



20mo. Aniversario CISMID
CONFERENCIA INTERNACIONAL EN INGENIERÍA SÍSMICA
20 al 22 Agosto 2007



USO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
EMPÍRICAS (HSVR) OBTENIDAS CON
MICROTREMORES PARA CONSTRUIR MAPAS CON LA
CLASIFICACIÓN DE LOS TERRENOS DE CIMENTACIÓN
PARA DISEÑO SÍSMICO EN MÉXICO

Javier Lermo y Felicita Limaymanta
Instituto de Ingeniería, UNAM

Se propone una metodología para la construcción de mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico, usando las **formas espectrales** de la técnica de Nakamura (HVSR) de registros de microtremores sobre mapas con la zonificación geológica-geotécnica.

Esta metodología utiliza además el parámetro **VS30** y el código Internacional European Eurocode 8 (EC-8), el cual será comparado con los códigos de los reglamentos de construcción de los estados de Puebla y Veracruz, México

Caracterización local del suelo

- Clasificación del suelo propuesta por Seed et al. (1976)

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

- Clasificación del suelo presentada en Ligorría y Atakan (1997)

Tipo de perfil	Descripción
S1 Terciario volcánico:	fundamentalmente compuesto por roca cristalina de origen volcánico, con una velocidad de cizalla superior a 750 m/s.
S2 Cuaternario:	un perfil con depósitos consistentes profundos de piroclastos, en su mayoría compuestos de cenizas con profundidades que superan los 60 m.
S3 Sedimentos de transición:	perfil sedimentario de 5 a 50 m de profundidad, conteniendo capas de arena con una consistencia de grado suave a intermedia, sobre depósitos de cenizas y grava gruesa, con o sin la intervención de capas de arcilla sin cohesión.
S4 Depósito aluvial cuaternario:	un perfil caracterizado por una velocidad de cizalla inferior a 150 m/s, compuesto de depósito aluvial cuaternario con espesor de más de 15 m.

- Clasificación del suelo propuesta por Borcherdt (1994)

TIPO DE SUELO		Descripción general	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN				Espesor			
			Velocidad media de cizalla				Mínimo	Máximo		
Nombre			ft/s	m/s	ft/s	m/s	ft	m		
SC-I		ROCA FIRME Y DURA								
SC-Ia	A	Roca dura (ej. roca metamórfica con fracturas muy extendidas)	4600	1400	5200	1320				
SC-Ib	B	Roca firme y dura (ej. granito, roca ígnea, conglomerados, areniscas 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	10
SC-III	C	ARCILLAS CONSISTENTES Y SUELOS ARENOSOS (ej. arenas de consistencia suave a densa, margas y arcilla arenosa, y arcillas de consistencia suave a dura, y arcillas sedimentarias (N < 50 blows/ft))	660	200	950	290	1230	375	20	5
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 blows/ft) y arcillas sedimentarias de espesor < 37 m)							19	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 más de 37 m)							10	3

CODIGO 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).

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

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	-

CODIGO 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.

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

TIPO DE SUELO	DESCRIPCION DEL SUELO	V_{S30} (m/s)
A	Roca u otro 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	-

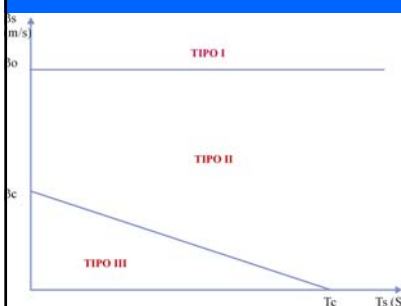
Caracterización local del suelo en México

El 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:

TIPO I Terreno firme: Depósitos de suelo formados solamente por estratos con velocidades de propagación $\beta_0 \geq 700$ m/s o módulos de rigidez $G_0 \geq 85000$ t/m².

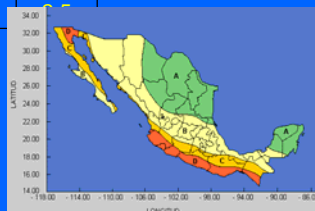
TIPO II Terreno intermedio: Depósitos de suelo con periodo fundamental de vibración y velocidad efectiva de propagación tales que se cumple la relación: $\beta_c T_s + \beta_s T_c \geq \beta_c T_c$

TIPO III Terreno blando: Depósitos de suelo con periodo fundamental de vibración y velocidad efectiva de propagación tales que se cumple la relación: $\beta_c T_s + \beta_s T_c < \beta_c T_c$



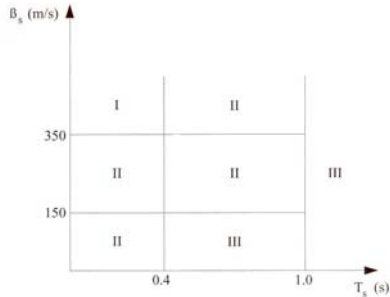
Zona sísmica	β_c (m/s)	T_c (s)
A	400	5.3
B	400	5.3
C	500	4.7
D	500	4.7

Valores de β_c y T_c



Carta de microzonificación sísmica

Clasificación de los terrenos de cimentación para Puebla, México, Propuesta por Aviles et al (1999)



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

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

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

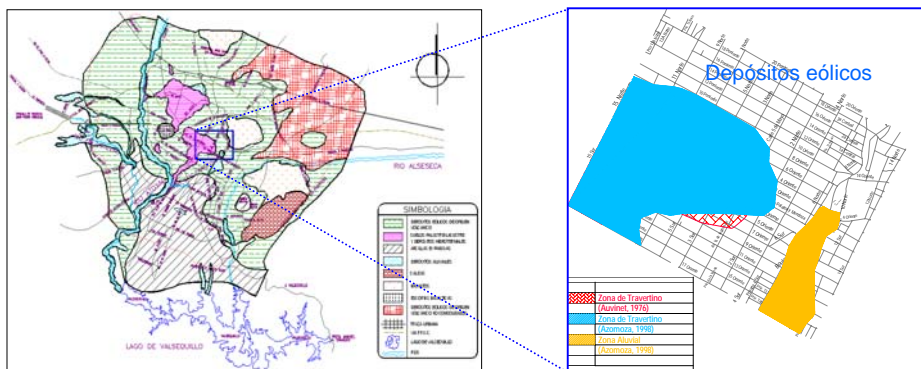
Clasificación de los terrenos de cimentación (RCMP), Propuesta para Veracruz-Boca del Río, México (2005)

PROPUESTA DEL REGLAMENTO DE VERACRUZ (RE-VER)				
Tipo de Suelo	Descripción	Valores Medios (efectivos) Profundidad de exploración del subsuelo $\geq 30m$		
		Velocidad de ondas de cortante V_s (m/seg)	Número de golpes de la prueba de penetración estándar N_s	Contenido s 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 geológicos - geotécnicos (zonificación geotécnica) o con información del subsuelo en zonas urbanas de México.
- Ejems: VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Tomo II, Guanajuato, Nov. 1976.
- Se aplicará al CENTRO HISTORICO DE LA CIUDAD DE PUEBLA, MÉXICO

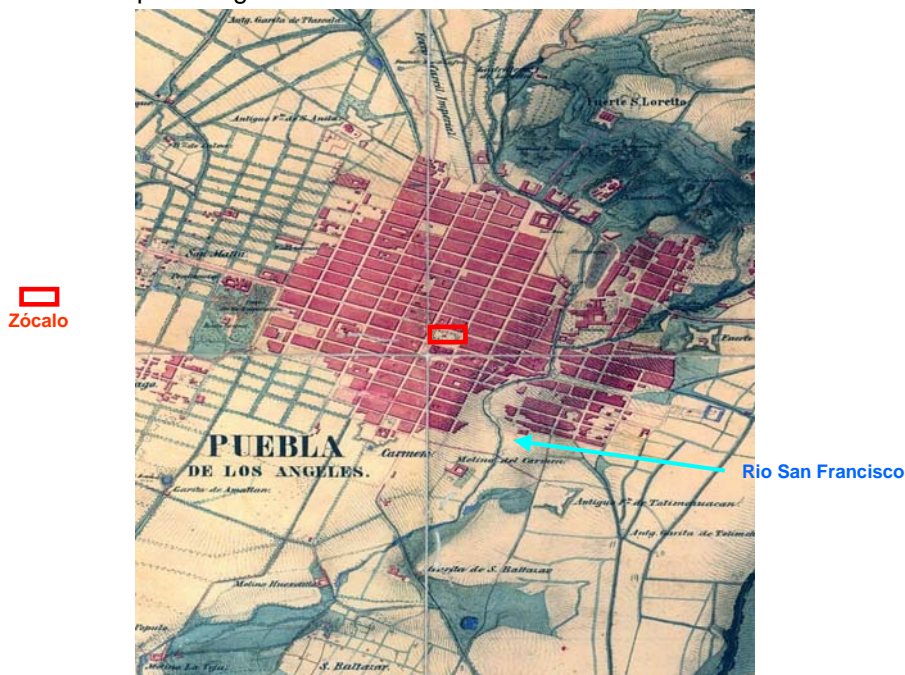
Mapa Geotécnico de la ciudad de Puebla y Centro Histórico



Azomoza, et al., 1998

Zona de estudio y zonificación de los depósitos de Travertino y aluviales.

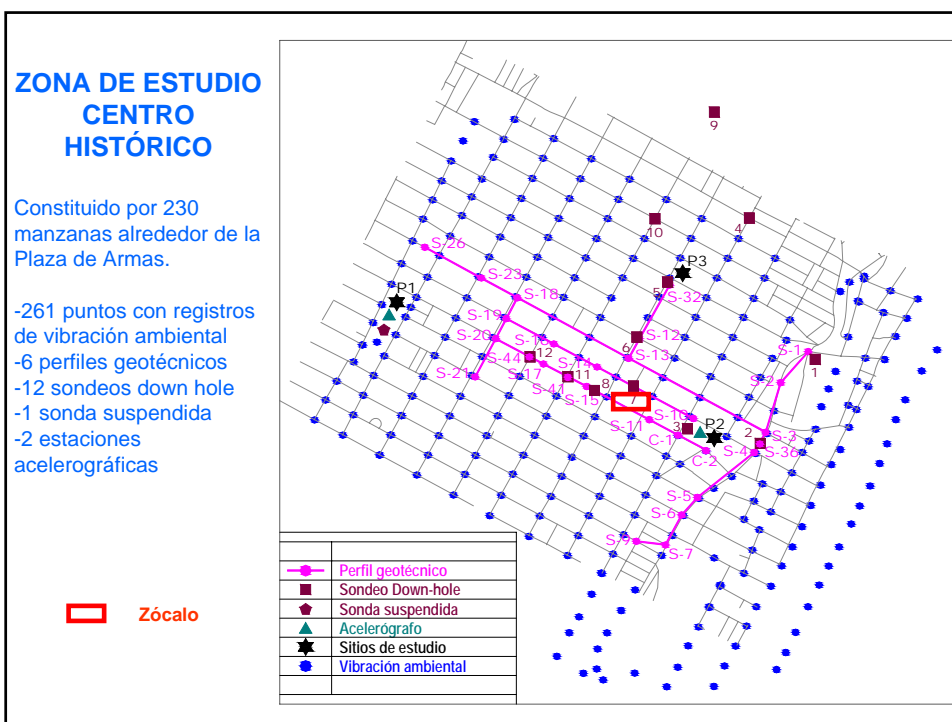
Mapa cartográfico de la ciudad de Puebla en el año de 1920



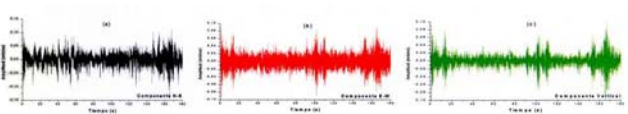
Zócalo

Rio San Francisco

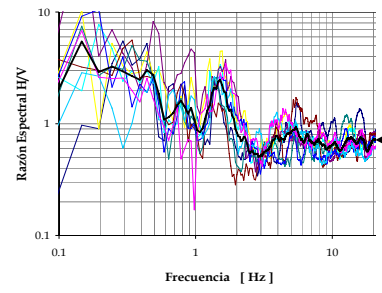
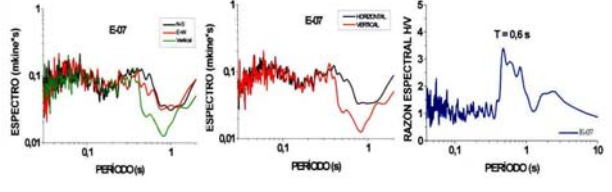
- **2do.** Realizar campañas de registros de microtremores para obtener las formas espectrales de la técnica de Nakamura (HVSr).



Registro de microtemores en el CH de puebla

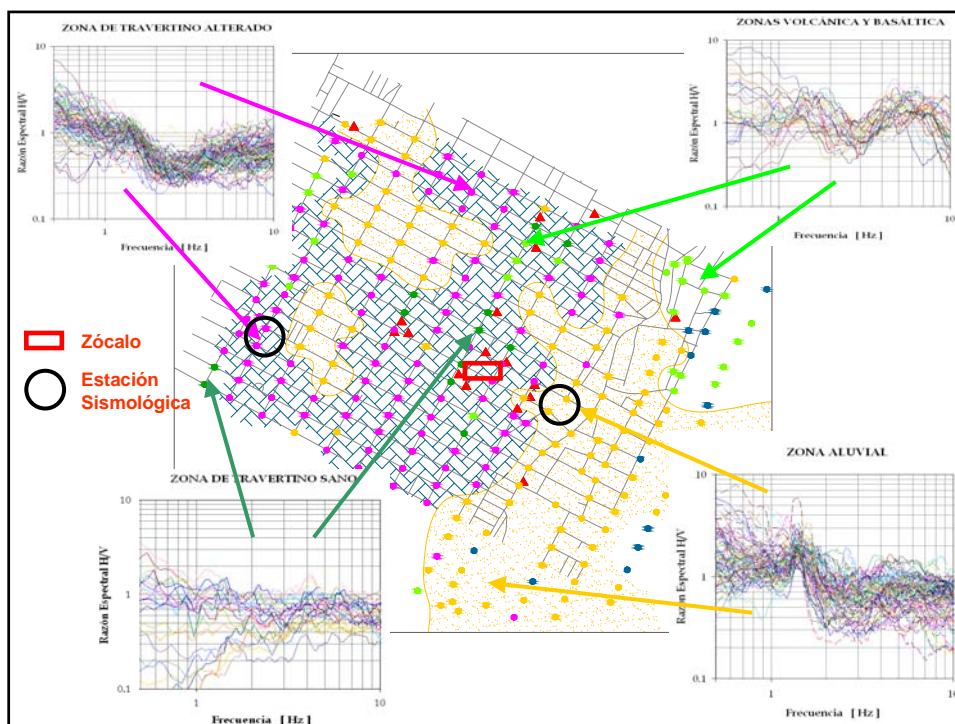


Microtemores
(Vibración ambiental)



Función de
transferencia empírica
(FTEP)

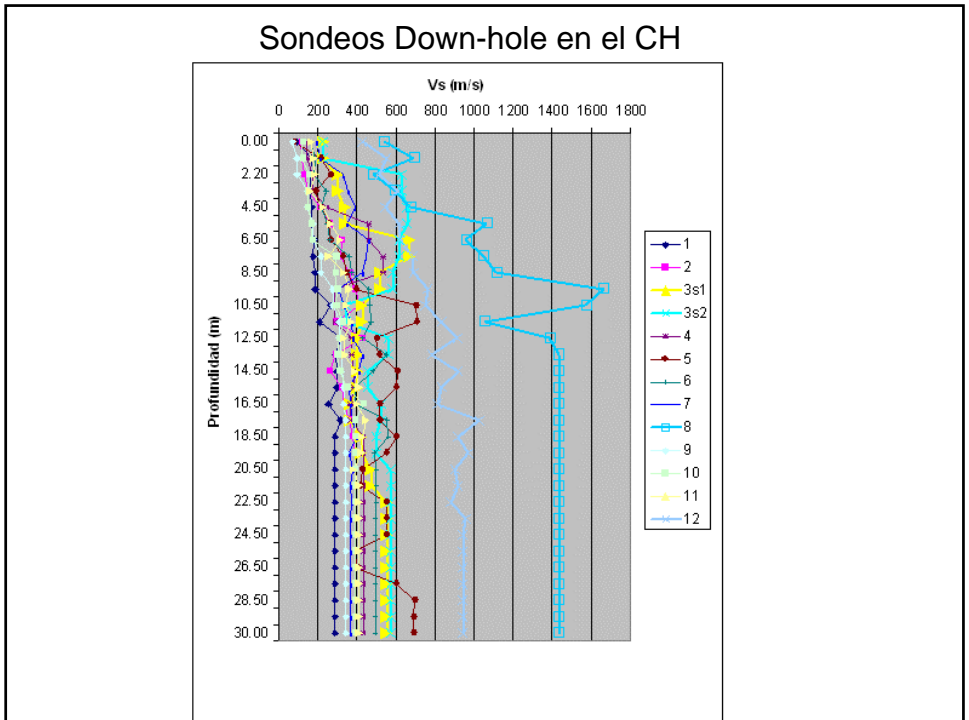
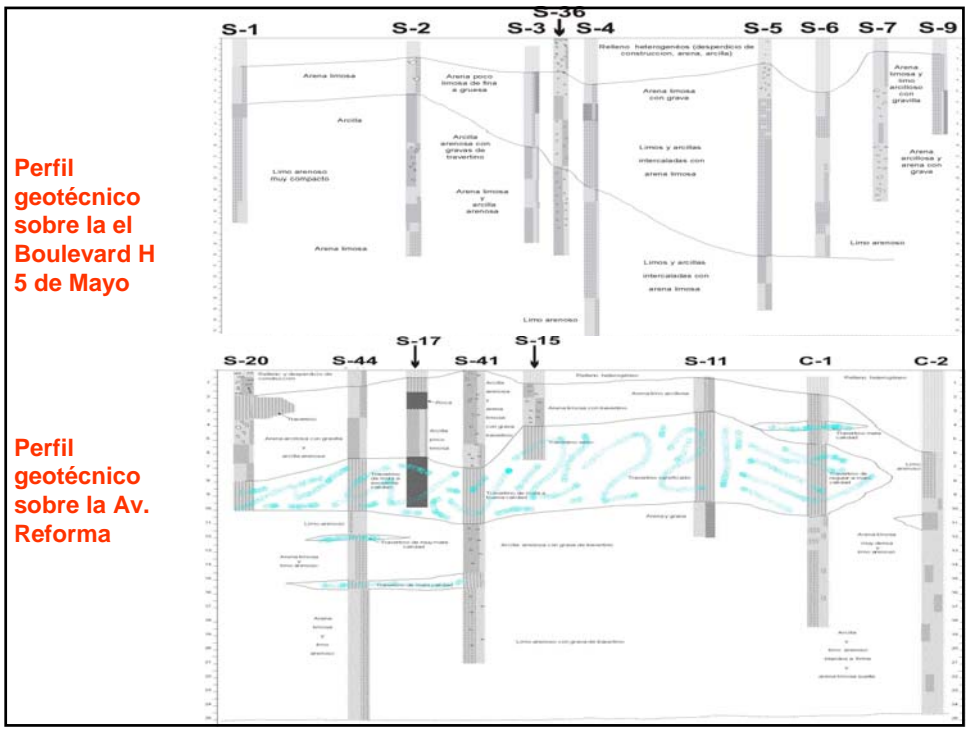
- **3ra.** Obtener familias con las formas espectrales de la técnica de Nakamura (HVSR) y encontrar las MICROZONAS



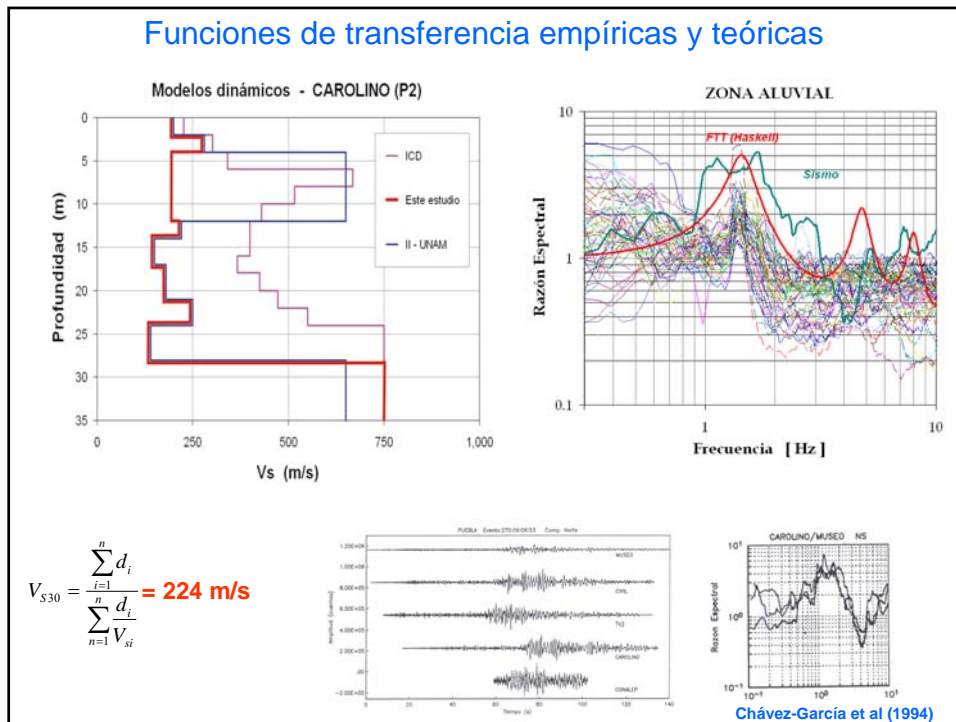
4to. Obtener el parámetro Vs30 en un punto de cada una de las microzonas.

Para esto se requiere de cuatro pasos:

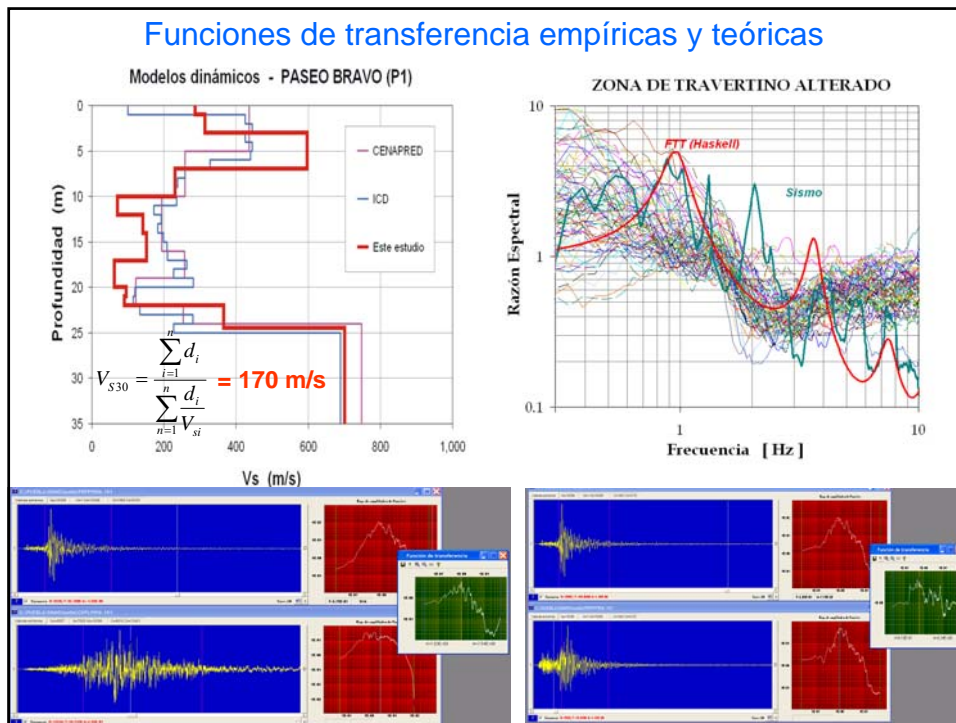
1. Obtener la **AMPLIFICACION RELATIVA REAL** de la microzona. Para esto se debe seleccionar en la microzona una estación sismológica (permanente o temporal), para poder registrar sismos (débiles o moderados), con el objeto de aplicar la técnica estándar (SSR) o Nakamura.
2. Obtener un **MODELO SISMICO 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....
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 VS30** del nuevo MODELO SÍSMICO obtenido del ajuste con los datos observados.



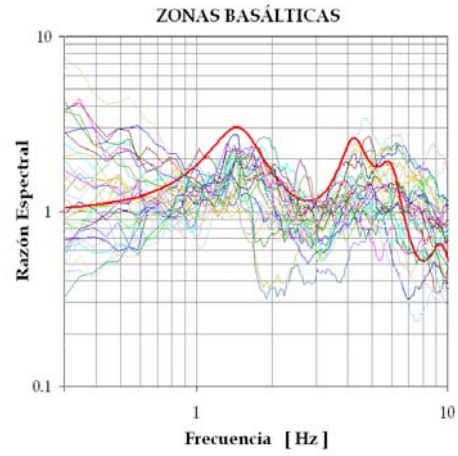
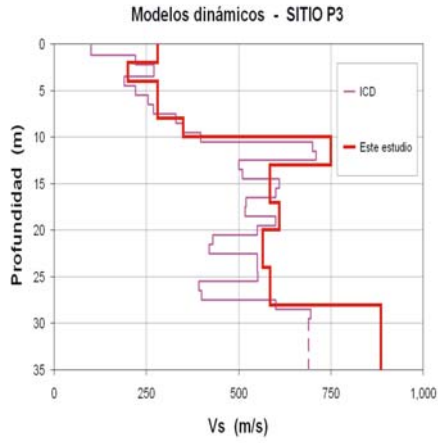
Funciones de transferencia empíricas y teóricas



Funciones de transferencia empíricas y teóricas

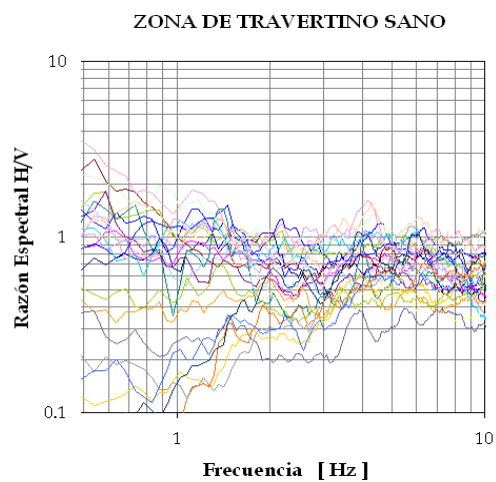
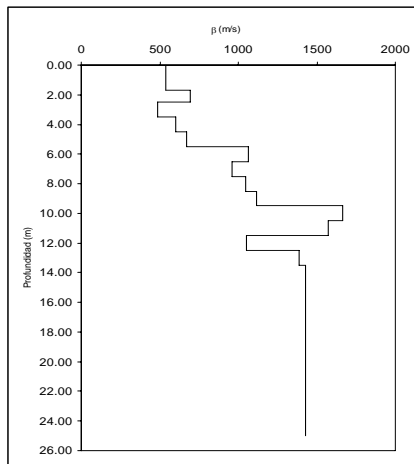


Funciones de transferencia empíricas y teóricas



$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} = 434 \text{ m/s}$$

Funciones de transferencia empíricas y teóricas



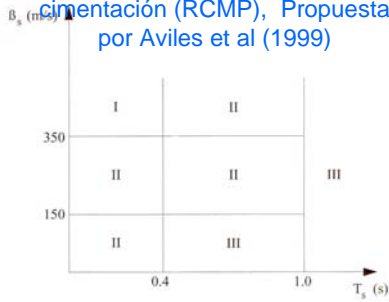
$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} = 1028 \text{ m/s}$$

- **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. Comparación con el código vigente del estado de Puebla, México.

Clasificación de los terrenos de cimentación (RCMP), Propuesta por Aviles et al (1999)

CODIGO INTERNACIONAL EUROPEAN EUROCODE 8 (EC- 8, 2004)

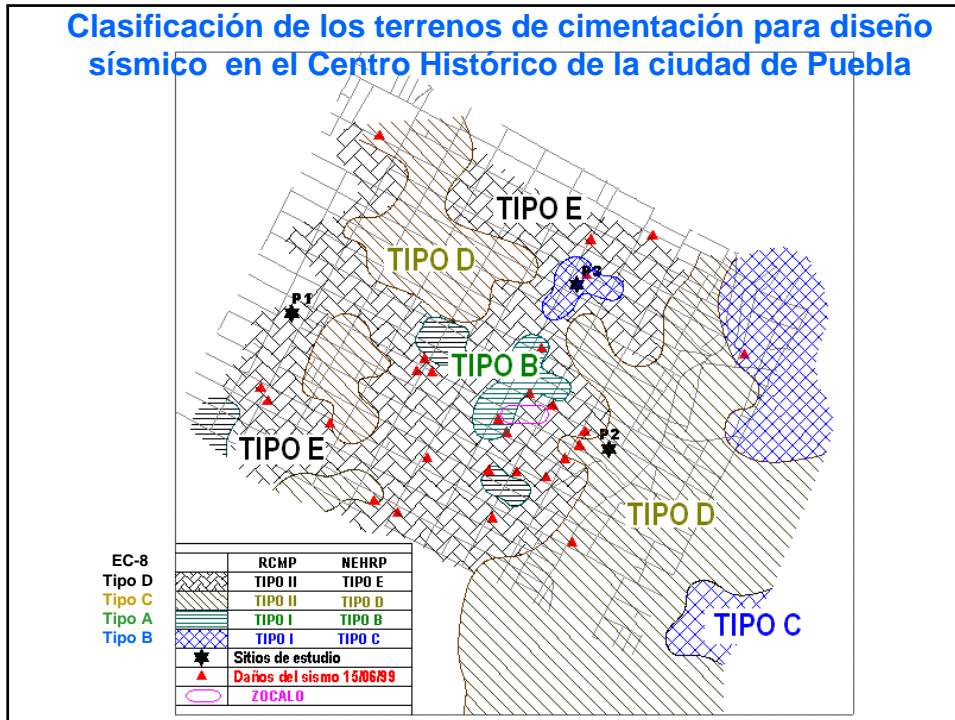
De acuerdo a este código los suelos se clasifican en seis grupos diferentes dependiendo del valor de la velocidad de ondas de corte a 30 metros de profundidad.



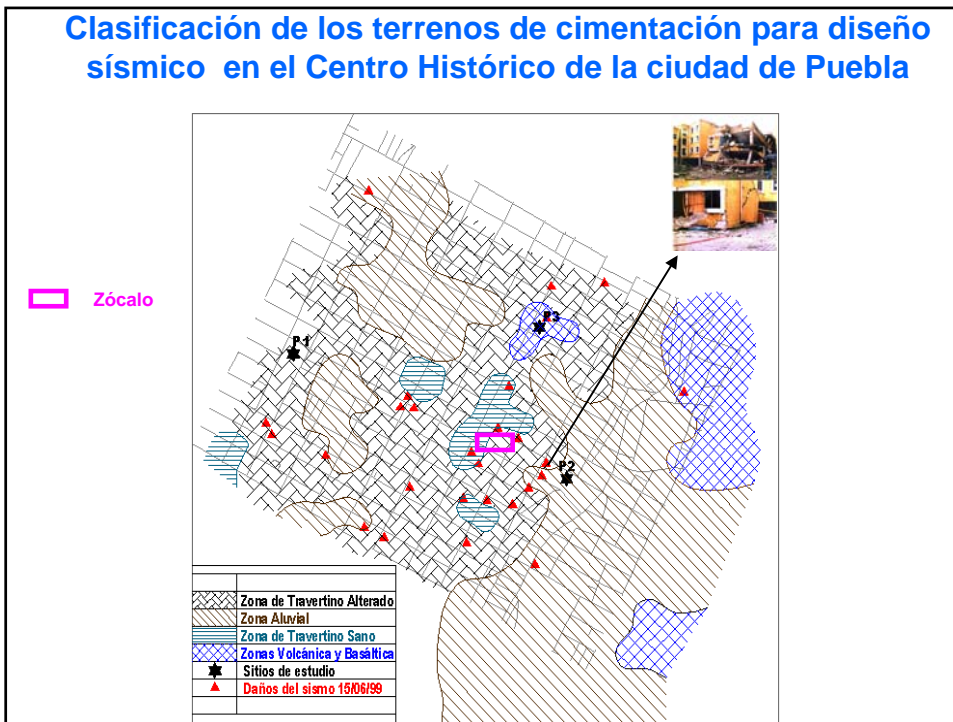
Terreno tipo I: $T_s < 0.4 s$ y $\beta_s > 350 m/s$
 Terreno tipo II: $T_s < 0.4 s$ y $\beta_s \leq 350 m/s$
 $0.4 \leq T_s \leq 1.0 s$ y $\beta_s \geq 150 m/s$
 Terreno tipo III: $T_s > 1.0 s$
 $0.4 \leq T_s \leq 1.0 s$ y $\beta_s < 150 m/s$

TIPO DE SUELO	DESCRIPCION DEL SUELO	V_{s30} (m/s)
A	Roca u otro 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	-

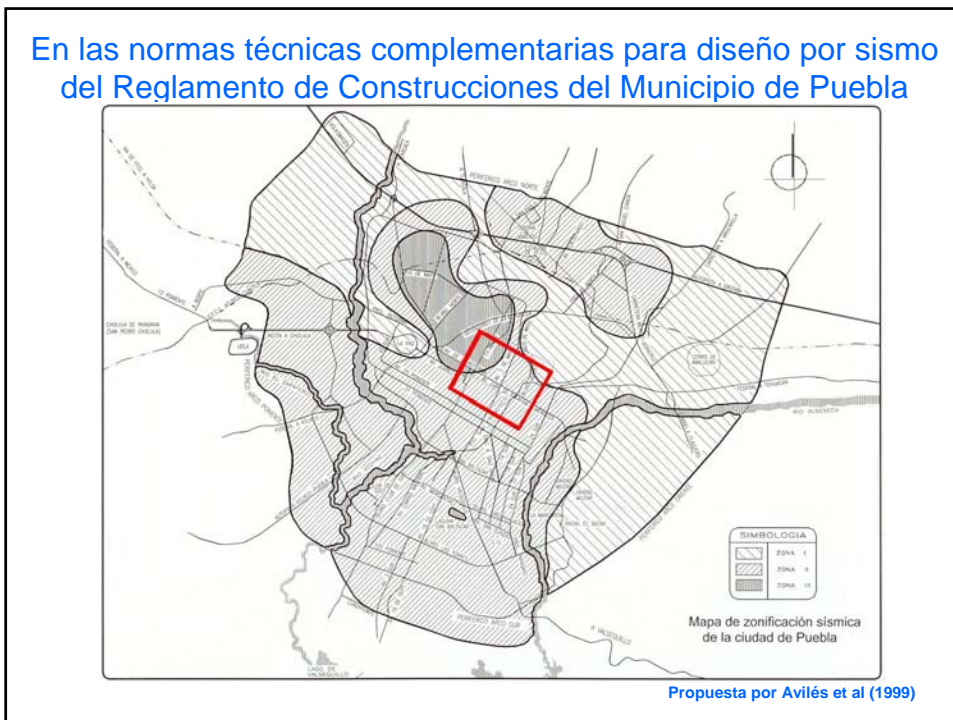
Clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla



Clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico en el Centro Histórico de la ciudad de Puebla



En las normas técnicas complementarias para diseño por sismo del Reglamento de Construcciones del Municipio de Puebla



CONCLUSIONES

LAS FORMAS ESPECTRALES DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EMPIRICAS (HVSr) obtenidos de registros de microtremores

Presentan 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 VS30.

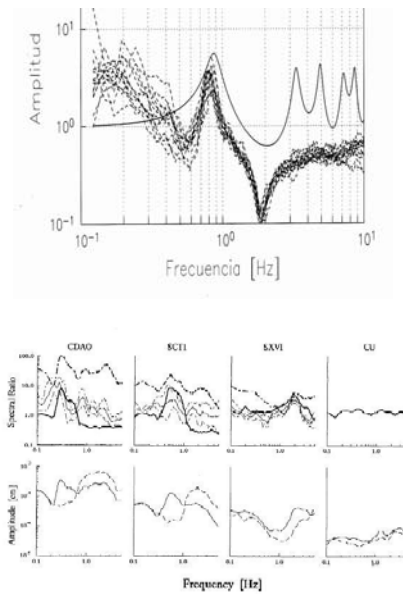
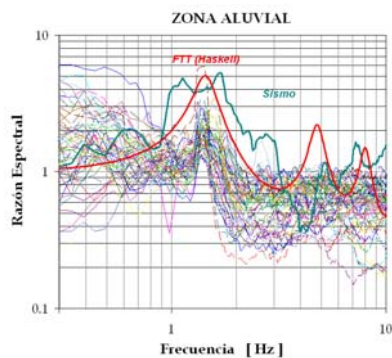
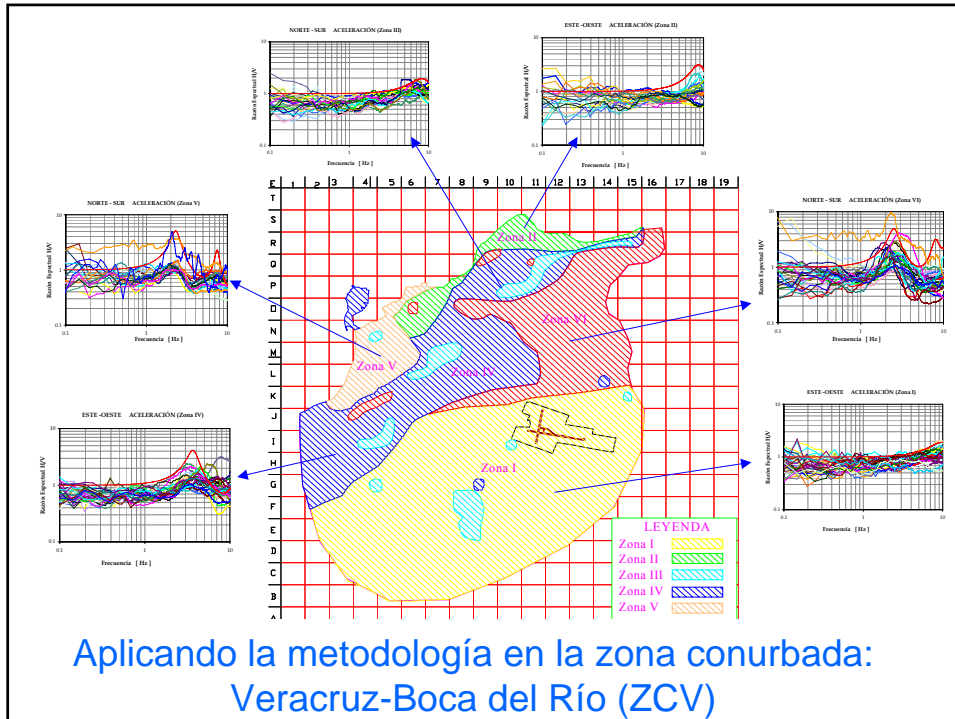
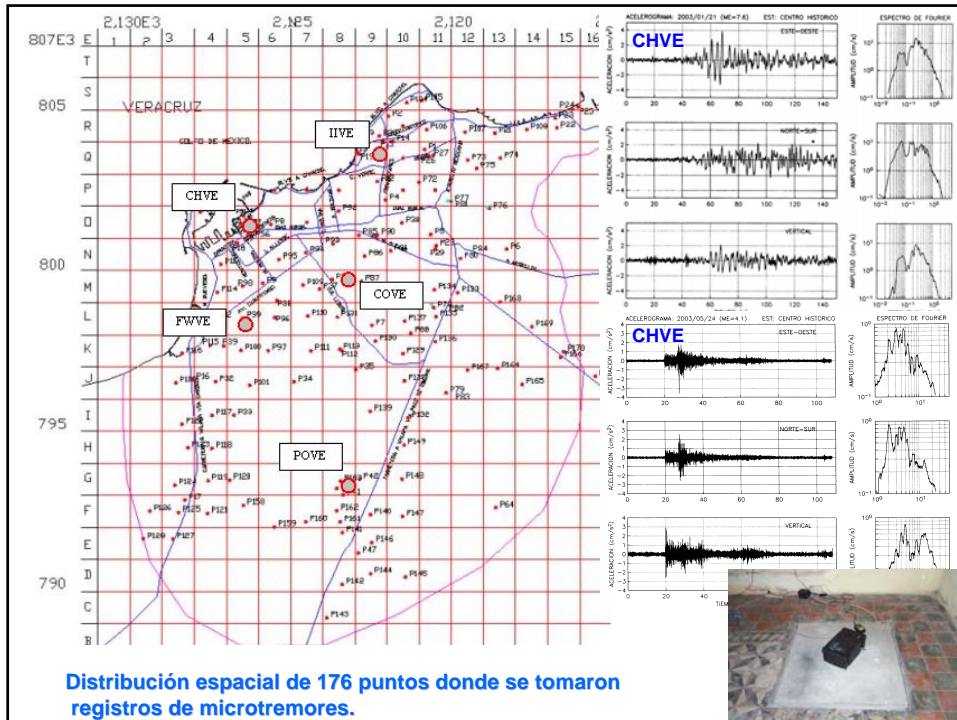
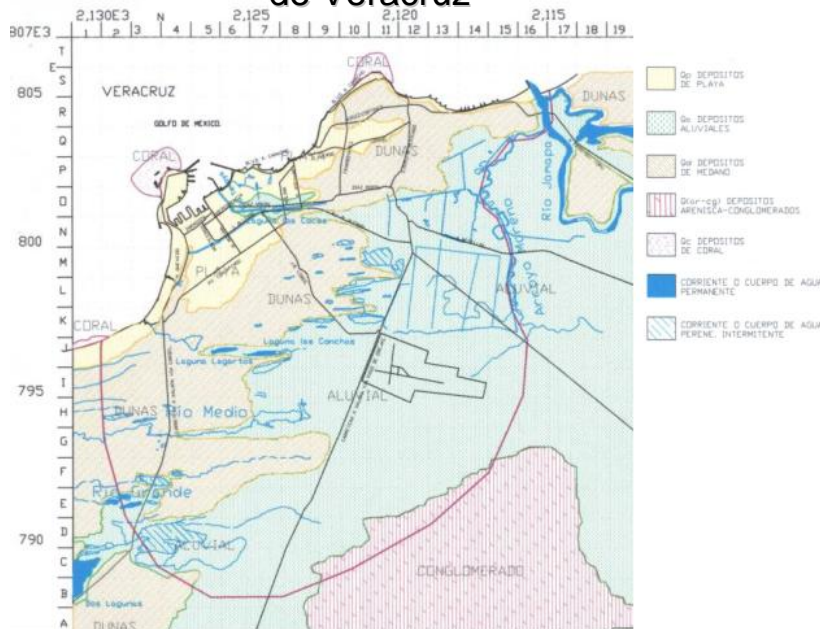


Figure 9. Results for Mexico City, N1 component. Flat row: average (thin continuous line) and one- σ plus or minus one standard deviation (thin dotted line) empirical transfer functions of strong motion data, relative to CU station. Thick dashed line: spectral ratios of microtremors relative to CU. Thick solid lines: Paciorek's (1982) ratio. Second row: average (solid) and spectra of microtremors of each station for both the horizontal (solid) and vertical (dotted line) components of motion.

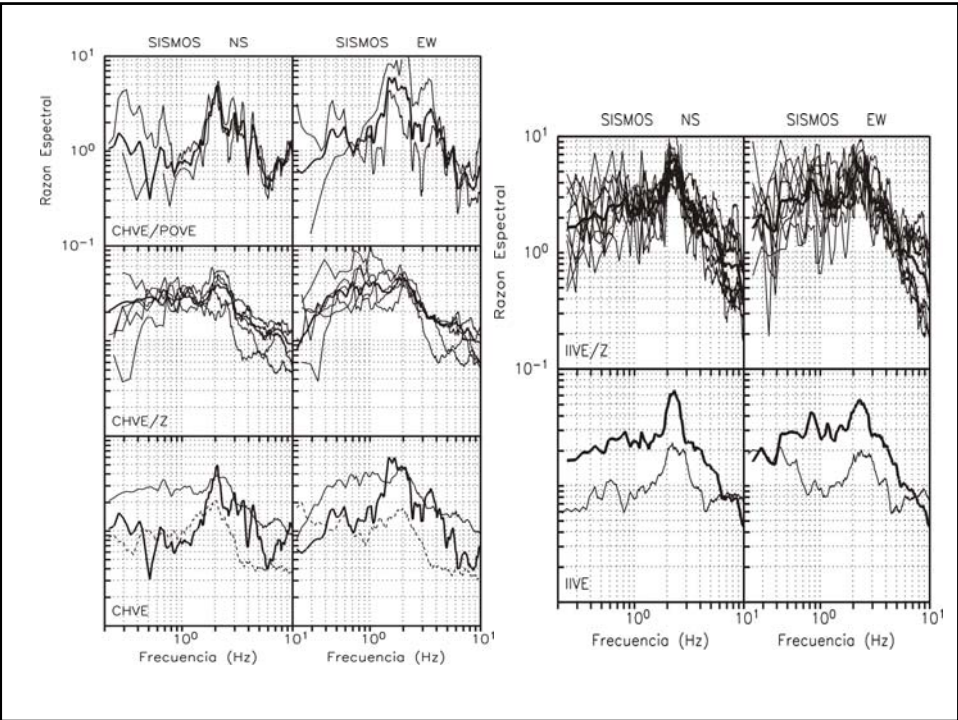
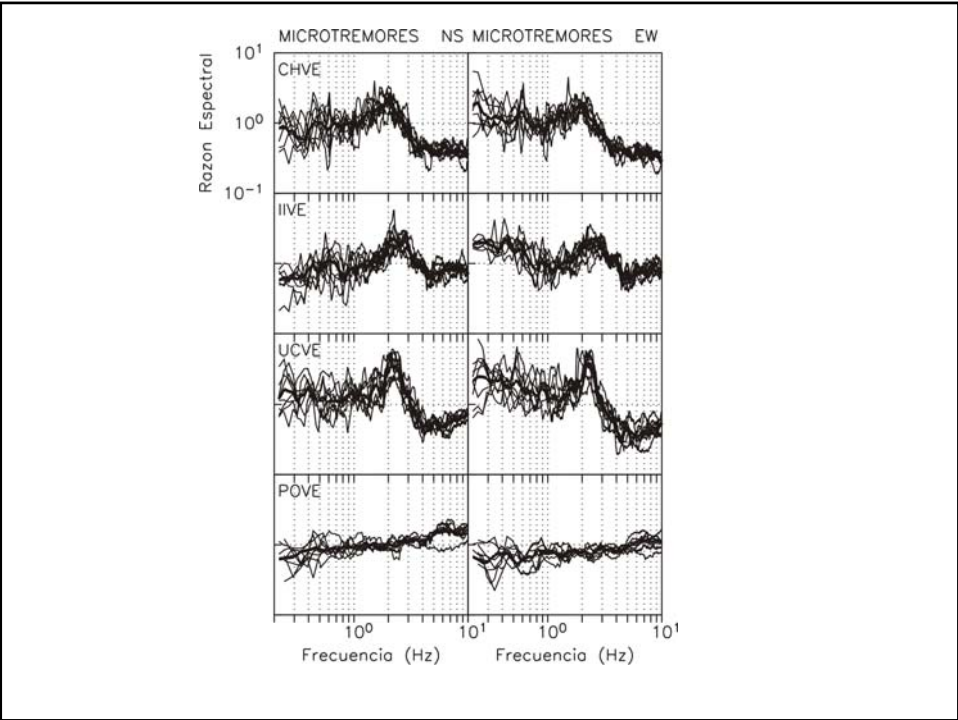


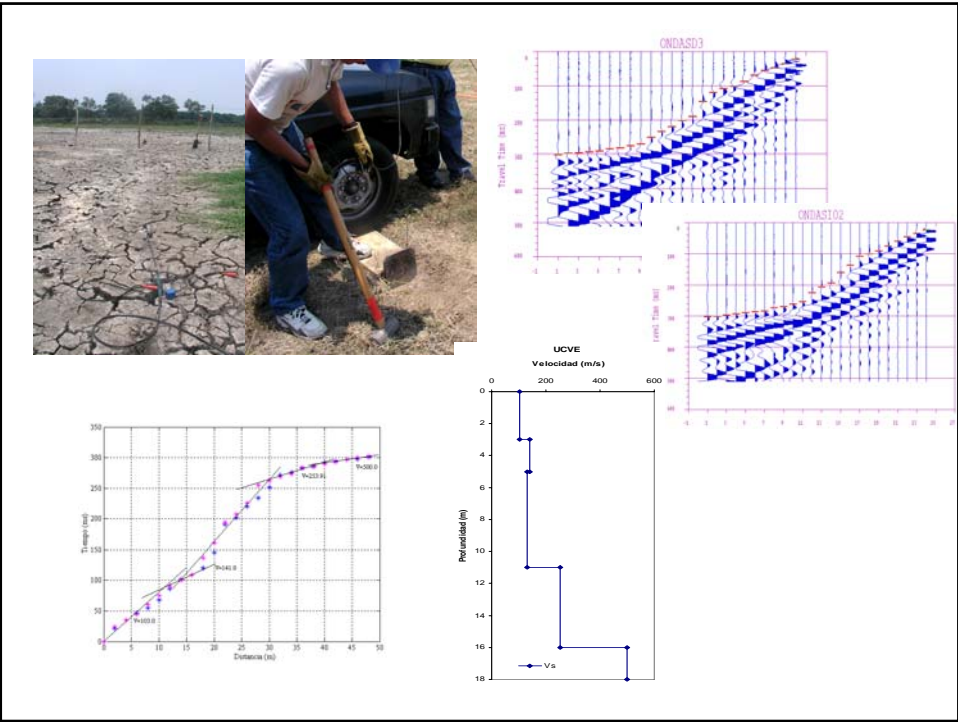
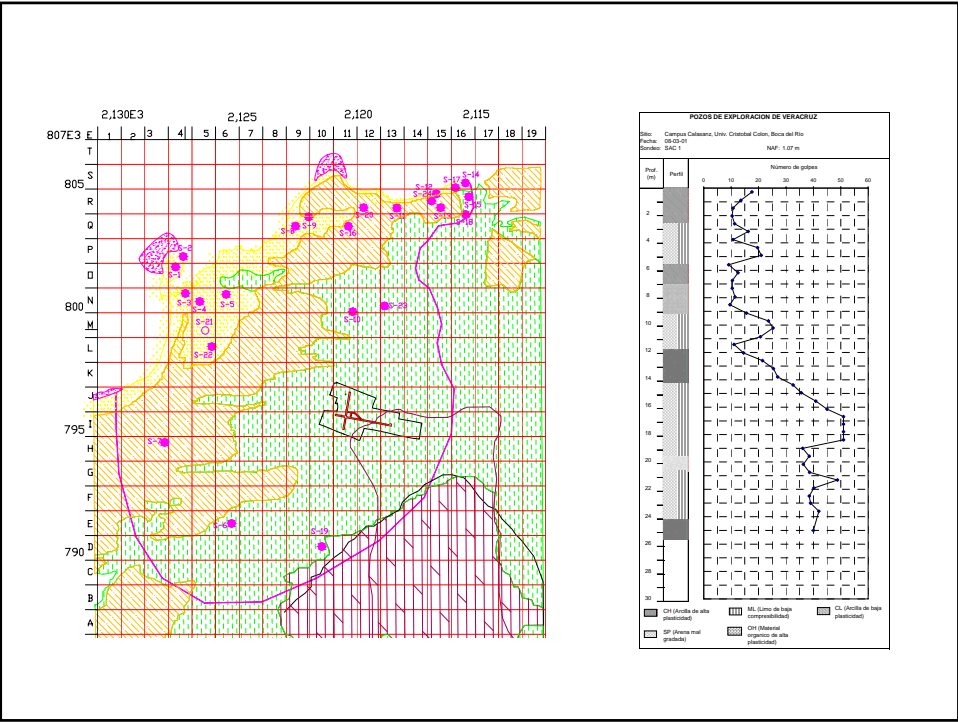
Aplicando la metodología en la zona conurbada:
Veracruz-Boca del Río (ZCV)

Mapa geológico-geotécnico e hidrológico de Veracruz



Distribución espacial de 176 puntos donde se tomaron registros de microtremores.





Propuesta de Romo y Ovando (1995) para zonificar geosísmicamente una región en México

Ellos clasifican el tipo de suelo de acuerdo con el periodo natural (T_0) y su amplificación relativa a un terreno firme de referencia (A_r) que se determine a partir de mediciones de vibración ambiental y estudios geotécnicos en el sitio.

TIPO I: Depósitos de suelo con $T_0 < 0.15$ s y $A_r < 2$ veces

TIPO II: Depósitos de suelo con: $0.15 < T_0 < 0.75$ s y $A_r < 5$ veces; y
 $T_0 < 0.15$ s y $2 < A_r < 5$

TIPO III: Depósitos de suelo con: $T_0 > 0.75$ s y $A_r > 1$ veces; y
 $T_0 < 0.75$ s y $A_r > 5$ veces

