

## USO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPIRICAS (HVNR) OBTENIDAS CON MICROTREMORES PARA CONSTRUIR MAPAS CON LA CLASIFICACIÓN DE LOS TERRENOS DE CIMENTACION PARA DISEÑO SISMICO

Javier Lermo Samaniego<sup>1</sup> y Felicita Marlene Limaymanta Mendoza<sup>1</sup>

### RESUMEN

En la mayoría de las ciudades importantes de los estados de la República carecen de mapas que contengan la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico. En este trabajo se propone una metodología para la construcción de estos mapas, usando las formas espectrales de la técnica de Nakamura (HVNR) de registros de microtremores sobre mapas con la zonificación geológica-geotécnica. Esta metodología utiliza además el parámetro  $VS_{30}$  y el código Internacional European Eurocode 8 (EC-8). Esta metodología fue aplicada al centro histórico de la zona urbana de Puebla (CHP), donde los suelos se agruparon en cinco formas espectrales que corresponden a cinco tipos de suelos (depósitos de travertino sano, travertino alterado, suelos aluviales, volcánicos y basálticos) y a cuatro grupos (A, B, C y D) del EC-8. Los resultados validaron el parámetro de  $VS_{30}$  y permitieron desarrollar mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para esta ciudad.

### ABSTRACT

In most of the important cities of the states of the Republic they lack maps that contain the classification of lands of laying of foundations for seismic design. In this work a methodology for the construction of these maps sets out, using the shape of spectra of the technique of Nakamura (HVNR) obtained with microtremors on maps with the geologic-geotecnic zonation. This methodology uses in addition parameter  $VS_{30}$  and the code of the International European Eurocode 8 (EC-8). This methodology was applied to the historical center of the urban zone of Puebla (CHP), where the soils were grouped in five spectral forms that correspond to five types of grounds (deposits of healthy, travertino travertino altered, alluvial, volcanic and basaltic grounds) and to four groups (To, B, C and D) of the EC-8. The results validated the  $VS_{30}$  parameter and allowed to develop maps with the classification of lands of laying of foundations for this city.

### CARACTERIZACIÓN LOCAL DEL SUELO

A medida que se ha ido avanzando en el conocimiento geológico, geotécnico, geofísico, y en el estudio del efecto de emplazamiento, las clasificaciones de los distintos tipos de suelo han evolucionado introduciendo nuevos parámetros cualitativos y cuantitativos.

Las primeras clasificaciones, se establecieron en función de la composición y espesores de los estratos. Así en general se distinguen tres tipos de suelo: *suelo duro o roca*, *suelo intermedio* y *suelo blando*. Por ejemplo en Seed et al. (1976) se establece la clasificación:

- *Roca* -caracterizada por una velocidad de cizalla superior a 750 m/s.
- *Suelo medio* -compuesto por arcilla, arena o lava, de espesor aproximado de 45 m, yaciendo sobre roca similar a la anterior.

---

<sup>1</sup> Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Apto. Postal 70-472, Coyoacán, 04510 México, D.F. México, jles@pumas.iingen.unam.mx

- *Depósito cohesional profundo* -de al menos 75 m de espesor sobre roca.

Este tipo de clasificaciones se siguen usando a veces por motivos de falta de información más detallada que permita una clasificación más fina, o bien, porque la escala del problema no requiere un conocimiento más detallado.

La relación sistemática entre amplificación local y geología subyacente queda reflejada en la clasificación reseñada en el trabajo y establecida por Philips y Aki (1986) que consiste en cuatro tipos de suelos: *granítico, formaciones mesozoicas, sedimentos en zonas de fallas y fuera de ellas*.

Cuanto más fina sea la clasificación, más se podrá ahondar en el conocimiento del efecto de emplazamiento. Por ejemplo en el trabajo de Su et al. (1992) donde se analiza el efecto local a través del estudio de la coda de sismos pequeños, registrados por una red sísmica localizada en la región central de California, se establece una clasificación más detallada que la anterior debido a un mejor conocimiento de la geología del emplazamiento. En este trabajo se señala, de nuevo, la relación inversa entre amplificación local y edad geológica, que se ve afectada por el contenido frecuencial; en las condiciones en las que se desarrolla el trabajo se infiere que la razón de decrecimiento de la amplificación con el aumento de la edad geológica, en las frecuencias bajas es más rápida que en las altas (el análisis se realiza entre 1.5 y 12 Hz).

Sin embargo, en una misma unidad geológica se pueden observar variaciones en el efecto de emplazamiento. El comportamiento de distintos tipos de suelo no puede caracterizarse sólo por su composición o los espesores de los estratos. Se requieren otros parámetros de tipo geotécnico y geofísico, asociados a éstos, que nos permitan conocer mejor el problema, como son: la velocidad de las ondas de compresión y de cizalla, el módulo de rigidez o de elasticidad transversal, el coeficiente de Poisson, la densidad, el amortiguamiento del medio, etc. El conocimiento de estos nuevos parámetros permite establecer nuevas clasificaciones sobre la base de ellos.

La clasificación publicada en el estudio de Borchardt (1994) es un buen ejemplo. En el trabajo propone un método empírico, estructurado en cuatro fases, para la estimación del espectro de respuesta en función del emplazamiento. La segunda de estas fases consiste en la caracterización de las condiciones locales del emplazamiento en función de las propiedades físicas del material, espesor mínimo de los estratos, y, la velocidad media de las ondas de cizalla. Esta última definida como:

$$v = 30 \text{ m/tiempo de llegada (seg) de la onda S a una profundidad de 30 m.}$$

La clasificación propuesta se describe en la Tabla 1. Para la realización de dicha tabla se ha recopilado la información existente en mapas o en perfiles locales en distintos emplazamientos, de las propiedades de los materiales más superficiales, la velocidad media y la amplificación del movimiento del suelo. El autor define las cuatro clases de suelo: *CS-I, CS-II, SC-III y SC-IV* compatibles con otras clasificaciones existentes.

Respecto al proceso de caracterización local se sugieren tres opciones según sea el estudio a realizar o la información conocida. La primera se basa en el conocimiento de las propiedades físicas de los materiales más superficiales. Se asigna una clase determinada en función de esas propiedades según se describe en la tabla 1. Con éste tipo de caracterización se puede sobrestimar la amplificación ya que, como es sabido, ésta en general disminuye con la profundidad.

Aumentando la información del emplazamiento obtendremos clasificaciones más detalladas, como es el caso de la segunda opción de caracterización que se propone. A partir del conocimiento de las propiedades físicas, espesores de las capas, y algún otro parámetro geotécnico más, se establecen clasificaciones en función de la información de las velocidades medias medidas en otros perfiles conocidos con materiales similares y profundidades comparables. La tercera técnica consiste en la medición de la velocidad media en el emplazamiento. Esta opción permite estimar la amplificación con menor incertidumbre.

**Tabla 1 Clasificación del suelo propuesta por Borchardt (1994)**

TIPO DE SUELO		CRITERIO DE CLASIFICACIÓN							
Nombre	Descripción General	Velocidad media de cizalla						Espesor	
		Mínima ft/s	m/s	Promedio ft/s	m/s	Máxima ft/s	m/s	Mínimo ft	m
SC-I	ROCA FIRME Y DURA								
SC-Ia	A	Roca dura (ej. Roca metamórfica con fracturas extendidas)	4600	1400	5200	1320			
SC-Ib	... B	Roca firme y dura (ej. Granito, roca ígnea, conglomerados, arenisca y esquistos con fracturas cercanas y más espaciadas entre sí)	2300	700	3500	1050	4600	1400	
SC-II	B	SUELOS PEDREGOSOS Y ROCA DE BLANDA A DURA Roca blanda sedimentaria ígnea, areniscas y esquistos, gravilla, suelos con > 20% gravilla	1230	375	1800	540	2300	700	20 6
SC-III	C	ARCILLAS CONSISTENTES Y SUELOS ARENOSOS (ej. Arenas de consistencia suave a densa, Margas y arcilla arenosa, y arcilla de consistencia suave a dura, y arcillas sedimentarias (N > 50 golpes/ft)	660	200	950	290	1230	375	20 6
SC-IV	D	SUELOS BLANDOS	330	100	500	150	660	200	
SC-IVa	D1	SUELOS BLANDOS NO ESTUDIADOS ESPECÍFICAMENTE (relleno suelto sumergido, arcillas muy blandas (N<1 golpes/ft) y arcillas sedimentarias de espesor < 37 m)							10 3
SC-IVb	E	SUELOS BLANDOS ESPECÍFICAMENTE ESTUDIADOS (suelos bajo licuefacción, arcillas altamente orgánicas, arcillas de un grado alto de plasticidad y suelos blandos con mas de 37 m)							10 3

Cuanto mayor sea el conocimiento cuantitativo de parámetros característicos del suelo, más se ajustará el modelo de suelo a la realidad. En esta línea cada vez son más los métodos geotécnicos, geofísicos y de laboratorio desarrollados con estos fines. Una primera clasificación de estos ensayos de obtención de parámetros dinámicos, es:

- *Ensayos de campo* entre los que destacan:

\* Las técnicas geofísicas de refracción y reflexión sísmica, y la inversión de las ondas superficiales (SASW, MASW, FK, CAPON, MUSIC, SPAC, REMI, etc).

\* Los métodos directos de Down-Hole (DH), Cross-Hole (CH), el cono sísmico de penetración, etc.

\* Los métodos indirectos de ensayo de penetración estándar (SPT), ensayo de cono de penetración (CPT), etc.

- *Ensayos de laboratorio* como son la columna resonante, de torsión, el triaxial cíclico, etc.

## Cuantificación del efecto de sitio de la geología superficial

En la extensa literatura desarrollada sobre el efecto de emplazamiento debido a la geología superficial, existen distintos enfoques de los análisis, en función de los aspectos del movimiento del suelo. Este apartado se centra fundamentalmente en la presentación de aquellos resultados que estén relacionados de forma más directa con la obtención de funciones de transferencia para distintos tipos de suelo. Estas estimaciones pueden realizarse de forma empírica (aproximación instrumental: *método estándar de las razones espectrales -SSR-* y *método de las razones espectrales -H/V*, HVSR (sismos), HVNR (microtremores)) o numérica (aproximación teórica) basados en una caracterización geológica y geométrica de la capa más superficial. Se persigue obtener unos rangos de frecuencia donde se produzca la máxima amplificación o reamplificación, localizando así la denominada frecuencia predominante del suelo. De esta forma, también se establecen rangos de amplificación del movimiento del suelo, para las distintas amplitudes espectrales (de Fourier o de respuesta).

Los trabajos de Lermo y Chávez-García (1993, 1994 a,b), Atakan y Torres (1997), Ligorria y Atakan (1997), Atakan (1997) son una muestra de estudio empírico de la respuesta local. En ellos, los autores presentan los resultados obtenidos sobre la cuantificación de la frecuencia predominante y la amplificación en distintos emplazamientos, dada la incidencia de movimientos débiles y fuertes, para regiones todas ellas localizadas en México y América Central. Algunas observaciones de tipo general recogidas en estos trabajos, corroboran conclusiones de otros autores (Hartzell (1992), Beresnev et al. (1995), Bard (1995, 1996). Entre ellas cabe destacar:

- Las amplificaciones espectrales dependen de la frecuencia. En el caso de cuenca sedimentaria la frecuencia predominante esta muy relacionada con la geometría de la misma y con las características de sus depósitos.
- El comportamiento no lineal de las razones espectrales en sedimentos, se puede observar, bien mediante la comparación de las amplificaciones espectrales de sismo de diferentes tamaños, o bien, a través de la respuesta del emplazamiento dependiente de la frecuencia y de las características de los sedimentos. En altas frecuencias, se ha observado que normalmente se producen deamplificaciones.
- Salvo en condiciones especiales, en promedio los factores de amplificación espectral no exceden un factor de 10 veces.
- En cualquier diseño sísmico en la región, es aconsejable considerar un factor mínimo de amplificación de dos a tres veces.
- Las frecuencias predominantes varían en los distintos emplazamientos, dependiendo del tipo de suelo. Sin embargo, la mayoría de la amplificación ocurre en una banda de frecuencias de 1 a 10 Hz.

Por tanto, a pesar de los muchos esfuerzos que se han dedicado al estudio de las características del movimiento del suelo debido a la geología local, existen muchos temas sin resolver, como pueden ser: la extrapolación de los resultados a otros emplazamientos, la fiabilidad de las estimaciones realizadas con algunas técnicas, la aplicabilidad de modelos unidimensionales de propagación de ondas, o por el contrario la necesidad de utilizar modelos bidimensionales o de grado superior, etc.

## CARACTERIZACIÓN LOCAL DEL SUELO EN ESTADOS UNIDOS Y EUROPA

**Código Internacional (NEHRP)**, de acuerdo a este código los suelos se clasifican en seis grupos diferentes dependiendo del valor de la velocidad de ondas de corte a 30 metros de profundidad. El valor promedio de las ondas de corte se calcula según la siguiente expresión, (Boore, 2004).

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

Donde:  $d_i$  y  $V_{si}$  denotan el espesor (m) y la velocidad de ondas de corte (m/s) de la  $i$ -th formación o capa, de un total de  $n$ , arriba de los 30 metros.

**Tabla 2 Clasificación del tipo de suelo de acuerdo a las características mecánicas principales de las capas superficiales según el NEHRP**

TIPO DE SUELO	DESCRIPCION DEL SUELO	$V_{S30}$ (m/s)
A	Roca dura	>1500
B	Roca	760 – 1500
C	Suelo muy denso	360 – 760
D	Suelos arenosos	180 – 360
E	Suelos blandos	<180
F	Suelos especiales	-

**Código internacional European Eurocode 8 (EC-8, 2004)**, de acuerdo a este código los suelos se clasifican en seis grupos diferentes dependiendo del valor de la velocidad de ondas de corte a 30 metros de profundidad.

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

Donde:  $d_i$  y  $V_{si}$  denotan el espesor (m) y la velocidad de ondas de corte (m/s) de la  $i$ -th formación o capa, de un total de  $n$ , arriba de los 30 metros.

**Tabla 3 Clasificación del tipo de suelo de acuerdo a las características mecánicas principales de las capas superficiales según al Eurocode 8**

TIPO DE SUELO	DESCRIPCION DEL SUELO	$V_{S30}$ (m/s)
A	Roca u otra formación geológica semejante, incluyendo hasta 5 m de material blando.	>800
B	Depósitos de suelos muy densos	360 – 800
C	Depósitos de Suelos densos	180 – 360
D	Depósitos de Suelos blandos	<180
S1	Depósitos de suelos con arcillas tipo zona del lago de la cuenca de México	<100
S2	Depósitos de suelos licuables	-

## CARACTERIZACIÓN LOCAL DEL SUELO EN MÉXICO

Siguiendo con esta misma tónica, en México también se han establecido recomendaciones para la clasificación de los suelos, como es el caso del Manual de Diseño de Obras Civiles, desarrollada por la Comisión Federal de Electricidad (1993), en su Sección C, Tema 1, Capítulo3: Diseño por sismo; presenta una sección relacionada a la clasificación de suelos según su estratigrafía (sección 3.1.2 de dicho manual), el cual se describe a continuación.

### Clasificación de Suelos según su Estratigrafía

Atendiendo a la respuesta del sitio ante excitación sísmica se adopta una clasificación del terreno de cimentación según su estratigrafía, que es función del periodo dominante de vibración y de la velocidad efectiva de propagación del sitio. Así, para clasificar un terreno se procederá como sigue:

1. Se localizará el nivel de terreno firme bajo el cual todos los estratos posean velocidades de propagación  $\beta_o \geq 700$  m/s o módulos de rigidez  $G_o \geq 85000$  t/m<sup>2</sup>.
2. Para los estratos comprendidos entre el nivel de terreno firme y la superficie, se calcularán el periodo fundamental de vibrar  $T_s$  y la velocidad efectiva de propagación  $\beta_s$  del sitio.
3. Se determinarán la velocidad característica  $\beta_c$  y el periodo característico  $T_c$ , dependiendo de la zona sísmica en que se ubica el sitio en cuestión según la regionalización sísmica del país; los valores de estos parámetros característicos se consignan en la Tabla 4.

**Tabla 4 Valores de  $\beta_c$  y  $T_c$**

Zona sísmica	$\beta_c$ (m/s)	$T_c$ (s)
A	400	5.3
B	400	5.3
C	500	4.7
D	500	2.5

Una vez conocidos los parámetros dinámicos del sitio,  $\beta_s$  y  $T_s$ , así como los parámetros característicos de la zona sísmica,  $\beta_c$  y  $T_c$ , se aplicará la carta de microzonificación sísmica que se presenta en la Figura 1, según la cual el terreno de cimentación se clasifica en:

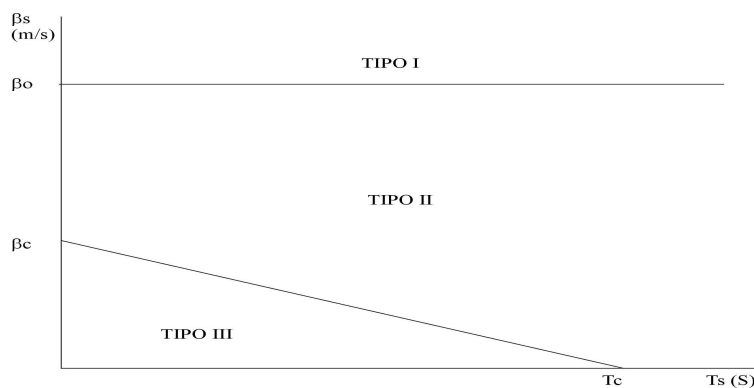
**TIPO I** *Terreno firme:* Depósitos de suelo formados solamente por estratos con velocidades de propagación  $\beta_o \geq 700$  m/s o módulos de rigidez  $G_o \geq 85000$  t/m<sup>2</sup>.

**TIPO II** *Terreno intermedio:* Depósitos de suelo con periodo fundamental de vibración y velocidad efectiva de propagación tales que se cumple la relación.

$$\beta_c T_s + \beta_s T_c \geq \beta_c T_c$$

**TIPO III** *Terreno blando:* Depósitos de suelo con periodo fundamental de vibración y velocidad efectiva de propagación tales que se cumple la relación.

$$\beta_c T_s + \beta_s T_c < \beta_c T_c$$

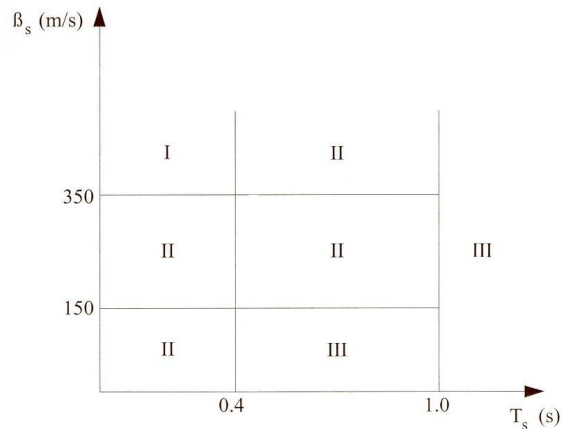


**Figura 1 Carta de microzonificación sísmica**

Hasta la fecha, solamente las ciudades de México y Acapulco presentan Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS) autorizadas, contando a su vez con mapas de zonificación con fines de diseño sísmico basados en Periodos dominantes ( $T_0$ ) obtenidos a partir de estudios de sismos y microtremores (Lermo y Chávez, 1994b; Gutiérrez et al., 1989). En la primer ciudad el mapa fue dividido en seis zonas, ya que la tercera zona fue subdividida en cuatro subzonas (zona IIIa comprendida entre 1 y 2 s; zona IIIb comprendida entre 2 y 3 s; zona IIIc comprendida entre 3 y 4 s; y zona IIId con periodos dominantes mayores a los 4 s), mientras que la segunda ciudad fue dividida en tres zonas (zona I con periodos menores a 0.2 s; zona II con periodos entre 0.2 a 0.6 s; y zona III con periodos entre 0.6 a 1.4 s). Sin embargo, existen varias propuestas de NTCDS en el país, como son el caso para las ciudades de Puebla y Veracruz, los cuales presentan una clasificación de tipos de suelo no adecuadas como se verán mas adelante. Aun mas, hay ciudades capitales que presentan estudios detallados de mapas de microzonificación sísmica listas para obtener sus correspondientes coeficientes sísmicos, como son los casos de las ciudades de Oaxaca (Lermo y Chávez, 1995), Tlaxcala (Bernal y Lermo, 2005), Veracruz (Williams et al., 2007), etc.

En las siguientes dos tablas 5 y 6, se pueden observar la clasificación de los terrenos de cimentación propuestas para la ciudades de Puebla y Veracruz, donde muestran una deficiente variación de los valores promedios de la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ). Por ejemplo en la Tabla 5, faltarían dos rangos de suelos, los que su valor de  $V_s$  estaría entre 350 a 700 m/s (si tomamos en cuenta la tabla 1) y los mayores a 700 m/s, mientras que en la tabla 6, el tipo de Suelo II presenta un rango también muy amplio, como se demostrara en el trabajo de Williams et al., 2007 (este congreso), los suelos en la ciudad del Puerto de Veracruz presentan valores de  $V_s$  entre 180 y 360 m/s y entre 360 y 750 m/s.

**Tabla 5 Clasificación de los terrenos de cimentación (RCMP), Propuesta para la ciudad de Puebla por Aviles et al (1999)**



Terreno tipo I:  $T_s < 0.4 \text{ s}$  y  $\beta_s > 350 \text{ m/s}$

Terreno tipo II:  $T_s < 0.4 \text{ s}$  y  $\beta_s \leq 350 \text{ m/s}$   
 $0.4 \leq T_s \leq 1.0 \text{ s}$  y  $\beta_s \geq 150 \text{ m/s}$

Terreno tipo III:  $T_s > 1.0 \text{ s}$   
 $0.4 \leq T_s \leq 1.0 \text{ s}$  y  $\beta_s < 150 \text{ m/s}$

**Tabla 6 Clasificación de los terrenos de cimentación (RCMP), Propuesta para Veracruz-Boca del Río (2005)**

PROPUESTA DEL REGLAMENTO DE VERACRUZ (RE-VER)				
Tipo de Suelo	Descripción	Valores Medios (efectivos) Profundidad de exploración del subsuelo $\geq 30\text{m}$		
		Velocidad de ondas de cortante $V_s$ (m/seg)	Número de golpes de la prueba de penetración estándar $N_s$	Contenidos de Agua %
Tipo I	Rocas	$> 700$	$> 50$	-
Tipo II	Suelos Firmes	$180 \leq V_s \leq 750$	$15 \leq N_s \leq 50$	-
Tipo III	Suelos Blandos Firmes	$< 180$	$< 15$	$> 40$

## METODOLOGÍA

### 1ro. BUSCAR MAPAS DE MICROZONIFICACIÓN QUE PRESENTEN VALORES DE PERIODOS DOMINANTES Y AMPLIFICACION RELATIVA O MAPAS CON LA ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA EN ZONAS URBANAS DE MÉXICO.

Para iniciar este tipo de estudios se tiene que buscar información previa sobre de estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos de la ciudad a trabajar, con el objeto de optimizar el tiempo y recursos. Unos ejemplos se dieron en el inciso anterior de ciudades con estudios de microzonificación sísmica, así como también en la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Tomo II, Guanajuato, Nov. 1976, se presenta información acerca del subsuelo en 17 ciudades de México.

En nuestro caso utilizaremos un estudio realizado por Lermo et al., 2006 en el Centro Histórico de Puebla, que utiliza precisamente esta metodología.

En la parte superior de la Figura 2 se muestra el plano geotécnico de la ciudad de Puebla (Azomoza et al., 1998). En la misma figura, se muestran cuatro tipos de suelo: depósitos hidrotermales o de travertinos (Auvinet, 1976); depósitos eólicos de origen volcánico; depósitos de tobas basálticas; y depósitos aluviales. Probablemente este último depósito se encuentre a lo largo del río San Francisco. En la parte inferior de la Figura 2 hemos resaltado el Centro Histórico a fin de mostrar nuestra área de estudio constituida de aproximadamente 230 manzanas alrededor de la Plaza de Armas. También se muestra la zonificación del travertino realizada por Auvinet (1976) y Azomoza et al., 1998, así como la zonificación para la zona aluvial.

### 2do. REALIZAR CAMPAÑAS DE REGISTROS DE MICROTREMORES PARA OBTENER LAS FORMAS ESPECTRALES CON LA TÉCNICA DE NAKAMURA (HVNR).

Continuando con nuestro ejemplo, en la figura 3 se muestran la ubicación de 261 puntos (círculos oscuros) donde se han registrado microtremores; además, con líneas continuas se han trazado la ubicación de tres perfiles geotécnicos, con cuadrados y rombos oscuros la ubicación de los sondeos down-hole y la sonda suspendida, mientras que con triángulos dos sitios donde se han registrado sismos.

El sistema de adquisición de datos consistió en tres acelerómetros marca Kinematics modelo FBA23 conectados a un registrador digital marca Kinematics modelo Altus. El componente Norte-Sur del movimiento se asignó a las calles cuyo eje corresponde aproximadamente al Norte-Sur geográfico, y



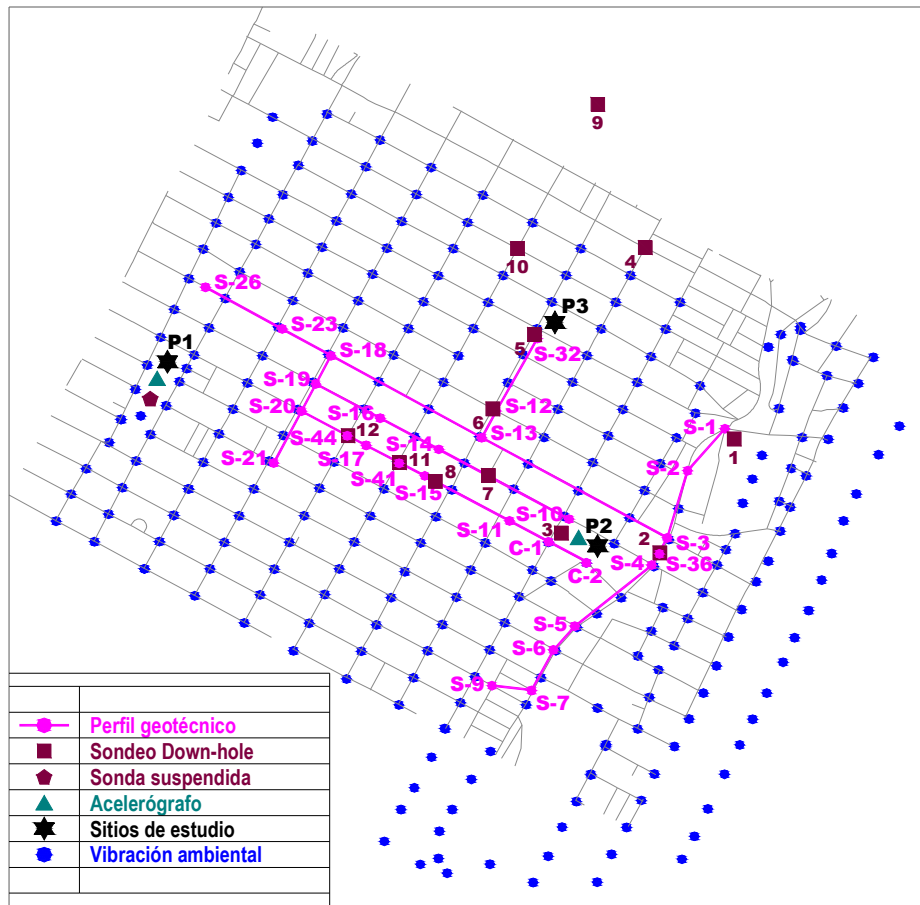


Figura 3 Zona de estudios, mostrando con círculos pequeños los puntos donde se realizó el registro de microtemores, con líneas delgadas se muestra los perfiles geotécnicos, con cuadros los sondeos down-hole, con triángulos las estaciones sismológicas y con estrella los tres sitios analizados a detalle

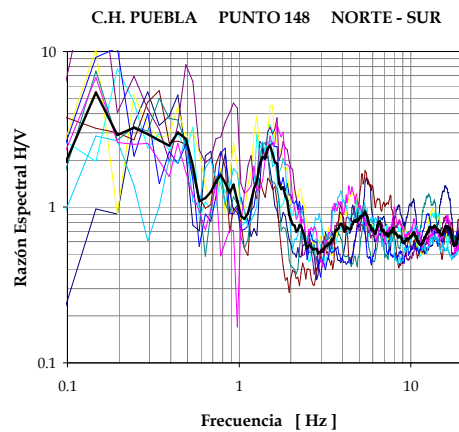
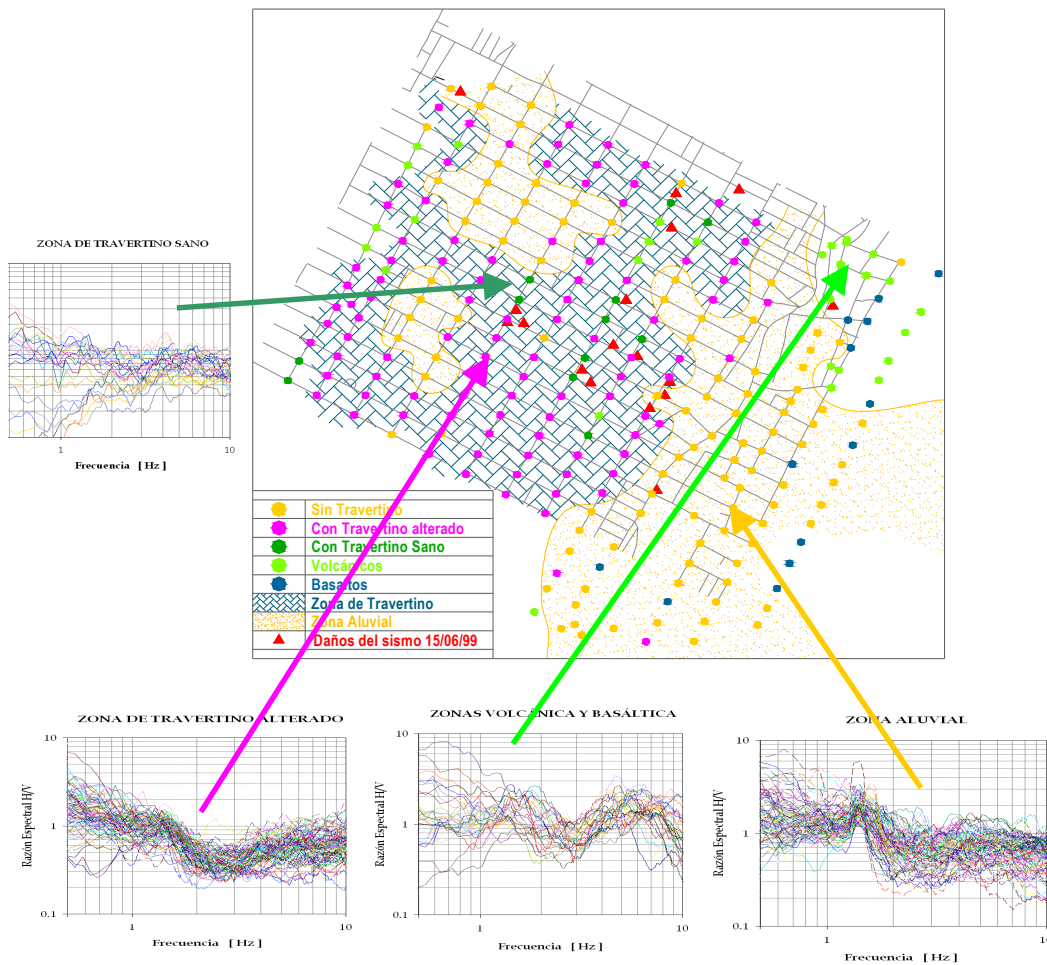


Figura 4 Ejemplo de FTEP para el punto 148. Líneas delgadas, cocientes espectrales; línea negra gruesa, promedio

### 3ra. OBTENER FAMILIAS CON LAS FORMAS ESPECTRALES DE LA TÉCNICA DE NAKAMURA (HVNR) O FTEP Y ENCONTRAR LAS MICROZONAS

Las FTEP se agruparon en cuatro grupos de acuerdo con su forma espectral, como se muestra en la parte derecha y baja de la Figura 5, donde se han graficado con líneas continuas las FTEP según la familia que le correspondía. Por ejemplo para la zona denominada como ALUVIAL, se agruparon solamente los promedios que presentan como característica común un máximo espectral alrededor de la frecuencia de 1.5 Hz; mientras que para la ZONA DE TRAVERTINO SANO, los promedios de las FTEP no muestran ningún máximo espectral notorio, sino en algunos casos, un decaimiento de la energía hacia bajas frecuencias. Otras FTEP se agruparon como ZONA DE TRAVERTINO ALTERADO, porque presentan sus máximos espectrales en frecuencias menores a 1 hz, muy diferentes a los otros dos grupos. Por último, la cuarta zona se agrupó como ZONAS VOLCÁNICAS Y BASÁLTICAS, pues sus FTEP presentan un máximo espectral alrededor de los 5 Hz, también muy diferente a los otros tres, ya que estos máximos presentan una amplificación relativa alrededor de las dos veces.

Por último, el mapa de la Figura 5, nos muestra en forma espacial la distribución de estas familias, denotadas con un color café claro para las zonas aluvial; morada para la zona de travertino alterado; verde oscuro para la zona de travertino sano y los colores verde claro y azul se juntaron en una zona denominada como zona volcánica y basáltica.



**Figura 5 Mapa de la zona de estudio con la distribución espacial de las microzonas, cada punto de medición ahora representa el color de una de las cuatro familias seleccionada.**

#### 4TO. OBTENER EL PARÁMETRO $VS_{30}$ EN UN SITIO DE CADA UNA DE LAS MICROZONAS.

Para esto se requiere de cuatro pasos:

1. Obtener un **MODELO SISMICO PRELIMINAR** utilizando estudios geofísicos y geotécnicos realizados en la estación sismológica o cerca de ella.
  - Estudios geotécnicos: sondeos SPT, cono eléctrico.
  - Estudios geofísicos: refracción sísmica, down hole, Spac, Remi, etc.
2. Obtener la **AMPLIFICACION RELATIVA REAL** de la microzona. Para esto se debe seleccionar en la microzona una estación sismológica (permanente o temporal), para poder registrar sismos (débiles o moderados), con el objeto de aplicar la técnica estándar (SSR) o HVSR.
3. Obtener una **FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA TEÓRICA** (Método de Haskell) con los dos pasos anteriores, el cual se ajustará a la forma espectral de cada una de las microzonas y a la amplificación relativa obtenida con los registros de sismos.
4. Obtener el **PARÁMETRO  $VS_{30}$**  del nuevo modelo sísmico obtenido del ajuste con los datos observados.

Para nuestro caso, los modelos sísmicos preliminares fueron detallados utilizando los cuatro perfiles geotécnicos y los 12 sondeos down hole realizados dentro de la zona de estudio, como se muestra en la Figura 3. En primer lugar se trato de observar la variaciones de los sedimentos mostrados en los perfiles, por ejemplo comparando el perfil norte-sur (S-1 a S-9) con el perfil este-oeste (S-20 a C-2) mostrados en las Figuras 6 y 7, se puede identificar que en el primer perfil no se tiene la presencia de los depósitos de travertino, ya sea sano o alterado (carsificado) o con intercalaciones de arenas limosas; sino, una capa formada de arena limosa con presencia de grava o gravilla y que a medida tiende a crecer su espesor hacia el sur, se presenta con limos y arcillas.

Otra forma de encontrar las variaciones laterales de los estratos presentes en la zona de estudio, y poderlos identificar para realizar los modelos sísmicos, es utilizando los sondeos down hole. Por ejemplo, en la Figura 8 se muestran los 12 sondeos juntos con el objeto de observar su distribución en profundidad. Como podemos ver hay cinco sondeos que presentan valore mayores a los 600 m/s, lo que nos muestra suelos firmes dentro de la zona de estudio (sondeos down hole #ros 8, 12, 3s1, 3s2 y 5), los demás con valores menores a los 400 m/s se pueden clasificar como suelos blandos.

Regresando a la metodología, para obtener los cuatro modelos sísmicos preliminares, primero ubicaremos los lugares donde se tienen estaciones sismológica temporal o permanente, que presenten estimaciones del efecto de sitio con alguna de las dos técnicas ya documentadas (SSR o HVSR) y que caigan dentro de alguna familia ya analizadas. Por ejemplo, se seleccionó el punto P2 para la zona Aluvial, el punto P1 para la zona de travertino alterado, y el punto P3 para la zona volcánica y basáltica.

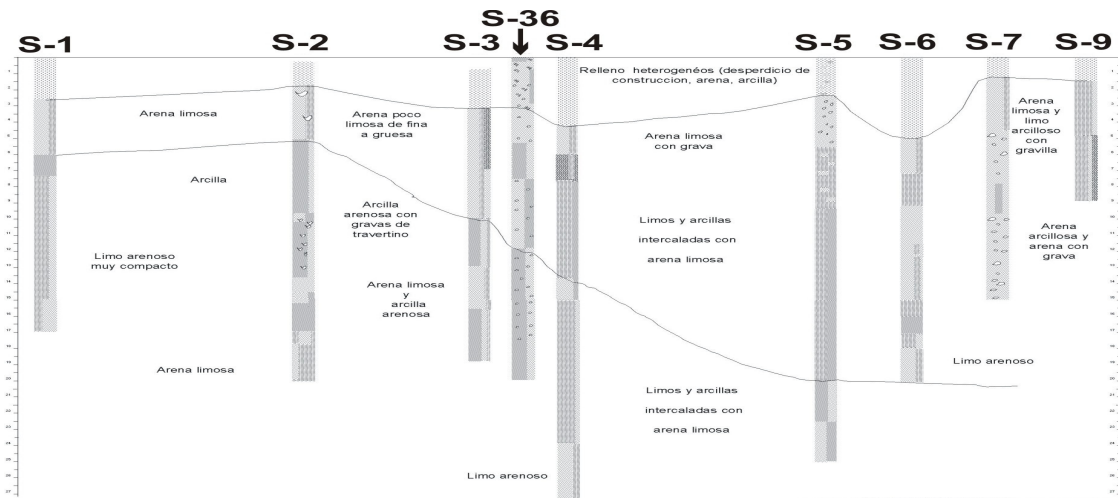
A continuación describiremos el modelo desarrollado para la **ZONA ALUVIAL**, donde se seleccionó el punto P2, donde no hay la presencia de travertino, como se puede constatar en el sondeo C2 o en el perfil S-1 a S-9 (figuras 3 y 6). Al analizar la ubicación de las FTEP de este grupo, destaca el hecho de que la mayoría fueron registrados a lo largo de este perfil, más aún, este perfil se trazó a lo largo del Boulevard 5 de Mayo, donde se encuentra entubado el Río San Francisco. Así pues, los puntos que presentan esta forma espectral indican dos características: la no presencia del travertino y el probable cause del Río San Francisco (ver Figura 5).

Por otro lado, en la Figura 9 se muestra el modelo sísmico que se desarrollo para esta zona, utilizando dos sondeos down-hole realizados en el punto P2 (ICD y II-UNAM), así como la SSR obtenida con registros de sismos (línea mediana, Chávez-García et al., 1994), y una función de transferencia teórica (FTT) del movimiento en superficie, para el caso de incidencia vertical de ondas S polarizadas horizontalmente (SH).

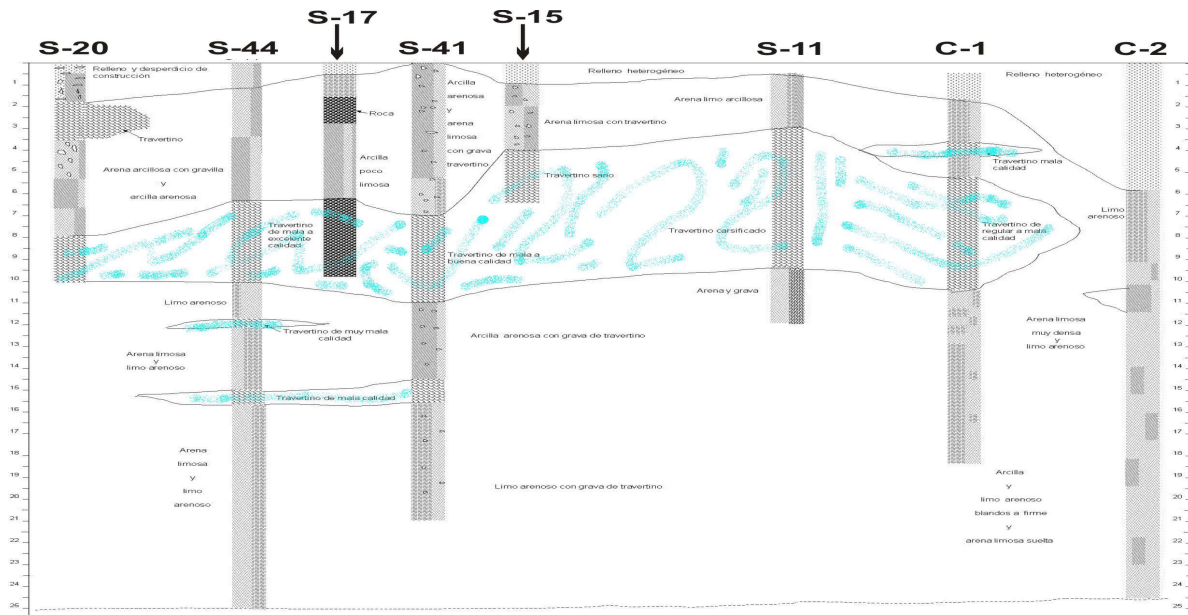
Los valores de densidad de masa y amortiguamientos de los estratos fueron estimados por Ovando-Shelley et al., 2001). Obteniendo de esta manera la FTT que por un lado envuelve a la familia de FTEP de la Zona Aluvial y por otra, alcanza los valores de amplificación relativa observada por la función empírica utilizando sismos (SSR), como se muestra en la Figura 9.

Finalmente, a partir del modelo final hallado, podemos calcular el parámetro  $VS_{30}$  que para esta zona presenta un valor de:

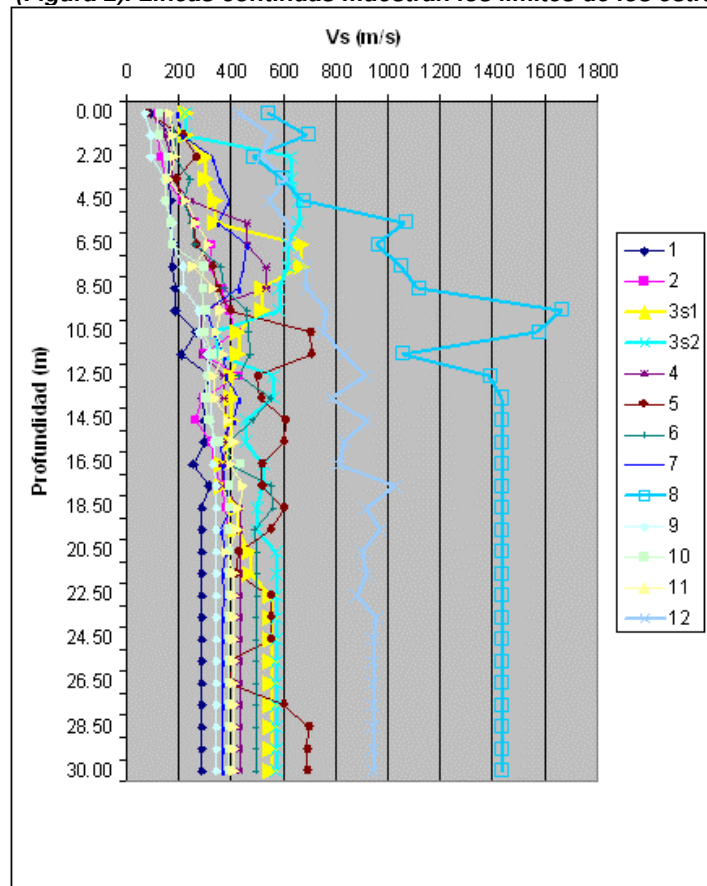
$$VS_{30} = 224 \text{ m/s}$$



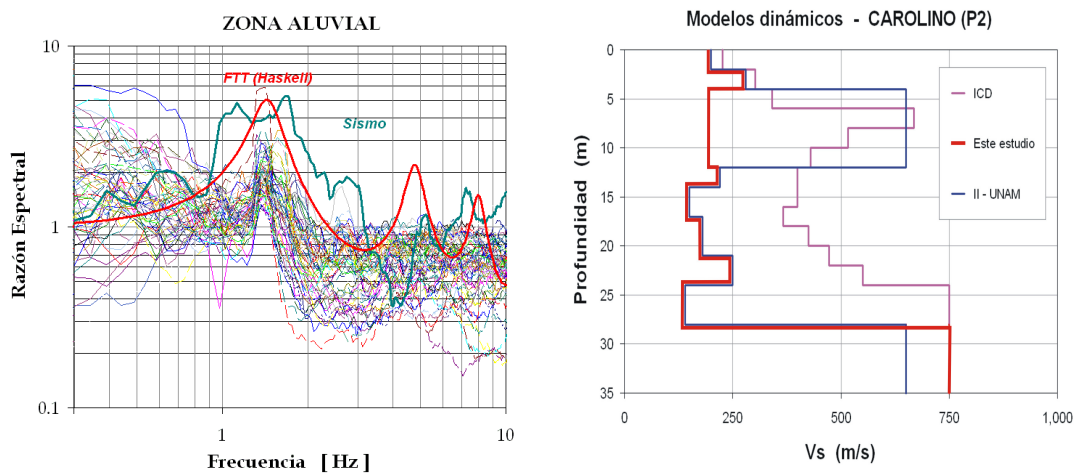
**Figura 6 Perfil geotécnico compuesto por 9 sondeos, ubicados a lo largo del Boulevard H 5 de Mayo (Figura 2). Líneas continuas muestran los límites de los estratos**



**Figura 7 Perfil geotécnico compuesto por 8 sondeos, ubicados a lo largo de la calle 3 Poniente (Figura 2). Líneas continuas muestran los límites de los estratos**

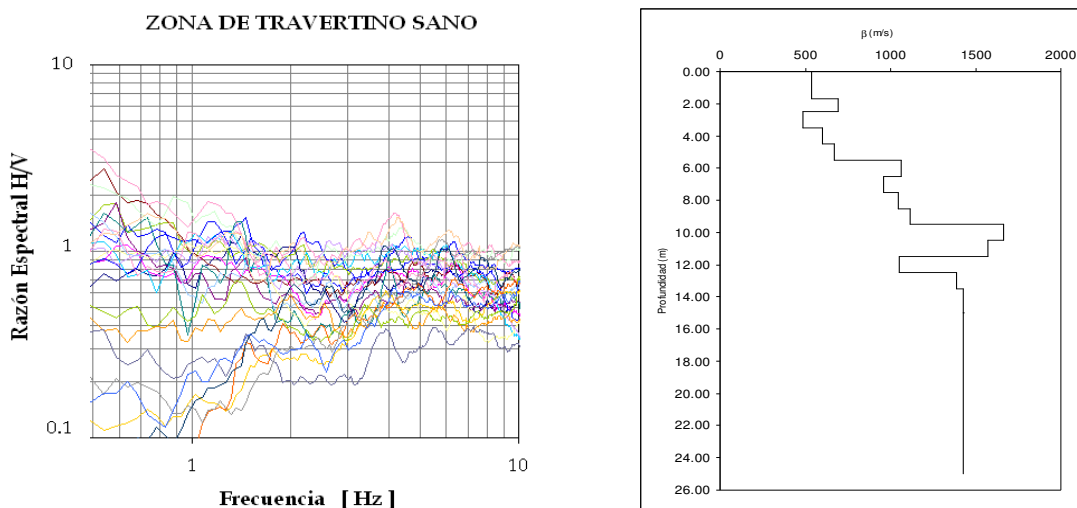


**Figura 8 Distribución en profundidad de los doce perfiles de sondeos down hole ubicados con un símbolo cuadrado dentro de la zona de estudio.**



**Figura 9 Parte derecha, gráfica con los promedios de la FTEP para la Zona Aluvial (líneas delgadas); línea mediana, FTE obtenida con el registro del un sismo; línea gruesa, FTT utilizando el perfil de velocidades ajustado del P2. Parte izquierda, Perfiles de velocidades de ondas S estimadas por el ICD, II-UNAM y este estudio para el punto P2**

Para la **ZONA DE TRAVERTINO SANO**, se toman las FTEP de los registros obtenidos cerca de los sondeos S17, S41 y S15 del perfil S-20 a C-2 (Figuras 3 y 7). Cerca de estos sondeos se realizó el down-hole # 8, ubicada en la calle 3 Poniente 141 (Edificio del Congreso del Estado de Puebla) desarrollado por la compañía ICD. El perfil de velocidades de la Figura 10 (parte derecha) muestra valores de ondas S mayores a los 500 m/s, lo que indica la presencia de un estrato de travertino muy superficial y de buena calidad que se incrementa con la profundidad, ya que la velocidad también aumenta. Por otro lado, de acuerdo con la descripción geológica del sondeo, por debajo del travertino (que llegó hasta los 12 m de profundidad), existen arcillas arenosas, cuyas velocidades son mayores a los 1000 m/s hasta profundidades mayores a los 26 m. Estos datos confirman que las FTEP observadas también en la figura 10 (parte izquierda), presenten una forma espectral plana alrededor de la unidad, es decir sin efecto de sitio. Si ahora utilizamos el perfil representativo de esta zona para obtener una estimación del parámetro VS30, nos da un valor de **1028 m/s**.



**Figura 10** Parte derecha, gráfica con los promedios de la FTEP para la Zona de Travertino Sano (líneas delgadas). Parte izquierda, Perfil de velocidades de ondas S representativo de esta zona

Ahora, para encontrar el modelo sísmico de la **ZONA DE TRAVERTINO ALTERADO**, tomamos los sondeos down hole desarrollados por el CENAPRED y la Cia. ICD en el punto P1 (figura 3), y proponemos uno mejorado, como se muestra en la parte derecha de la Figura 11. De estos perfiles se observa que el travertino presenta espesores mucho menores que el caso anterior. Además, el estrato que se encuentra por debajo del travertino, presenta valores de velocidad menores a los 200 m/s, lo que contribuye a que las formas espectrales para este grupo presente sus máximos espectrales hacia frecuencias menores a 1 Hz (parte izquierda de la Figura 11).

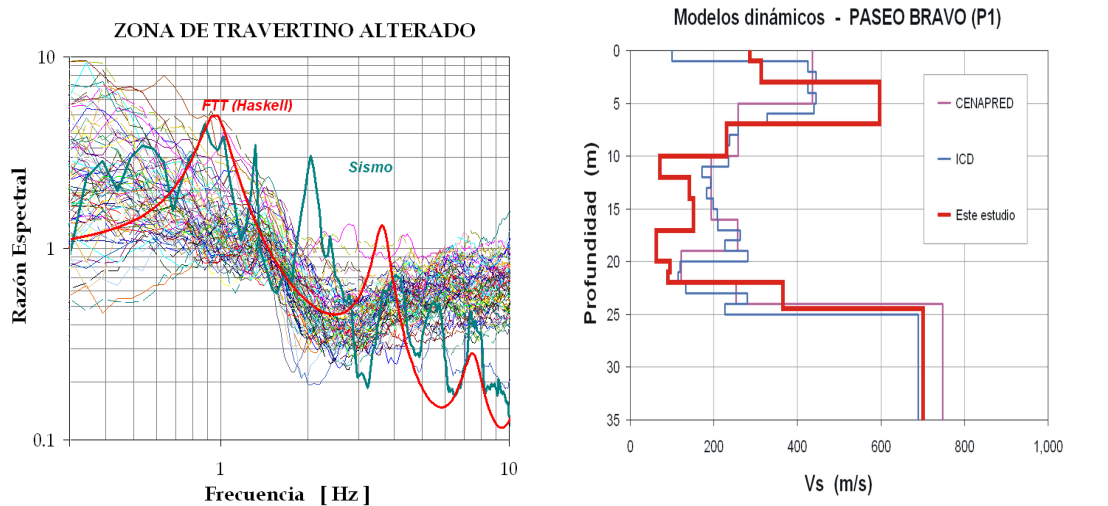
Por lo tanto, en la parte izquierda de la Figura 11 también se ha graficado la FTE del registro del sismo de Tehuacan ( $M_w=7$ , 15/06/99) obtenida con el método SSR (Lermo y Chávez-García, 1994a, b), así como la FTT, utilizando el perfil de velocidades ajustado del sitio P1. Ahora si, con este perfil mejorado podemos calcular el parámetro  $VS_{30}$  para esta zona:

$$VS_{30} = 170 \text{ m/s}$$

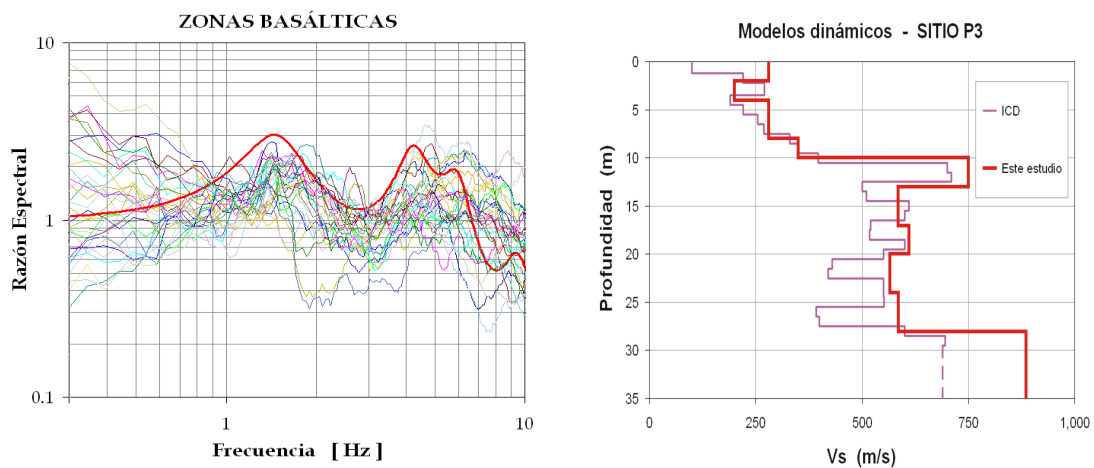
Por último, para las **ZONAS VOLCANICA Y BASALTICA**, utilizamos el análisis del sitio P3, donde se utilizó el sondeo down hole de la Cia. ICD, mostrada en la parte derecha de la Figura 12, resalta el

acortamiento de la calidad y espesor del travertino y el aumento del espesor de la segunda capa, constituido por limos arenosos y orgánicos con velocidades de ondas S alrededor de los 250 m/s. Este estrato superficial de baja velocidad y la desaparición del travertino, presentan un comportamiento dinámico de estos suelos muy diferente a los otros tres, presentando en las FTEP un máximo alrededor de los 5 Hz (parte derecha de la Figura 12). Así pues, el ajuste de la FTT para esta microzona muestra un buen ajuste a las familias de las FTEP, como se puede observar en la parte derecha de la Figura 12. Finalmente, con el modelo ajustado ya podemos calcular el parámetro  $V_{S30}$  para esta zona y presenta un valor de:

$$V_{S30} = 434 \text{ m/s}$$



**Figura 11** Parte derecha, gráfica con los promedios de la FTEP para la Zona de Travertino Alterado (líneas delgadas); línea mediana, FTE obtenida con el registro del un sismo; línea gruesa, FTT utilizando el perfil de velocidades ajustado del P1. Parte izquierda, Perfiles de velocidades de ondas S estimadas por el CENAPRED, ICD y este estudio para el punto P1



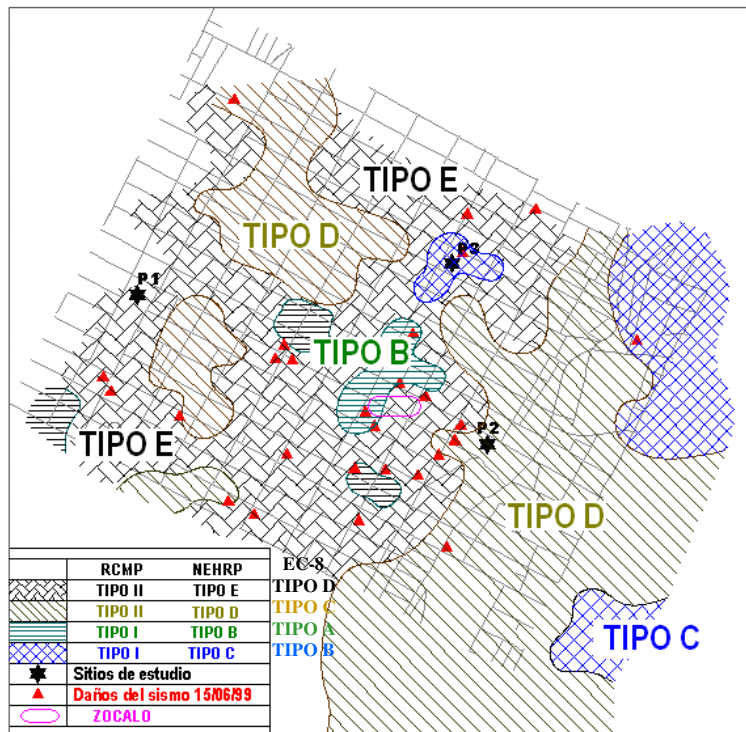
**Figura 12** Parte derecha, gráfica con los promedios de la FTEP para la Zona Volcánica y Basáltica (líneas delgadas); línea gruesa, FTT utilizando el perfil de velocidades ajustado del P3. Parte izquierda, Perfiles de velocidades de ondas S estimadas por el ICD y este estudio para el punto P3

### 5ta. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA CON LA CLASIFICACIÓN DE LOS TERRENOS DE CIMENTACIÓN PARA DISEÑO SÍSMICO EN LA ZONA URBANA, UTILIZANDO EL CÓDIGO INTERNACIONAL EC-8 Y EL CÓDIGO VIGENTE DEL ESTADO.

Por último, utilizando los valores del parámetro  $VS_{30}$  para cada uno de las cuatro zonas analizadas, podemos valorizar cada zona, utilizando los códigos de clasificación del tipo de suelo propuestos internacionalmente (NEHRP y EUROCODE 8) y local (propuesta por Aviles et al., 1999 para la ciudad de Puebla). En la Figura 13 se muestra los resultados de aplicar estos códigos para el Centro Histórico de Puebla. Donde se nota la gran diferencia si utilizamos los códigos internacionales, ya que los suelos fueron clasificados en cuatro tipos: tipo B, C, D y E (según NEHRP) y tipo A, B, C y D (según EUROCODE 8); mientras que si utilizamos el código local, solamente diferenciamos dos tipos de suelo (I y II).

Por lo tanto, una manera de zonificar dinámicamente los suelos del CHP, es utilizando las FORMA ESPECTRALES de las FTEP obtenidos con registros de vibración ambiental o microtremores. Así pues, en la Figura 13 se muestra la zonificación dinámica propuesta en este trabajo, logrando ubicar cuatro zonas de travertino sano (achuradas con líneas horizontales); cuatro zonas aluviales (achuradas con líneas oblicuas); dos zonas con depósitos basálticos hacia el este del CHP y una zona con depósitos volcánicos (achuradas con cuadrillos); y por último las zonas con travertino alterado (achuradas con rectángulos).

En este mapa de zonificación dinámica de los suelos, hemos graficado también, los sitios donde se presentaron colapsos o daños graves a estructuras coloniales y nuevas, provocadas por el sismo de Tehuacán ( $M_w=7$ , 15/06/99). Aparentemente estos sitios de daños se distribuyen en los límites de los cuatro tipos de suelos dinámicos encontrados, probablemente por los diferentes modos de vibrar de cada uno de ellos.



**Figura 13 Nueva clasificación dinámica de los suelos en el CHP, mostrando con diferentes achurados las nuevas regiones. Suelos con travertino sano, alterados, suelos aluviales y suelos de origen volcánicos y basálticos. Con triángulos, los sitios donde se presentaron daños con el temblor de Tehuacan y con estrella, los tres sitios analizados a detalle**

## CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología alternativa para la construcción de mapas que contengan la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico, utilizando las **FORMAS ESPECTRALES DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPIRICAS PROMEDIO (FTEP)** obtenidos de registros de microtemores (HVNR), que además tienen las siguientes ventajas:

1. Aún cuando se tiene el problema de la amplificación relativa, que en la mayoría de los casos subestima al real, es una herramienta sencilla de operar, bajo costo y rapidez en cuanto a resultados para obtener la frecuencia o periodo dominante de un depósito de suelo.
2. Permite distinguir diferentes zonas: firmes (sin o con poco efecto de sitio), de suelos heterogéneos y blandos.
3. Se puede utilizar como una herramienta de prospección geofísica para la clasificación de los suelos en zonas urbanas.
4. Permite estimar de una manera preliminar cuando se puede aplicar el parámetro  $VS_{30}$ .

Finalmente, se propone una nueva clasificación dinámica de los suelos para el Centro Histórico de Puebla, utilizando las formas espectrales de las FTEP registradas con microtemores, que logran explicar de manera más clara los daños de las edificaciones provocados por diferentes eventos sísmicos. También, se propone que estas FTEP, sirvan como una herramienta de prospección geofísica para la clasificación de los suelos en toda la zona urbana de la ciudad de Puebla.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto de Ingeniería de la UNAM (Proyecto # R329), a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (Facultad de Ingeniería) y a la Universidad Popular Autónoma de Puebla (Investigación, proyecto 21601-146), por el financiamiento de este trabajo. También agradecemos a los Ingenieros, José Genaro Azomoza Ponce (ICD), Raúl López Bretón (ROCCA), Alejandro Vera Alejandro (Corporativo) y Carlos Ruiz Acevedo (ICE), la información geotécnica y geofísica suministrada. Finalmente agradecemos de manera especial: Araceli Aguilar, Yimis Carmona, Irvin Osorio, Ricardo de La Rosa, y Efrén Cruz del Colegio de Geofísica (FI-BUAP); Hugo Ferrer, García-Hernández y E. Borrego-García de la UPAEP por su colaboración en la toma de datos en campo y elaboración de mapas.

## REFERENCIAS

Atakan K. (1997). "**Empirical site response studies in Central America: present status**", Proceedings of the seminar on Assessment and mitigation of seismic risk in the Central American area, September, 1997, El Salvador.

Atakan K. y Torres R. (1997). "**Local site response in San Salvador, El Salvador, based on the October 10, 1986 earthquake**", Special Issue: *Engineering Geology*.

Auvinet G. (1976). "**Zonificación de suelos de la ciudad de Puebla**", Memorias de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Guanajuato, Gto.

Avilés J., Corona G., González C., Ernesto J. (1999). "**Normas Técnica complementarias para diseño por sismo, Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla**", Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México.

- Azomoza G., Vera A. y Reyes L. (1998). **“Zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla”**, Memorias del XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Noviembre, Puebla; Pue. México.
- Beresnev .A., Wen, K., Yek, Y.T. (1995). **“Nonlinear soil amplification: its corroboration in Taiwan”**, Bull. Seism. Soc. Am., 85, 496 – 515.
- Bard P-Y. (1995). **“Effects of surface geology on ground motion: recent result and remaining issues”**, Proc. 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Vienna, Austria.  
- (1996). **“Site effects and seismic microzonation: recent advances, knowledge gaps and perspectives for application”**, &th Forum of Seismic Zonation, Ibero-Magrebian Region Conference, Barcelona, Spain.
- Bernal I., Lermo J., Tavera H (2005). **“Evaluación de los efectos de sitio por sismos en la ciudad de Tlaxcala, México”**, Boletín Sociedad Geológica del Perú, ISSN-0079-1091, editado por Sociedad Geológica del Perú, vol. 100, no. (2), 97-114.
- Borcherdt R.D. (1994). **“Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology unjustification)”**, Earthquake Spectra, 10, 617-673.
- Boore D.M. (2004). **“Estimating Vs (30) (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 30m)”**, Bull. Seism. Soc. Am., 94, 591-597.
- Chávez-García F.J, Lermo J., Cuenca J., Aguilar A., Rivera J., y Hernández H. (1994), **“Microzonificación sísmica de la zona urbana de la ciudad de Puebla”**, Instituto de Ingeniería, UNAM, realizado para CONACYT, proy. 2548, México.
- Chávez-García F.J., Cuenca J., Lermo J. y Mijares H. (1995). **“Seismic microzonation of the city of Puebla”**, Mexico, Proceedings of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.
- Gutiérrez C., Lermo J., Nava E., Singh SK., Coyoli R., Rodríguez M., Mijares H. (1989). **“Registro de temblores pequeños y medición de microtemblores en Acapulco para microzonificación de la ciudad”**, Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 1, Acapulco, México, A41-A50.
- Hartzell S.H (1992). **“Site response estimation from earthquake data”**, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 2308 - 2327.
- Haskell N.A (1962), **“Crustal reflection of plane P and SV waves”**, J. Phys. Earth., No. 67, pp. 4751-4767.
- Lachet C. and Bard PY. (1994), **“Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura’s technique”**, J. Phys. Earth., 42, 377-397.
- Lermo J. and Chávez-García FJ (1993). **“Site effect evaluation using spectral ratios with only one station”**, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1574 – 1594.
- Lermo J. and Chávez-García FJ. (1994a). **“Are microtremors useful in site response evaluation ?”**, Bull. Seism. Soc. Am. 84, 1350-1364.
- Lermo J. and Chávez-García FJ. (1994b). **“Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records”**, Soil. Dyn. & Earthq. Eng. 13, 413-423.
- Lermo J. y Chávez-García FJ. (1995). **“Efectos de sitio en la Ciudad de Oaxaca. Resultados con registros de temblores y mediciones de microtemblores”**, *Revista de Ingeniería Sísmica*, 50, 1-13.

Lermo J., Aguilar A., Ferrer H., Vega D. y Ovando E. (2006), **“Nueva clasificación dinámica de los suelos en el Centro Histórico de Puebla, México”**, XXIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 463-472.

Ligorria J.P, Atakan K. (1997). **“Empirical site response estimation in Guatemala city”**, Proceedings of the seminar on Assessment and mitigation of seismic risk in the Central American area, September, 1997, El Salvador.

Nakamura Y. (1989). **“A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface”**, QR of RTRI, 30, No.1, 25-33.

Philips W.S., Aki K. (1986). **“Site amplification of coda waves from local earthquake in Central California”**, Bull. Seism. Soc. Am. 76, 509-529.

Riquer G. Williams F., Lermo J, Torres G. y Leyva R. (2003), **“Microzonificación sísmica en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río”**, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guanajuato-León, Gto.

Ovando-Shelley, E., Ordaz M, Singh SK. and Lermo J. (Enero 2001), **“Estimation of seismic hazard to rehabilitate the temple of La Compañía en Puebla, Mexico”**, International Millennium Congress, More than two thousand year in the history of architecture.

Vega, D. y Lermo, J. (2003). **“Revisión de estudios de efectos de sitio para zonas urbanas de México”**, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guanajuato-León, Gto.

Sistema Digital de Daños (2000). **Sismo de Tehuacán, Puebla del 15 de Junio de 1999**, Disco Compacto, Colegio de Ingenieros Civiles de Puebla, A.C.

Seed H.B., Murarka, R., Lysmer, J. (1976). **“Relation ships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source and local site conditions for moderately strong earthquakes”**, Bull. Seism. Soc. Am. 66, 1323-1342.

Su, F., Aki, K., Teng, T, Zeng, Y., Koyanagi, S., Mayeda, K. (1992). **“The relation between site amplification factor and surficial geology in Central California”**, Bull. Seism. Soc. Am. 82, 580-602.

