

MÉTODO DE COCIENTES ESPECTRALES H/V CON EXCITACIÓN IMPULSIVA: VALIDACIÓN NUMÉRICA Y ENSAYO EXPERIMENTAL

Odetti, Santiago^a; Suárez Colche, Luis^b

(a) Ingeniero Civil, M.Sc. Universidad de Puerto Rico, Mayagüez santhiagoodetti@gmail.com

(b) Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura Universidad de Puerto Rico, Mayagüez civil@uprm.edu

Palabras clave: cocientes espectrales H/V, frecuencia fundamental de sitio, efectos locales de sitio, carga impulsiva superficial, método de Nakamura.

RESUMEN

La amplificación de ondas sísmicas en depósitos de suelo superficiales es una de las principales causas de daño sísmico, siendo la frecuencia fundamental del depósito un parámetro fundamental para su caracterización dinámica. El método de Nakamura, basado en cocientes espectrales H/V de vibraciones ambientales, es el procedimiento más difundido para su determinación. El presente trabajo desarrolla, en la primera parte, un análisis numérico del método de cocientes espectrales bajo distintos tipos de excitación mediante modelos de propagación de ondas y elementos finitos. En la segunda parte, motivada por los resultados numéricos, se propone un ensayo de carga impulsiva superficial como método alternativo al de Nakamura, ejecutado en dos sitios de estudio. Los resultados obtenidos son concordantes con los del método de Nakamura y con los análisis numéricos, validando el ensayo propuesto como alternativa práctica con ventajas operativas significativas respecto al procedimiento clásico.

ABSTRACT

The amplification of seismic waves in near-surface soil deposits is one of the primary causes of earthquake-induced damage, with the fundamental frequency being a important parameter for dynamic site characterization. The Nakamura method, based on H/V spectral ratios of ambient vibrations, is the most widely used procedure for this purpose. This paper develops, in the first part, a numerical analysis of the H/V method under different excitation types using wave propagation theory and finite element models. In the second part, motivated by the numerical findings, a surface impulse load test is proposed as an alternative to the Nakamura method and executed at two study sites. The results are consistent with those obtained by the Nakamura method and the numerical analyses, validating the proposed test as a practical alternative with significant operational advantages over the classical procedure.

INTRODUCCIÓN

Los movimientos registrados en superficie ante un evento sísmico son el resultado de la combinación de múltiples factores: la magnitud del sismo y las características de la fuente, la trayectoria de propagación de las ondas sísmicas, y los denominados efectos locales de sitio. Estos últimos refieren a la influencia que ejercen las propiedades dinámicas del depósito de suelo superficial sobre las ondas que lo atraviesan, modificando tanto la amplitud como el contenido de frecuencias del movimiento registrado en superficie.

La importancia de los efectos locales de sitio ha sido ampliamente documentada en la literatura. Un ejemplo paradigmático es el sismo de México de 1985, en el que zonas alejadas del epicentro presentaron amplificaciones espectrales pronunciadas en torno al período de 2 segundos, atribuidas directamente a las características dinámicas del depósito lacustre sobre el que se asienta parte de la Ciudad de México, Kramer ¹. Este fenómeno ilustra con claridad que depósitos de suelo con baja velocidad de onda de corte amplifican preferentemente las frecuencias bajas, mientras que depósitos más rígidos presentan el comportamiento opuesto, en función de su función de transferencia particular.

Ante esta evidencia, las normativas vigentes de diseño sísmico (ASCE 7-22) han incorporado la exigencia de realizar estudios de sitio en suelos con ciertas características de clasificación, para caracterizar la influencia local del depósito en la respuesta dinámica en superficie. Para satisfacer esta exigencia, existen dos grandes grupos de métodos de caracterización dinámica de suelos. Los métodos invasivos, como el ensayo de *downhole*, *uphole* y *crosshole*, permiten obtener perfiles de velocidad de onda de corte en profundidad a partir de perforaciones, pero implican costos operativos elevados y la utilización de equipamiento especializado. Los métodos no invasivos, como el SASW, el MASW y el SPAC, recurren únicamente a sensores superficiales y permiten obtener el perfil de velocidades mediante la inversión de la curva de dispersión de ondas de Rayleigh, sin necesidad de perforación.

Dentro de los métodos de caracterización dinámica de sitio, los métodos de cocientes espectrales ocupan un lugar particular. Sin permitir la determinación directa de un

perfil de velocidades, proveen una información de gran relevancia práctica: la frecuencia fundamental del depósito de suelo, parámetro central para la caracterización dinámica del sitio. El más difundido de estos métodos es el propuesto por Nakamura², quien sugiere registrar las componentes horizontal y vertical de la aceleración en superficie bajo condiciones de vibración ambiental, calcular sus respectivos espectros de Fourier, y obtener el cociente H/V entre ellos. Dicho cociente presenta un pico bien definido en la frecuencia fundamental del depósito, constituyendo así una cuasi función de transferencia del sitio. El método ha sido ampliamente adoptado y validado en la comunidad científica^{3,4} por su sencillez operativa y su bajo costo de implementación

Sin embargo, la dependencia del método respecto de la vibración ambiental como fuente de excitación introduce limitaciones en situaciones donde dicha fuente no resulta suficientemente estacionaria, isotrópica o representativa del espectro de frecuencias de interés. En este contexto, el presente trabajo explora la posibilidad de obtener cocientes espectrales H/V equivalentes mediante una fuente de excitación controlada de tipo impulsiva, tanto desde una perspectiva numérica como experimental.

El **propósito del presente** trabajo es doble. En una primera parte, se desarrolla un análisis numérico del método de cocientes espectrales H/V bajo la acción de distintos tipos de excitación, con el objetivo de estudiar la influencia del tipo de carga en la forma y resolución del cociente espectral obtenido. Dicho análisis se lleva a cabo sobre dos modelos de depósito: un modelo teórico de una capa, utilizado como caso de referencia, y un modelo estratificado de diecinueve capas representativo de un sitio real, analizado tanto mediante la teoría de propagación de ondas en medios continuos como mediante el método de elementos finitos. En ambos casos se evalúan distintos tipos de excitación: aceleraciones sísmicas en la base, carga impulsiva superficial y vibración ambiental. En una segunda parte, y motivado por los resultados del análisis numérico, se propone y ejecuta un ensayo de campo de carga impulsiva como método alternativo al clásico de Nakamura para la determinación experimental del cociente H/V. El ensayo es realizado en el mismo sitio para el cual se dispone del perfil estratigráfico completo, lo que permite comparar directamente los resultados

experimentales con los numéricos y con los obtenidos mediante el método de vibración ambiental.

REVISIÓN DE CONCEPTOS

Efectos locales de sitio y función de transferencia

La respuesta de un depósito de suelo ante una excitación sísmica se describe mediante el concepto de función de transferencia (FdT), que relaciona el movimiento en superficie con la excitación en la base del depósito en el dominio de la frecuencia. Para un depósito homogéneo de espesor H y velocidad de onda de corte V_s , sobre un semiespacio rígido, la FdT en la componente horizontal resulta¹:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)} \quad (1)$$

Esta expresión presenta picos de amplificación en las frecuencias naturales del depósito, siendo la frecuencia fundamental:

$$f_0 = \frac{V_s}{4H} \quad (2)$$

En depósitos estratificados, la función de transferencia puede obtenerse mediante una fórmula recursiva¹, que permite calcular la respuesta en frecuencia del sistema de “n” capas considerando las condiciones de compatibilidad de tensiones y desplazamientos en cada interfaz.

Método de cocientes espectrales H/V (Nakamura)

El método propuesto por Nakamura² permite estimar la frecuencia fundamental de un depósito de suelo a partir de mediciones de vibración ambiental en superficie, sin requerir el conocimiento previo de las propiedades del depósito. El procedimiento consiste en registrar simultáneamente las componentes horizontal y vertical de la aceleración en superficie, calcular sus espectros de amplitud de Fourier, y obtener el cociente entre ambos:

$$H/V(\omega) = \frac{\sqrt{S_{H1}(\omega)^2 + S_{H2}(\omega)^2}}{S_V(\omega)} \quad (3)$$

donde S_{H1} , S_{H2} y S_V son los espectros de amplitud de Fourier de las componentes

horizontales Norte–Sur, Este–Oeste y vertical, respectivamente.

El cociente así obtenido presenta un pico en la frecuencia fundamental del depósito, constituyendo una cuasi función de transferencia (QFT) del sitio. La interpretación física del pico H/V ha sido objeto de debate en la literatura; las explicaciones más aceptadas lo atribuyen a la amplificación de las ondas de corte horizontales en combinación con la menor amplificación de la componente vertical en dicha frecuencia³, aunque contribuciones de las ondas de Rayleigh también han sido consideradas⁵.

PRIMERA PARTE: ANÁLISIS NUMÉRICO

Casos analizados y propiedades de los modelos

Con el objetivo de explorar numéricamente el método de cocientes espectrales H/V bajo distintos tipos de excitación, se desarrollaron dos casos de análisis que representan situaciones de complejidad creciente.

El **Caso 1** consiste en un modelo teórico de referencia: un depósito homogéneo de una sola capa, con profundidad $H = 100$ ft (30.48m), velocidad de onda de corte $V_s = 600$ ft/s (182.87 m/s) y peso unitario $\gamma = 110$ pcf (17.28 kN/m³), apoyado sobre un semiespacio elástico rígido. La frecuencia fundamental horizontal teórica de este depósito, calculada como $f_0 = V_s / (4H)$, resulta igual a **1.50 Hz**. Este caso permite validar la metodología de cálculo contra la solución analítica conocida.

El **Caso 2** representa un depósito estratificado real, modelado mediante 19 capas de suelo cuyas propiedades dinámicas fueron obtenidas a partir de un ensayo de *downhole*⁶ ejecutado en el estacionamiento del Departamento de Biología de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez (UPRM). Las propiedades de cada capa se resumen en la Tabla 1. La frecuencia fundamental horizontal del perfil, determinada a partir de la función de transferencia del sistema estratificado, resulta igual a **3.1 Hz**.

CAPA	h [m]	vs [m/s]	γ [kN/m ³]	G [kN/m ²]	u	E [kN/m ²]
A	3.31	177	16.89	57456	0.30	5
B	1.52	128	16.65	28728	0.48	85035
C	1.52	253	17.59	114912	0.28	294175
D	1.52	256	18.07	119700	0.30	311220
E	1.52	296	18.07	162792	0.30	423259
F	1.52	533	18.07	521892	0.30	1356919
G	1.52	250	18.07	114912	0.23	282684
H	1.52	436	21.21	411768	0.50	1235304
I	1.52	415	20.42	359100	0.43	1027026
J	1.52	128	22.46	38304	0.22	93462
K	1.52	515	22.46	608076	0.47	1787743
L	1.52	588	20.11	708624	0.38	1955802
M	1.52	323	20.11	215460	0.39	598979
N	1.52	457	22.78	483588	0.50	1450764
O	1.52	713	20.42	1058148	0.31	2772348
P	1.52	512	21.99	588924	0.35	1590095
Q	1.52	1594	22.78	5898816	0.30	15336922
R	1.52	1106	22.78	2839284	0.30	7382138
S	1.52	1963	22.78	8943984	0.30	23254358

[Tabla 1 — Propiedades dinámicas del perfil estratigráfico - sitio Biología, UPRM)]

Tipos de análisis

Para cada caso se emplearon dos enfoques de análisis, cuyo objetivo común es la determinación del cociente espectral H/V en superficie, aunque difieren en la metodología de cálculo y en los tipos de excitación admisibles. El esquema conceptual de ambos enfoques se ilustra en la Figura 1.

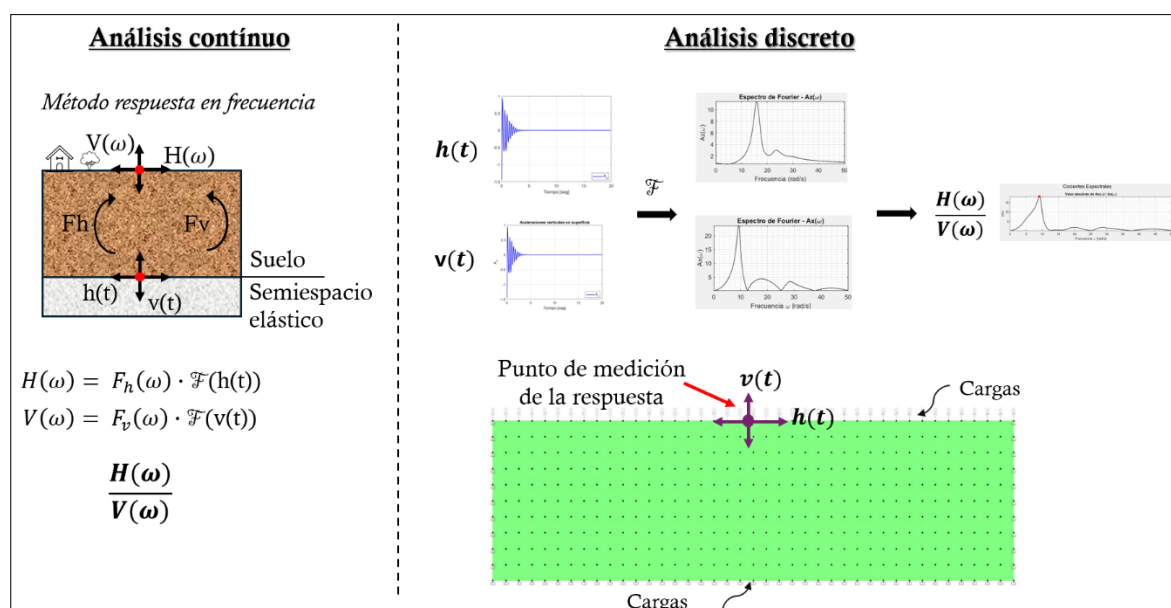


Figura 1. Esquema conceptual de cada tipo de análisis

Análisis continuo. Este enfoque se basa en la teoría de propagación de ondas unidimensionales y en el método de respuesta en frecuencia. La función de transferencia horizontal $F_h(\omega)$ y vertical $F_v(\omega)$ del depósito son determinadas analíticamente. Los espectros en superficie se obtienen como el producto de dichas funciones de transferencia por la Transformada de Fourier de la señal de entrada en la base del modelo:

$$H(\omega) = F_h(\omega) \cdot \mathcal{F}\{h(t)\} \quad V(\omega) = F_v(\omega) \cdot \mathcal{F}\{v(t)\} \quad (4)$$

El cociente espectral se obtiene directamente como $H(\omega)/V(\omega)$. Este enfoque requiere necesariamente que la excitación se aplique en la base del depósito, por lo que resulta aplicable únicamente a los casos de carga en base.

Análisis discreto. Este enfoque emplea un modelo de elementos finitos (EF) desarrollado en el programa SAP2000, bajo condiciones de deformación plana bidimensional. Se selecciona un nodo de control ubicado en superficie, en el cual se registra la respuesta temporal en las componentes horizontal $h(t)$ y vertical $v(t)$. Dichos registros son transformados al dominio de la frecuencia mediante la Transformada de Fourier Discreta, y el cociente espectral se calcula como:

$$\frac{H(\omega)}{V(\omega)} = \frac{\mathcal{F}\{h(t)\}}{\mathcal{F}\{v(t)\}} \quad (5)$$

A diferencia del análisis continuo, el modelo de EF admite tanto cargas aplicadas en la base (aceleraciones impuestas en los apoyos) como cargas superficiales (patrones de carga en función del tiempo aplicados en nodos superficiales), lo que permite analizar la totalidad de los tipos de excitación considerados.

Tipos de excitación analizados

Se consideraron cuatro tipos de excitación, los cuales se ilustran esquemáticamente en la Figura 2:

- **Pulso en la base:** señal impulsiva de corta duración aplicada en la base del modelo como aceleración impuesta. (Análisis continuo y discreto.)
- **Sismos registrados:** dos registros históricos de aceleración aplicados en la base. (Análisis continuo y discreto.)

- **Ruido ambiental:** modelado como ruido blanco con contenido de energía constante en toda la banda de frecuencia, aplicado como patrón de carga en función del tiempo en nodos superficiales del modelo. (Únicamente mediante análisis discreto.)
- **Impulso superficial:** carga triangular de corta duración aplicada en superficie como patrón de carga temporal. (Únicamente mediante análisis discreto.)

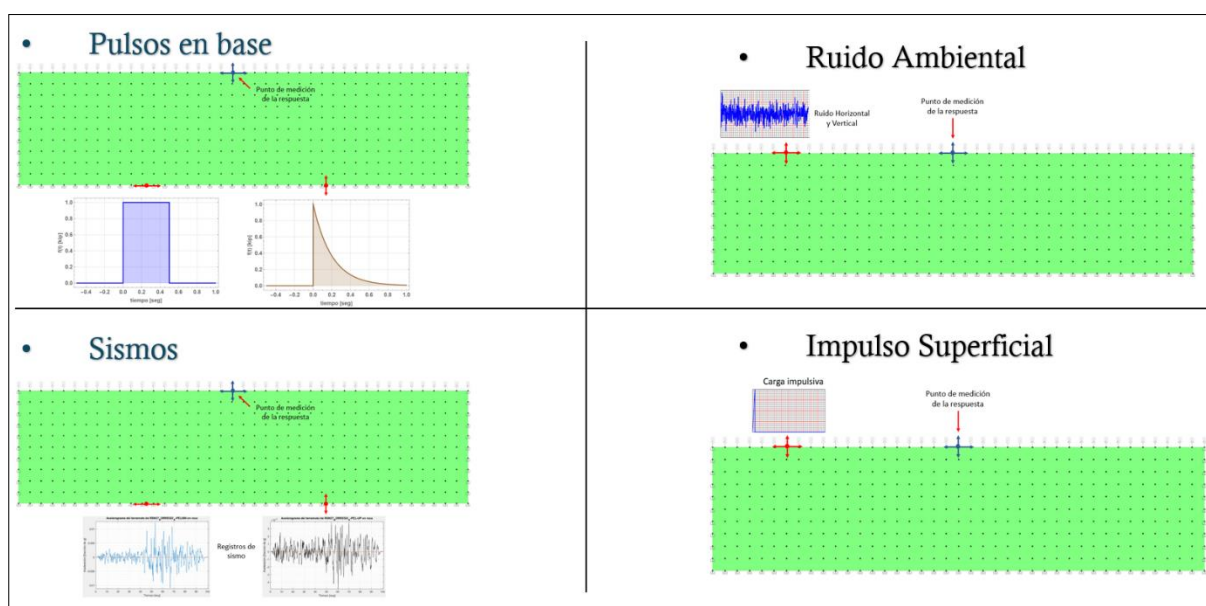


Figura 2. Tipos de carga.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS NUMÉRICO

Ejemplo ilustrativo: Caso 2 bajo carga impulsiva superficial

A modo de ilustración de la metodología empleada, se presenta en detalle el resultado obtenido para el Caso 2 (depósito de 19 capas) bajo excitación impulsiva superficial, por ser este el tipo de carga de mayor relevancia para los objetivos del trabajo.

La Figura 3 muestra el flujo completo del análisis discreto para este caso. A partir de la aplicación de la carga impulsiva triangular en superficie, se obtienen los registros temporales $h(t)$ y $v(t)$ en el nodo de control. Ambas señales exhiben una respuesta transitoria de corta duración seguida de vibración libre amortiguada. Al calcular los espectros de amplitud de Fourier de dichos registros, se obtienen los espectros $H(\omega)$ y $V(\omega)$ en superficie. El espectro horizontal presenta un pico de amplitud pronunciado

Organiza:

en la vecindad de 3.1 Hz, consistente con la frecuencia fundamental del perfil estratigráfico. El cociente espectral $H(\omega)/V(\omega)$ resultante exhibe un pico nítido y bien definido a **3.15 Hz**, en excelente concordancia con el valor teórico.

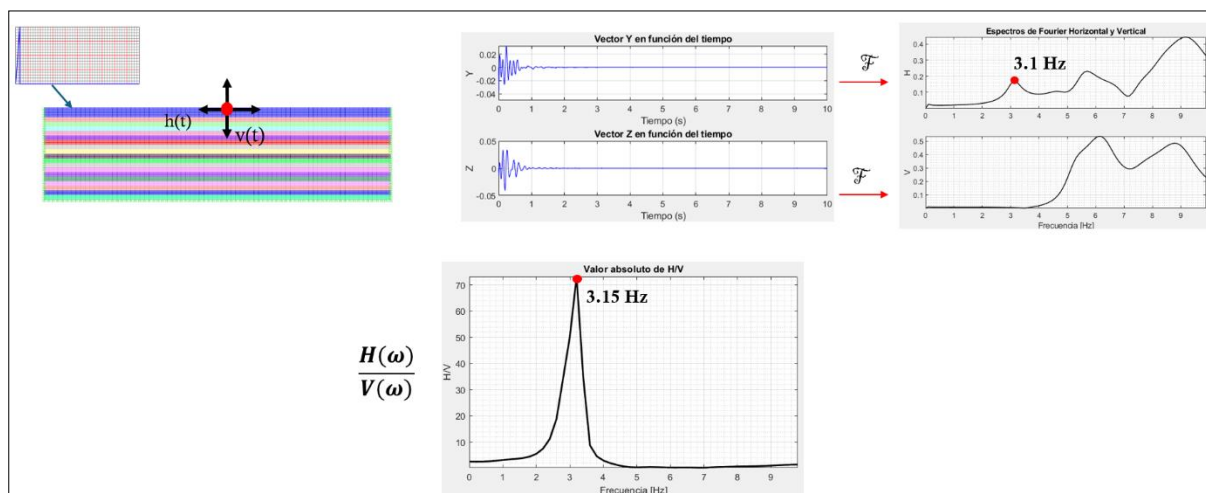


Figura 3. Metodología – Caso de carga impulsiva – Análisis discreto.

Resultados comparativos para ambos casos

La Figura 4 presenta los cocientes espectrales H/V obtenidos para la totalidad de los tipos de excitación analizados, superpuestos en un único gráfico para cada caso. Los resultados correspondientes al Caso 1 (depósito de una capa) se muestran en el panel izquierdo, y los del Caso 2 (19 capas) en el panel derecho.

En ambos casos se observa que, independientemente del tipo de excitación aplicado — ya sea en la base o en superficie, de tipo impulsivo, sísmico o de ruido —, el cociente espectral H/V presenta un pico en la vecindad de la frecuencia fundamental del depósito. Para el Caso 1 dicho pico se sitúa en torno a 1.50 Hz, y para el Caso 2 en torno a 3.1 Hz, en concordancia con los valores teóricos en ambos casos.

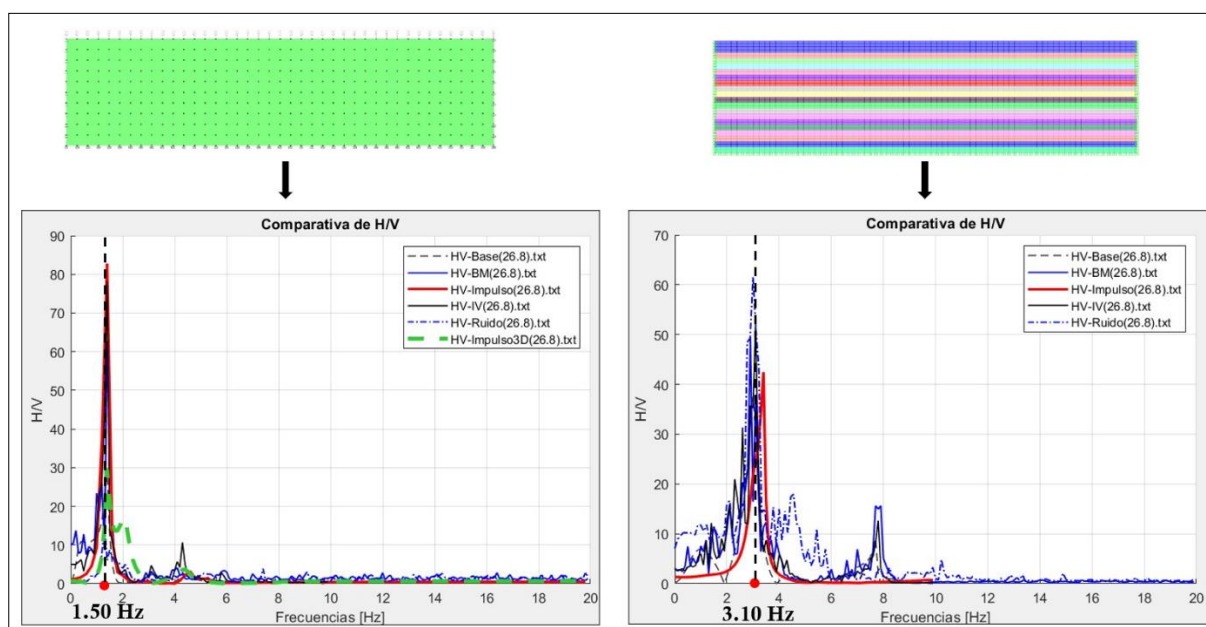


Figura 4. Resultados – (a) Caso 1 capa uniforme – (b) Caso 19 capas.

Del análisis comparativo de los cocientes obtenidos bajo los distintos tipos de excitación se desprende una observación de particular relevancia. Los cocientes espectrales generados a partir de la excitación impulsiva superficial presentan un pico de mayor resolución y definición que los obtenidos mediante los restantes tipos de carga: la amplitud del pico es más pronunciada, la banda de frecuencias en torno al pico es más estrecha, y la energía espectral fuera de dicha banda resulta esencialmente nula.

Este hallazgo constituye la motivación central del ensayo experimental propuesto en la segunda parte del presente trabajo: si la excitación impulsiva permite obtener cocientes espectrales H/V de mayor resolución en el entorno numérico, resulta de interés explorar si dicho comportamiento puede reproducirse mediante un ensayo de campo controlado que replique la condición de impulso superficial.

SEGUNDA PARTE: ENSAYO DE CARGA IMPULSIVA SUPERFICIAL

Los resultados del análisis numérico previamente presentados motivaron el diseño de un ensayo de campo que replique dicha condición de manera controlada, como alternativa al método clásico de vibración ambiental de Nakamura.

Los ensayos fueron ejecutados en dos sitios independientes. El primero corresponde al mismo sitio en el que se dispone del perfil estratigráfico completo obtenido por downhole⁶: el estacionamiento del Departamento de Biología de la UPRM. Esta coincidencia de sitio constituye una condición fundamental del trabajo, ya que permite contrastar directamente los resultados experimentales con la frecuencia fundamental teórica del perfil de 19 capas ($f_0 = 3.1$ Hz) y con los cocientes espectrales obtenidos numéricamente. El segundo sitio, denominado en adelante "Civil", se ubica en las proximidades del Departamento de Ingeniería Civil de la misma institución. En ambos casos se siguió el mismo protocolo de ensayo descrito en las siguientes secciones.

Configuración del ensayo

El esquema del ensayo se presenta en la Figura 5. La fuente de excitación consiste en un golpe de martillo aplicado sobre una placa de acero de 1 pulgada de espesor, colocada en el fondo de un pozo excavado en el terreno con inclinación de 45°. Esta geometría de pozo inclinado tiene por objeto orientar el impulso transmitido al suelo de manera que excite de forma eficiente tanto las componentes horizontales como la componente vertical del movimiento, replicando así la condición de excitación impulsiva modelada numéricamente.

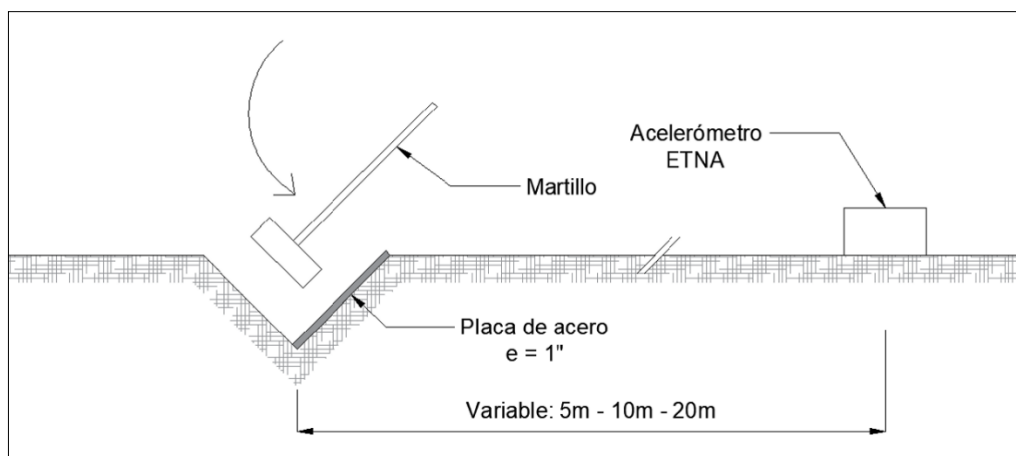


Figura 5. Esquema de ensayo de carga impulsiva.

La respuesta del terreno fue registrada mediante un acelerómetro triaxial ETNA (0.25g), compuesto por tres sensores EpiSensor independientes que registran simultáneamente las componentes Este–Oeste (canal 1), Norte–Sur (canal 2) y Vertical (canal 3), con una sensibilidad de 1.248–1.250 V/g y frecuencias naturales del sensor superiores a 190 Hz, lo que garantiza una respuesta plana en toda la banda de interés del ensayo. Los componentes del instrumento se ilustran en la Figura 6, junto con imágenes de la ejecución del ensayo.

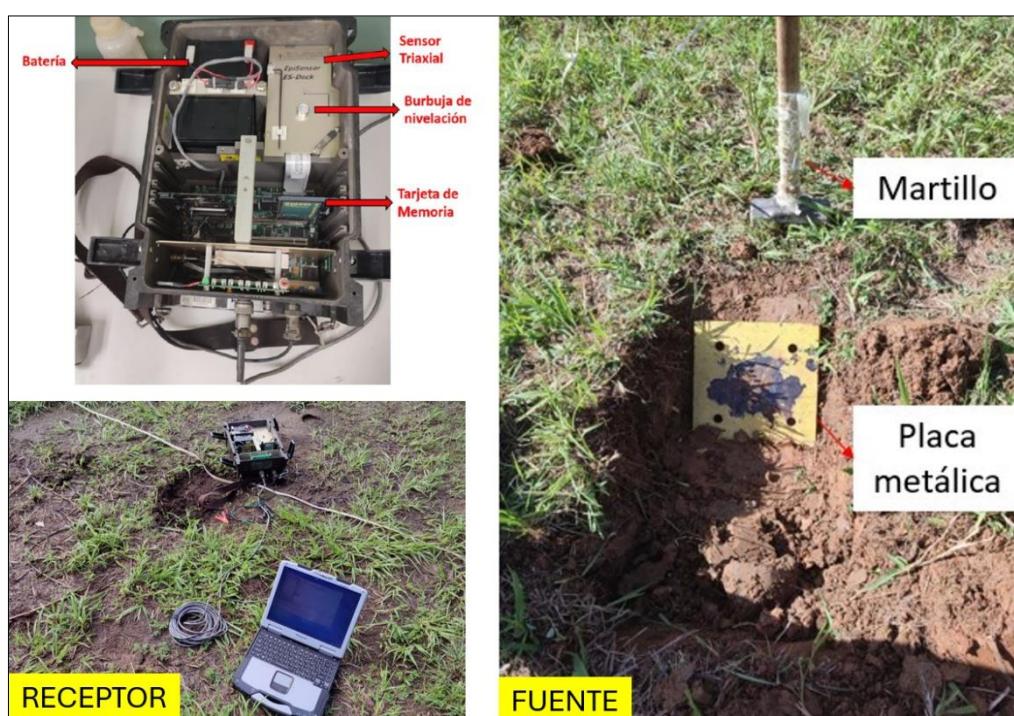


Figura 6. (a) Acelerómetro ETNA (0.25g) (b) Acelerómetro en campo. (c) Fuente de excitación.

La distancia entre la fuente y el sensor fue sistemáticamente variada en tres configuraciones: 5 m, 10 m y 20 m, con el objetivo de evaluar la influencia de dicho parámetro en los cocientes espectrales obtenidos.

Protocolo de ensayo y registros obtenidos

Se ejecutaron dos modalidades de excitación impulsiva: ensayos de golpe único y ensayos de golpe múltiple a razón de 8 golpes consecutivos con una cadencia aproximada de 1 golpe por segundo. Adicionalmente, se registró la vibración

ambiental del sitio siguiendo el protocolo estándar de Nakamura, con el fin de disponer de una referencia directa de comparación.

La Figura 7 presenta los registros de aceleración en función del tiempo obtenidos para las tres modalidades: golpe único, 8 golpes y vibración ambiental. En el caso del golpe único se observa una respuesta transitoria breve y bien delimitada en las tres componentes, seguida de una zona de silencio. En el ensayo de 8 golpes los pulsos individuales son claramente distinguibles, con períodos de vibración libre entre cada uno. Los registros de vibración ambiental presentan, por contraste, un carácter estacionario y de amplitud notablemente inferior.

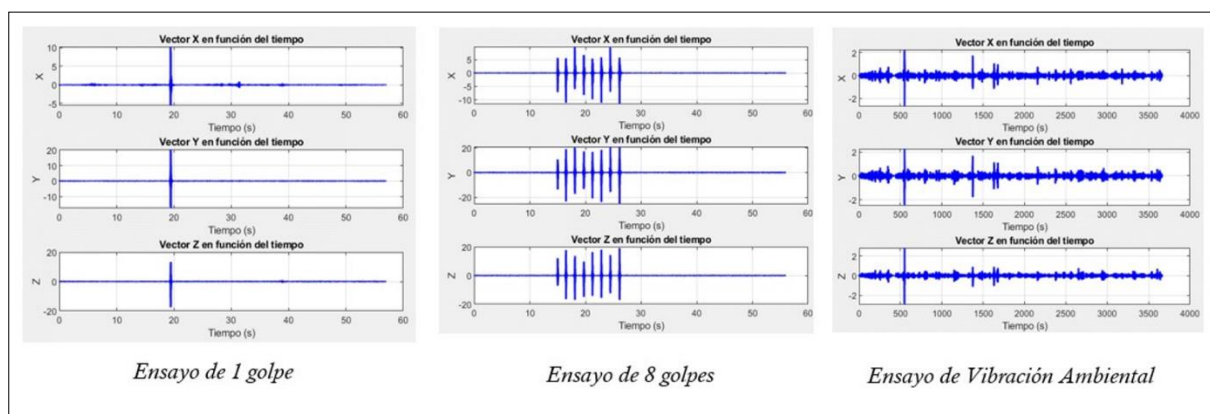


Figura 7. Registros de aceleración – Ensayo de carga impulsiva (a) y (b) y vibraciones ambientales (c).

Procesamiento de los datos

El procesamiento de los registros se realizó mediante un esquema por ventanas, cuyo flujo se ilustra en la Figura 8 y se describe a continuación en seis pasos:

1. Los registros de aceleración de las tres componentes (X, Y, Z) son organizados en una matriz de datos.
2. El registro se segmenta en ventanas temporales de longitud fija, generando una matriz de ventanas por componente.
3. A cada ventana se le aplica la Transformada de Fourier Discreta (FFT), obteniendo los espectros de amplitud individuales.

4. Los espectros de cada ventana son promediados, resultando en los vectores espectrales medios X_m , Y_m y Z_m .
5. Las dos componentes horizontales son combinadas en un único espectro horizontal medio mediante:

$$H_m = \sqrt{\frac{X_m^2 + Y_m^2}{2}} \quad (6)$$

6. El cociente espectral experimental se obtiene como:

$$C_e = \frac{H_m}{Z_m} \quad (7)$$

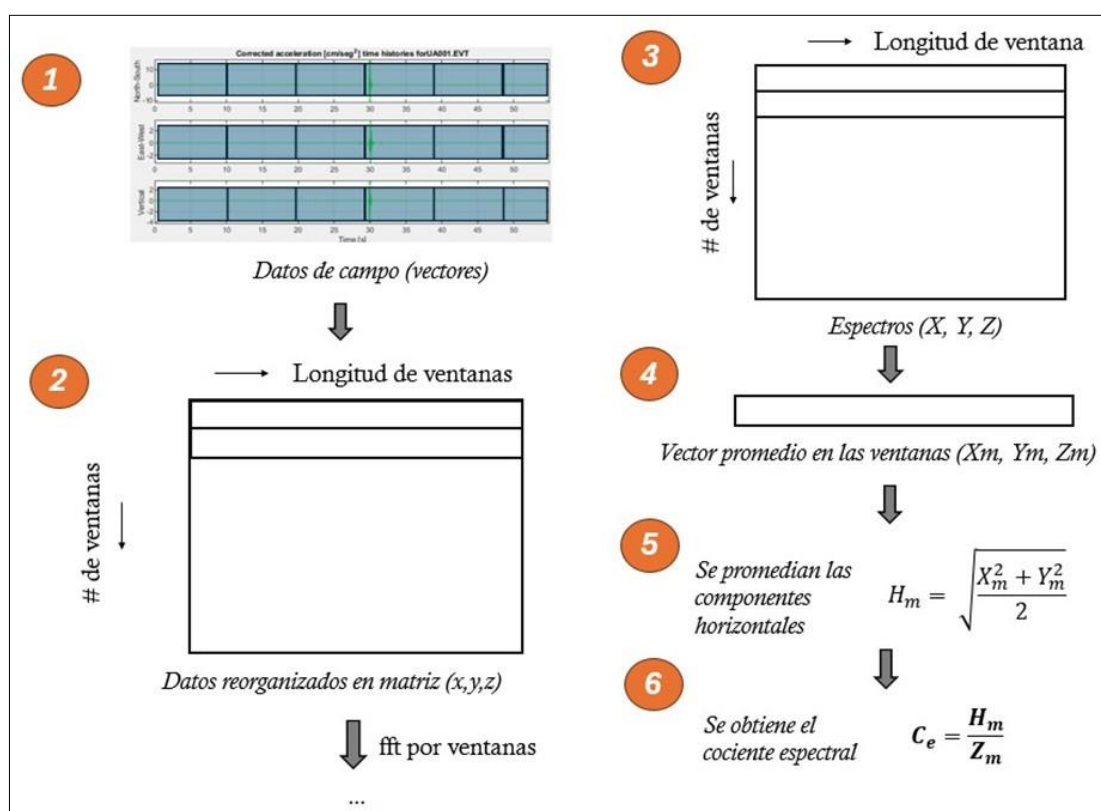


Figura 8. Metodología para procesamiento de datos

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y COMPARACIÓN

Resultados obtenidos en Biología

Los resultados obtenidos mediante el procedimiento previamente descripto fueron agrupados y graficados en conjunto con la finalidad de extraer conclusiones

relevantes. La Figura 9 (panel izquierdo) presenta los cocientes espectrales H/V obtenidos para la totalidad de los ensayos de carga impulsiva, agrupados por distancia fuente–receptor. En los tres casos — 5 m, 10 m y 20 m — se observa un pico claramente definido en torno a **3.2 Hz**, valor que presenta una excelente concordancia con la frecuencia fundamental teórica del perfil (3.1 Hz) y con el pico obtenido numéricamente. La consistencia del pico a lo largo de las tres distancias evaluadas indica que el cociente H/V obtenido mediante carga impulsiva resulta robusto frente a variaciones razonables en la separación entre fuente y receptor, lo que constituye una característica favorable para la aplicación práctica del ensayo.

El panel derecho de la Figura 9 presenta la comparación entre los cocientes espectrales obtenidos mediante el ensayo de carga impulsiva y el ensayo de vibración ambiental ejecutado en el mismo sitio. Ambos métodos producen un pico en la misma banda de frecuencias, en torno a 3.2 Hz, con una concordancia notable tanto en la posición del pico como en el orden de magnitud del cociente. Esta coincidencia valida la hipótesis central del trabajo: la excitación impulsiva superficial constituye una fuente de excitación alternativa a la vibración ambiental para la determinación experimental de la frecuencia fundamental mediante cocientes espectrales H/V .

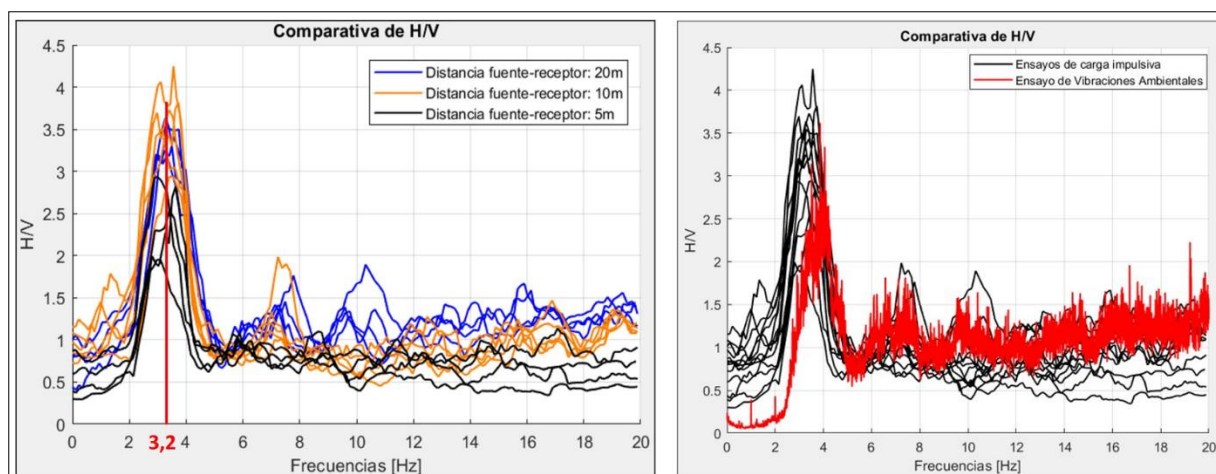


Figura 9. Resultados en Biología - (a) Gráficas de H/V comparando distancia fuente-receptor.
(b) Gráficas de H/V comparando con método de Nakamura.

Comparación con los resultados numéricos

La Figura 10 presenta la comparación entre los cocientes espectrales experimentales

de carga impulsiva (curvas en negro) y el cociente numérico obtenido mediante el modelo de elementos finitos en la primera parte del trabajo, bajo excitación impulsiva superficial (curva en rojo). La posición del pico es consistente en ambos casos, confirmando la coherencia entre el comportamiento numérico y el experimental. El cociente numérico presenta, como era esperable, un pico de menor ancho de banda que los resultados experimentales.

La consistencia observada entre los tres órdenes de resultados — teórico, numérico y experimental — valida tanto la metodología de análisis desarrollada en la primera parte del trabajo como el procedimiento de ensayo propuesto en la segunda.

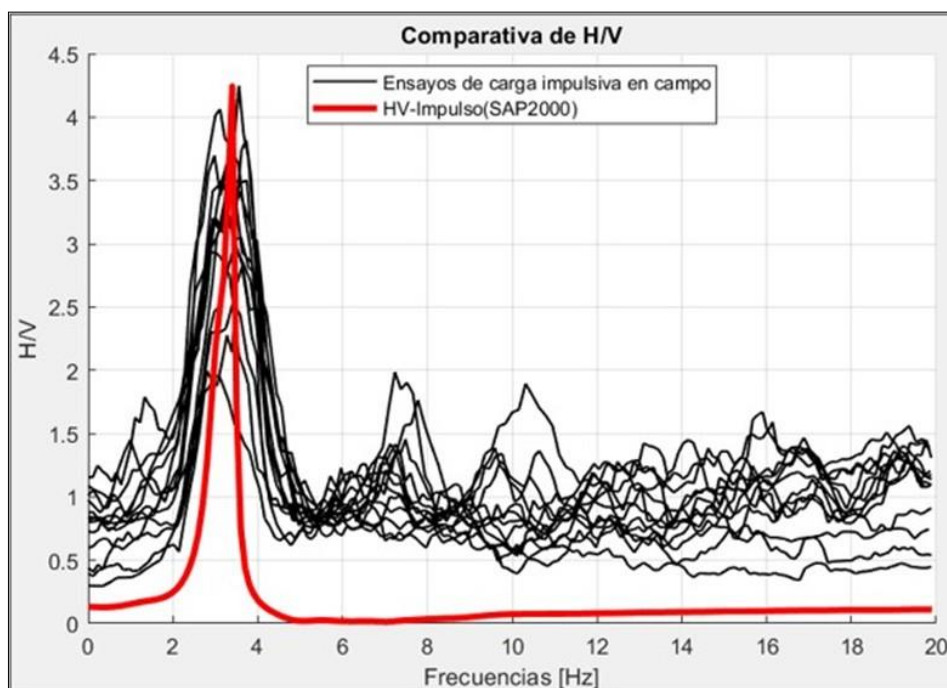


Figura 10. Comparativa entre resultados numéricos y ensayo de carga impulsiva.

Resultados obtenidos en Civil

Con el objetivo de evaluar la replicabilidad del ensayo propuesto en un sitio de características distintas, el procedimiento fue ejecutado adicionalmente en el sitio *Civil*. Los resultados se presentan en la Figura 11. El panel izquierdo muestra los cocientes espectrales H/V obtenidos para las tres distancias fuente–receptor ensayadas. A diferencia del sitio Biología, el perfil espectral del sitio Civil exhibe múltiples picos. El panel derecho presenta la comparación entre los ensayos de carga

impulsiva y el ensayo de vibración ambiental en el mismo sitio. Ambos métodos identifican consistentemente el pico fundamental.

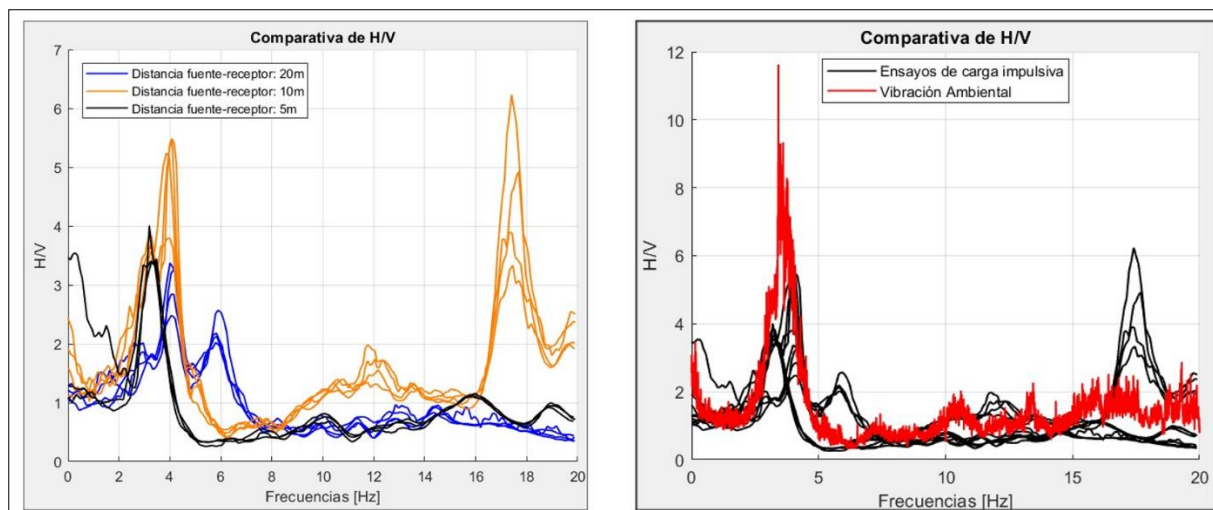


Figura 11. Resultados en Civil - (a) Gráficas de H/V comparando distancia fuente-receptor. (b) Gráficas de H/V comparando con método de Nakamura.

CONCLUSIONES

El presente trabajo desarrolló un estudio numérico y experimental del método de cocientes espectrales H/V, con el objetivo de explorar tipos de excitación alternativos a la vibración ambiental para la determinación de la frecuencia fundamental de depósitos de suelo. Del conjunto de resultados obtenidos se derivan las siguientes conclusiones:

1. Independientemente del tipo de excitación aplicada — sísmica, impulsiva en base, ruido ambiental o impulso superficial — el cociente H/V presenta un pico en la vecindad de la frecuencia fundamental del depósito. Este resultado fue verificado tanto en el modelo teórico de una capa como en el modelo estratificado de 19 capas, siendo consistente con los fundamentos del método de Nakamura y con la literatura disponible.
2. La excitación impulsiva superficial produce cocientes espectrales H/V con mayor resolución que los restantes tipos de carga analizados: el pico es más pronunciado, la banda de frecuencias en torno a él es más estrecha, y la energía espectral fuera de dicha banda resulta esencialmente nula. Este hallazgo, identificado en el entorno

numérico, constituyó la motivación del ensayo experimental propuesto.

3. El ensayo de carga impulsiva ejecutado en campo permitió determinar la frecuencia fundamental del depósito en ambos sitios estudiados, con resultados consistentes con el perfil downhole disponible y con el modelo numérico desarrollado para el mismo sitio.

4. La comparación con el método clásico de Nakamura arrojó resultados concordantes en ambos sitios, con ambos métodos identificando el mismo pico fundamental. Se observó un leve desplazamiento del pico hacia frecuencias menores en los ensayos de carga impulsiva respecto a la vibración ambiental, aspecto que merece investigación adicional, particularmente en sitios con perfiles estratigráficos más complejos.

5. El método propuesto ofrece ventajas operativas concretas respecto al método de Nakamura: reduce el tiempo de medición de aproximadamente 60 minutos a menos de 60 segundos por ensayo, genera amplitudes fácilmente identificables por acelerómetros convencionales. En una campaña de microzonificación sísmica sobre un área de influencia de una hectárea, esta diferencia permite obtener un orden de magnitud más de puntos de medición en el mismo tiempo de trabajo, incrementando sustancialmente la representatividad espacial del estudio.

6. Como líneas de investigación futura se propone: (a) aplicar el método en sitios donde el método de Nakamura presente limitaciones, particularmente aquellos con bajo contraste de impedancia acústica o bajo nivel de ruido ambiental; y (b) explorar la estimación del amortiguamiento del suelo a partir de los registros de vibración libre obtenidos en el ensayo, mediante métodos análogos al decremento logarítmico.

REFERENCIAS

- [1] Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- [2] Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface". *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- [3] Lermo, J. y Chávez-García, F. J. (1994). "Are microtremors useful in site response evaluation?". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5): 1350–1364.
- [4] SESAME European Project (2004). "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations". *WP12 – Deliverable D23.12*, European Commission.
- [5] Nogoshi, M. e Igarashi, T. (1970). "On the propagation characteristics of microtremors". *Journal Seismological Society of Japan*, 23: 264–280.
- [6] Ponce I & M Engineering Laboratory, Inc. (1998). *Geotechnical investigation report for the new biology building project, University of Puerto Rico, Mayagüez campus*.