

DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO VS30 USANDO LOS MÉTODOS FK Y SPAC EN LA BAHÍA DE CÁDIZ (SUR DE ESPAÑA)

Víctor Schmidt Díaz

Resumen

En abril de 2008 se llevó a cabo una campaña de medición de vibraciones ambientales en la Bahía de Cádiz (sur de España). Fueron aplicadas las técnicas H / V y de arreglo de sensores colocados en serie para clasificar los suelos según el parámetro Vs30 en seis ciudades cercanas: Cádiz, Chiclana, Rota, Puerto Real, San Fernando y El Puerto de Santa María. La técnica H / V confirma que en las ciudades de Cádiz, Chiclana y El Puerto de Santa María, el medio es heterogéneo y horizontal, lo que permite observar el fenómeno de dispersión. En Puerto Real el perfil de suelo parece ser horizontal pero homogéneo y en Rota y San Fernando se observaron cambios importantes en las razones H/V obtenidas a 50 m de distancia entre ellas, por lo que el perfil no puede ser considerado horizontal. La técnica de arreglos en serie mostró una clara definición de la curva de dispersión y un perfil del suelo bien definido (modelos con menor error) en Cádiz, Chiclana y El Puerto de Santa María, pero no mostró resultados concluyentes para Rota ni para San Fernando, debido a la falta de claridad de las curvas de dispersión. En general, el suelo que predomina en la zona podría ser clasificado como B y C según el Eurocódigo 8, basado en los valores de Vs30 obtenidos utilizando las técnicas de FK y SPAC.

Palabras clave: Vs30, respuesta de suelos, curvas de dispersión, sensores en serie, Cádiz, España.

Abstract

In April 2008 an ambient vibration measurement campaign was conducted in Cadiz Bay (South of Spain). H/V and arrays techniques were applied in order to classify the soil types at different sites according to Vs30 parameter in six nearby towns: Cadiz, Chiclana, Rota, Puerto Real, San Fernando and El Puerto de Santa María. The H/V technique confirmed that in towns of Cadiz, Chiclana and El Puerto de Santa María, the medium is heterogeneous and with horizontal layering which allows us to observe the dispersion phenomena. In Puerto Real the soil profile looks like horizontal but homogeneous and in Rota and San Fernando the soil profile changes in a short distance, according to the differences observed in the H/V obtained in two sites 50 m apart. The array technique showed clear definition of dispersion curve and well defined soil profile (models with less error) in Cádiz, Chiclana and El Puerto de Santa María but not conclusive results for Rota and San Fernando, due to unclear dispersion curves obtained. In general, the soil types that predominate in the area can be classified as B and C according to Eurocode 8, based on the values of Vs30 obtained using arrays technique.

Keywords: Vs30, soil response, dispersion curves, arrays, Cadiz, Spain

Recibido: 29 de noviembre 2010 • **Aprobado:** 2 de octubre 2012

1. INTRODUCCIÓN

Frecuentemente, la clasificación de suelos de un emplazamiento se lleva a cabo por medio de la interpretación de la información existente en una ciudad o región a una escala poco detallada, a partir de la observación de mapas geológicos, geotécnicos o bien, de visitas al campo. Sin embargo, esta clasificación

resulta ser muy subjetiva debido a que no se logra determinar la profundidad del suelo identificado en la superficie.

Uno de los parámetros más importantes considerados en la actualidad a nivel mundial para la clasificación de los suelos es el llamado Vs30, que corresponde al promedio de las velocidades de ondas cortantes de las capas de suelo ubicadas desde la superficie hasta 30

metros debajo de ella (Martin et al, 2004). Sin embargo, las técnicas geofísicas requeridas para conocer este parámetro son sumamente costosas, además de que tienen cierto nivel de complejidad técnica y logística para su aplicación. (Boore, 2004; Boore et al, 2011).

El hecho de definir el promedio de velocidades a los 30 metros de profundidad como un criterio para la clasificación de suelos, obedece a que el suelo dentro de esta profundidad es el que afecta en mayor medida el comportamiento de las estructuras que se edifiquen sobre él.

A modo de ejemplo, el código estadounidense NEHRP (*Nacional Earthquake Hazards Reduction Program*, BSSC, 1994), define cinco clases de suelo, todos dependientes de V_{s30} , tal y como lo muestra el Cuadro 1.

donde:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (1)$$

Siendo d_i el espesor de cada capa de suelo del perfil hasta alcanzar los 30 m de profundidad, V_{si} la velocidad de onda cortante de cada capa i en m/s y N el número de capas hasta alcanzar los 30 m.

Desde hace varios años, investigadores de todo el mundo han desarrollado métodos basados en la medición de las ondas superficiales por medio de sensores colocados en serie o arreglos (Aki, 1957; Okada, 2003; Asten, 2006), también conocidos internacionalmente como *arrays*, con los que es posible aplicar las técnicas FK (*frequency-wavenumber*) y SPAC (*spacial autocorrelation*), por medio de las cuales se pueden determinar perfiles de suelo (V_s vs. profundidad) y por lo tanto V_{s30} .

La principal razón del éxito que ha tenido la técnica de arreglos dentro de la comunidad científica, se justifica en que su aplicación práctica es relativamente sencilla, sobre todo porque utiliza fuentes pasivas que son las vibraciones ambientales, por lo que no es invasiva ni destructiva. A partir de su aplicación es posible identificar algunas características de las capas sedimentarias (espesor y velocidad de onda cortante) a un costo bastante inferior respecto a otros métodos geofísicos invasivos como VSP (*Vertical Seismic Profiling*), *Downhole*, etc.

Cuadro 1. Tipos de suelo definidos por en NEHRP según el parámetro V_{s30}

Clase	Características
A	Roca dura con $V_{s30} > 1500$ m/s
B	Roca con $760 \text{ m/s} < V_{s30} \leq 1500$ m/s
C	Suelo muy denso y roca suave con $360 < V_{s30} \leq 760$ ó $NSPT > 50$ o $SU > 100$ KPa
D	Suelo firme con $180 \text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 360$ m/s ó $15 \leq NSPT \leq 50$ ó $50 \text{ KPa} \leq SU \leq 100$ KPa
E	Un perfil de suelo con $V_{s30} < 180$ m/s ó $NSPT < 15$ ó $SU < 25$ KPa

Fuente: BSSC, 2003.

El método asume primeramente que las vibraciones ambientales están compuestas en forma mayoritaria de ondas superficiales y que la estructura del subsuelo está formada por estratos horizontales.

En medios unidimensionales y heterogéneos (perfiles de suelo con capas de distinto material), las ondas superficiales son dispersivas y muestran variaciones de velocidad aparente según la frecuencia (Wathelet, 2007).

Para obtener el parámetro Vs30, deben seguirse cuatro pasos principales, según procedimientos sugeridos por el grupo SESAME (SESAME Group, 2005):

- La toma de datos en el sitio con el uso de los arreglos de sensores
- La extracción y procesamiento de los datos
- La obtención de la curva de dispersión del sitio (variación de la velocidad de las ondas superficiales en función de la frecuencia) por medio de las técnicas FK o SPAC
- La inversión de la curva anterior, lo que permite obtener los perfiles de velocidad de onda cortante en función de la profundidad. A partir de este perfil es que se calcula Vs30.

En esta investigación, las técnicas mencionadas fueron aplicadas en bahía de Cádiz, España; en seis sitios previamente identificados, a partir de una campaña de medición realizada en abril de 2008.

Uno de los principales beneficios obtenidos al aplicar estos procedimientos es el conocimiento y la experiencia adquiridos, ya que se tiene programado desarrollar este tipo de investigaciones en Costa Rica para la caracterización, en forma sistemática, de los suelos bajo las estaciones acelerográficas del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (INII, UCR), así como lograr una clasificación de suelos más precisa que permita mejorar los criterios contenidos en las normas y códigos de diseño vigentes en el país.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Cádiz está situada en la provincia de Cádiz, en la comunidad autónoma de Andalucía (SW de España). Tiene una extensión de 607 km² y una población de 417.924 habitantes para el año

2006. Está formada por cinco municipios: Cádiz, el Puerto de Santa María, San Fernando, Puerto Real, Chiclana de la Frontera y Rota. La bahía presenta grandes extensiones de marismas y de esteros que se inundan por efectos de las mareas (Schmidt, 2010).

Con base en las descripciones litológicas de las hojas 1061 (Baena et al., 1984), 1062 (Baena et al., 1984), 1068 (García et al., 1984) y 1069 (García et al., 1991), del mapa geológico correspondiente a los municipios de la bahía de Cádiz, se obtuvo un mapa geológico en el que, siguiendo los criterios de Fleta et al. (1998), se simplifica la clasificación de suelos a cuatro tipos: roca, A, B y C. El mapa obtenido se muestra en la Figura 1.

Se observa que gran parte de estos municipios son una especie de “islas”, en especial Cádiz y San Fernando, donde se encuentran edificadas las construcciones más antiguas. Sin embargo, los procesos de sedimentación y erosión, así como la mano del hombre y la tectónica de la zona han permitido un aumento de las áreas habitables, pero generalmente en condiciones de suelo C (rellenos naturales o antrópicos, con las propiedades mecánicas más pobres). Las islas están constituidas en forma predominante por lo que se conoce popularmente como “piedra ostionera”, que son conglomerados y areniscas ricas en ostras, de edad terciaria.

3. METODOLOGÍA APLICADA

3.1 Técnica H/V para la determinación de la horizontalidad de los estratos y de la frecuencia fundamental del sitio

La técnica H/V permite identificar la frecuencia fundamental del suelo utilizando sensores triaxiales que permitan medir vibraciones ambientales (SESAME Group, 2005). Si esta razón H/V se mantiene aproximadamente constante en el área de estudio, puede asegurarse que los estratos de suelo sobre el basamento se disponen horizontales y el medio puede considerarse unidimensional.

Este método, propuesto por Nakamura (1989) ha probado ser útil para la identificación

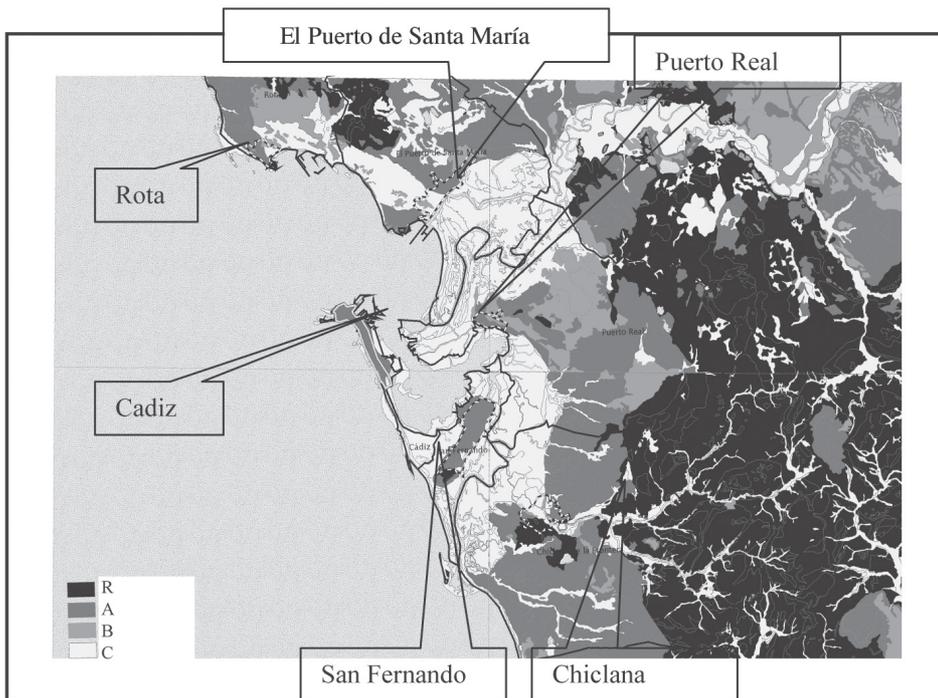


Figura 1. Mapa de la geología simplificada de la bahía de Cádiz. En la leyenda se indica los tipos de suelo simplificados según Fleta et al. (1998). R: roca, A: roca meteorizada, B: suelo medio y C: suelo blando.

Fuente: El autor.

del periodo (o frecuencia) fundamental de depósitos de suelo. Posteriormente Lermo (1993) lo aplicó con resultados exitosos en el Valle de México y desde ese momento la técnica se aplica ampliamente alrededor del mundo, en muchos casos con buenos resultados. La existencia de información previa de la geología local, así como sondeos geotécnicos y geofísicos permite interpretar mejor los resultados obtenidos con la aplicación de esta técnica.

El método H/V consiste en la determinación de los espectros de Fourier de las componentes horizontales y de la vertical de registros de vibraciones ambientales, obtenidos con un velocímetro o un acelerógrafo triaxial. A partir de ellos se obtiene la razón H/V (cociente espectral), que es considerado por Nakamura (1989) como la función de transferencia aproximada de los estratos del suelo sobre el basamento. Al contarse con dos componentes horizontales, H suele ser considerado como el promedio de los espectros en el plano horizontal.

El método H/V parte de la hipótesis que las vibraciones ambientales están compuestas por varios tipos de ondas y considera que estas son similares horizontal y verticalmente en el basamento. Al propagarse por las distintas capas del suelo, las vibraciones en componente horizontal son amplificadas debido a multirreflexiones de la onda S, mientras que la componente horizontal contiene información de la onda incidente, la cual viaja en forma inalterada hasta la superficie y por lo tanto, libre de amplificación. Esto es válido si en estas vibraciones predominan ondas Rayleigh y su elipticidad es casi unitaria, lo que generalmente sucede en medios estratificados donde hay un contraste significativo entre las impedancias de las capas de suelo y del basamento. El método ha sido ampliamente utilizado y se dispone de una exhaustiva lista de recomendaciones para su aplicación (Bard et al., 2004).

El equipo utilizado en este trabajo para realizar las mediciones está formado por un

digitalizador CityShark y dos sensores Lennartz triaxiales de 5 segundos. El programa utilizado para el procesamiento de los datos fue el GEOPSY (versión 2.2.6, 20071130, diseñado en C++ por Marc Wathelet, Grenoble, France). Se tomaron registros de entre 10 y 20 minutos y se seleccionaron ventanas de distintas duraciones. Se calculó el promedio de las razones espectrales para cada sitio.

3.2 Técnicas FK y SPAC para la determinación de los espesores de capas y velocidades de ondas cortantes.

El registro simultáneo de varios sensores distribuidos en una geometría determinada, conocido comúnmente como arreglos, ha resultado ser un atractivo método para la determinación de las velocidades Vs y espesor de los estratos del suelo a partir de mediciones de ruido hechas “in situ”.

El método asume primeramente que las vibraciones ambientales están compuestas en forma mayoritaria por ondas superficiales y que la estructura del subsuelo está formada por estratos horizontales.

En medios unidimensionales y heterogéneos, las ondas superficiales son dispersivas y muestran variaciones de velocidad aparente según la frecuencia. Los modos de ondas Love (S_H) y Rayleigh (P- S_V) coexisten en las componentes horizontales, mientras que las verticales son afectadas únicamente por ondas superficiales Rayleigh (Wathelet et al, 2007).

El procesamiento de los datos para obtener los perfiles de Vs a partir de las mediciones en serie de ruido se divide en dos pasos principales, debido a que las propiedades de las fuentes que generan las excitaciones en el suelo son casi siempre desconocidas. Estos pasos son:

a. Derivación de la curva espectral característica de propagación de ondas (llamada también curva de dispersión o curva de autocorrelación). La velocidad de las ondas que viajan a una determinada frecuencia es derivada del procesamiento de registros del movimiento del suelo, simultáneamente en varias estaciones.

En esta investigación, dichas curvas se obtendrán a partir de dos métodos:

- **El método de número de onda vs. frecuencia**, conocido como FK, asume que frentes de ondas planas atraviesan el arreglo que se ubica en la superficie del suelo. Considerando una onda de frecuencia f con una dirección de propagación y una velocidad conocidas (o los números de onda equivalentes K_x y K_y a lo largo de los ejes horizontales X y Y), los tiempos de arribo son calculados en todos los sensores según su ubicación y las fases de los registros son cambiadas según los tiempos de retardo. La respuesta del arreglo es calculada sumando las señales transformadas al dominio de la frecuencia. Si las ondas viajan con velocidad y dirección específicas, todas las contribuciones se acumularán constructivamente, resultando un arreglo de gran salida o respuesta. La localización de esta máxima salida en el plano K_x y K_y (conocida también como *beam power*), provee una estimación de la velocidad y del azimut de las ondas que viajan a través del arreglo.

- **El método de la autocorrelación espacial (SPAC)** asume la distribución de las fuentes en el campo de ondas del ruido como aleatoria, tanto en el tiempo como en el espacio. En el caso de una onda dispersiva, se ha demostrado que las razones de autocorrelación son función de la velocidad de fase y de la apertura del arreglo. Este método aprovecha entonces la distribución aleatoria de las fuentes para relacionar las razones de autocorrelación con las velocidades de fase.

b. Inversión de la curva obtenida en a. para obtener la estructura del suelo. En estos métodos, la resolución en profundidad está intrínsecamente relacionada con las amplitudes espectrales del campo de ondas, así como con la capacidad y distribución de los sensores.

Para realizar la inversión de las curvas de dispersión, el método que permite determinar los perfiles de Vs consiste en invertir las curvas espectrales, ya sean de dispersión o de autocorrelación, obtenidas en a). Las dos técnicas de número de onda vs. frecuencia proveen la curva de dispersión aparente la cuál puede ser invertida usando el algoritmo clásico linealizado, o bien una técnica directa de búsqueda como el algoritmo “del vecino”, métodos iterativos o redes neuronales. En este caso, fue utilizado el método del vecino para realizar la inversión tanto de las curvas de dispersión como las de autocorrelación.

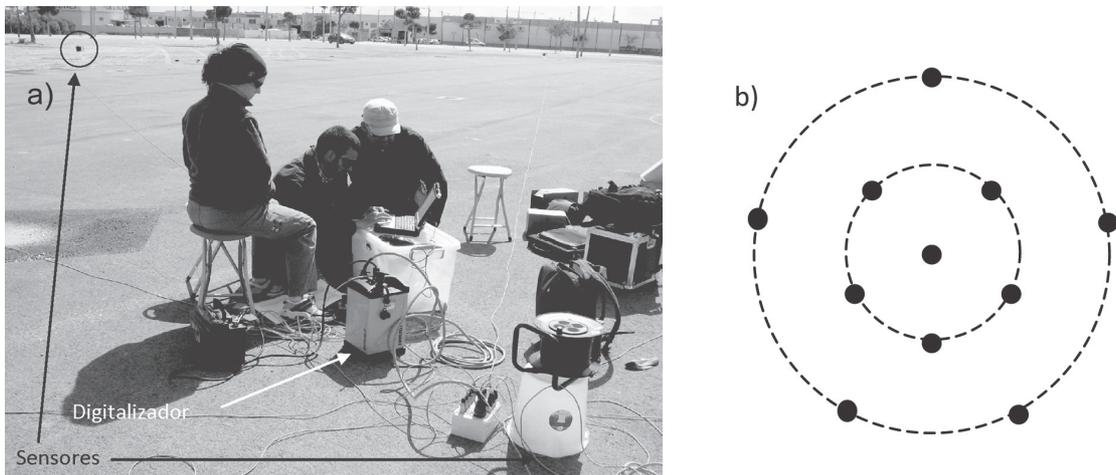


Figura 2. a) Trabajo de campo en el sitio llamado Chiclana. Disposición de digitalizador, sensores y cables.
b) Ubicación de los 11 sensores en planta.

Fuente: El autor.

Para la medición de ruido sísmico usando arreglos se contó con un sistema de adquisición de datos desarrollado por DMT (Deutsche Montan Technology) que consta de una unidad Compact Summit con un digitalizador de 24 canales sísmicos al que se adaptaron 11 sensores Mark L4C uniaxiales (una componente vertical) de 1 Hz, y cables que permiten una apertura del array de 100 m. Los sensores se ubicaron en forma concéntrica respecto al sensor central, dos círculos: uno con radio máximo de 50 m, en cuya circunferencia se colocaron cinco sensores y otro con un radio máximo de 25 m, donde se ubicaron los cinco restantes. Estas dimensiones se definieron de acuerdo con el espacio disponible para hacer las pruebas, así como la longitud máxima de los cables (50 m) ya que para longitudes mayores se produce pérdida de señal. La Figura 2a muestra la disposición de los sensores, cables y digitalizador en el trabajo de campo y la Figura 2b la ubicación de los sensores en planta.

Para definir los emplazamientos para la campaña de medición, tanto para la aplicación de la técnica H/V como la de arreglos, se utilizó el mapa geológico simplificado de la Figura 1.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Técnica H/V

La Figura 3 muestra las razones espectrales H/V obtenidas en dos emplazamientos separados por 50 m uno del otro, para cada uno de los seis municipios donde se llevaron a cabo las mediciones.

Se observa que para los casos de Cádiz (3a), Chiclana (3b), El Puerto de Santa María (3c) y Puerto Real (3d), las razones espectrales obtenidas para cada municipio son semejantes, por lo que se puede considerar que los estratos se disponen en forma horizontal en esos cuatro sitios.

Por otro lado, las Figuras 3e y 3f, que representan los casos de Rota y San Fernando respectivamente, no evidencian la presencia de estratos dispuestos en forma horizontal debido a que las razones H/V obtenidas en cada sitio no son coincidentes, sobre todo en el caso correspondiente a Rota, donde ni las amplitudes ni la frecuencia fundamental se asemejan.

El Cuadro 2 presenta una descripción de los resultados de H/V obtenidos para los seis municipios. Con base en este, se pueden agrupar en tres casos:

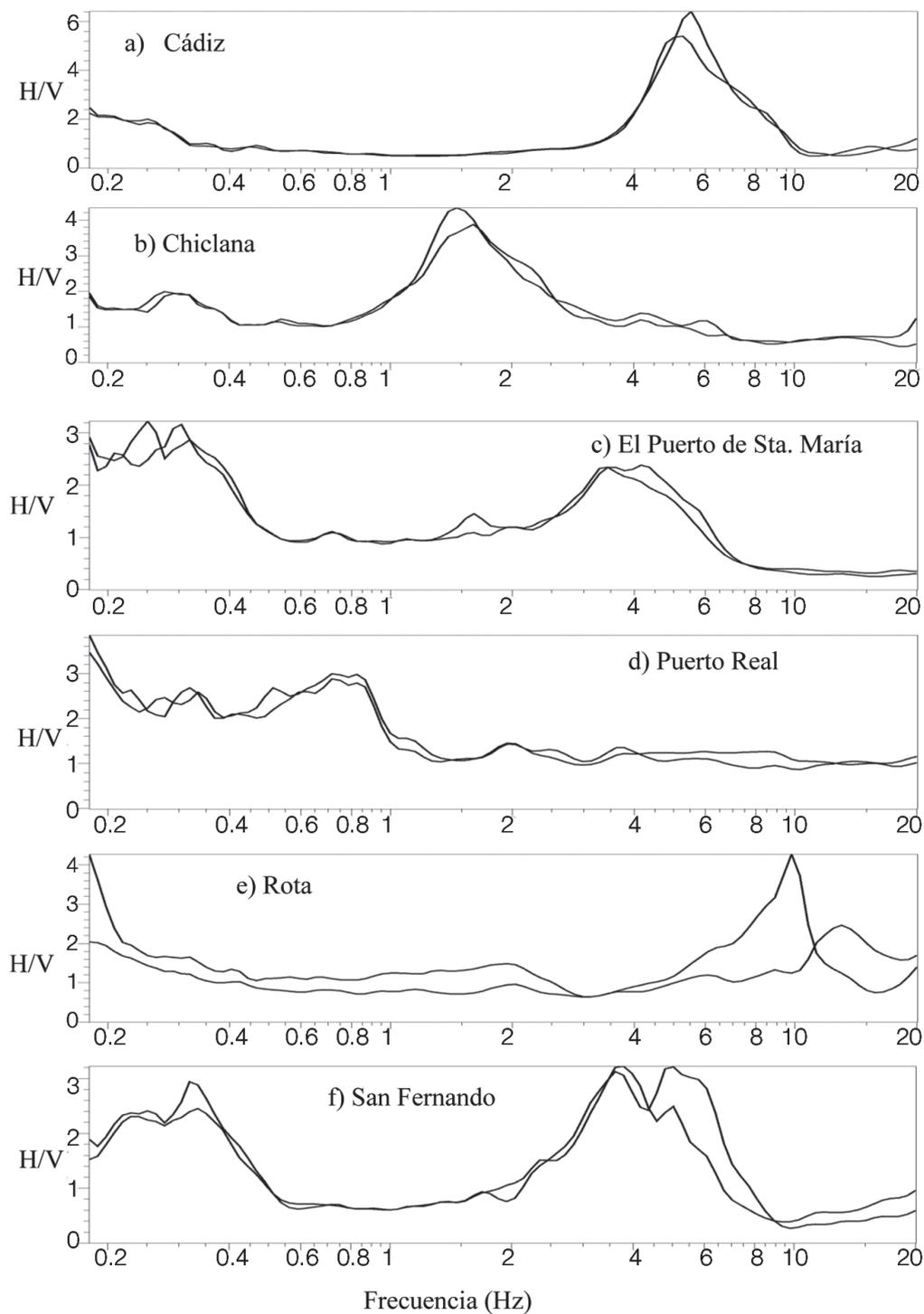


Figura 3. Comparación entre razones espectrales H/V obtenidas en los seis sitios en estudio.

Fuente: El autor.

Cuadro 2. Resultados de la aplicación de la técnica H/V en seis municipios de la Bahía de Cádiz

Municipio	Sitio	Duración (minutos)	Frecuencia F_0 (pico observado, Hz)	Amplitud	Observaciones
Chiclana	Recinto ferial	20	1,6	3,7	Posible segundo pico en 0,3 Hz, pero mucha dispersión para definirlo
		20	1,5	4	
Rota	Base naval	20	9,8	2,9	Pico muy agudo debido a presencia de relleno antrópico, resto apl. bajas
		20	15,1	2,1	
El Puerto Sta. María	Parking Valdelagrana	20	3,5	2,4	Se define segundo pico a frec. bajas pero mucha dispersión
		20	3,4	2,4	
San Fernando	Parking Bahía Sur	20	3,5	2,9	Pico pobremente definido para f_0 , aparece otro a frec. bajas pero gran dispersión
		20	3,5	2,9	
Puerto Real	Recinto ferial	20	0,8	3,1	Mucha dispersión para definir f_0
		20	0,8	2,9	
Cádiz	Campo fútbol	20	5,2	5,4	Pico muy definido en altas frecuencias debido a relleno antrópico
		20	5,5	6,4	
		20	5,5	6,4	

Fuente: El autor.

- Cádiz y Chiclana (Figuras 3a y 3b): picos bien definidos, amplitudes superiores a 4, frecuencias predominantes superiores a 1 Hz, gran semejanza entre las razones espectrales observadas en cada gráfico.
- El Puerto de Santa María (Figura 3c) y San Fernando (Figura 3f): un primer pico definido entre 0,2 Hz y 0,4 Hz (aunque con mucha dispersión) y otro pico mejor definido entre 2 Hz y 4 Hz. Se considera que este último pico es el que representa la frecuencia fundamental, por la baja dispersión de los resultados para este caso y por ser más concordante con la geología del sitio.

- Puerto Real y Rota (Figuras 3d y 3e): razones espectrales muy planas, con amplitud predominante igual a 1,0, lo que parece indicar que son medios homogéneos, formados por un solo material dominante (sin grandes contrastes entre capas). En estos casos no será posible observar claramente el fenómeno de dispersión.

Con base en lo anterior, se espera que la técnica de arreglos funcione mejor en los casos de Cádiz, Chiclana y Puerto Real, ya que es en ellos en los que se cumplen las condiciones requeridas para observar el fenómeno de dispersión: estratos heterogéneos (amplitud de algún pico en la razón H/V superior a 1,0) y horizontales (semejanzas

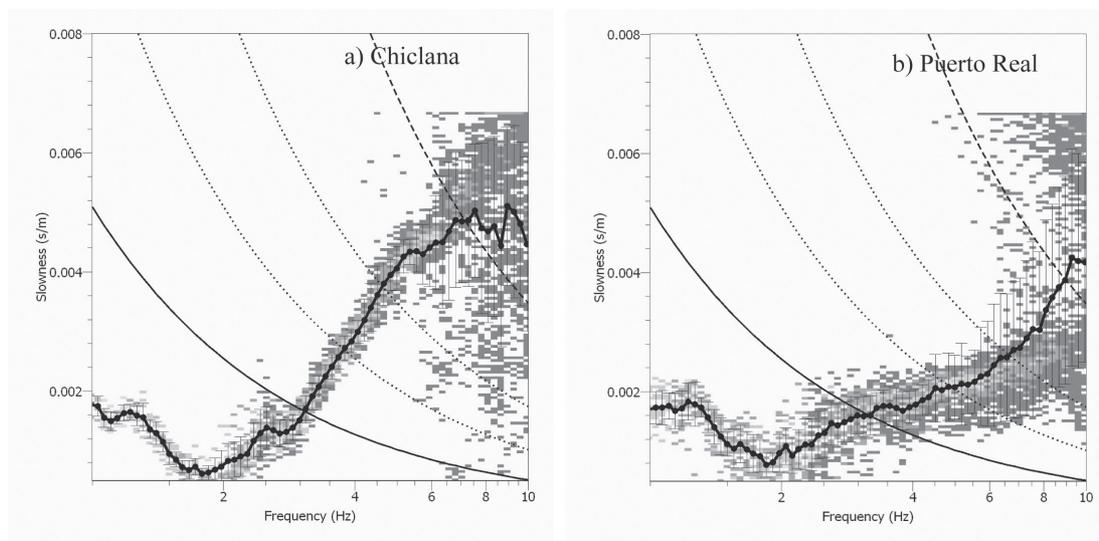


Figura 4. Dos casos de aplicación de la técnica de arrays usando el método FK después de eliminar el efecto de aliasing para cada banda de frecuencia, para los casos de Chiclana (3a) y Puerto Real (3b). En ambos casos las líneas negras gruesas representan los números de onda K mín/2 (línea continua) y K máx (línea discontinua), mientras que las líneas centrales (en puntos) representan el rango de mayor seguridad de los resultados (Wathelet, 2007).

Fuente: El autor.

entre las razones H/V obtenidas en los puntos de medición separados una cierta distancia).

Técnica de arreglos

Para obtener las curvas de dispersión, las mediciones realizadas consistieron en dos ventanas de tiempo de 8 minutos cada una, unidas para lograr una ventana de 16 minutos por cada sitio (misma ubicación y distribución) y su posterior procesado de los datos. Se trabajó con ventanas de 8 minutos debido a limitaciones de memoria del digitalizador. Se obtuvo lo siguiente:

- Para Chiclana y El Puerto de Santa María se observa la mayor claridad de las curvas, tanto las de dispersión (obtenidas con el método FK) como las de autocorrelación (obtenidas con el SPAC).
- El caso de Cádiz muestra una curva de dispersión más limitada en el rango de frecuencias y los resultados entre los métodos FK y SPAC no son coincidentes en cuanto a su tendencia.
- Para Puerto Real y Rota, la solución obtenida es bastante limitada en el rango de frecuencias,

además de que no se aprecia un aumento gradual del retardo con la frecuencia, que es lo esperado. Al ser ambas curvas casi horizontales el fenómeno de dispersión no es claro, lo que hace pensar que el medio se comporta como homogéneo (o sea, no estratificado en distintas capas), lo que debilita la posibilidad de aplicación de estos métodos. Esto es concordante con lo obtenido según el método H/V, en el que se observa una variación de la frecuencia fundamental en una distancia muy corta.

- En San Fernando es donde se tiene la menor claridad en cuanto a la definición de la curva de dispersión dada por el método FK (cantidad de picos presentes que impiden definir una curva suave) y resulta imposible definir rangos dentro de los cuales varía la curva de autocorrelación para la aplicación del método SPAC.

A modo de ejemplo, en la Figura 4a que corresponde a la curva de dispersión obtenida para Chiclana con el método FK, se observa un incremento gradual de la lentitud (o inverso de la velocidad de fase) en función de la frecuencia. La línea no presenta picos ni anomalías.

Sin embargo, la Figura 4b que representa el caso de Puerto Real, la curva de dispersión

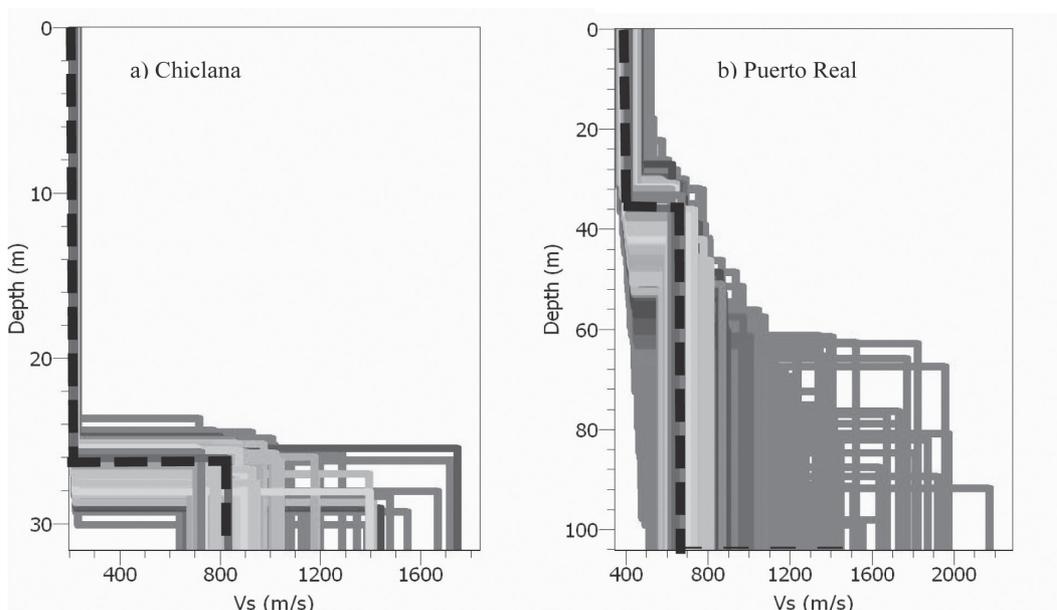


Figura 5. Soluciones de Vs vs. profundidad para los sitios de Chiclana y Puerto Real.

Fuente: El autor.

Cuadro 3. Frecuencias fundamentales obtenidas por dos métodos distintos

Municipio	F_n según perfil (Hz)	f_0 según H/V (Hz)
Cádiz	3,8	5,5
Chiclana	2,1	1,6
Puerto Real	2,9	0,8
Rota	2,4	9,8
San Fernando	3,4	3,7
Santa María	3,9	3,4

Fuente: El Autor.

obtenida también con el método FK, muestra mayores diferencias entre los resultados (barras de error más grandes) y un medio aparentemente menos disperso, ya que la línea es más irregular y horizontal que el caso anterior.

Las Figuras 5a y 5b representan los perfiles obtenidos según las mejores soluciones (menor dispersión de los resultados) con la aplicación del método FK para los sitios de Chiclana y Puerto Real, respectivamente.

Para Chiclana (5a) puede observarse una buena definición de la Vs para la primera capa, en la que coinciden prácticamente todos los modelos generados según el algoritmo de inversión utilizado. La profundidad de esta primera capa es definida moderadamente bien (menor coincidencia entre los modelos) y se observa una mayor dispersión de los resultados para la Vs correspondiente a la segunda capa. La línea de guiones representa la solución con el menor error, por lo tanto, la escogida.

Para Puerto Real (Figura 5b), los distintos modelos generados que muestran el menor error, coinciden al definir un valor muy similar de Vs para la primera capa, pero no así para la profundidad de esta ni para la Vs de la segunda capa. Es importante destacar que las Vs obtenidas para la primera y segunda capas son similares, lo que es concordante con el hecho de que para este sitio, la curva de dispersión obtenida tiende a ser horizontal. Esto refuerza la idea de que el medio tiende a ser homogéneo, por lo que se contradice una de las principales hipótesis necesarias para aplicar el método de arreglos.

El Cuadro 3 muestra comparaciones entre las frecuencias fundamentales obtenidas a partir de los dos métodos aplicados. En la segunda columna, la denominada fh se obtuvo a partir de las velocidades y de los espesores de los perfiles escogidos como mejor solución de cada arreglo y aplicando la fórmula: $f_h = 1/4 * V_{s0}/h_0$ (Kramer, 1996). En la tercera columna, la f_0 se leyó directamente de las razones espectrales H/V. Nuevamente, en los casos donde se obtuvo mayor claridad de los resultados es donde hay mayor coincidencia respecto a las estimaciones de la frecuencia fundamental, que son: Chiclana y El Puerto de Santa María. Los tres casos restantes requieren de información complementaria, como datos provenientes de pruebas de NSPT

u observaciones directas como perforaciones para definir en forma más precisa los perfiles para esos sitios.

Perfiles propuestos para los seis municipios

Con el fin de complementar los resultados obtenidos a partir de la aplicación del método de arreglos y para obtener los perfiles que se proponen en este estudio, se consultaron datos de ensayos SPT (*Standard Penetration Test*) disponibles y con el uso de correlaciones propuestas por Coral (2002) se lograron definir Vs principalmente para capas superficiales que los modelos generados por la técnica de arreglos no lograron identificar. En la mayoría de los casos, los perfiles disponibles no superaron los 10 m de profundidad. Sin embargo, estos resultados sirvieron para definir mejor las Vs, de la siguiente forma:

En el caso de Puerto Real (Figura 6a), el perfil correspondiente al recinto ferial se trabajó tal y como se obtuvo a partir de la aplicación del método de arreglos, ya que es más congruente con el tipo de suelo que se definió en el mapa de la geología superficial.

Para los casos de Rota (base naval, Figura 6b) y San Fernando (hotel Bahía Sur, Figura 6g), que fue en los sitios donde se obtuvieron resultados con más error y dispersión en los modelos, se crearon nuevos perfiles a partir de los datos de ensayos SPT. Estos tienen los nombres de Rota recinto ferial (Figura 6c) y San Fernando Almirante (Figura 6h), ambos casos representan perfiles ubicados más cerca del centro de los municipios respectivos, pero al no estar en los sitios precisos donde se llevaron a cabo las pruebas con arreglos de sensores, estos nuevos datos no fueron introducidos en los modelos obtenidos de la inversión de los resultados de las técnicas FK y SPAC nuevamente, sino que se consideraron como perfiles nuevos.

En el caso de Cádiz (Figura 6e), se definió una primera capa de 10 m de espesor con una Vs = 250 m/s. Con estas condiciones, se volvieron a obtener curvas de dispersión y se generaron nuevos modelos. Para Chiclana (Figura 6d), los resultados de SPT sirvieron para corroborar la presencia de una primera capa cuya Vs es aproximadamente igual a 250 m/s, dada por los modelos generados previamente. En El Puerto de Santa María (Figura

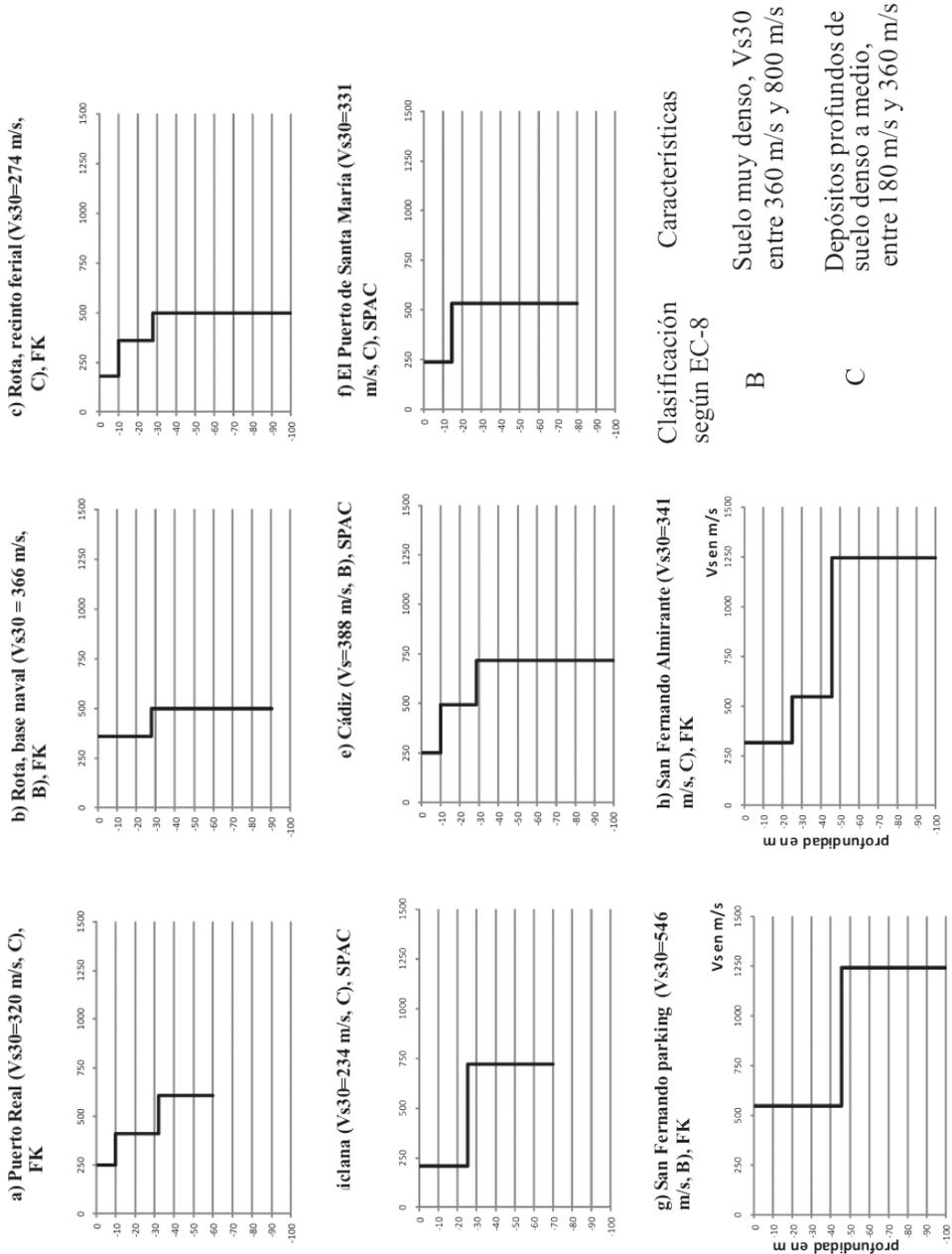


Figura 6. Perfiles propuestos obtenidos a partir de los arrays y las correlaciones con las pruebas NSPT. Se indican los métodos con los que se obtuvo la mejor solución: FK o SPAC.
Fuente: El autor.

Cuadro 4. Perfiles obtenidos con la técnica de arrays para la generación de modelos de respuesta en superficie

Municipio	Profundidad capa (m)	Espesor capa (m)	Vs (m/s)
Puerto Real, recinto ferial ($f_h=3.20$ Hz, $f_0=0.8$ Hz)	32.2	32.2	412.4
Vs30 = 412 m/s, suelo B según EC-8	60	27.8	607.3
suelo II según NCSE02, suelo A según Fleta et al. (1998)			
Rota, base naval ($f_h=3.21$ Hz, $f_0=9.78$ Hz)	27.9	27.9	358.4
Vs30 = 366 m/s, suelo B según EC-8	90.5	62.6	500
suelo II según NCSE02, suelo A según Fleta et al. (1998)			
Rota, recinto ferial ($f_h=2.37$ Hz, $f_0=3.96$ Hz)	10	10	180
Vs30 = 274 m/s, suelo C según EC-8	27.9	17.9	358.4
suelo III según NCSE02, suelo B según Fleta et al. (1998)	100	72.1	500
Chiclana, recinto ferial ($f_h=2$ Hz, $f_0=1.6$ Hz)	25.4	25.4	208.8
Vs30 = 234 m/s, suelo C según EC-8	70	44.6	719.4
suelo III según NCSE02, suelo B según Fleta et al. (1998)			
Cádiz, campo de fútbol ($f_h=3.23$ Hz, $f_0=5.47$ Hz)	10	10	250
Vs30 = 388 m/s, suelo B según EC-8	28.4	18.4	493
suelo II según NCSE02, suelo A según Fleta et al. (1998)	100	71.6	715
El Puerto de Santa María, Valdelagrana ($f_h=4.04$ Hz, $f_0=3.42$ Hz)	14.7	14.7	237.2
Vs30 = 331 m/s, suelo C según EC-8	30	15.3	531.8
suelo III según NCSE02, suelo B según Fleta et al. (1998)			
San Fernando, parking Bahía Sur ($f_h=2.99$ Hz, $f_0=3.7$ Hz)	45.6	45.6	545.9
Vs30 = 546 m/s, suelo B según EC-8	100	100	1244
suelo II según NCSE02, suelo A según Fleta et al. (1998)			
San Fernando, Almirante ($f_h=2.14$ Hz, $f_0=0.35$ Hz)	25	25	317.2
Vs30 = 341 m/s, suelo C según EC-8	45.6	20.6	545.9
suelo III según NCSE02, suelo B según Fleta et al. (1998)	100	54.4	1244

Fuente: El Autor.

6f) no se utilizaron pruebas de sondeos SPT por no estar disponibles.

Los perfiles propuestos se definen en el Cuadro 4 y se grafican en la Figura 6. En el Cuadro 4 se compara además la frecuencia fundamental obtenida a partir del método H/V (llamada f_0) con la estimada a partir de los perfiles definidos para cada municipio, aplicando la relación ya mencionada para f_h . En todos los casos se obtienen valores comparativos aceptables, con excepción de los sitios de Rota base naval y Puerto Real, donde la f_0 se ubica muy por encima o muy por debajo de la f_h , respectivamente, lo que puede estar asociado a una incorrecta curva de dispersión.

En ese mismo cuadro, se muestra la Vs30 para los ocho perfiles obtenidos y esto permite clasificar los suelos de acuerdo con el Eurocode 8 (2001) y su correspondencia aproximada con las clasificaciones según la norma NCSE02 (2002) y Fleta et al. (1998). Tal y como se puede apreciar, todos los sitios se ubican en condición de suelo B o C según el EC-8 y en varios casos en un punto medio entre ambas categorías, lo que permite concluir que los suelos presentes en la zona en estudio pueden ser considerados como densos. La Figura 6 muestra las Vs30 estimadas para cada sitio, que corresponde a la variable buscada en esta investigación.

5. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo una campaña de medición de vibraciones ambientales en la bahía de Cádiz (sur de España) en abril de 2008, para aplicar las técnicas H / V y de arreglos de sensores, que permiten clasificar los tipos de suelo según el parámetro Vs30 en seis municipios: Cádiz, Chiclana, Rota, Puerto Real, San Fernando y El Puerto de Santa María.

Primero, la técnica H V fue aplicada para verificar la horizontalidad de las capas del suelo y para obtener la frecuencia natural del suelo para cada sitio.

Se observó que para los casos de Cádiz, Chiclana, El Puerto de Santa María y Puerto Real, las razones espectrales obtenidas para cada municipio en al menos dos puntos de medición son semejantes, por lo que se puede considerar

que los estratos se disponen aproximadamente en forma horizontal en esos cuatro sitios.

Por el contrario, los casos de Rota y San Fernando no evidencian la presencia de estratos dispuestos en forma horizontal debido a que las razones H/V obtenidas en cada sitio no son coincidentes, sobretodo en el caso correspondiente a Rota, donde ni las amplitudes ni la frecuencia fundamental se asemejan.

Seguidamente, la técnica de arreglos se basó en el registro de vibraciones ambientales por medio de 11 sensores con una apertura máxima de 100 metros (dos círculos concéntricos con 5 sensores de cada sensor uno más uno central). Las características del perfil del suelo (Vs y el espesor de cada capa) para cada sitio se obtuvieron primero utilizando los métodos FK y SPAC a los registros de vibraciones y luego se realizó la inversión de las curvas de dispersión o de autocorrelación utilizando el “algoritmo de vecino”.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que son los sitios Chiclana y El Puerto de Santa María en los que se obtuvieron resultados más confiables, debido a las siguientes razones:

- Coincidencia entre la f_h y f_0 , esta última leída de las razones espectrales H/V.
- Curvas de dispersión bien definidas, con un incremento gradual de la lentitud en función de la frecuencia y barras de error menores.
- Concordancia entre el tipo de suelo según la geología superficial (criterio según Fleta et al., 1998) y la clasificación según EC-8, lograda a partir del parámetro Vs30.

En los demás sitios, la curva de dispersión obtenida es bastante irregular (casos de Rota y Puerto Real, donde resultó ser horizontal) y en San Fernando, en la que se observaron muchas irregularidades, lo que dificultó hacer la inversión. El gran contraste observado en el perfil correspondiente a este municipio puede ser debido a estas irregularidades.

En estos tres casos no se cumplen claramente dos de las hipótesis básicas del método: horizontalidad y heterogeneidad de los estratos, por lo que el fenómeno de dispersión no queda claramente justificado.

De acuerdo con el criterio Vs30, los suelos que predominan en la región en estudio son

tipo B y C según el EC-8, que corresponde a suelos muy densos (B) o densos a medios (C), lo que es congruente con los tipos de suelo predominantes en la zona, tomando en cuenta tanto los mapas de geología superficial siguiendo criterios de Fleta et al. (1998), como las descripciones litológicas disponibles.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a las siguientes instituciones que hicieron posible la realización del presente estudio: Instituto Geológico de Cataluña (Barcelona, España), Universidad de Costa Rica, Ministerio de Ciencia y Tecnología y CONICIT de Costa Rica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthquake Res. Inst.* 35, 415–457.
- Asten, M. (2006). On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods. *Geophysics*, 71, no.6, V153-V162.
- Baena, J., Zazo, C. y Goy, J.L. (1984). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, Hoja 1061 Cádiz*. IGME.
- Baena, J., Zazo, C. y Goy, J.L. (1984). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, Hoja 1062 Paterna de Rivera*. IGME.
- Bard, P. Y. (coord.) (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration measurements, processing and interpretation*. Sesame European research project (WP12- Deliverable D23.12).
- Boore, D. M. (2004). Estimating (or NEHRP Site Classes) from shallow velocity models (depths < 30 m). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 591-597.
- Boore, D. M., E. M. Thompson, and H. Cadet (2011). Regional correlations of VS30 and velocities averaged over depths less than and greater than 30 m. *Bull. Seism. Soc. Am.* 101,3046-3059.
- Building Seismic Safety Council (BSSC), (1994), *NEHRP Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings, part I: Provisions, developed for the Federal Emergency Management Agency*. Washington D.C.
- Coral, H. (2002). *Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra*. (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Eurocode 8 (2001). (EC-8) *Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. DRAFT No 4. Final Project Team Draft (Stage 34), December.
- Fleta, J., Estruch, I. and Goula, X. (1998). Geotechnical characterization for the regional assessment of risk in Catalonia. En: *Proc. 4th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Soc.* Barcelona, 699-702.
- García, A., González, J., Hernáiz, P.P., Zazo, C., Goy, J.L. y Baena, J. (1984). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, Hoja 1068 San Fernando*. IGME.
- García, A., González, J., Hernáiz, P.P., Zazo, C., Goy, J.L. y Ruiz, P. (1991). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, Hoja 1069 Chiclana de la Frontera*. IGME.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Lermo, J., & Chavez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull. Seism. Soc. of Am.*, 83, 1574–1594.
- Martin A.J. & Diehl J.G (2004). *Practical experience using a simplified procedure to measure average shear wave velocity to a depth of 30 meters (VS30)*. In: 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1–6, 2004, paper n. 952.
- Nakamura, Y. (1989). A method of dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quart. Rep. Railways Tech. Res. Inst.* 30, 25-33.
- NCSE02, (2002). *Norma de Construcción Sismorresistente*. BOE No. 244. Viernes 11 de octubre 2002, España.

Okada, H. (2003). The microtremor survey method. *Geophysical Monograph*. Series, SEG, 129.

SESAME Group (2005). *Site effects assessment using ambient excitations, final report. WP13: recommendation for quality array measurements and processing*. European Commission- Research General Directorate. Project No. EVG1-CT-2000-00026.

Schmidt, V. (2010). *Avances para estudios del riesgo sísmico a escala regional y local: aplicación a América Central y a la Bahía de Cádiz (Sur de España)*. (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Wathelet, M. (2007). *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave*

inversions. (Thesis submitted for the degree of Doctor of Applied Sciences). Université de Liège, Belgium.

SOBRE EL AUTOR

Víctor Schmidt Díaz

Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil e Investigador del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, Doctor en Ingeniería Sísmica de la Universidad Politécnica de Cataluña

Correo electrónico: victor.schmidt@ucr.ac.cr

Teléfono: 2511-6678