

12. VIBRACIONES INDUCIDAS POR CONCIERTOS

En este capítulo se presenta una breve introducción a las vibraciones inducidas (estado del arte) especialmente por público en escenarios masivos. Se reportan evidencias empíricas en la zona de estudio, asociadas a conciertos musicales que produjeron oscilaciones perceptibles (reportadas) en edificaciones hasta distancias de 1 km. Finalmente, se presentan, analizan y discuten mediciones geofísicas de vibraciones, realizadas durante un concierto de rock en el Coliseo El Pueblo en junio del presente año.

Aún cuando la literatura sobre vibraciones inducidas por maquinaria, tráfico, explosiones, etc. es abundante, lo mismo que en relación con vibraciones en estructuras de uso público como estadios y coliseos, no se encontraron muchas referencias sobre efectos a distancia de las vibraciones inducidas desde sitios de conciertos musicales u otros actos de concurrencia masiva, de hecho, se encontró solo una sobre este tipo de efecto (Walker, 2001), pero donde no existe aún mediciones que permitan cuantificar y analizar las vibraciones inducidas.

12.1 CARGA DINÁMICA Y FRECUENCIAS

Las personas en movimiento durante conciertos pueden saltar (generando fuerzas impulsivas) o bailar (generando fuerzas quasiperiódicas). Estos movimientos son continuos y rítmicos durante las canciones. En ocasiones, dependiendo del tipo de música, parte del público puede saltar coordinadamente.

En la Tabla 31 se presentan las frecuencias típicas de diferentes movimientos durante conciertos o partidos de fútbol.

Tabla 31. Frecuencias típicas durante conciertos

Tipos representativos de actividades	1. Tasa de actividad	Frecuencia, Hz
Saltar	Normal	2,0 - 3,0
	Altos	2,0 - 3,0
Bailar		2,0 a 3,0
Aplaudir de pie con saltos		1,6 ó 2,4
Aplaudir	Normal	1,6 ó 2,4
	Intenso	2,0
Oscilación lateral del cuerpo	Sentado	0,6
	Parado	0,6

Fuente: Barrios et al (2000)

Ji & Ellis (1999) evaluaron la definición de la masa de las personas utilizada para el diseño de pisos de baile. Después de una serie de ensayos de laboratorio encontraron que una persona en movimiento sobre una estructura actúa como una fuerza (variable quasiperiódica) cuando salta y como un sistema masa-resorte amortiguado cuando esta sentada o parada.

12.1.1 Definición.

Las cargas dinámicas generadas por personas en movimiento (saltando, aplaudiendo, bailando) inducen vibraciones a las estructuras y éstas al medio.

Las vibraciones inducidas por la carga dinámica durante conciertos varían con el tiempo y se conocen como vibraciones no estacionarias (según definición de p. ej. Piersol, 1996), pero si las propiedades promedio de las vibraciones no cambian rápidamente durante un lapso de tiempo determinado pueden ser consideradas como estacionarias (ibid).

El caso objeto de estudio en este capítulo son las vibraciones inducidas por el movimiento del terreno en edificios, que a su vez ha sido inducido por las vibraciones generadas durante conciertos.

Las vibraciones inducidas en estructuras por una carga de impacto pueden ser estudiadas a partir del momento en que se termina la excitación, como la respuesta de la estructura a dicha carga (p. ej. Mejia, 1991). Por su parte y por su carácter continuo las vibraciones inducidas durante conciertos por personas en movimiento (saltando, aplaudiendo acompasadamente, bailando, brincando) deben ser estudiadas durante los lapsos de duración de la actividad, coincidente con las canciones, cuando el público salta (a veces coordinadamente al compás de la música rock), cuando el público pide repetición y/o zapatean coordinadamente y cuando el público hace la “la ola”.

12.1.2 Casos de vibraciones inducidas.

Como se explica en el Capítulo 10, las masas de suelo y roca están permanente sometidas a fuentes vibratorias naturales (viento, oleaje, ríos, sismos) y artificiales (tráfico, bombas de agua, maquinaria y actividad cultural en general).

Dentro de las fuentes vibratorias artificiales que inducen vibraciones al suelo , y de allí a terrenos cercanos y edificaciones, se encuentran los siguientes:

- explotación de rocas
- hincado de tablestecados
- tráfico vehicular y férreo,

Estas fuentes de vibraciones y sus efectos han sido estudiadas por diversidad de geofísicos e ingenieros para determinar los posibles daños asociados o para el diseño de obras civiles que mitiguen los efectos causados, por ejemplo, por el tráfico pesado (p. ej. Sarria, 1996).

Clough y Chameau (1980) evaluaron las aceleraciones inducidas por martillos en excavaciones para el sistema hidráulico de San Francisco (CA), sobre una secuencia de depósitos de gravas, gravas arenosas, depósitos arenosos de estuario, rellenos arenosos y dunas con espesores entre 12 y 33 metros. Encontraron que las aceleraciones disminuían rápidamente con la distancia al sitio de las excavaciones desde valores entre 0,16 – 0,27 g a pocos metros del sitio hasta 0,015 g a 48 m de distancia.

Drabkin *et al* (1996), reportan nueve sitios en los cuales se midieron vibraciones durante hincado de tablestacas, con fines de predicción de asentamientos en suelos arenosos; encontraron que las máximas amplificaciones de las vibraciones eran de 18 mm/s a 1,5 m del sitio de excavación y menores de 2,5 mm/s a partir de los 15 m; vibraciones del orden de 2,5 mm/s pueden ser percibidas por el cuerpo humano y mayores de 50 mm/s pueden causar daño a la integridad estructural de estructuras sensitivas.

Linehan *et al* (1992) reportan valores máximos cercanos a 12,7 cm/s a 1 metro de sitios de excavación de pilas, que decaen a valores entre 0,04 cm/s y 0,12 cm/s a 33 metros de distancia, en terrenos de gravas y arenas densas a muy densas, con una capa de turba muy blanda entre 1,5 y 3 metros de profundidad y de limos blandos entre los 3 y 6 metros.

En la literatura revisada se encontró solo un caso de vibraciones inducidas por conciertos (Walker, 2001) en edificaciones con ausencia de registros. En el marco de este proyecto se pudieron medir las vibraciones inducidas al subsuelo por un concierto, de las cuales se presentan, más adelante, las mediciones y análisis realizados.

12.2 ANTECEDENTES.

Con motivo de los Juegos Panamericanos de Cali en 1971 se mejoró y amplió la infraestructura deportiva de la ciudad. En la zona de estudio, en donde

estuvieron los campos deportivos de la Universidad del Valle (IGAC, 1958), en cercanías de la Plaza de Toros edificada en 1956, se construyeron el Coliseo El Pueblo y el Velódromo. En general toda esta infraestructura se diseñó para cargas estáticas, sin considerar la acción de personas en movimiento. Además, el comportamiento del público cambió en los últimos decenios de espectadores relativamente pasivos a acciones más dinámicas como aplausos rítmicos, oscilaciones laterales rítmicas de audiencia de pie o sentada, saltos, bailes, etc. (Barrios, *et al* 2000). Por otro lado, muchos de estos escenarios empezaron a ser utilizados para conciertos de música rock, pop, salsa, etc., con comportamientos masivos que incluyen lapsos de tiempo con movimientos rítmicos y euforia.

En coincidencia con fechas y horas de conciertos en la Plaza de Toros y el Coliseo El Pueblo, desde 1988 residentes de viviendas y edificios de la zona de estudio empezaron a reportar al OSSO ocurrencia de “movimientos sísmicos” que, en general, ocurrían entre las 21 y las 00 horas. Estos reportes incluían movimientos de objetos colgantes, sensación de mareo y, ocasionalmente, caída de objetos de estanterías. En una ocasión todo un edificio fue desocupado durante la noche por una sensación generalizada de molestia a causa de vibraciones inducidas por un concierto (Archivo macrosísmico, OSSO).

El tema fue motivo de discusión en el Comité Local para la Prevención y Atención de Desastres, que previas reuniones con los arquitectos y diseñadores de la Plaza de Toros, recomendó a la Administración Municipal suspender los conciertos en ella. Por su parte, habitantes de la zona interpusieron una Acción de Tutela (AC-1343) con base en la cual el Juez falló a favor, ordenando al Alcalde suspenderlos, lo que ocurrió en 1993 (oficio Alcaldía No. 2758 de diciembre 3 de 1993).

Previamente, entre 1991 y 1992 el Departamento de Mecánica de Sólidos³⁰, (Mecánica de Sólidos, 1992) mediante Convenio con la Alcaldía y la Junta Administradora de Deportes del Valle del Cauca, realizó el que quizás fue el primer estudio de dinámica estructural con mediciones acelerométricas *in situ* en Colombia en un escenario deportivo en Colombia (Estadio Pascual Guerrero, Cali). Este Estudio encontró para los pórticos de la tribuna norte dos frecuencias fuertemente marcadas (1,9 y 2,4 Hz), una frecuencia longitudinal entre 2.3 y 2.4 Hz y un valor dominante en 4.2 Hz para un voladizo de la gradería.

12.2.1 Fuentes y reportes de vibraciones inducidas.

Conciertos en La Plaza de Toros.

Durante 1988 y años posteriores se programaron en la Plaza de Toros diversos conciertos de música rock en español (grupos Maná, Hombres G, Los Prisioneros) y de otras tendencias musicales como balada y merengue (Ricardo Arjona, Rocío Durcal, Ricardo Montaner y Jerry Rivera).

La mayoría de estos conciertos indujeron vibraciones en el suelo que fueron sentidas en casas y edificios a 200 y 800 metros de distancia (Tabla 32, **Figura 77**). Los habitantes reportaron cosas como que: "las lámparas oscilan, los cuadros se tuercen, las matas se mueven, los techos se descomponen, caen objetos y se resquebrajan las paredes" (Archivo macrosísmico, OSSO).

Debido a que las vibraciones incomodaban a los habitantes y a que generalmente tenían lugar entre las 21:00 h y 00:00 horas, como se dijo antes, los ciudadanos apelaron a la Alcaldía para solicitar prohibición de conciertos en la Plaza de Toros. El 3 diciembre de 1993, se produjo el oficio del Alcalde, suspendiendo los espectáculos en dicho escenario.

³⁰ Hoy Escuela de Ingeniería Civil y Geomática (Universidad del Valle).

Conciertos en El Coliseo El Pueblo.

Durante conciertos de rock en el Coliseo El Pueblo se han reportado vibraciones sentidas en Torres de Alcalá II a 1 km de distancia (**Figura 77**).

Tabla 32. Edificios con reportes de vibraciones inducidas por conciertos en la Plaza de Toros.

Fuente	Edificio	Dist.*	Descripción
Conciertos en la Plaza de Toros	E. El Hostal	250	4 pisos, bloques
	U. R. Guadaupe	160	6 pisos, bloques
	Torres de Doña Lupe	190	7 pisos
	Unidad Santiago de Cali	780	5 pisos, bloques
	Torres de Santiago de Cali	800	11 pisos, dos torres

** Distancia en metros de la Plaza de Toros al edificio*

Torres de Alcalá II (Tabla 33) es un conjunto residencial conformado por dos edificios (Torres A y B). Las vibraciones han sido reportadas sentidas en diversos pisos de ambas torres.

A continuación se detalla información de los reportes:

1. Concierto de rock en español: Vilma Palma & Vampiros.

Fecha: 7 de abril de 1995.

De cuatro apartamentos de ambas torres (pisos 2, 3 y 7) reportaron sentir aproximadamente 20 vibraciones con duración variable entre 7 y 15 segundos. Los habitantes de los apartamentos reportaron que oscilaban lámparas, cuadros y ropa en armarios; a nivel de tierra no se sentía nada (Archivo macrosísmico, OSSO)

2. Concierto de Shakira (pop) y Cafetacuba (rock en español).

Fecha: 2 de marzo de 1996. Lleno total del Coliseo El Pueblo. Del séptimo y último piso de la Torre B se reportaron vibraciones. Un equipo del OSSO acudió a verificar reportando que se sintieron varios “sismos” o vibraciones de 10 s y una vibración de 4 minutos; en el último “evento”, de las 23:35 horas, se sintió traquear el techo. Durante las vibraciones oscilaban lámparas y vibraron matas, porcelanas y un crucifijo colgado en la pared. Las vibraciones se reportaron sentidas como incómodas por todos (Archivo macrosísmico, OSSO).

El 12 de mayo del 2000 se realizó otro concierto del grupo Vilma Palma & Vampiros en el Coliseo El Pueblo, el cual no generó vibraciones perceptibles en el edificio Alcalá. En esta ocasión el grupo interpretó música más suave (balada pop) y el público no estuvo eufórico.

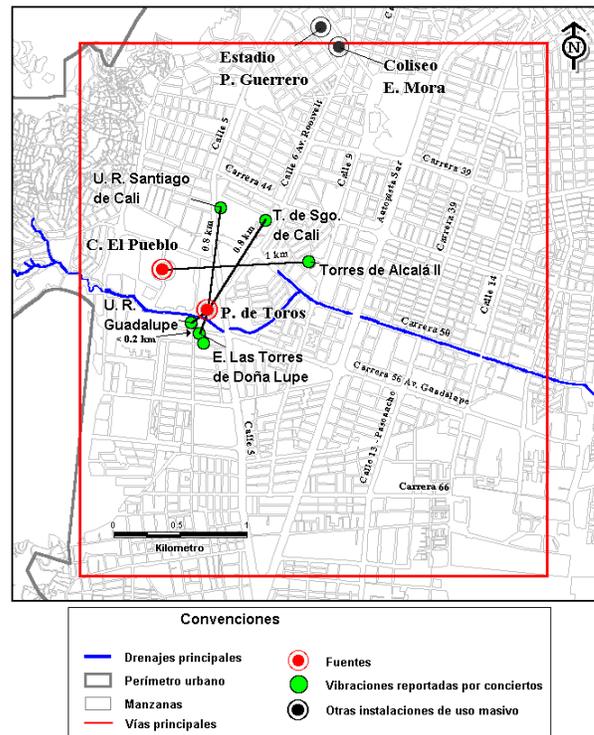


Figura 77. Distribución de reportes de vibraciones inducidas por conciertos.

Tabla 33. Edificio con reportes de vibraciones inducidas durante conciertos en el Coliseo El Pueblo.

Fuente	Edificio	Dist.*	Dirección	Descripción
Conciertos en Coliseo El Pueblo	Torres de Alcalá II	1000	Cra. 47 B # 8 B-65	7 pisos + sótanos, 2 torres, 60 apartamentos

** Distancia en metros de la Plaza de Toros al edificio*

12.2.2 Distribución espacial.

Con base en trabajo de campo se realizó un inventario (no exhaustivo) de las edificaciones de más de cinco pisos. La Figura 78 muestra la distribución de los edificios según rangos del número de pisos.

Se han resaltado con símbolos mas grandes los edificios con reportes de vibraciones inducidas. Se desconoce si del conjunto de edificios de la figura, existen mas sitios en donde hayan sentido vibraciones inducidas por los conciertos.

Los reportes de vibraciones incluyen edificios de cinco pisos (p. ej. conjunto de bloques de la Unidad Residencial Santiago de Cali) y de más de 10 pisos (p. ej. Torres de Santiago de Cali con 14 pisos).

12.3 MEDICIONES.

12.3.1 Descripción.

Desde el planteamiento de este proyecto se consideró relevante realizar mediciones de vibraciones inducidas por conciertos en el Coliseo El Pueblo (ya que los conciertos en la Plaza de Toros se encuentran prohibidos). En junio del

presente año se aprovechó la presentación en vivo del grupo de rock en español los “Fabulosos Cadillacs”.

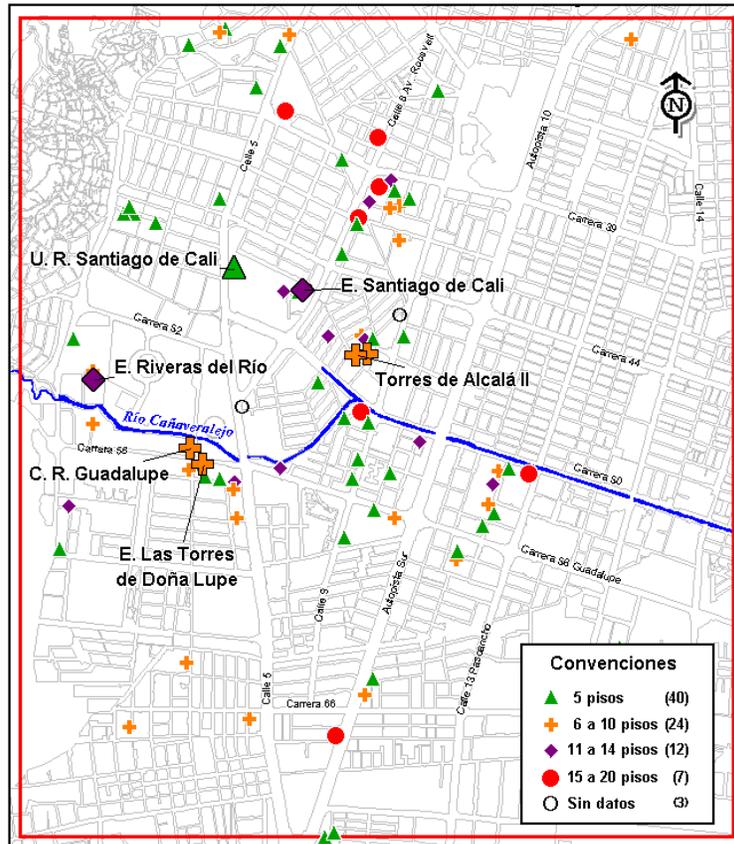


Figura 78. Edificaciones de mas de cinco pisos en la zona de estudio

Con base en los sitios de interés (fuente y sitios con reportes) y según los sensores disponibles se diseñó el plan de mediciones. Se utilizaron tres equipos de velocidad uno con registro continuo y dos por *trigger*.

Las vibraciones inducidas por el concierto fueron registradas en los tres sensores y percibidas en el piso siete de la Torre B del edificio Torres de Alcalá I.

El Coliseo El Pueblo está conformado por dos niveles de graderías (Figura 79-a)). El concierto tuvo gran asistencia de público, 85% del cupo en “platea” y graderías con visibilidad al escenario (85 - 90% de la capacidad total). El escenario tiene una capacidad para 17,000 espectadores (Figura 79b).

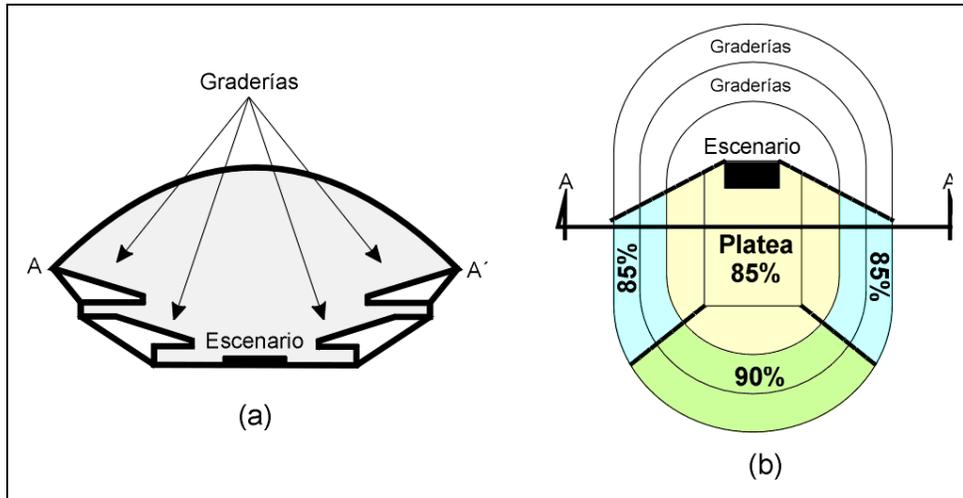


Figura 79. (a) Graderías (esquema) y (b) distribución del público, Coliseo El Pueblo, (20 de junio del 2001).

Mediciones y equipos.

Los sitios seleccionados para las mediciones fueron: 1. Afueras del Coliseo 2. Terreno del edificio Torres de Alcalá y 3. Terraza del mismo edificio. En la Tabla 34 se relacionan los sensores y los sitios de registro.

El concierto inició a las 21:15 y los equipos de Alcalá y Terraza fueron instalados a las 21:52 y 21:55 respectivamente. El equipo en Coliseo fue instalado a las 22:10.

El sensor L4C fue usado en conjunto con la unidad digitalizadora RD3, el mismo empleado en las mediciones de microtrepidaciones cuya descripción se encuentra en el § 11.1.

Sensor GSV-320. Sensor de velocidad de tres componentes, ancho de banda entre 4,5 y 315 Hz.

Tabla 34. Sitios de registro y equipos.

	Sitio	Sensor	SAD		Tipo registro	Registros
1	Coliseo	GSV-320	GCR-16	16 bits	<i>Trigger por umbral</i>	51
2	Alcalá	L4C	RD3	16 bits	Continuo	60 min
3	Terraza	GSV-320	GSR-18	18 bits	STA/LTA ³¹	21

Señales. Se registraron un total de 72 archivos en los equipos por trigger y, tres de duración variable en el equipo de registro continuo. En este último se detuvo la grabación dos veces para no tener archivos tan largos. El primer registro se paró una vez terminaron las Canciones *Matador* y *Mal Bicho*.

- Coliseo 51 archivos
- Alcalá 21 archivos
- Terraza 3 archivos de duración variables entre 15 y 30 minutos

12.3.2 Análisis.

Del conjunto de señales se seleccionaron para el análisis aquellas que correspondían a canciones. Aún cuando no se pudo tener tiempo coordinado en los tres equipos, por motivos circunstanciales se pudo identificar en todos ellos los archivos correspondientes a la canción *Matador*, que junto con *Mal Bicho*, generó mayor euforia en el público.

³¹ *Trigger* por comparación de las amplitudes en un periodo de tiempo corto (Short Time Average) y uno largo (Long Time Average)

Velocidades registradas.

De todos los registros las mayores velocidades (Tabla 35) se presentaron durante la canción *Matador*, con registros máximos de 1,60 mm/s en Coliseo, seguido de Alcalá con 0,47 mm/s y por último Terraza con 0,001 mm/s.

Tabla 35. Velocidades máximas medidas en tres puntos durante el concierto de los Fabulosos Cadillacs del 20 de junio del 2001.

Componente	N	E	V
Sitio	mm/s	mm/s	mm/s
Coliseo	1.23	0.43	-1.60
Alcalá	0.47	0.17	0.4
Terraza	0.001	0.0009	0.0005

Contenido frecuencial.

Las señales seleccionadas (canciones) fueron tratadas en el dominio de las frecuencias a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Para cada señal identificada como “canción” en Coliseo y Alcalá, se leyeron las máximas amplitudes con sus correspondientes frecuencias. Los espectros mostraron un pico predominante en Coliseo y de tres a cuatro armónicos asociados. La dispersión de las parejas de datos para Coliseo (frecuencia-amplitud) se presenta en la Figura 80. En la figura el pico predominante está afectado por la respuesta del sensor no plana en el rango < 4.5 Hz. Por su parte en Alcalá se presentó un pico predominante (alrededor de 2 Hz) y los armónicos se presentaron muy atenuados, o no se alcanzaron a distinguir (Figura 81).

El Canal “E” (componente Este) de la Figura 80 no fue tenido en cuenta para el análisis. Al parecer la señal se afectó por el equipo de medición. Las señales originales presentaban un ruido constante y amplitudes muy bajas en comparación con la componente N.

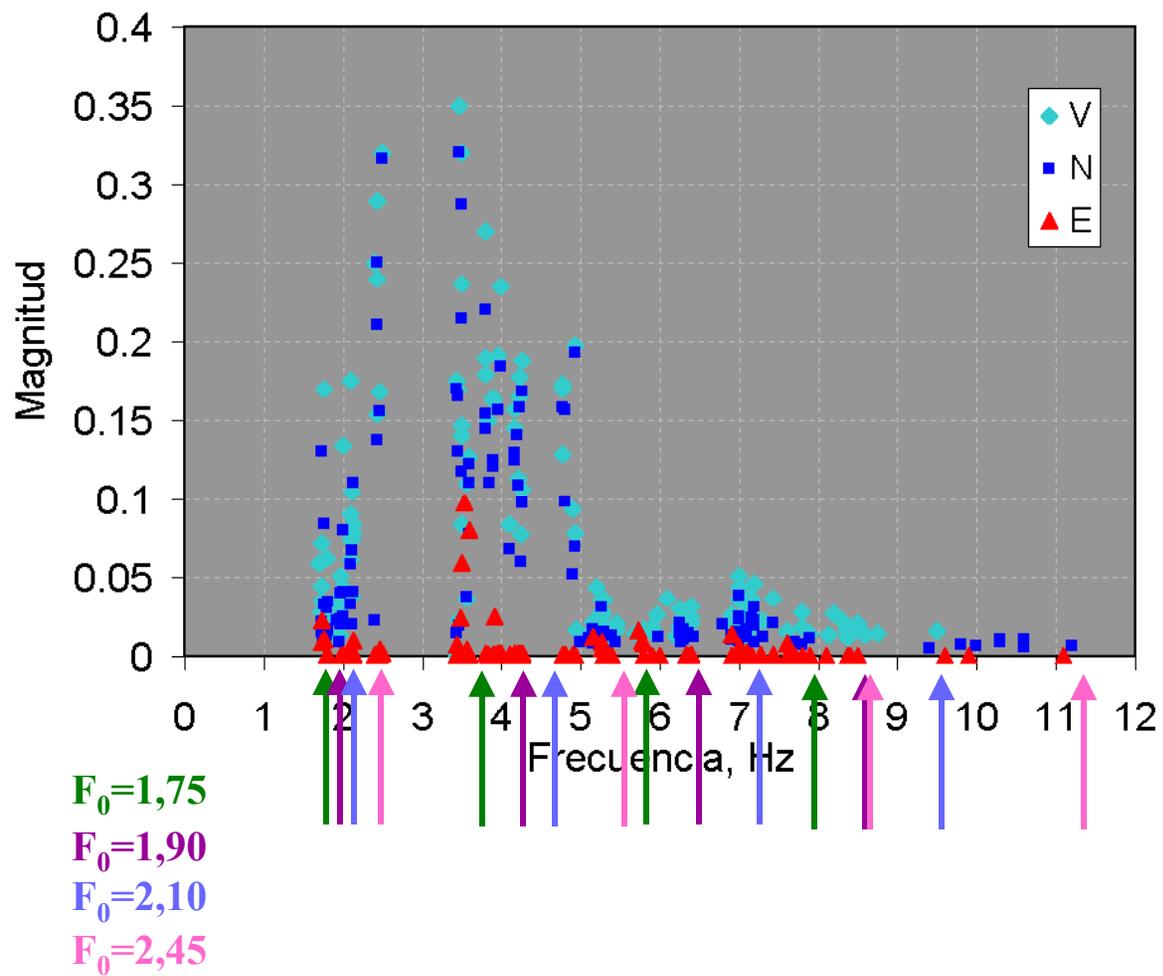


Figura 80. Frecuencias vs amplitudes, Coliseo El Pueblo.

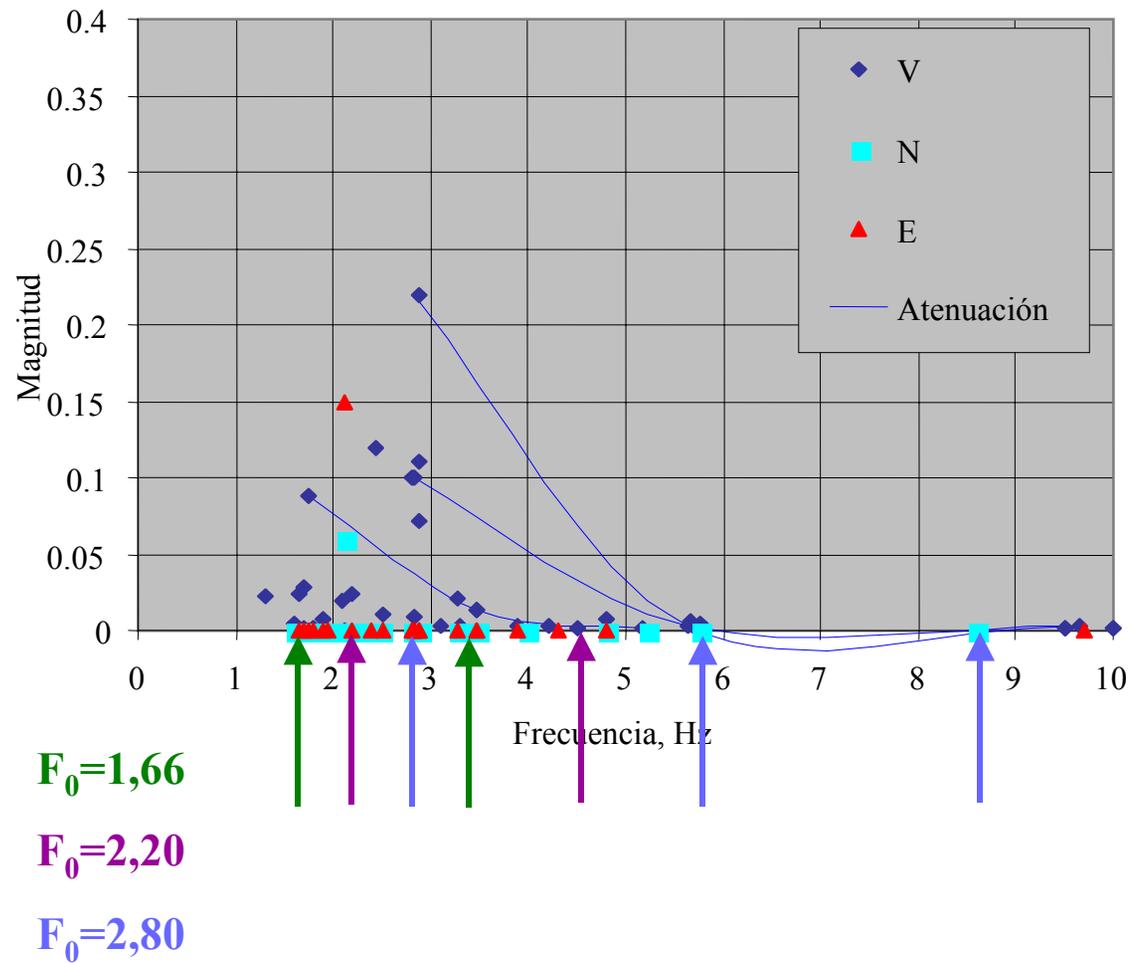


Figura 81. Dispersión de frecuencia vs amplitud en Alcalá y atenuación.

La distribución de los puntos (frecuencia vs amplitud) sugiere que las máximas amplitudes no son múltiplos creados por interferencia constructiva de múltiples reflexiones de la onda SH como en el "efecto de sitio", con máximos en múltiplos impares de f_0 , sino que corresponden con armónicos (f_0 , $2f_0$, $3f_0$) de un oscilador confinado, de tipo "cuerda vibrante" (§ 3.3.6), como puede ocurrir también con una viga suspendida entre dos columnas o una gradería suspendida en sus dos extremos.

Las mediciones en Alcalá podrían corresponder a la fuente - oscilaciones de la estructura de Coliseo -, o al medio cercano - tipo "ondas de canal"- . Por su parte las magnitudes de las frecuencias pueden corresponder a las magnitudes de los modos de vibración de la estructura del substrato de suelo, o a las magnitudes máximas de frecuencias de la canción.

Así, mientras una canción presentó armónicos en 1,66, 3,32, 4,98 y 8,3, otra presentó sus armónicos en 2,1, 4,2, 6.3 y 8,4.

Atenuación espectral. Los gráficos de dispersión también fueron analizados en términos de la atenuación espectral de las amplitudes (Figura 81). Como era de esperarse se encontró que la atenuación de las amplitudes entre Coliseo y Alcalá³², presentan una atenuación inelástica normal, inversamente proporcional a la frecuencia, que podría incluir efectos de interferencia y resonancia.

Atenuación en función de la distancia. Para la canción *Matador* se calculó la relación de amplitudes entre Coliseo y Alcalá en el rango de frecuencias donde la respuesta de ambos sensores es plana ($> 4,9$ Hz), encontrando que la señal se atenúa del orden de 20 veces en 1000 metros.

³² Rigurosamente se debe calcular la atenuación (exponencial) con mas de dos puntos.

Este valor fue comparado con aquellos obtenidos de atenuación por vibrohincado en arenas (Figura 82). Aunque las fuentes de energía en cada caso no son comparables (muchedumbre generando esfuerzos en estructura *versus* martillo con impactos puntuales), se ve claramente que las atenuaciones en comparación son muy altas: la curva de Drabkin (1996) se atenuó 7,2 veces en 13 metros y la de Linehan (1992) 11 veces en 46 metros.

El resultado de la atenuación en Coliseo debe ser visto en contexto. Se compararon los valores para el tercer armónico (en el rango de respuesta plana del sensor), que tiene menos energía que los superiores, y seguramente está mas sometido a la atenuación inelástica.

A pesar de la anterior anotación, se puede ver que la atenuación es comparativamente baja en dos órdenes de magnitud menos que las otras dos en la Figura 82.

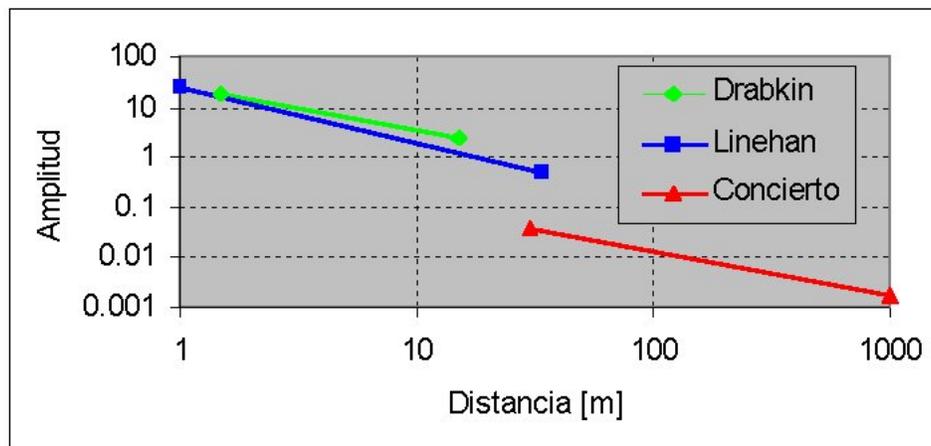


Figura 82. Casos de atenuación con la distancia.