar su posible coincidencia con la respuesta del suelo encontrada con el método de Nakamura.

En suma, el modelo preliminar que resulta de este proyecto muestra que el comportamiento dinámico singular de los terrenos en el área de los depósitos de Cañaveralejo no resulta sólo de la velocidad C_S en los primeros 30 m del suelo, sino de una conjugación de factores que también incluyen la forma tridimensional de los depósitos.

El conjunto de factores contemplados y analizados en éste modelo preliminar permiten concluir que los depósitos de Cañaveralejo sí tienen un efecto sísmico local. Cuyo rasgo determinante es una espesa capa de arcillas - marginalmente blandas-, saturadas de agua, que amplifican ondas sísmicas en el rango 0,6 - 1,7 segundos.

En relación con la metodología empleada se puede concluir finalmente que:

- Es acertado integrar diversas técnicas de evaluación, complementarias.
- Evaluaciones puntuales (perforaciones, ensayos en muestras) son insuficientes; pueden llevar a imágenes incompletas y erróneas de la realidad.
- Es necesario evaluar también dimensiones espaciales y temporales (génesis y evolución).