

- SUELOS
- ESTRUCTURAS SISMOS RESISTENTES,
- DIAGNOSTICO POST-SISMO.



# **CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SITIO Y DAÑOS ASOCIADOS A TIPOS DE SUELOS**

**Ramón Verdugo Alvarado (Ph.D.)**

**Socio Fundador CMGI Ltda.**



**23 DE JUNIO DE 2023**

# PÉRDIDAS MATERIALES Y VÍCTIMAS FATALES DE TERREMOTOS RECIENTES

| <b>Terremoto</b>                   | <b>Fecha</b>         | <b>Mw</b>  | <b>Pérdida Directa en Miles de Millones (US\$)</b> | <b>Víctimas fatales</b> |
|------------------------------------|----------------------|------------|--|-------------------------|
| <b>Maule Chile</b>                 | <b>Febrero, 2010</b> | <b>8.8</b> | <b>30</b>  | <b>525</b>              |
| <b>Tohoku, Japón</b>               | <b>Marzo, 2011</b>   | <b>9.0</b> | <b>211</b>   | <b>15894</b>            |
| <b>Christchurch, Nueva Zelanda</b> | <b>Febrero, 2011</b> | <b>6.3</b> | <b>40</b>  | <b>185</b>              |
| <b>Gorkha Nepal</b>                | <b>Abril, 2015</b>   | <b>7.8</b> | <b>10</b>  | <b>9000</b>             |
| <b>Muisne, Ecuador</b>             | <b>Abril, 2016</b>   | <b>7.8</b> | <b>3</b>   | <b>663</b>              |
| <b>Puebla, México</b>              | <b>Sept., 2017</b>   | <b>7.1</b> | <b>2</b>   | <b>369</b>              |
| <b>Turquía-Siria</b>               | <b>Febrero, 2023</b> | <b>7.8</b> | <b>120</b>   | <b>60000</b>            |

# TERREMOTO DE TURQUÍA-SIRIA. 6-FEB-2023, Mw = 7.8

(<https://www.context.news/money-power-people/rotten-buildings-corruption-in-spotlight-after-turkey-quake>)



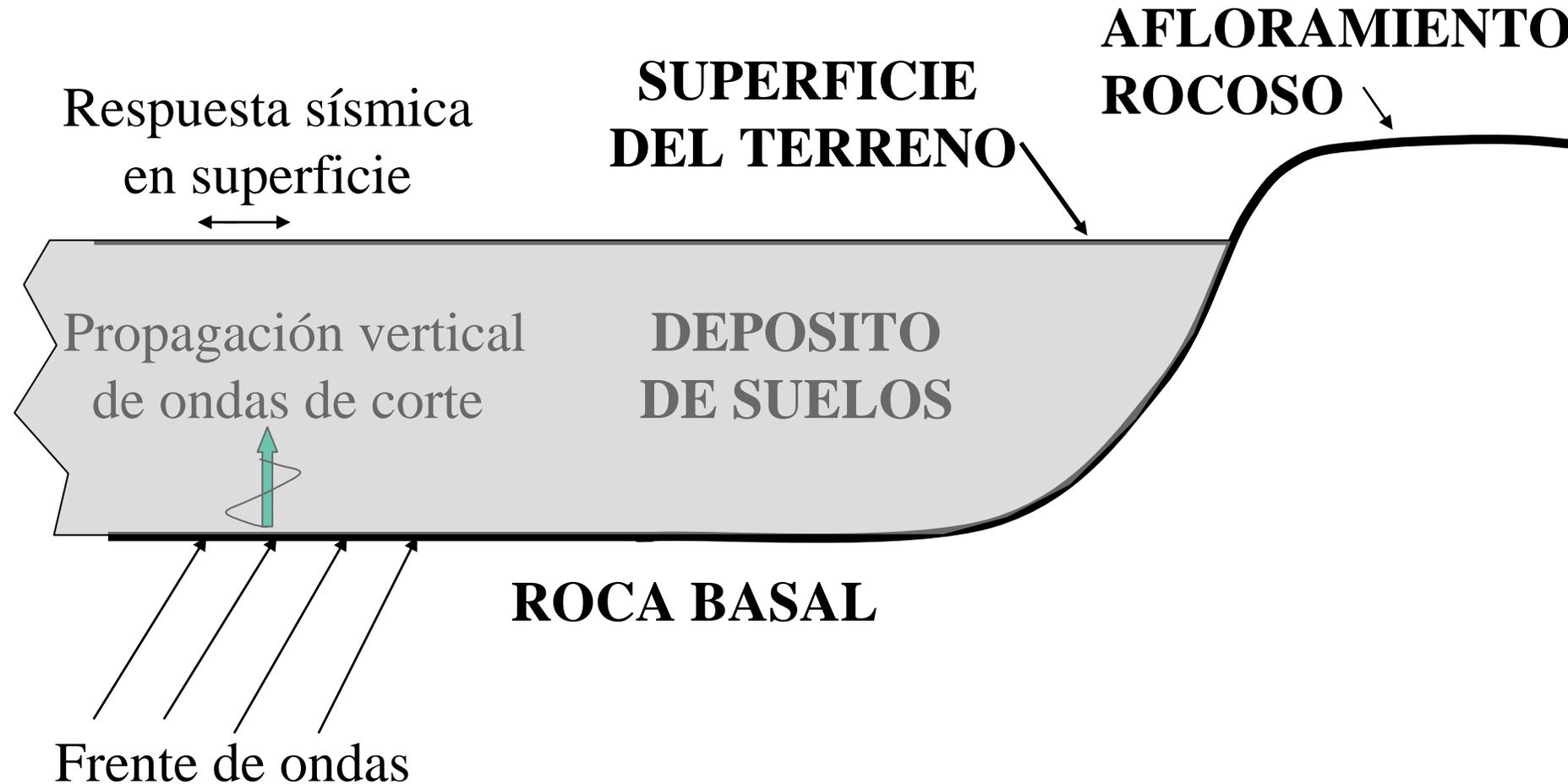
# TERREMOTO DE MÉXICO. 19-SEPT.-2017 - Mw = 7.1



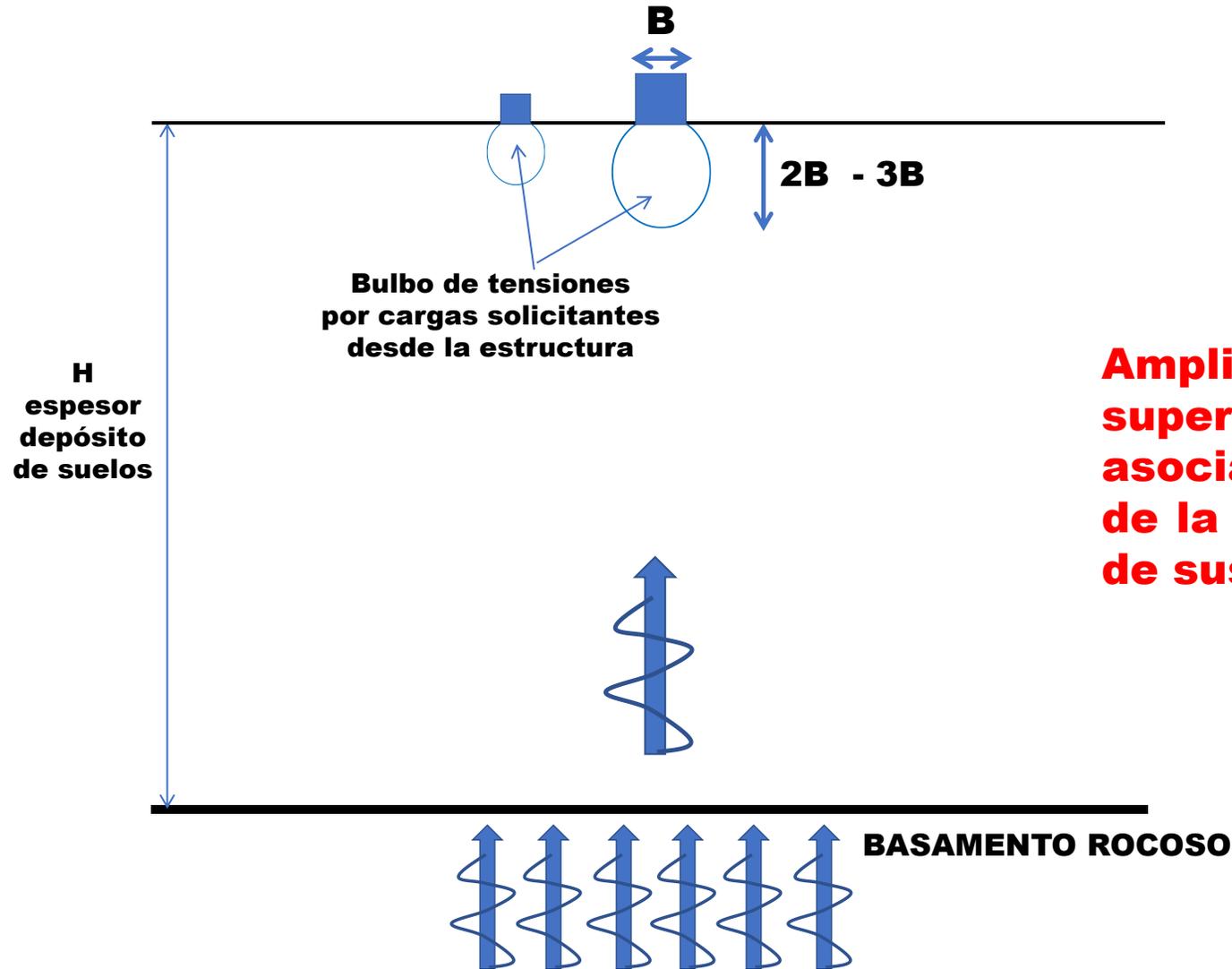
# TERREMOTO DEL MAULE, CHILE. 27-FEB-2010. Mw=8.8



# RESPUESTA SÍSMICA DE SITIO

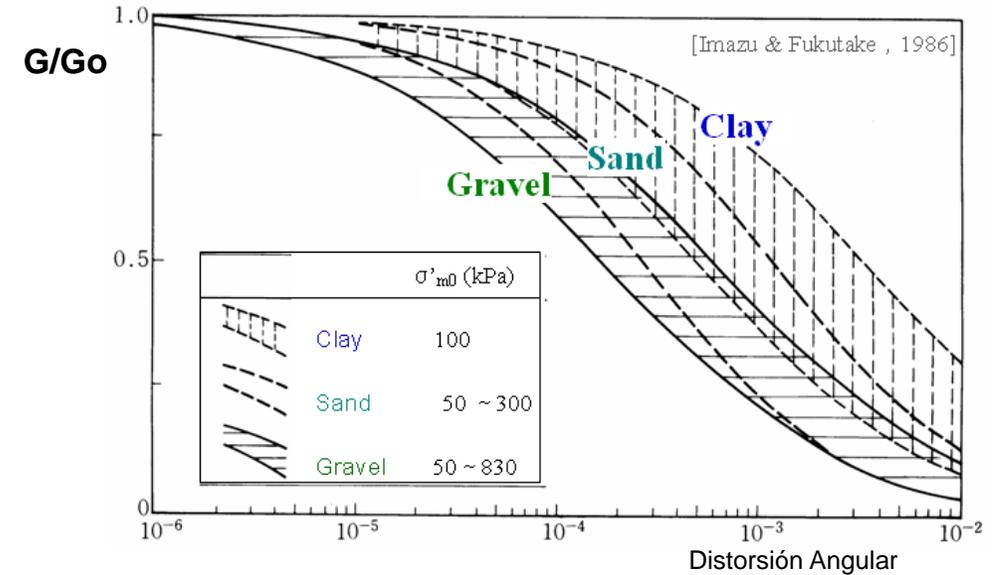
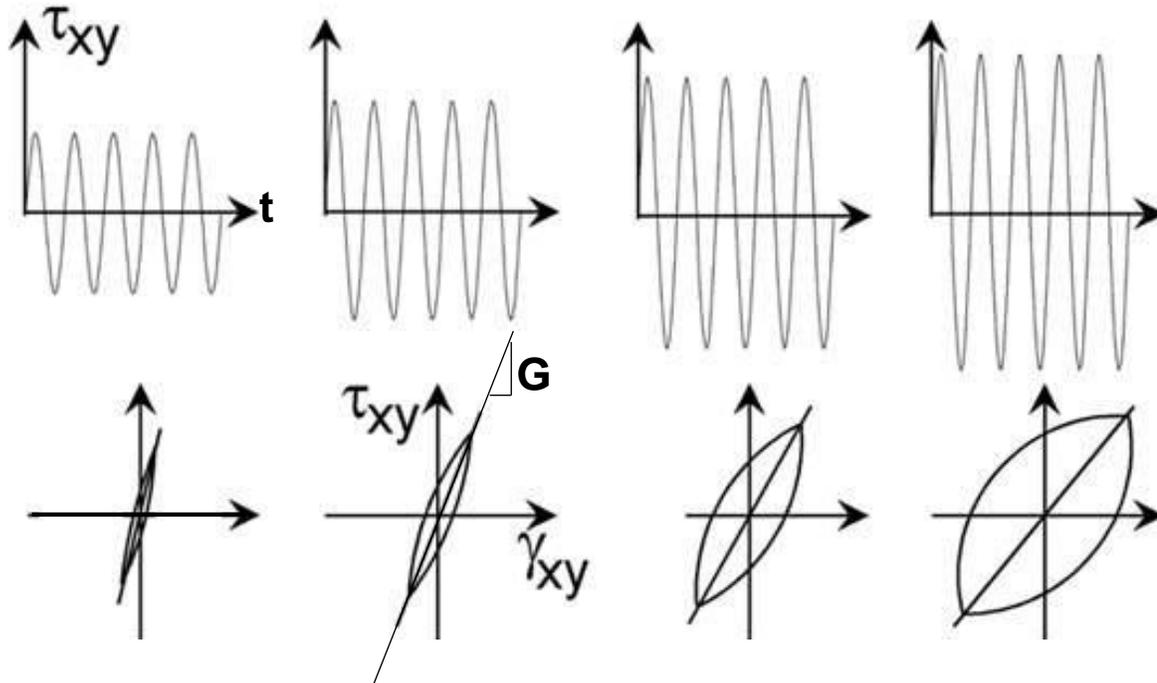


# FRENTE DE ONDAS SÍSMICAS PROPAGÁNDOSE DESDE EL BASAMENTO ROCOSO



**Amplificación sísmica en la superficie del terreno no está asociada con las dimensiones de la estructura, ni el ancho  $B$  de sus fundaciones.**

# COMPORTAMIENTO CÍCLICO DRENADO DE SUELOS



**Para terrenos horizontales y no-licuables, el nivel de deformación del suelo durante un evento sísmico severo, en general, es menor a  $5 \times 10^{-1}$  %. Esto significa que mayoritariamente no se está en las cercanías de la falla del suelo y por tanto las propiedades resistentes pierden relevancia.**

# VISTA GENERAL DE VALPARAISO, CHILE



**Cerros con cubierta de roca meteorizada que mejora rápidamente con la profundidad**

**Depósito de suelos arenosos de espesor medio del orden de 40 m**

# TERRENO NATURAL Y DAÑOS OBSERVADOS EN ESTRUCTURAS TERREMOTO DE VALPARAISO 1906, M = 8.2

**EDIFICACIONES SIN DAÑOS  
EN SECTORES DE CERROS**



**GRAN DESTRUCCIÓN EN ZONA  
DE SUELOS DE MEDIANA RIGIDEZ**



# EFECTO TERRENO NATURAL, TERREMOTO DE 1906, M = 8.2

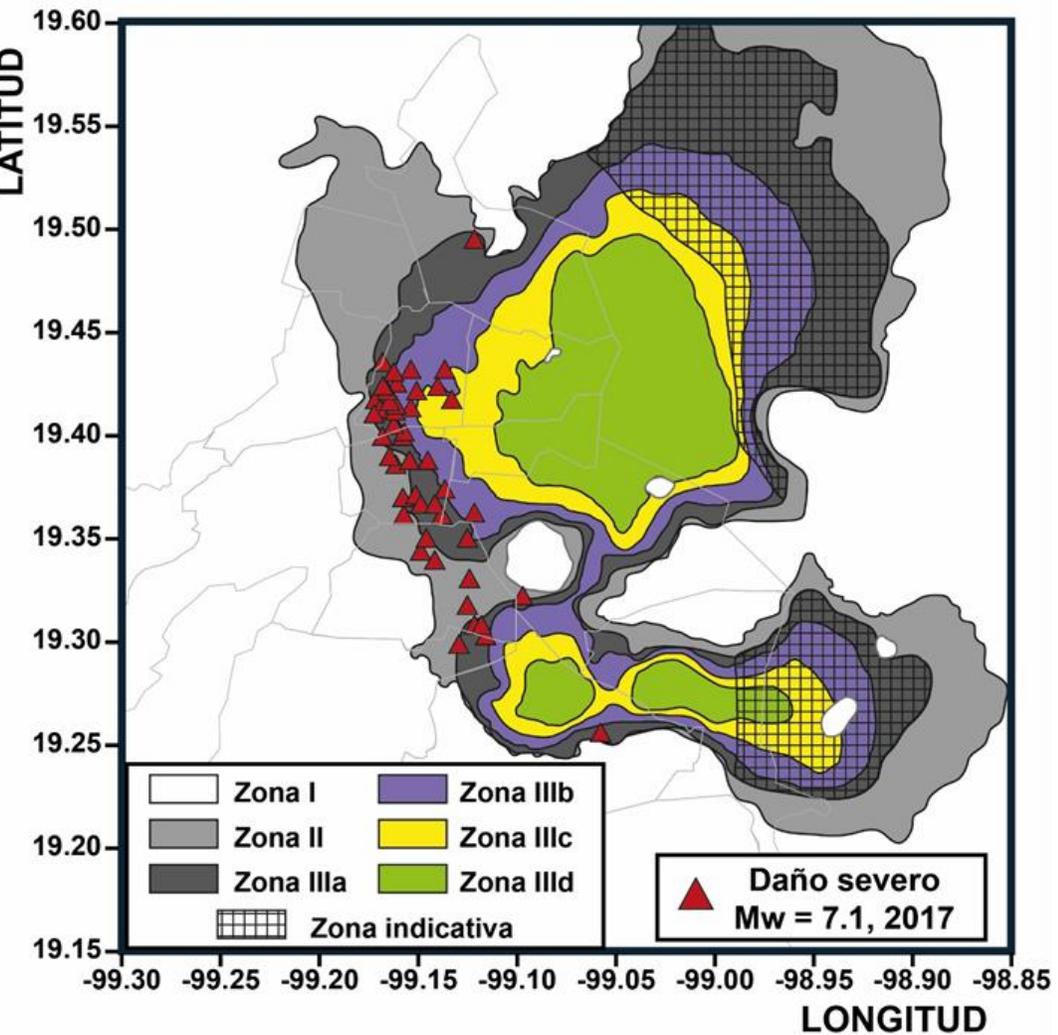
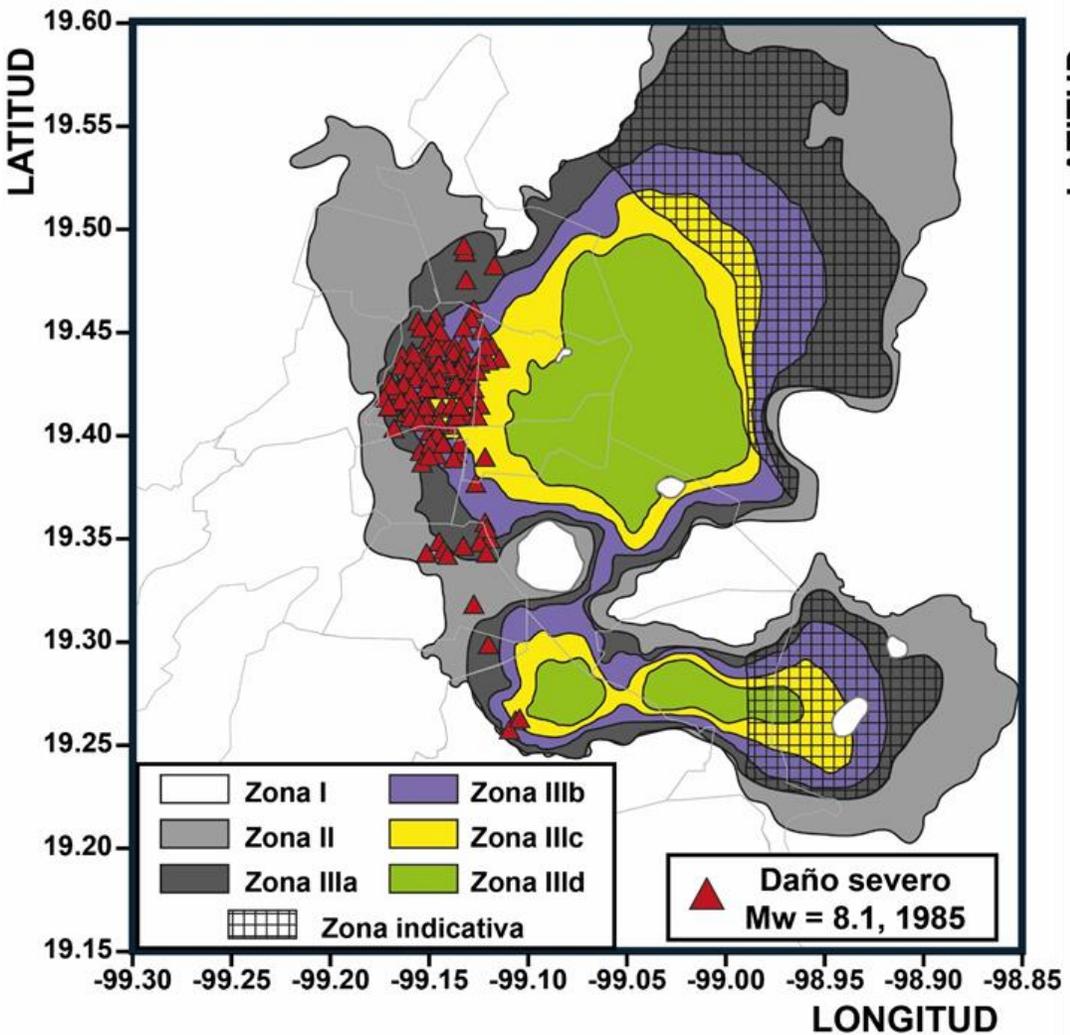
**EDIFICACIÓN CONSTRUIDA EN 1855, EN TERRENO ROCOSO. AÚN FUNCIONANDO**



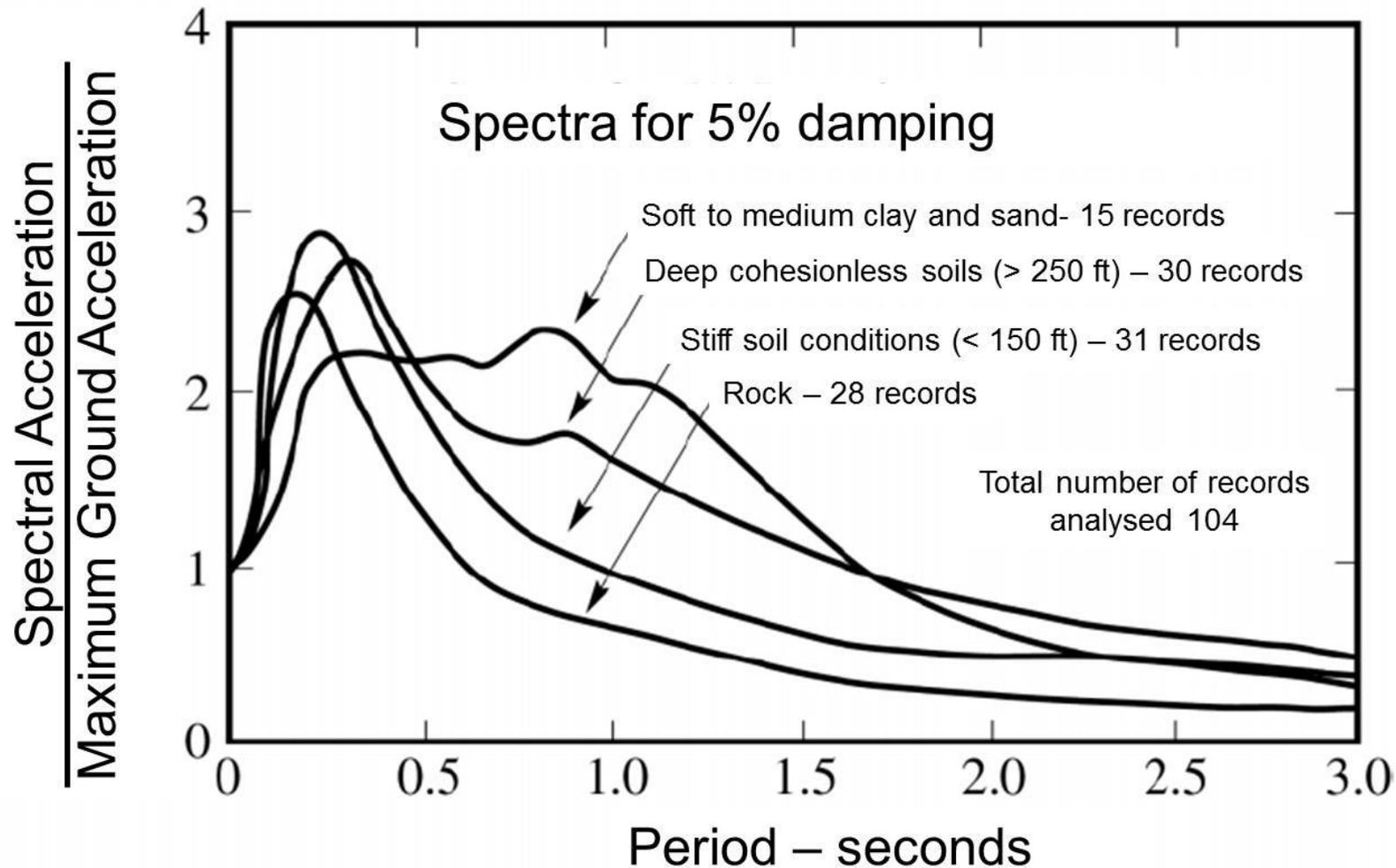
**TEATRO VICTORIA CONSTRUIDO EN 1886 EN TERRENO ARENOSO. COLAPSÓ EN 1906**



# CIUDAD DE MÉXICO: EJEMPLO DEL EFECTO DEL TERRENO EN LOS DAÑOS EN EDIFICIOS. SISMOS DE 1985 Y 2017



# EFECTO DEL TERRENO EN EL ESPECTRO ELÁSTICO DE PSEUDO-ACELERACIÓN (Seed et al. 1976)

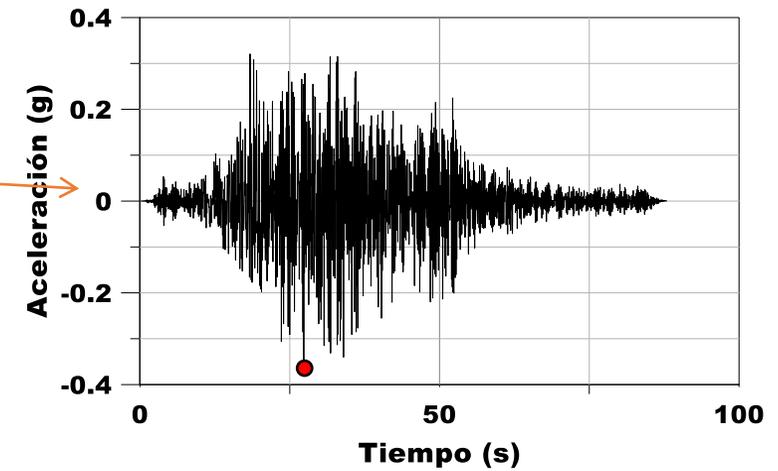
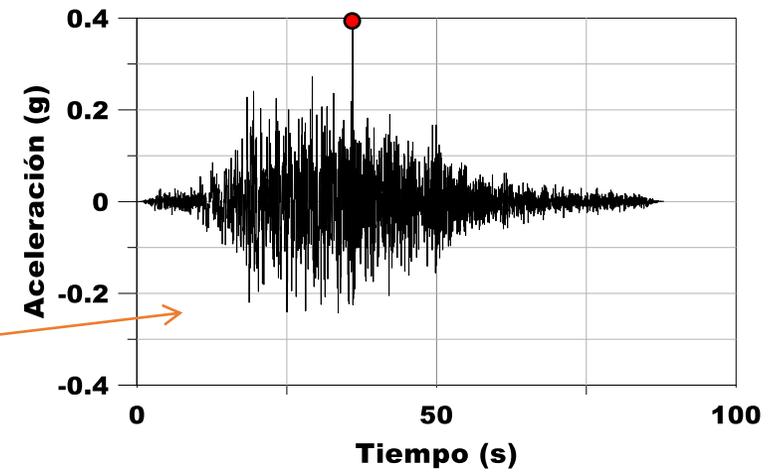
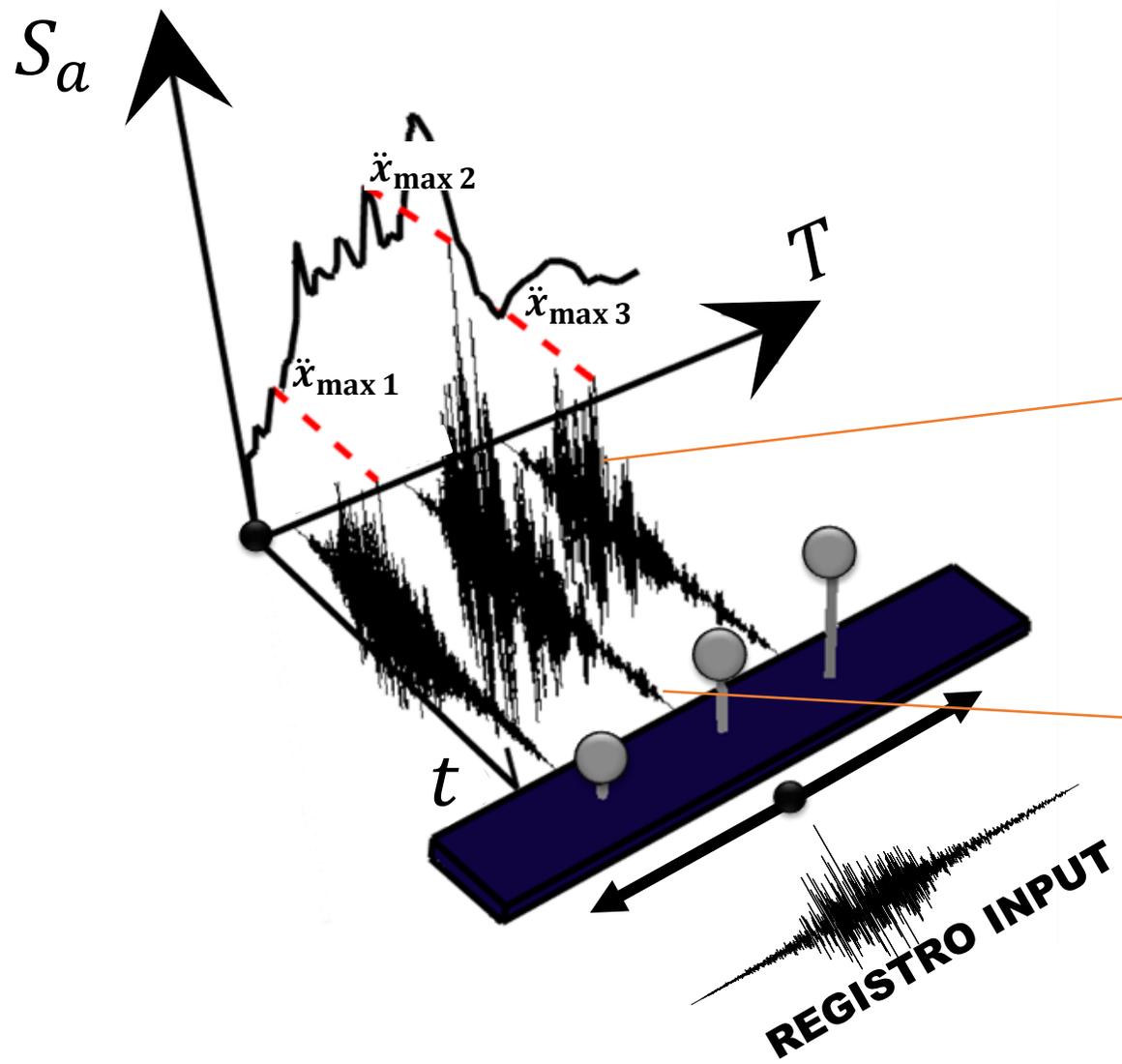


Seed, H. B., Ugas C. and Lysmer J. (1976): Site-dependent spectra for earthquake-resistance design. Bull. Seismological. Soc.of America. Vol. 66, No.1, 221-243

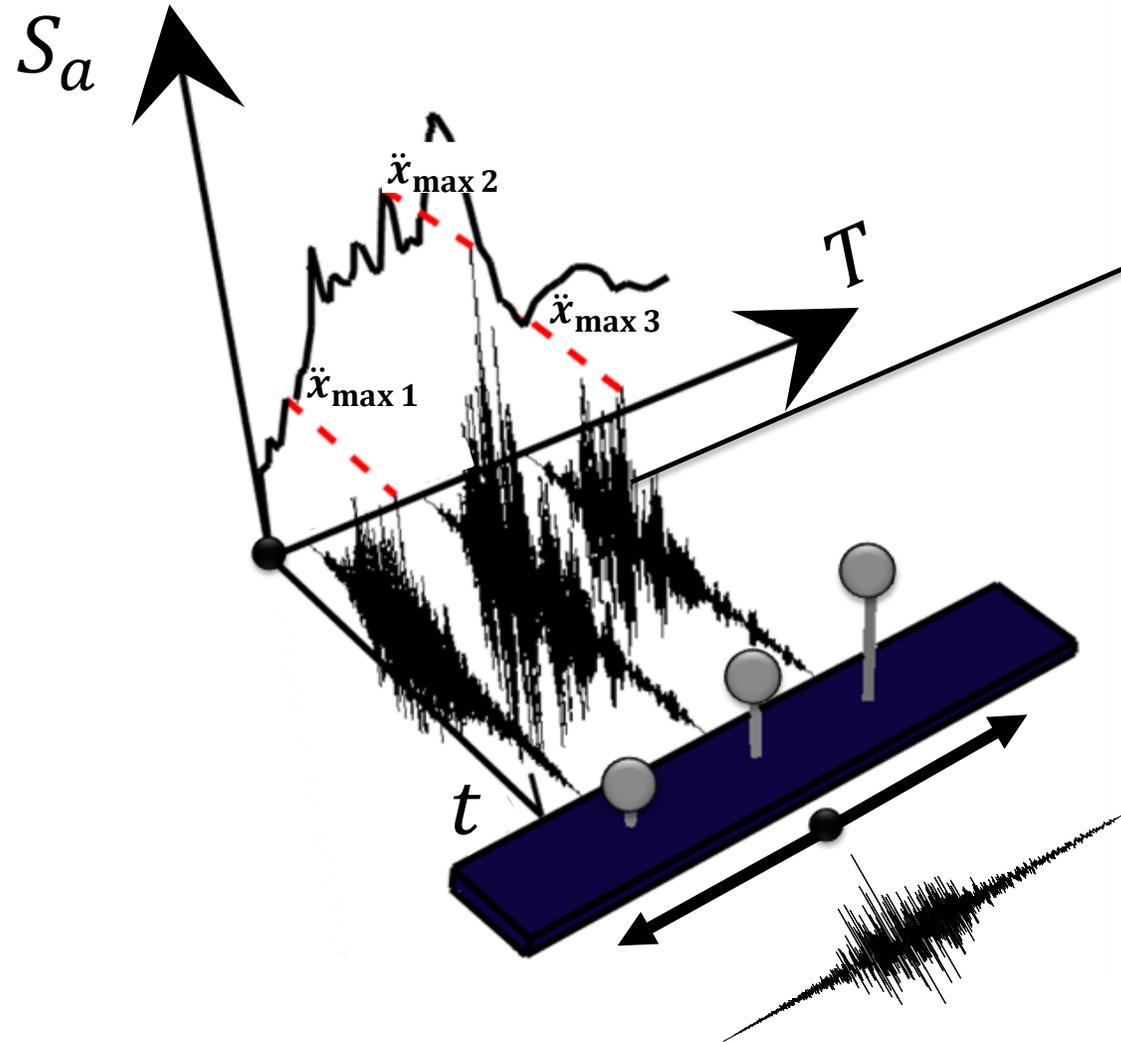
# HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

- **Espectro de energía o de Intensidad de Arias**
- **Razón espectral H/V**
- **Velocidad de ondas de corte equivalente,  $V_{s30-E}$**

# ESPECTRO DE RESPUESTA ELÁSTICA DE PSEUDO-ACELERACIÓN



# EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA DE LA RESPUESTA DE CADA OSCILADOR DE FRECUENCIA $\omega$ , $E_\omega$



$$E_\omega = \int_0^{Tt} [a(t)]^2 dt$$

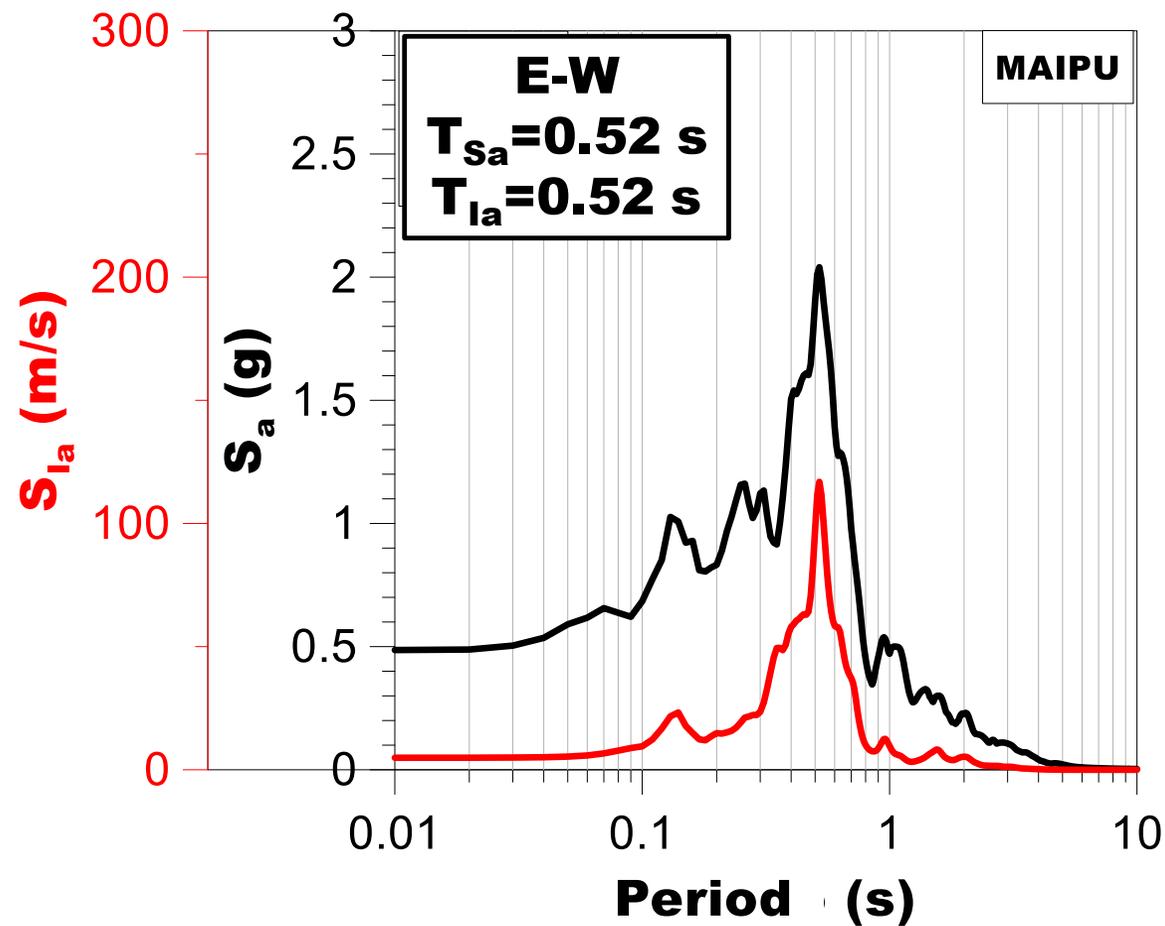
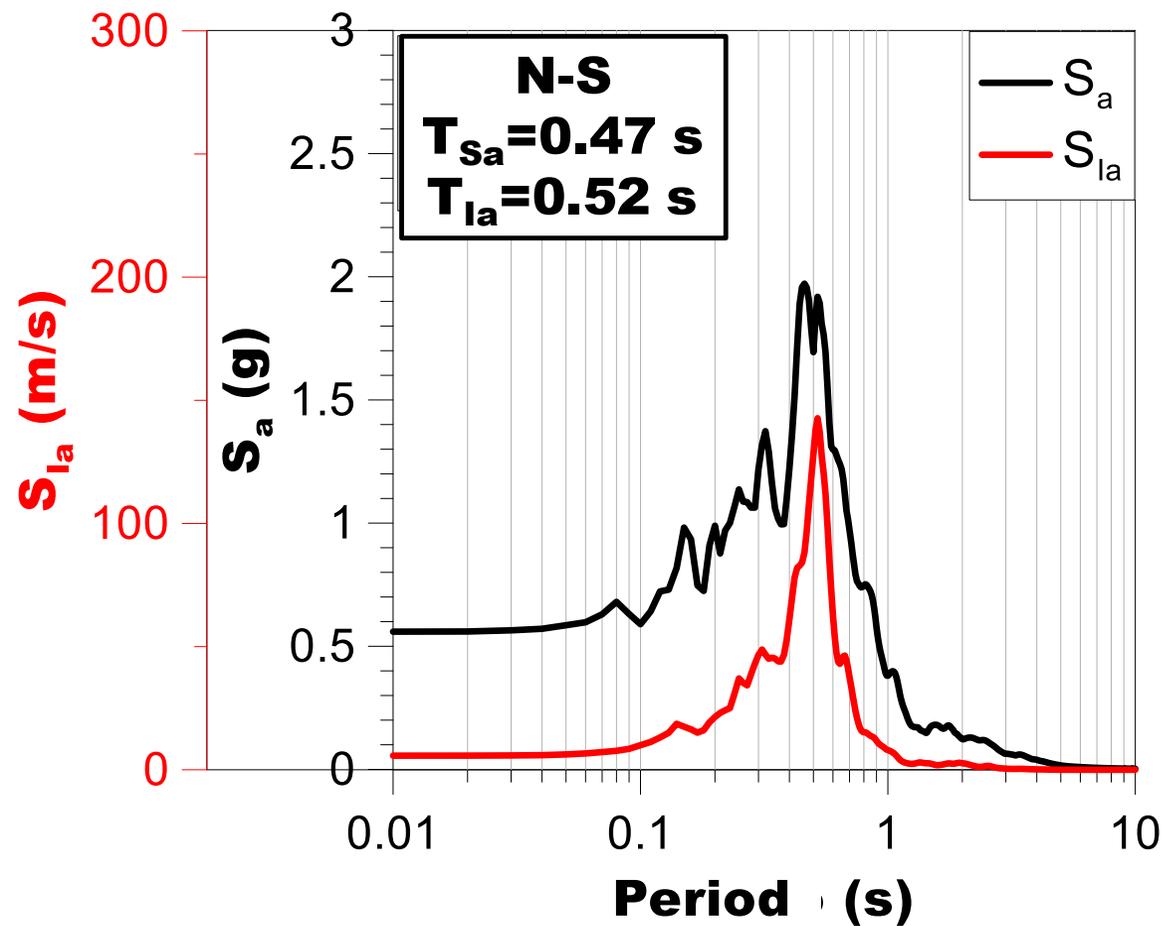
**BUT:**

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{Tt} [a(t)]^2 dt$$

$$E_\omega = \frac{2g}{\pi} I_A$$

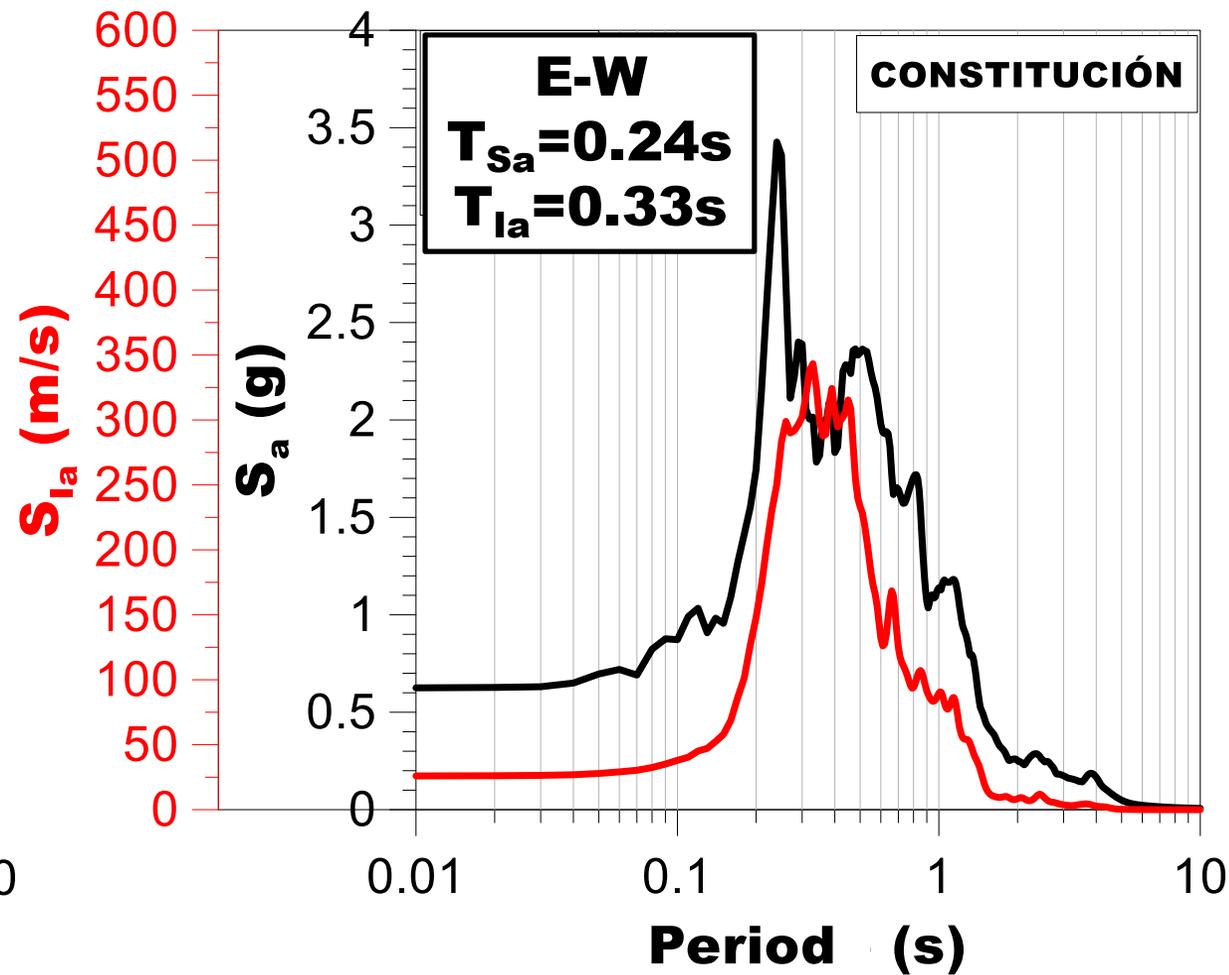
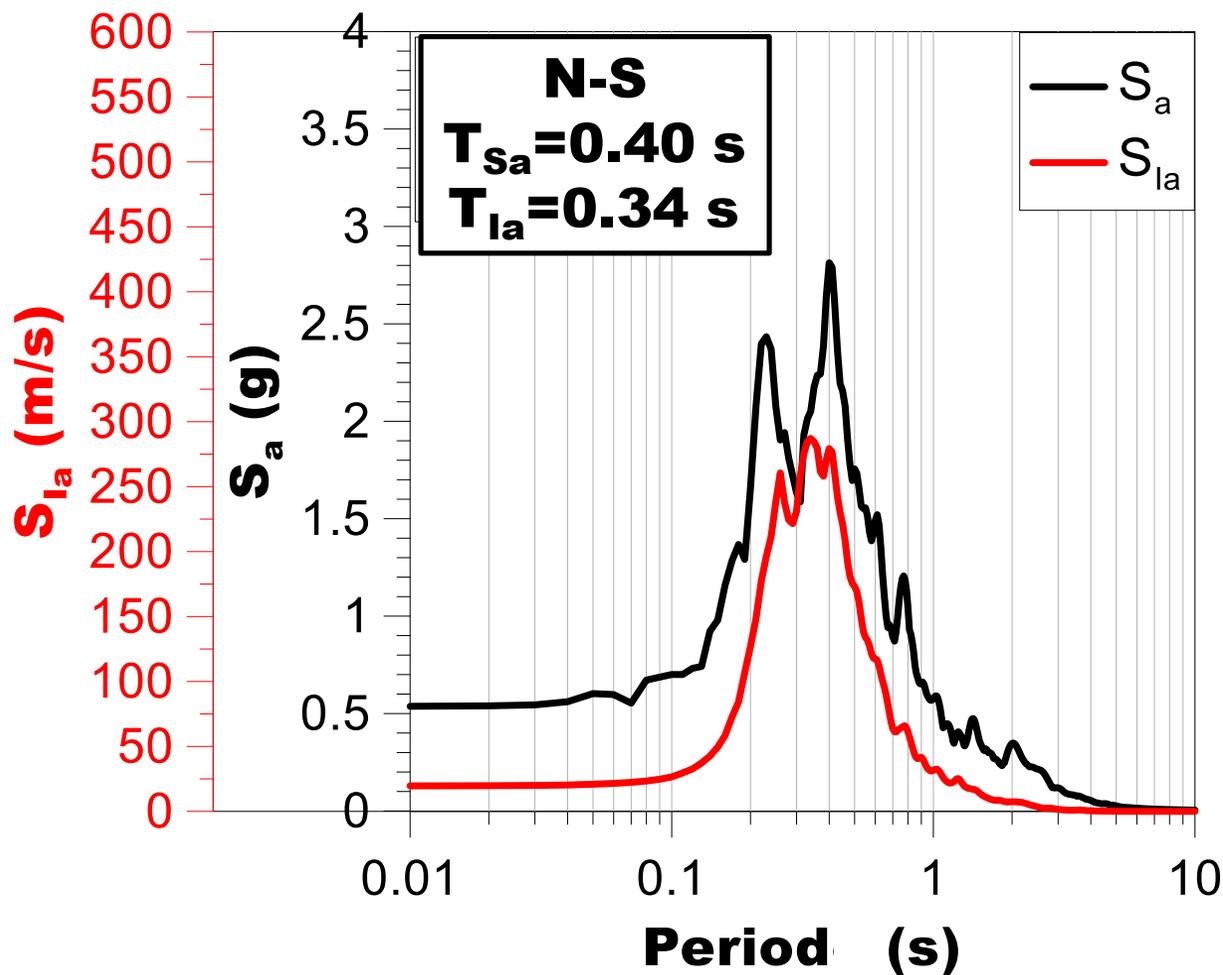
# ESPECTROS RESPUESTA ELÁSTICA DE PSEUDO-ACELERACIÓN Y ESPECTROS DE INTENSIDAD DE ARIAS

MAULE EARTHQUAKE 2010, Mw = 8.8

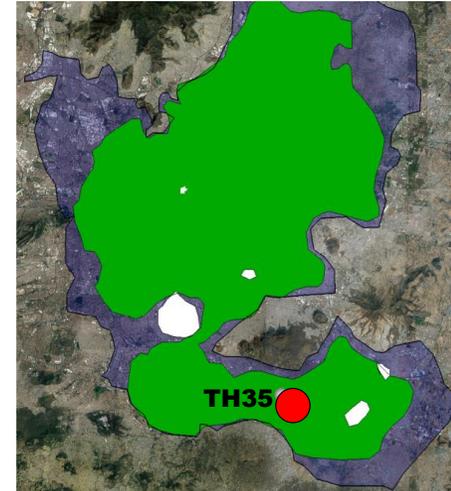
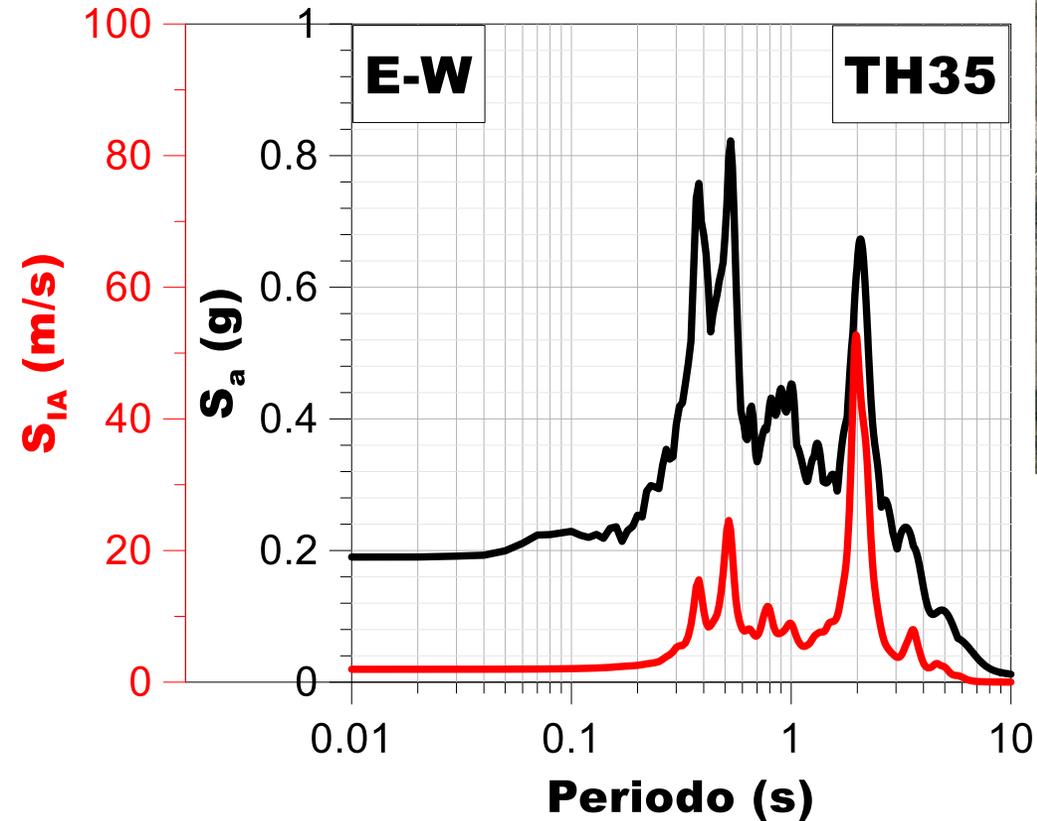
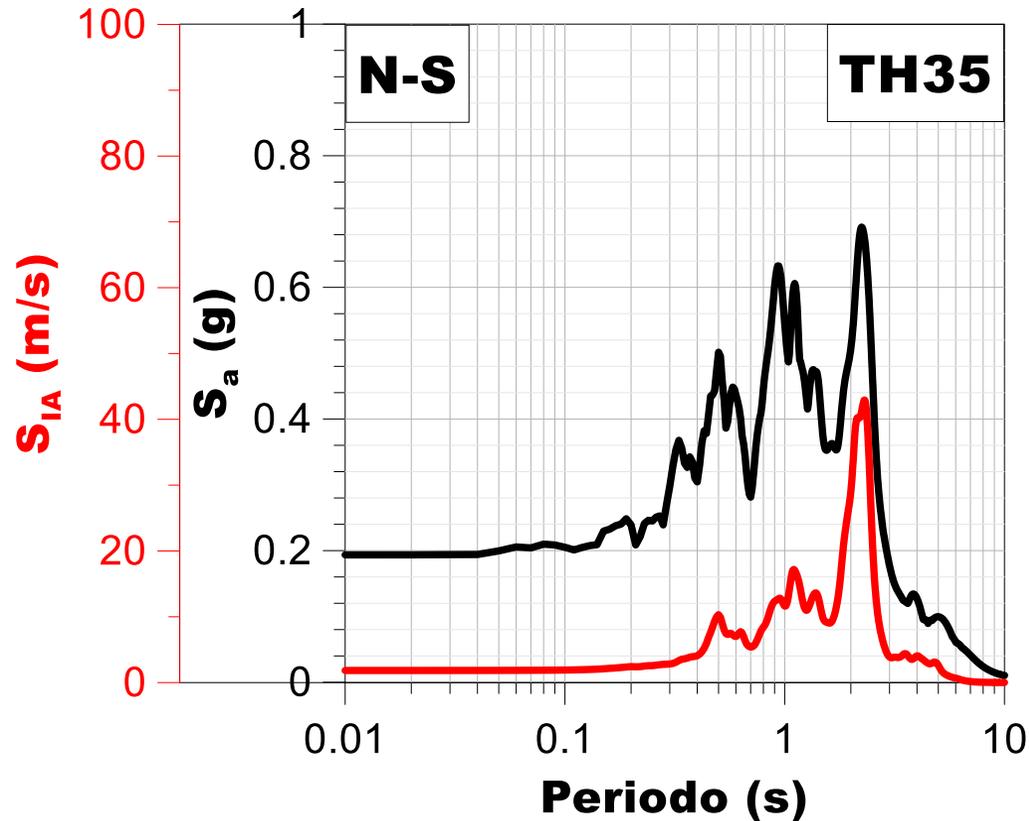


# ESPECTROS RESPUESTA ELÁSTICA DE PSEUDO-ACELERACIÓN Y ESPECTROS DE INTENSIDAD DE ARIAS

MAULE EARTHQUAKE 2010, Mw = 8.8

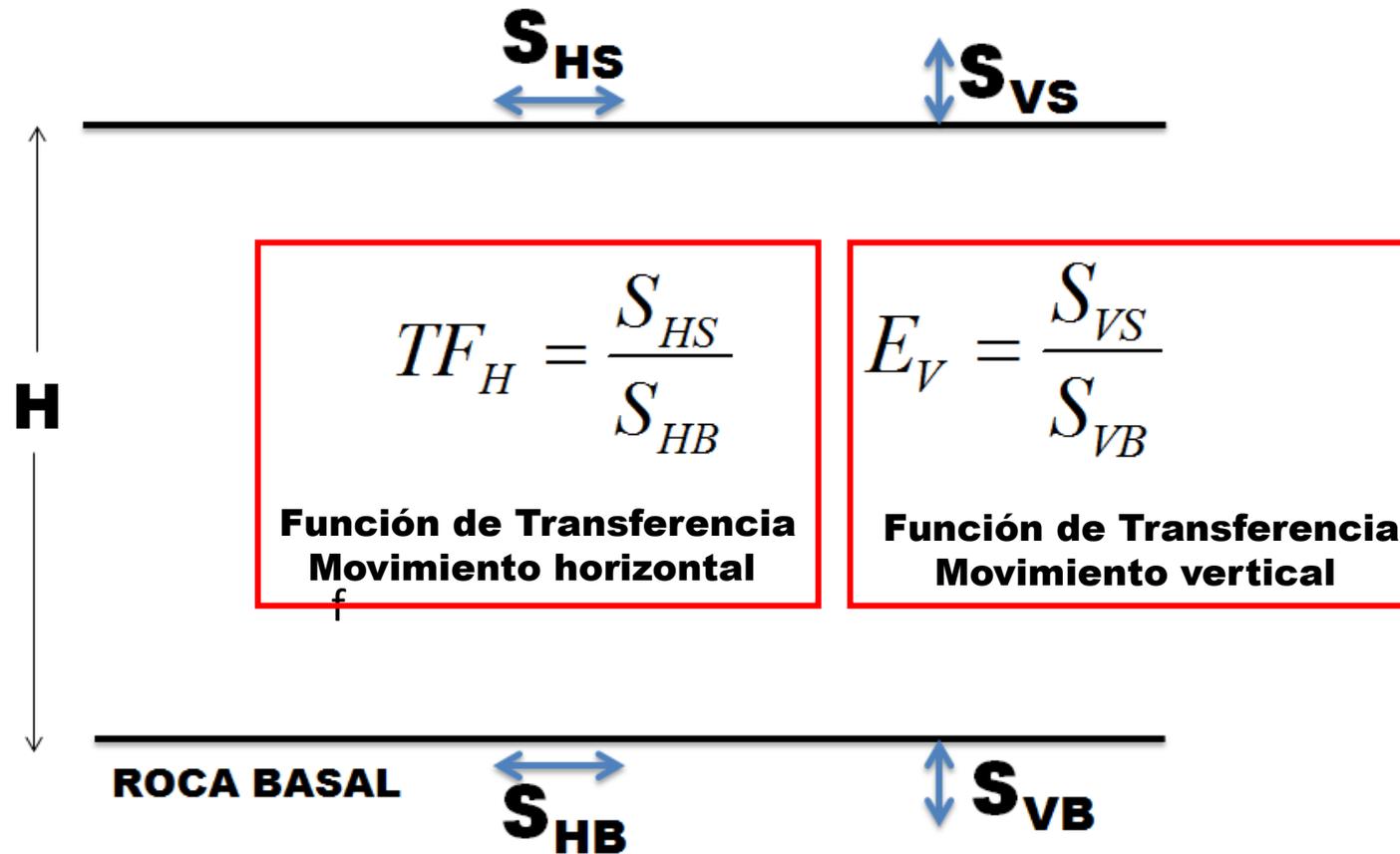


# ESPECTROS RESPUESTA ELÁSTICA DE PSEUDO-ACELERACIÓN Y ESPECTROS DE INTENSIDAD DE ARIAS



# PERIODO FUNDAMENTAL DE UN DEPÓSITO DE SUELOS RAZÓN ESPECTRAL H/V O MÉTODO DE NAKAMURA

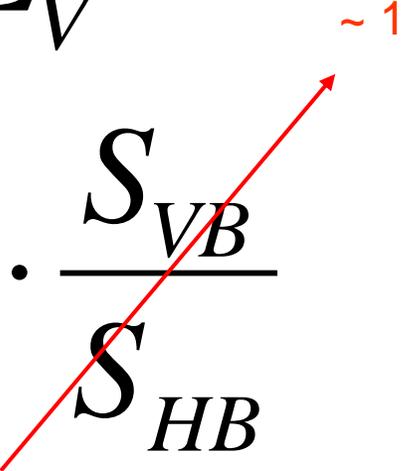
- Razón espectral H/V, método de Nakamura



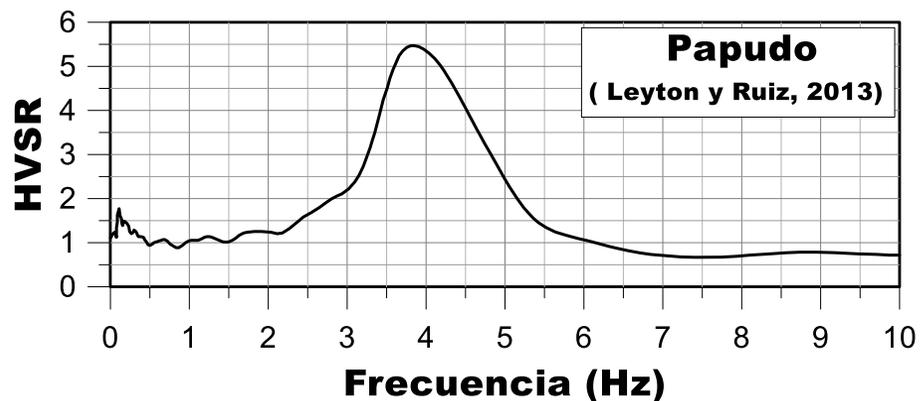
# RAZÓN ESPECTRAL H/V, O MÉTODO DE NAKAMURA

**FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ONDAS DE CORTE  
SUPERFICIE – BASE:**

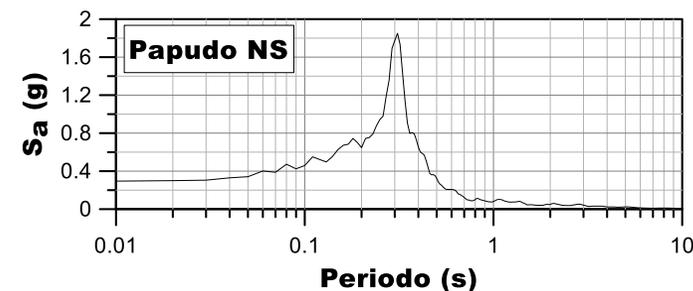
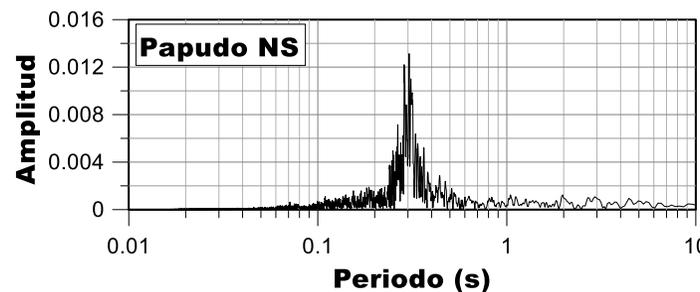
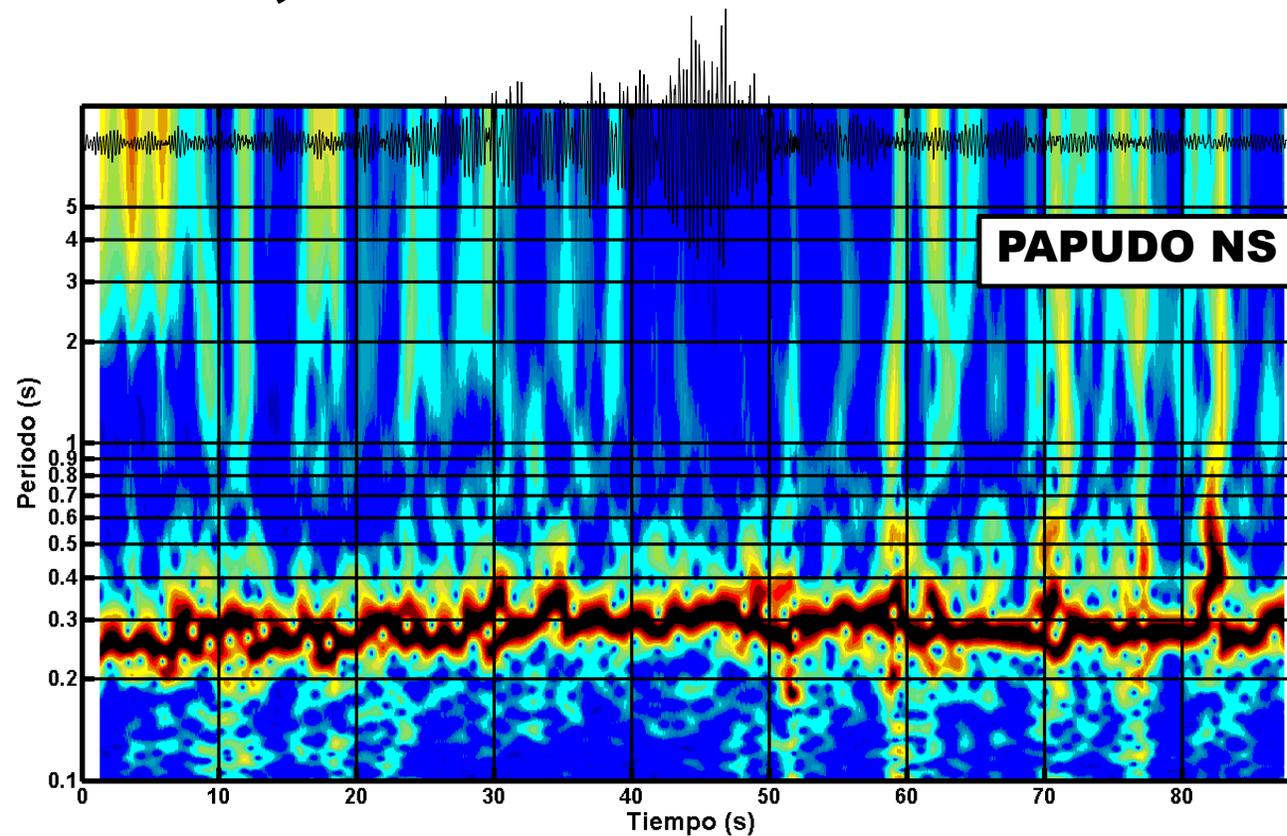
$$TF_{HW} = \frac{TF_H}{E_V}$$

$$TF_{HW} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \cdot \frac{S_{VB}}{S_{HB}}$$


# PERIODO PREDOMINANTE, RAZÓN ESPECTRAL H/V

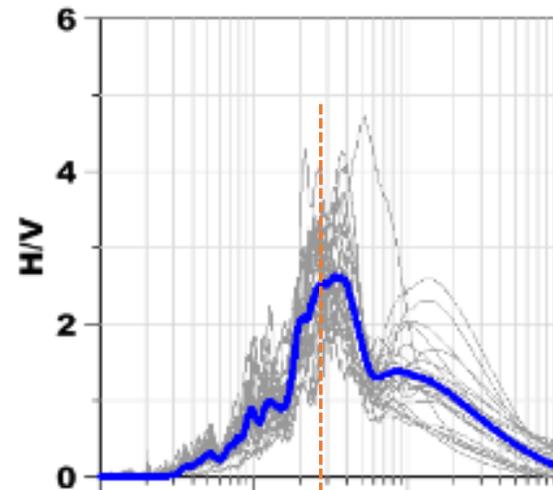
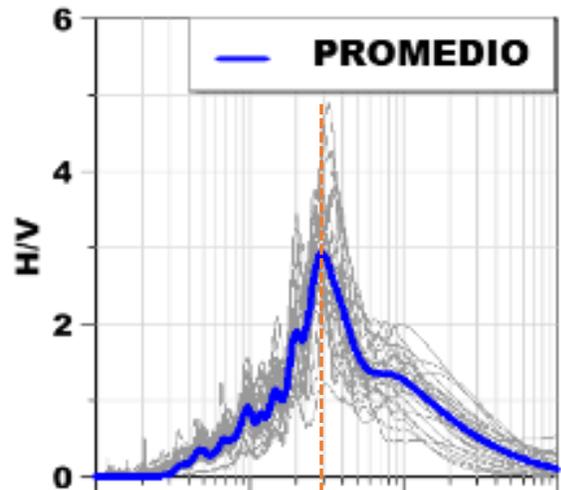


$$T = 1/3.9 = 0.26 \text{ seg}$$

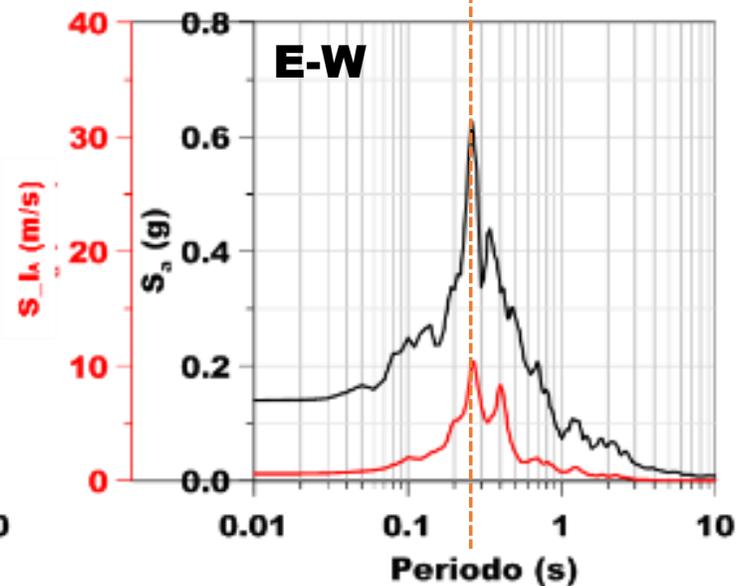
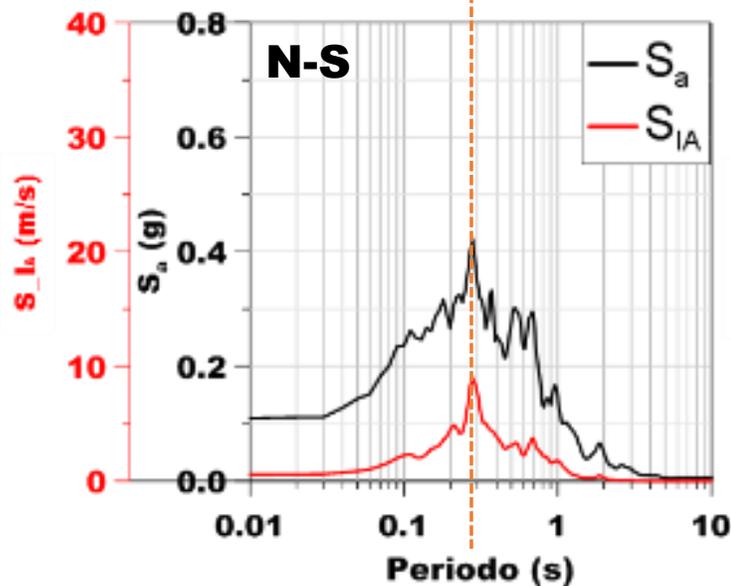


# MÉTODO DE RAZÓN ESPECTRAL H/V

**C330**

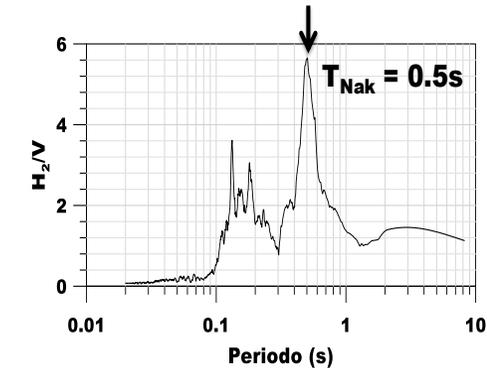
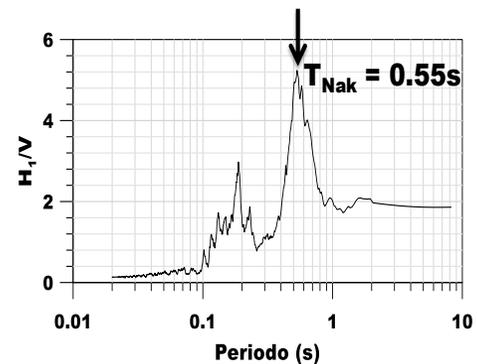
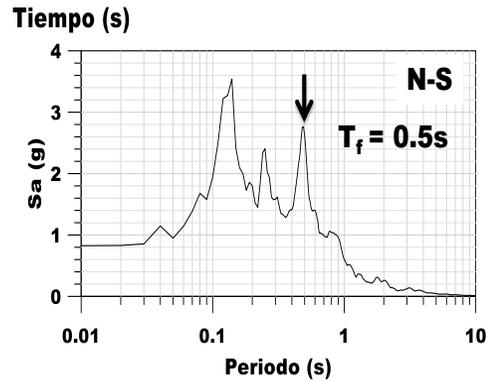
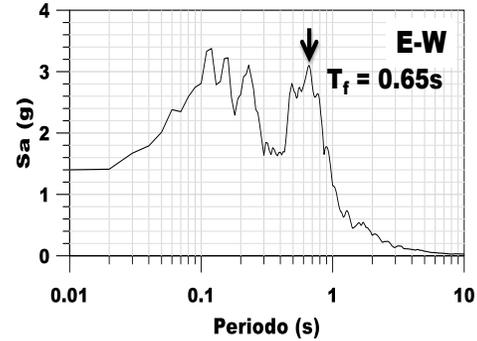
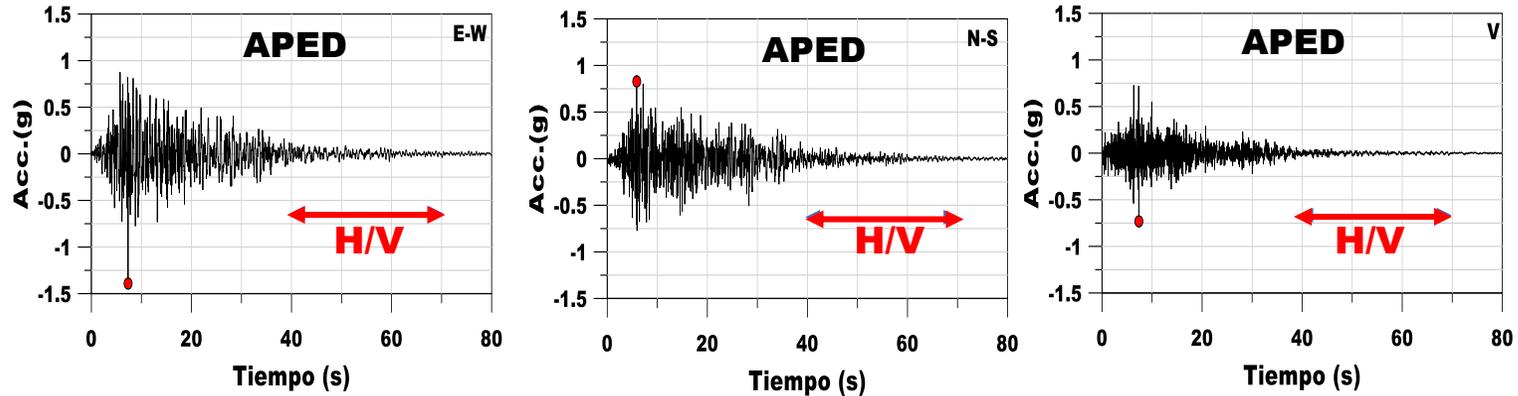


**EVENTOS  
SÍSMICOS  
MENORES**



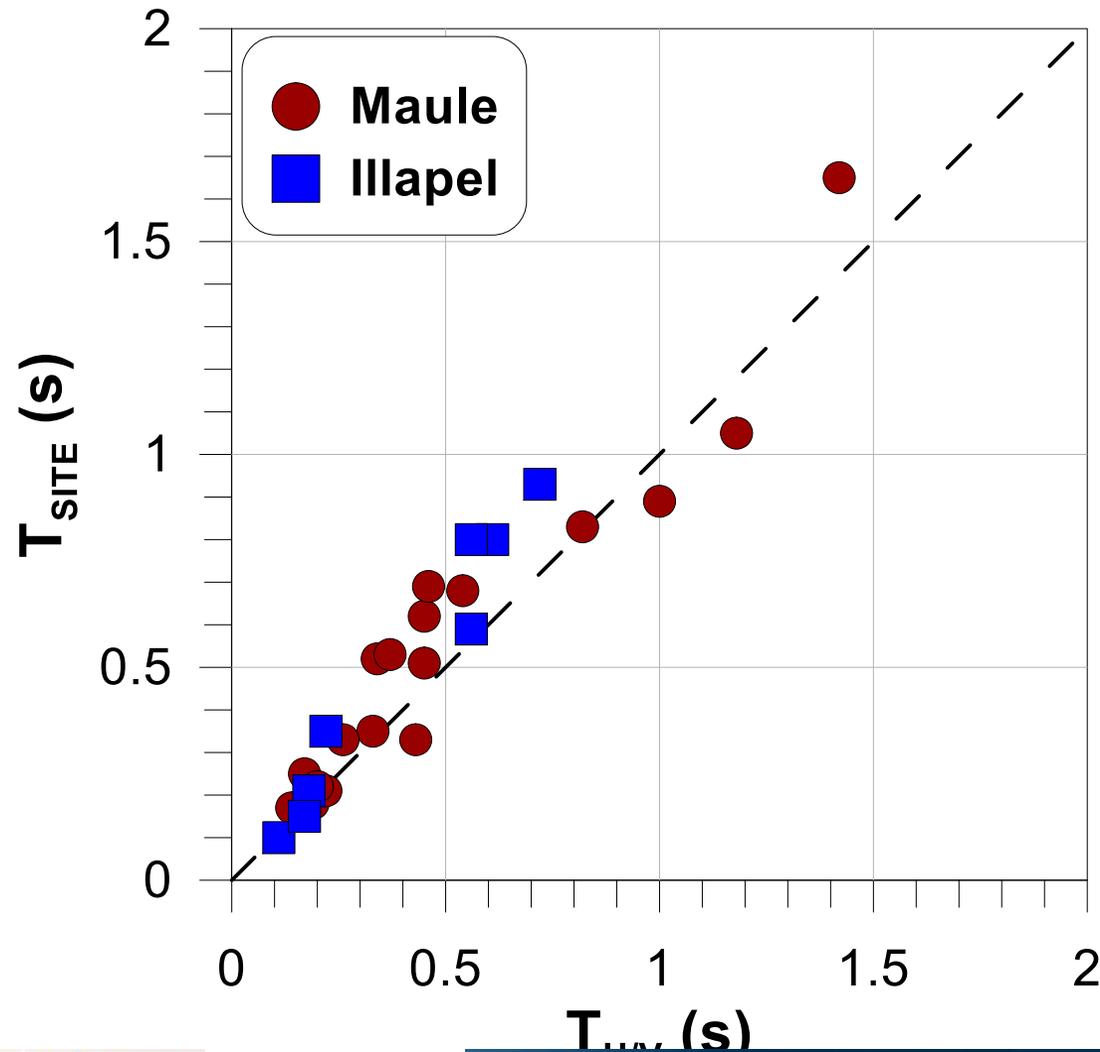
**TERREMOTO  
ILLAPEL  
Mw = 8.3**

# MÉTODO DE RAZÓN ESPECTRAL H/V



**Terremoto de Muisne  
Ecuador  
2016  
 $M_w = 7.8$**

# PERIODO FUNDAMENTAL DEL SITIO OBTENIDO DE ESPECTROS DE RESPUESTA Y RAZÓN ESPECTRAL H/V

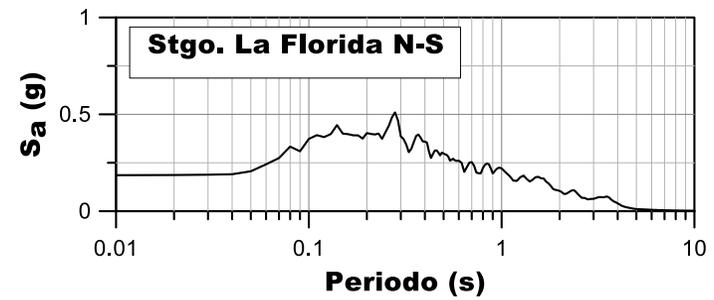
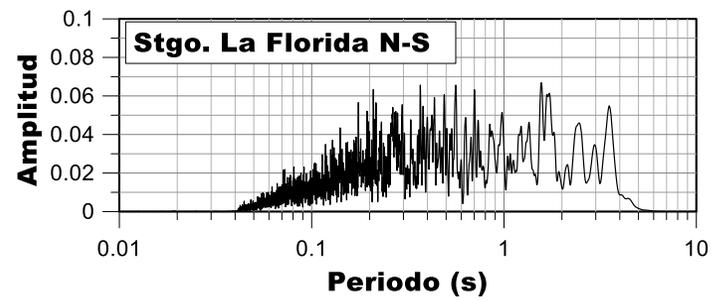
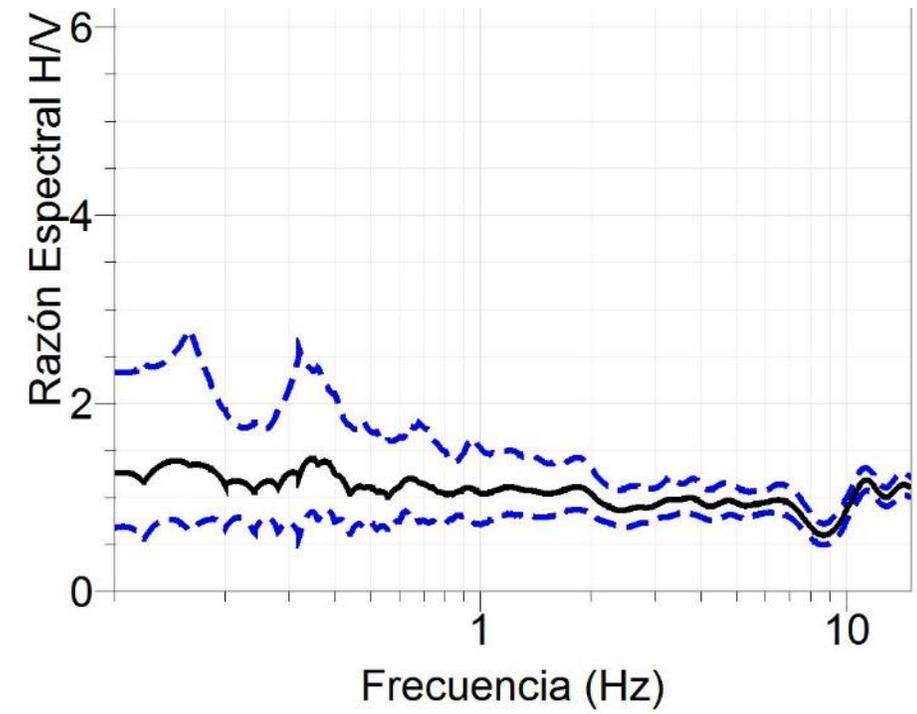
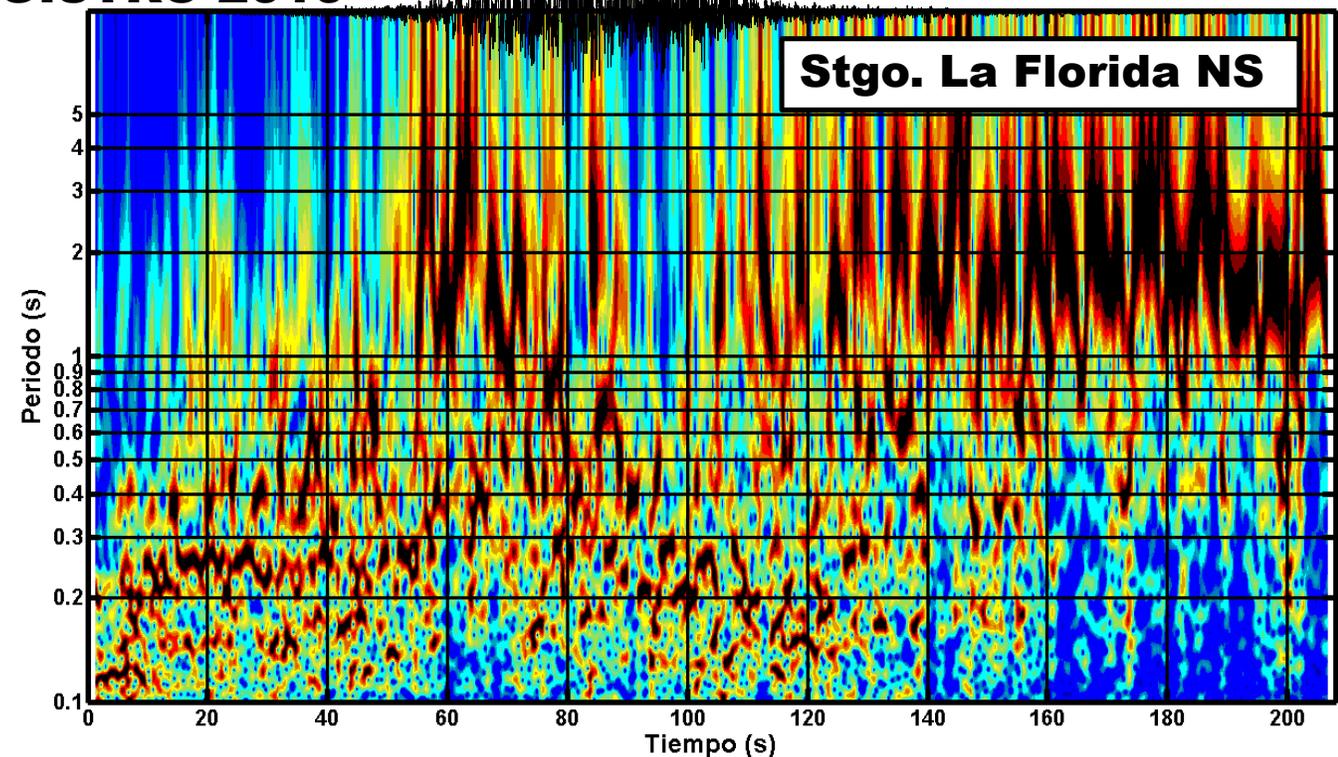


**Terremoto del Maule  
Mw = 8.8. Chile, 2010**

**Terremoto de Illapel  
Mw = 8.3. Chile, 2015**

# RAZÓN ESPECTRAL H/V EN SUELO DE ALTA RIGIDEZ

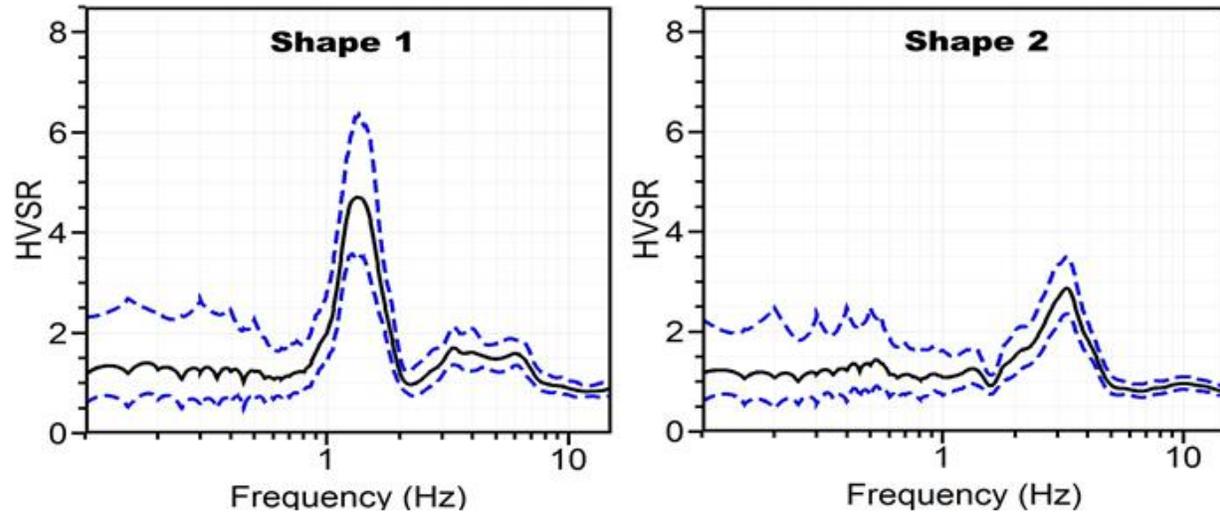
REGISTRO 2010



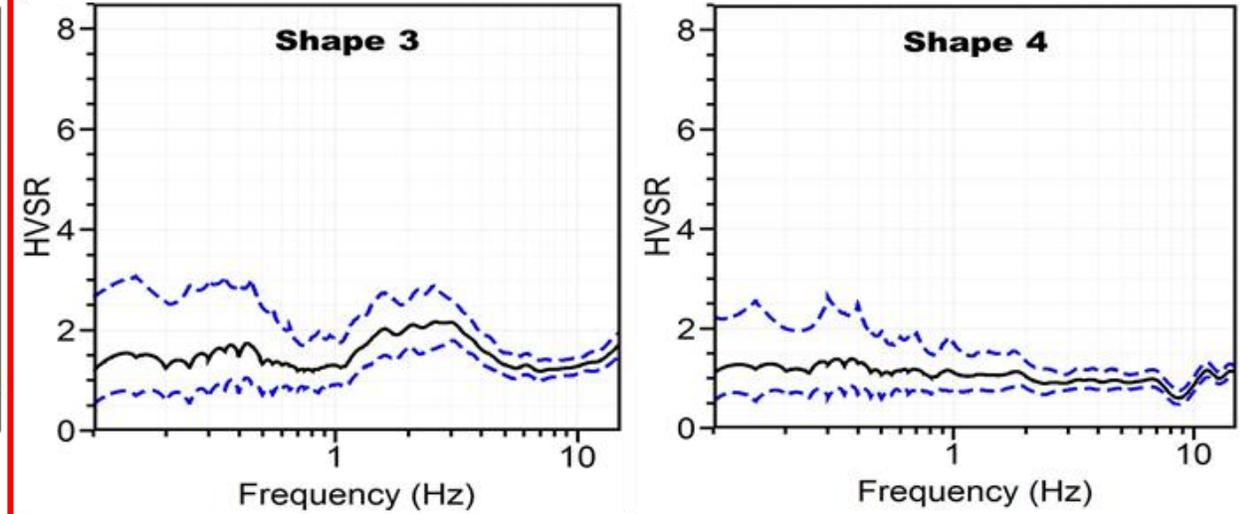
## RAZÓN ESPECTRAL H/V

# CURVAS TÍPICAS DE RAZÓN ESPECTRAL H/V

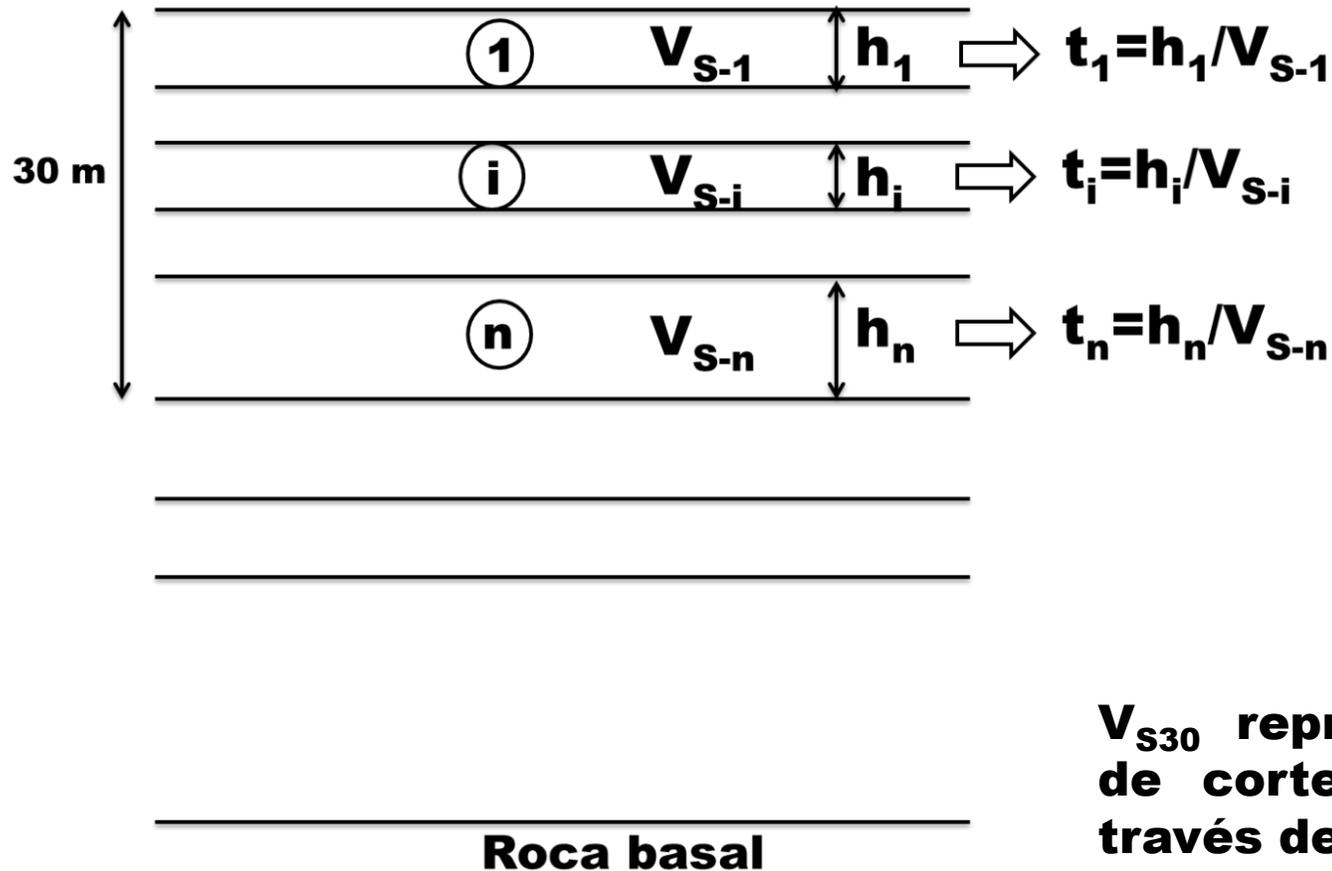
## DEPÓSITO DE SUELOS BLANDOS



## DEPÓSITO DE SUELOS DUROS



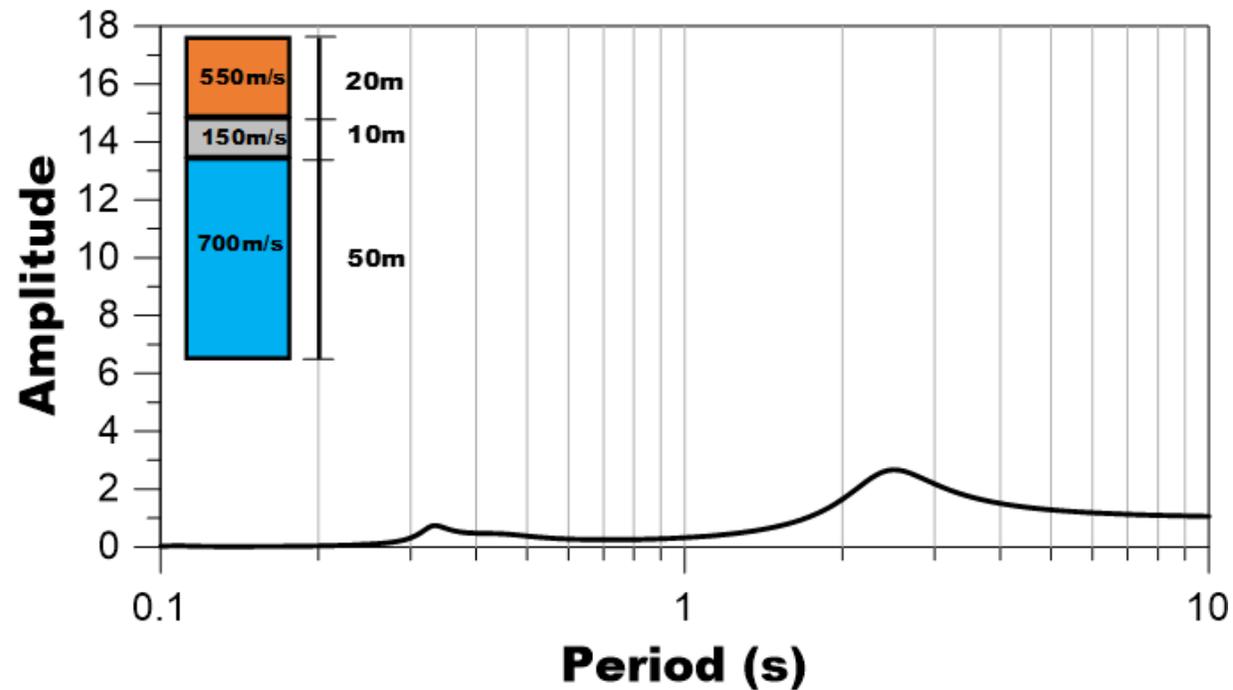
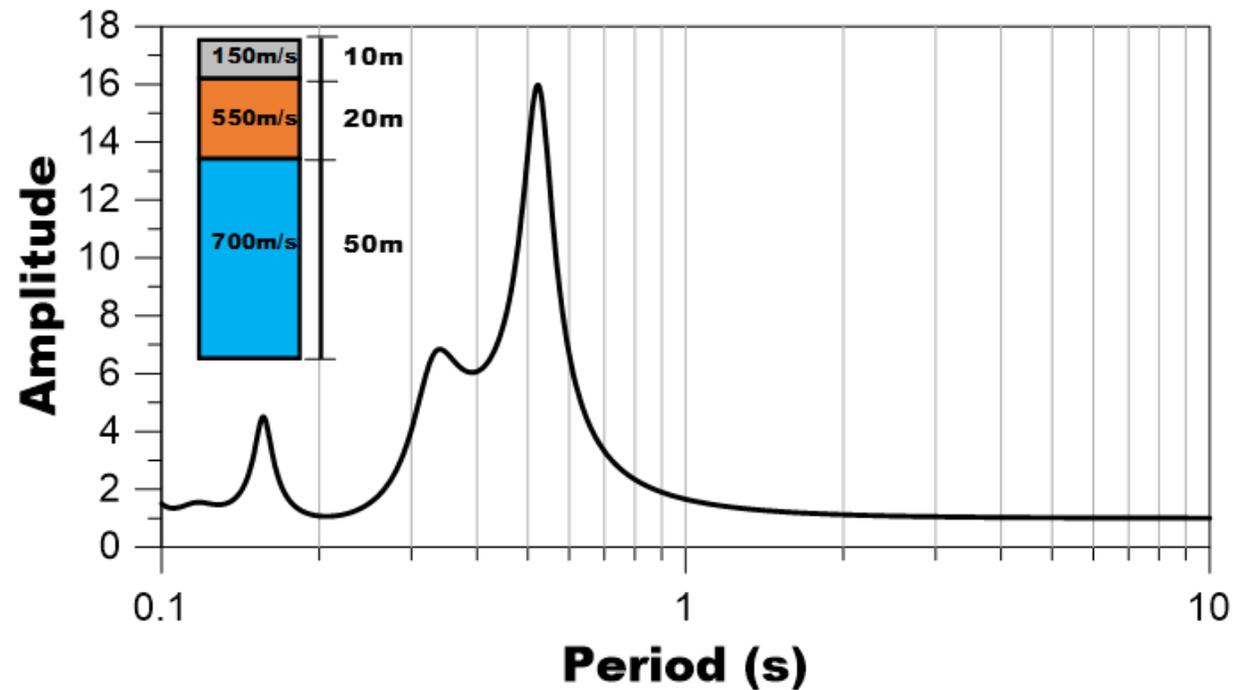
# VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE DE LOS 30 m SUPERIORES DEL TERRENO: $V_{S30}$



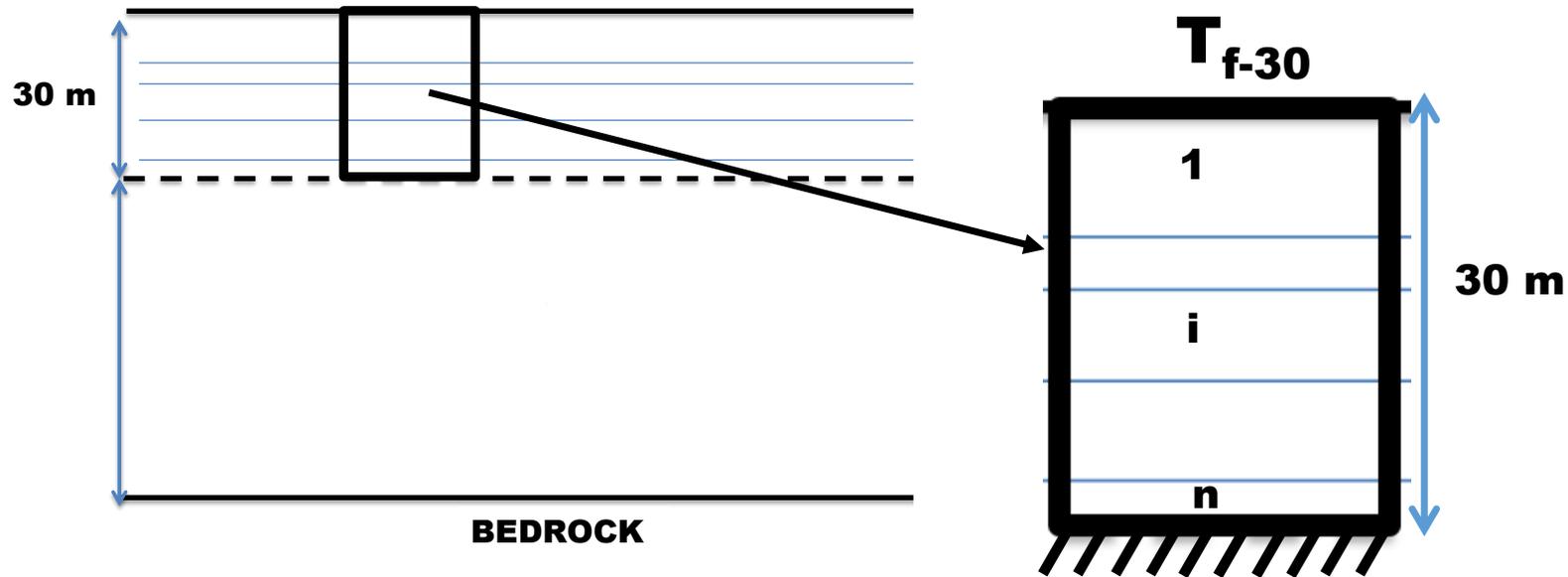
$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}}$$

$V_{S30}$  reproduce el tiempo de viaje de las ondas de corte que se propagan verticalmente a través de los 30 m superiores del terreno

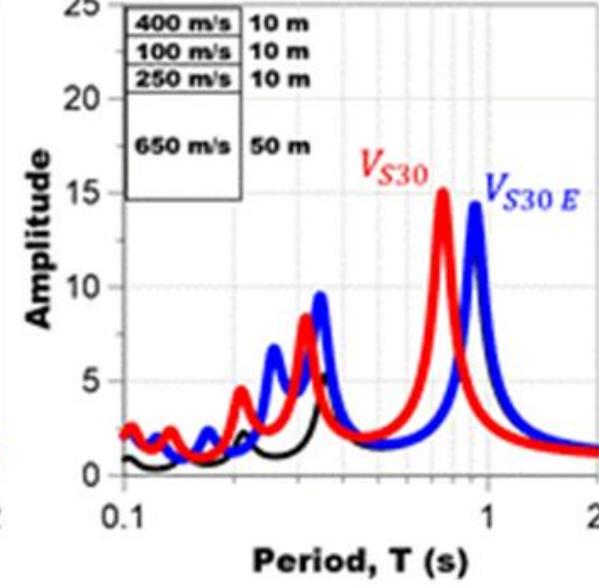
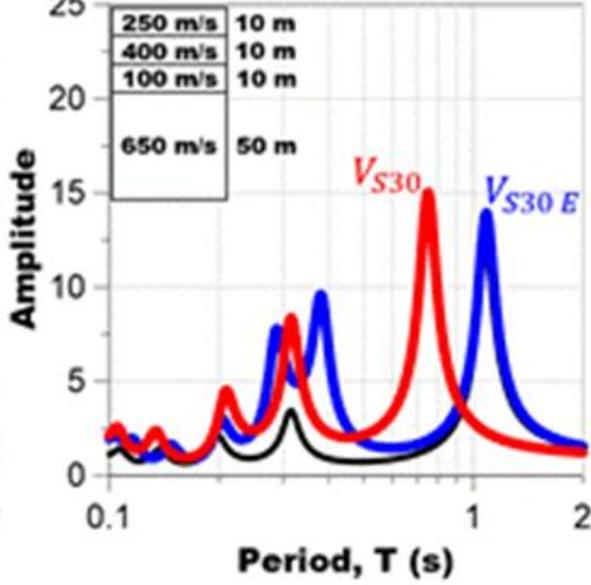
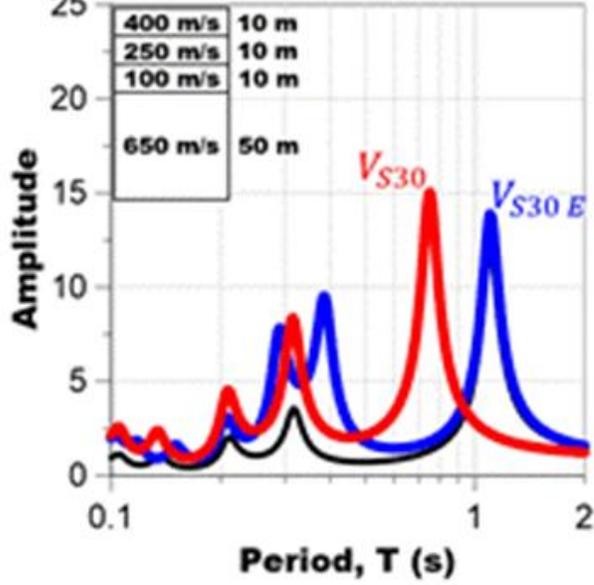
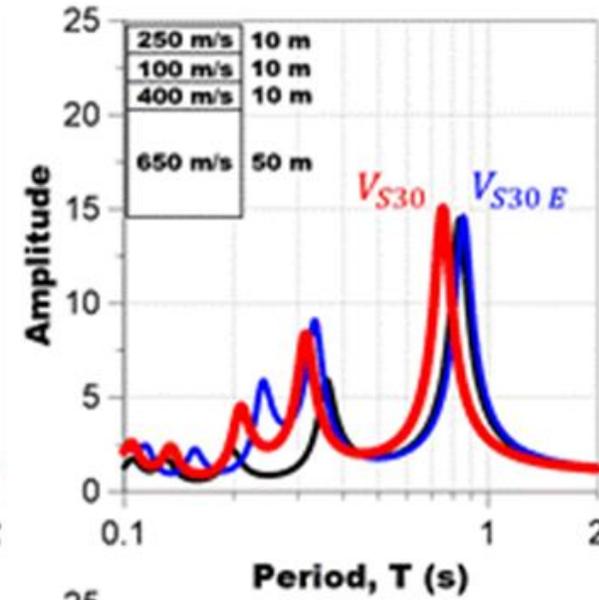
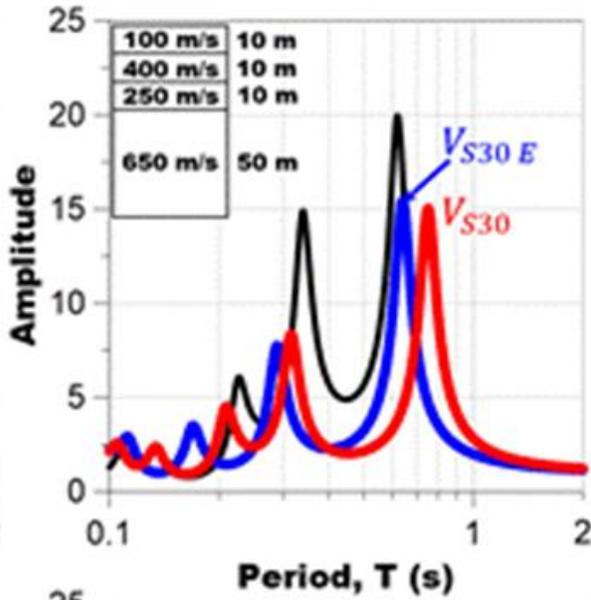
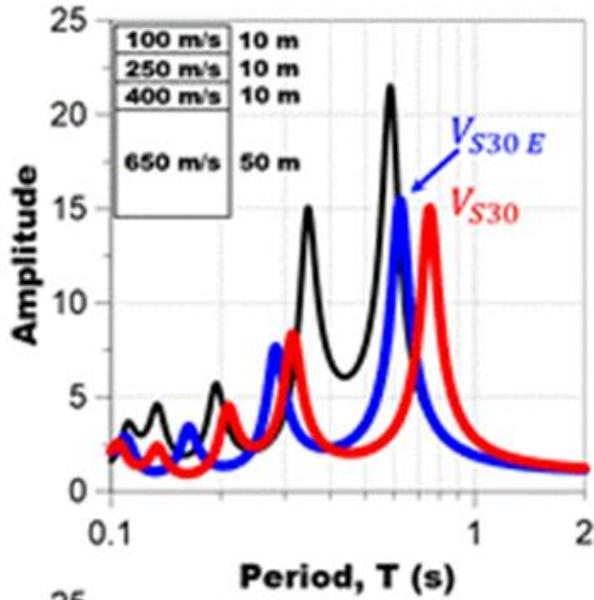
# LIMITACIÓN DE $V_{s30}$ NO CONSIDERA LA SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA



# VELOCIDAD $V_{S30-E}$ : REPRODUCE RIGIDEZ DE LOS 30 m SUPERIORES DEL TERRENO



$$\mathbf{1-D\ analysis} \longrightarrow \mathbf{T_{F-30}} \longrightarrow V_{S30-E} = \frac{120}{T_{f-30}}$$



| Secuencia de estratos superiores | $T_{F-30}$ (s) | $V_{S30-E}$ (m/s) |
|----------------------------------|----------------|-------------------|
| 100-250-400                      | 0.50           | 242               |
| 100-400-250                      | 0.52           | 232               |
| 250-100-400                      | 0.78           | 154               |
| 250-400-100                      | 1.03           | 116               |
| 400-100-250                      | 0.85           | 140               |
| 400-250-100                      | 1.05           | 114               |

# **CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SITIO Y ESPECTROS DE DISEÑO**

# PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

## PROPIEDADES DE ESTADO

- Densidad
- Densidad Relativa
- Grado de Compactación

## PARÁMETROS DE RESISTENCIA (grandes deformaciones)

- Índice de Penetración Estándar (N-SPT)
- Resistencia Compresión Simple
- Resistencia No-Drenada

---

## PARÁMETROS DE RIGIDEZ (pequeñas deformaciones)

- Velocidad de propagación de ondas de corte

## PARÁMETROS DE VIBRACIÓN

- Periodo fundamental de vibración

# PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

## **PROPIEDADES DE ESTADO**

- Densidad
- Densidad Relativa
- Grado de Compactación

## **PARÁMETROS DE RESISTENCIA (grandes deformaciones)**

- Índice de Penetración Estandar (N-SPT)
- Resistencia Compresión Simple
- Resistencia No-Drenada

---

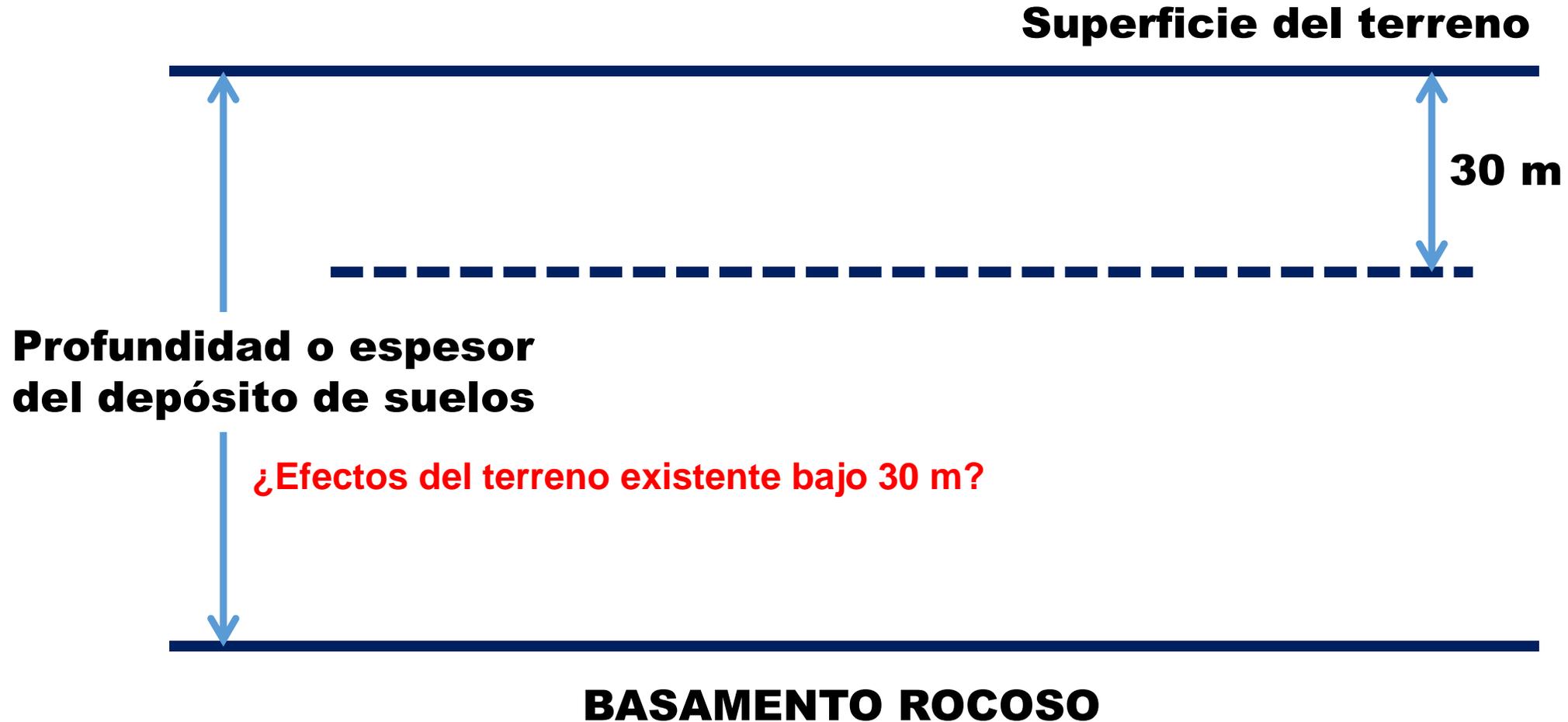
## **PARÁMETROS DE RIGIDEZ (pequeñas deformaciones)**

- Velocidad de propagación de ondas de corte

## **PARÁMETROS DE VIBRACIÓN**

- Periodo fundamental de vibración

# CLASIFICACIÓN SÍSMICA DEL TERRENO BASADA EN PROPIEDADES DE LOS 30 m SUPERIORES



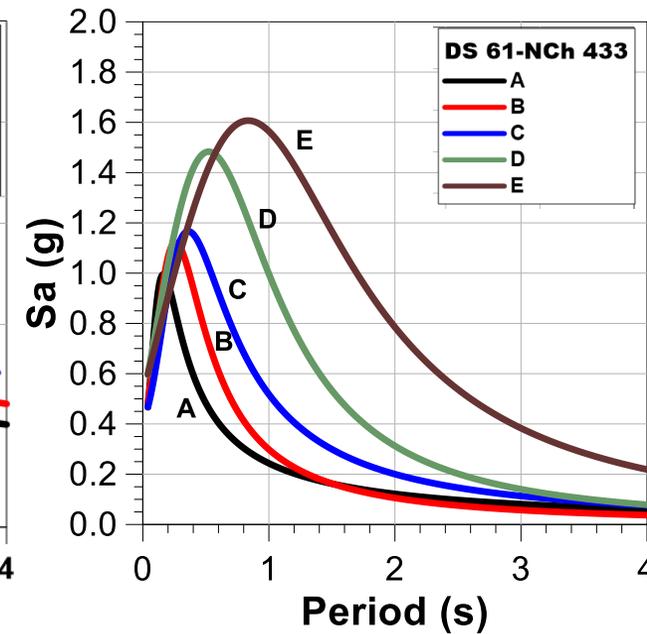
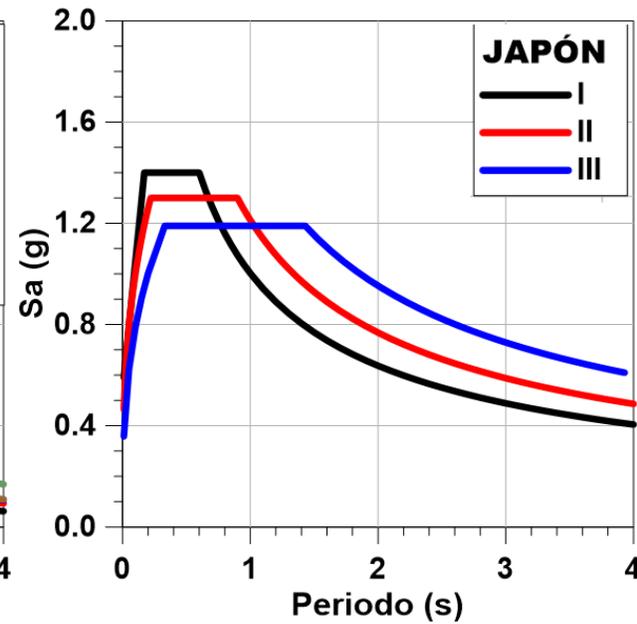
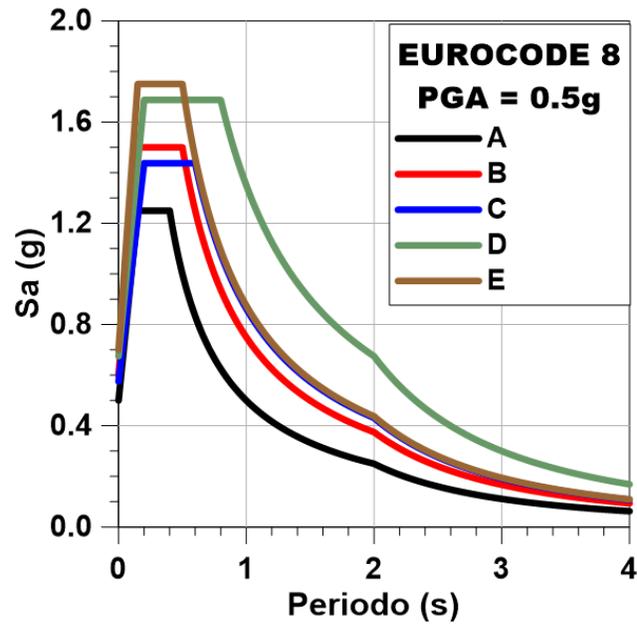
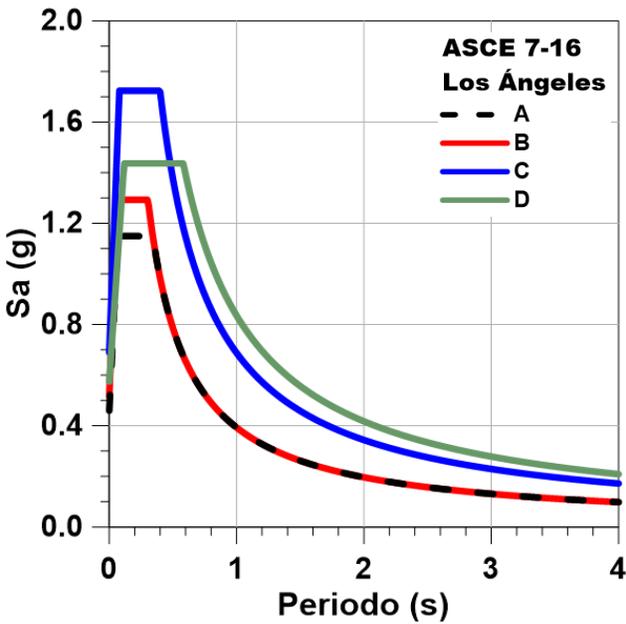
# CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SUELOS PROPUESTA EN CHILE

| Sitio Tipo |   | $V_{s30}$<br>(m/s) | $T_g$<br>(s)              |
|------------|---|--------------------|---------------------------|
| A          | Roca, suelo cementado                                 | $\geq 900$         | $< 0.15$<br>(o H/V plano) |
| B          | Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme | $\geq 500$         | $< 0.30$<br>(o H/V plano) |
| C          | Suelo denso o firme                                   | $\geq 350$         | $< 0.40$<br>(o H/V plano) |
| D          | Suelo medianamente denso, o firme                     | $\geq 180$         | $< 1.00$                  |
| E          | Suelo de compacidad, o consistencia mediana           | $< 180$            |                           |

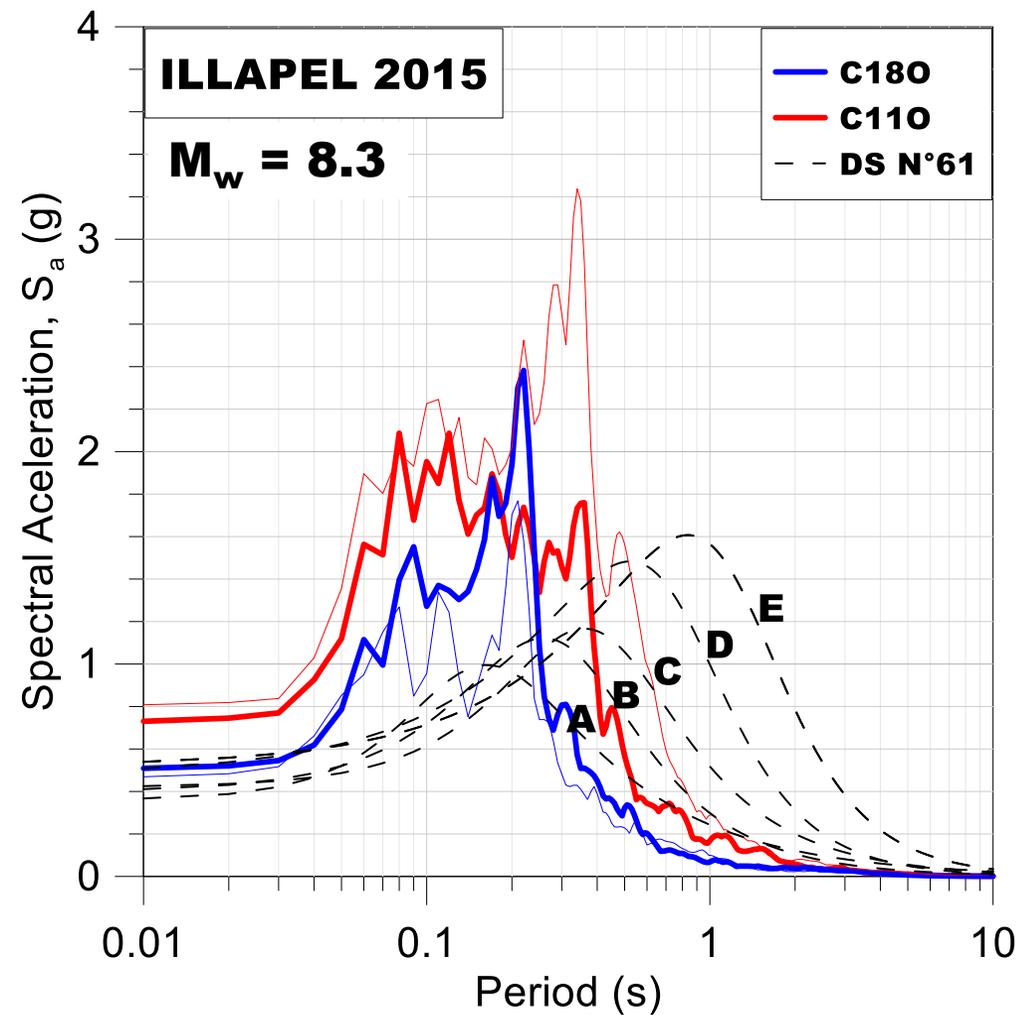
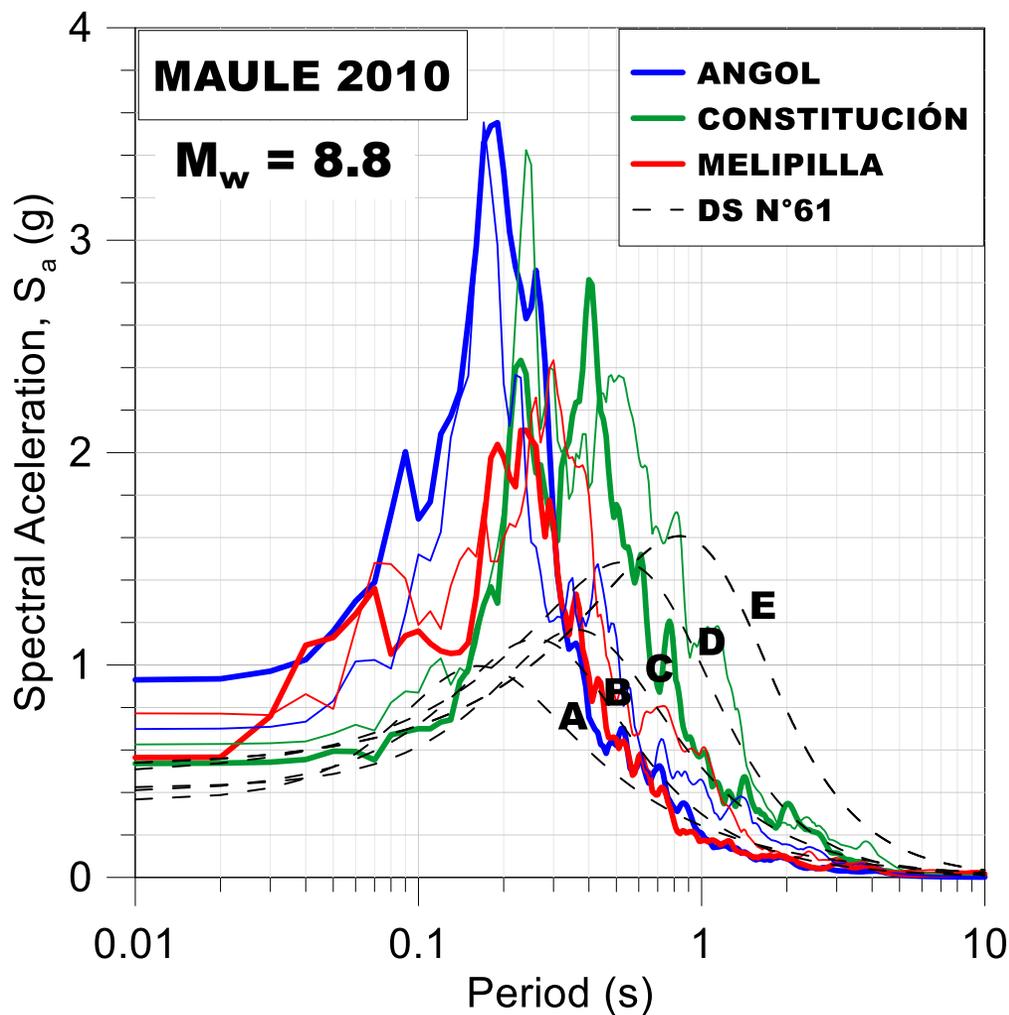
**Si no se cumple el periodo  $T_g$ , se debe degradar la clasificación en un grado**

# **ESPECTROS ELÁSTICOS DE PSEUDO-ACELERACIÓN DE NORMA Y OBTENIDO DE MEDICIONES INSTRUMENTALES**

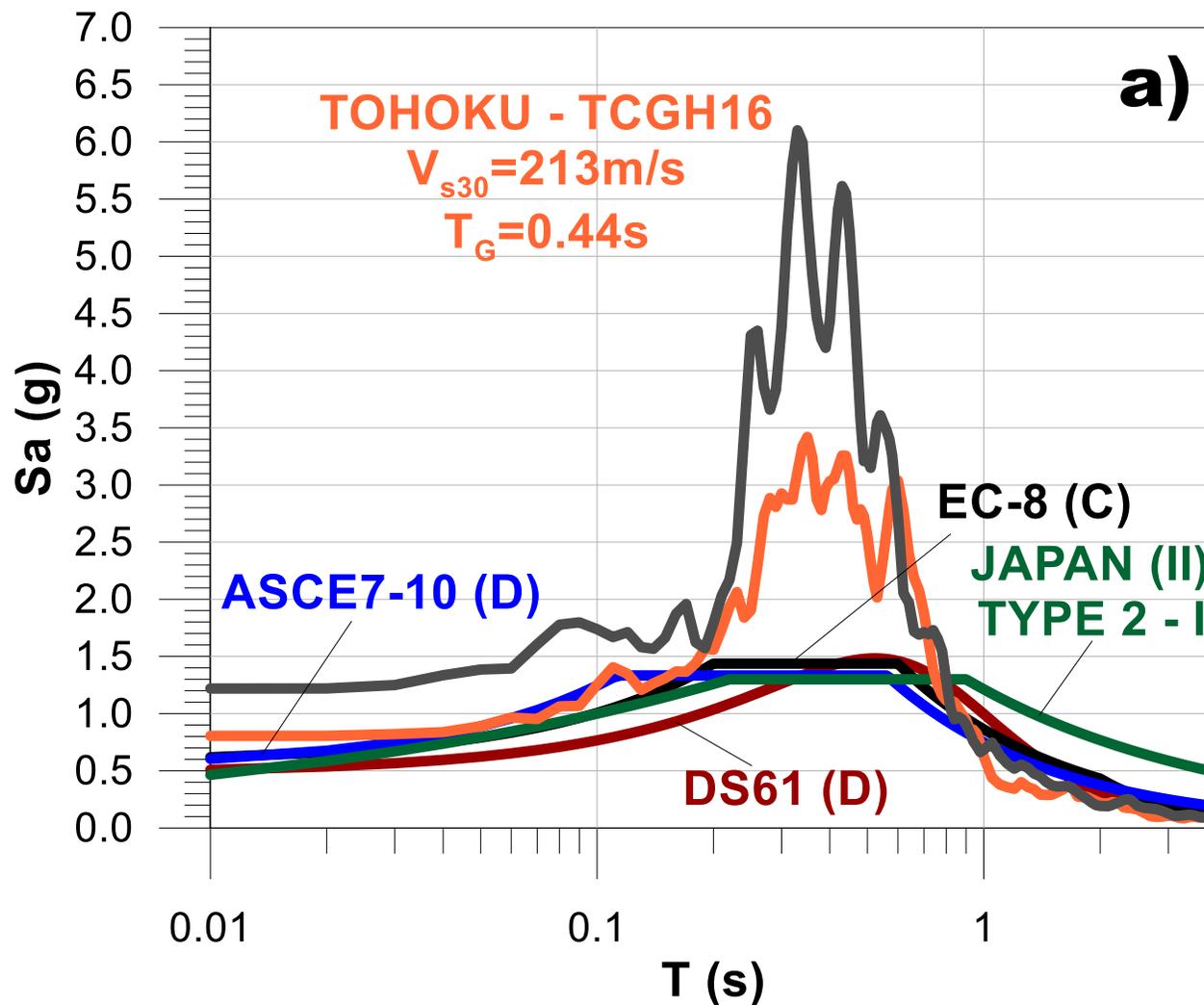
# ESPECTROS ELÁSTICOS DE PSEUDO-ACELERACIÓN PARA DISEÑO



# ESPECTROS ELÁSTICOS DE PSEUDO-ACELERACIÓN DE NORMA CHILENA DS61 E “INSTRUMENTALES”



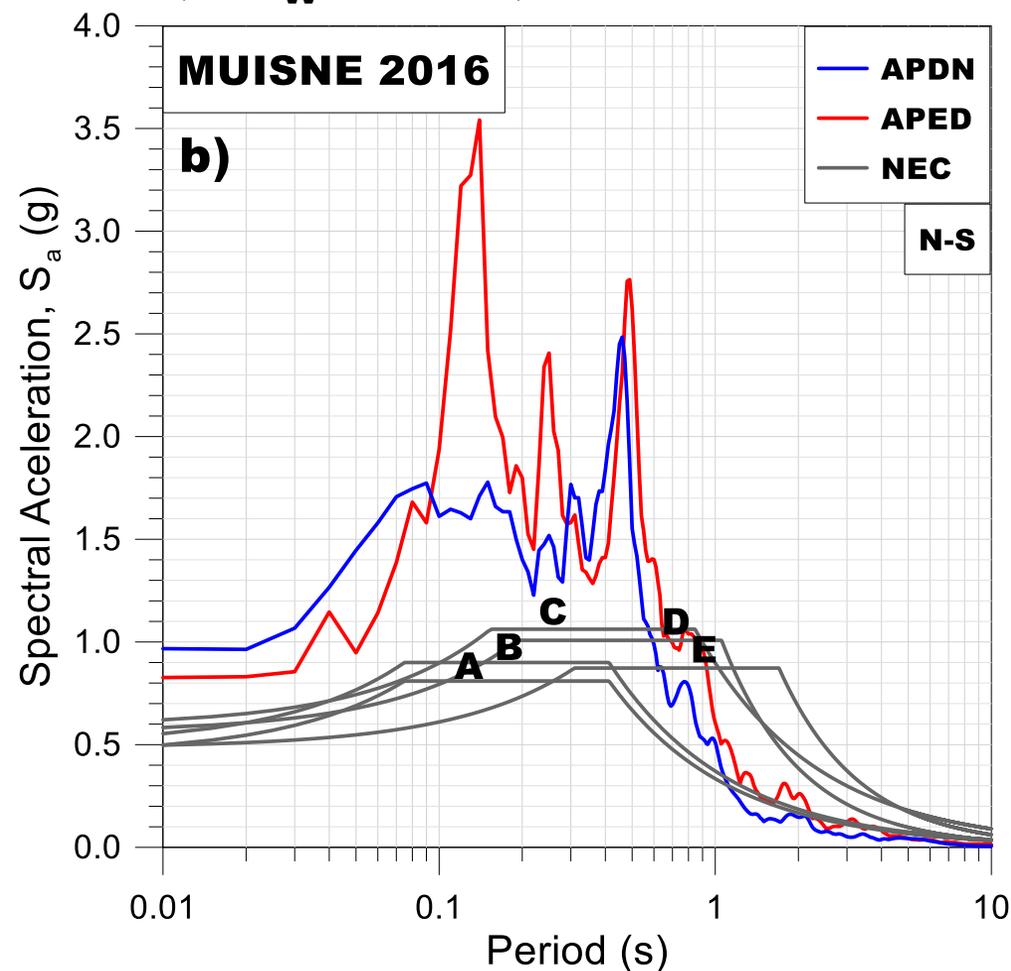
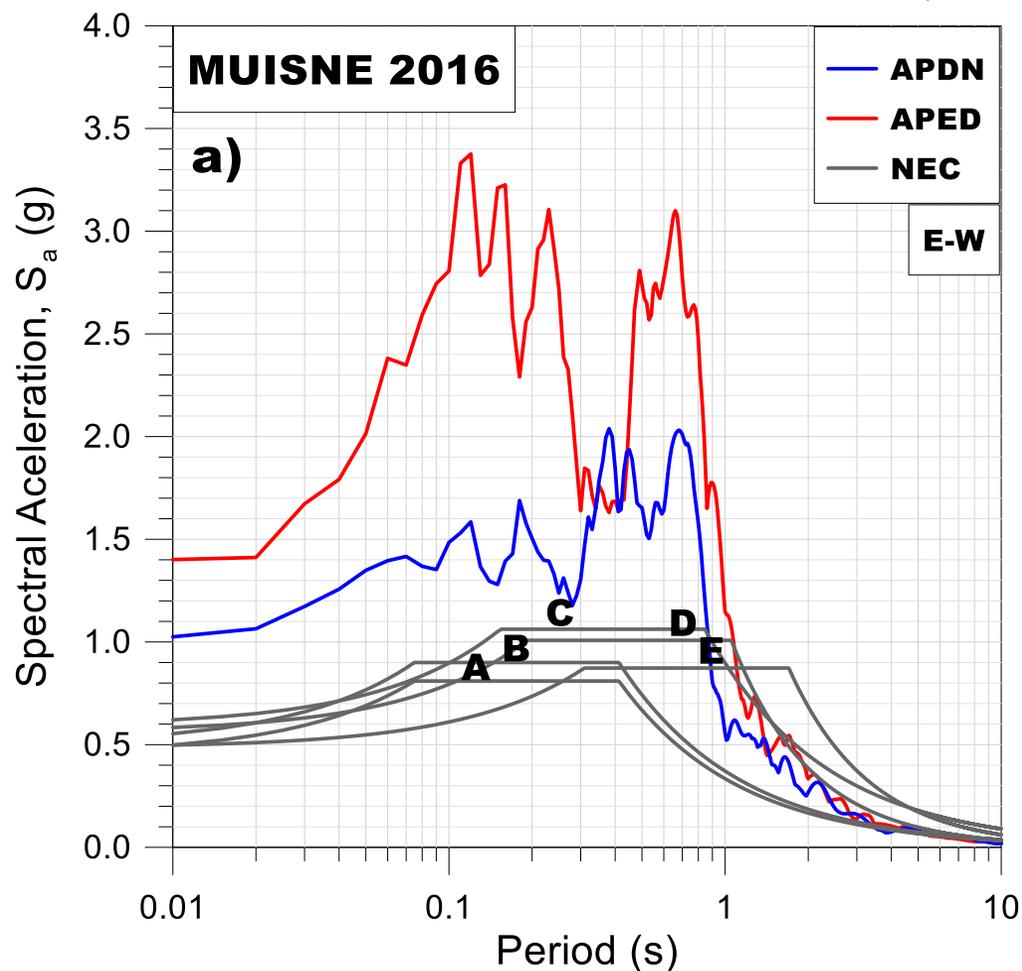
# ESPECTROS ELÁSTICOS DE PSEUDO-ACELERACIÓN DE NORMA JAPONESA E “INSTRUMENTALES”



**Tohoku Earthquake**  
 **$M_w = 9.0$ , 2011**

# ESPECTROS ELÁSTICOS DE PSEUDO-ACELERACIÓN DE NORMA ECUATORIANA E “INSTRUMENTALES”

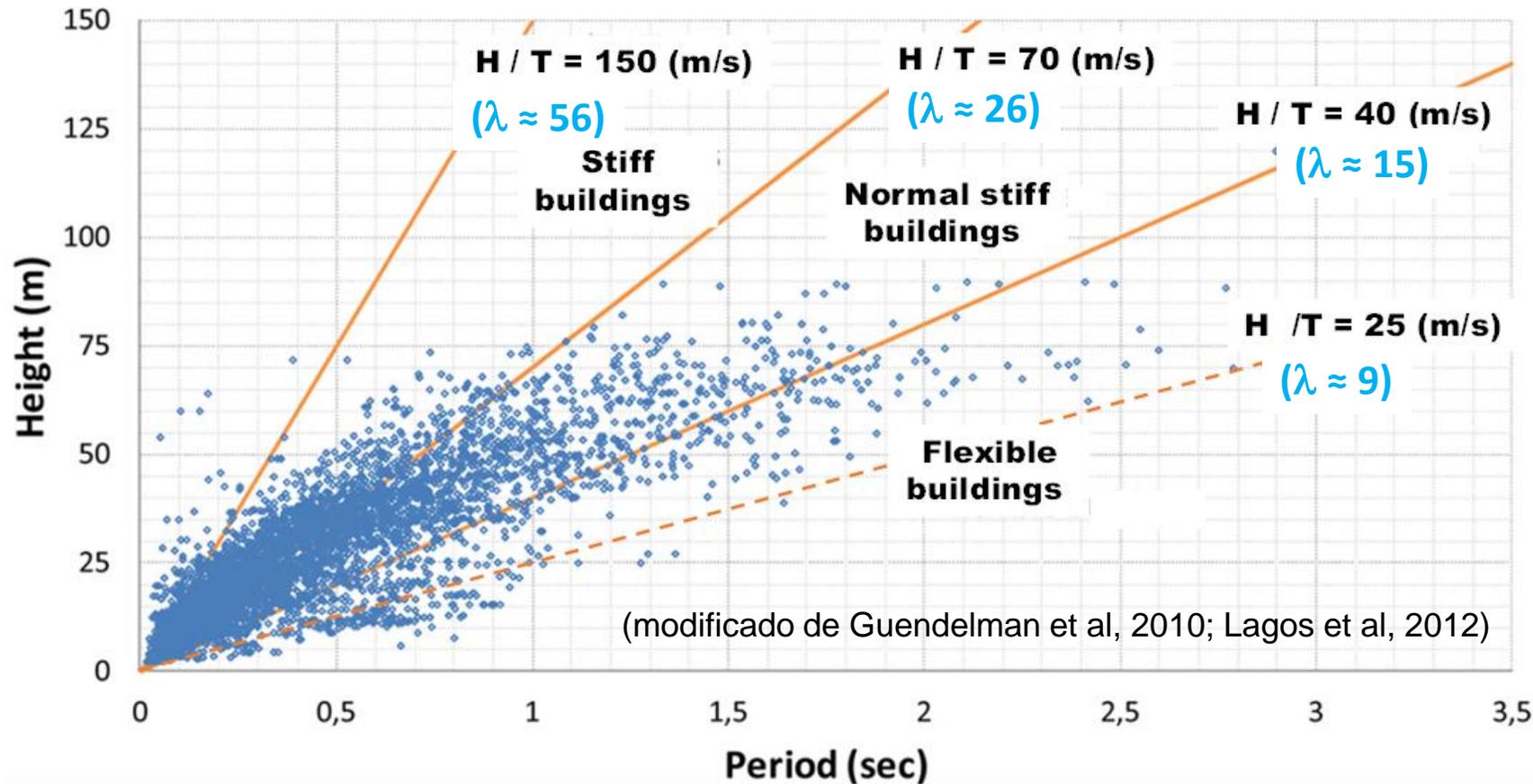
## Terremoto de Muisne, Ecuador, $M_w = 7.8$ , 2016



# **ESPECTRO ELÁSTICO DE DESPLAZAMIENTO LÍMITE, O DE UMBRAL DE INICIO DE DAÑO**

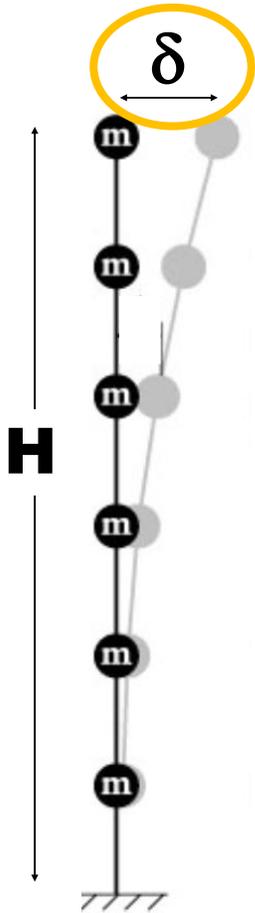
# RELACIÓN EMPÍRICA PERIODO FUNDAMENTAL EDIFICIOS

$$T_f = \frac{\text{Número de Pisos}}{\lambda} = \frac{\text{Altura Edificio}}{2.7 * \lambda} = \frac{H}{2.7 * \lambda} \quad (\text{segundos})$$



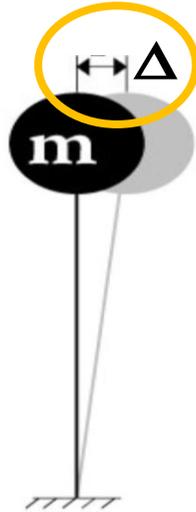
$$\lambda = \frac{H}{2.7 * T_f}$$

# DESPLAZAMIENTO LATERAL DE TECHO



**SISTEMA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD**

$$\delta \sim 1.3 \Delta$$



**OSCILADOR SIMPLE**

**RAZÓN DE DERIVA LATERAL, RDL:**

$$\mathbf{RDL} = \frac{\delta}{H}$$

$$\mathbf{RDL} = \frac{1.3 \cdot \Delta}{H}$$

$$\Delta = \frac{2.7 * RDL * \lambda}{1.3} T_f$$

# RESTRICCIÓN A LA DEFORMACIÓN LATERAL PARA EVITAR INICIACIÓN DE DAÑO

**EDIFICIOS DE ALBAÑERÍA:  $RDL \leq 0.001$**

**EDIFICIOS HORMIGÓN ARMADO:  $RDL \leq 0.006$**

**EDIFICIOS DE ACERO:  $RDL \leq 0.015$**

$$\Delta_{MAX} = \frac{2.7 * \lambda * (RDL)_{LÍMITE}}{1.3} T_f$$

# ESPECTROS ELÁSTICO DE DESPLAZAMIENTO Y PSEUDO-ACELERACIÓN UMBRAL

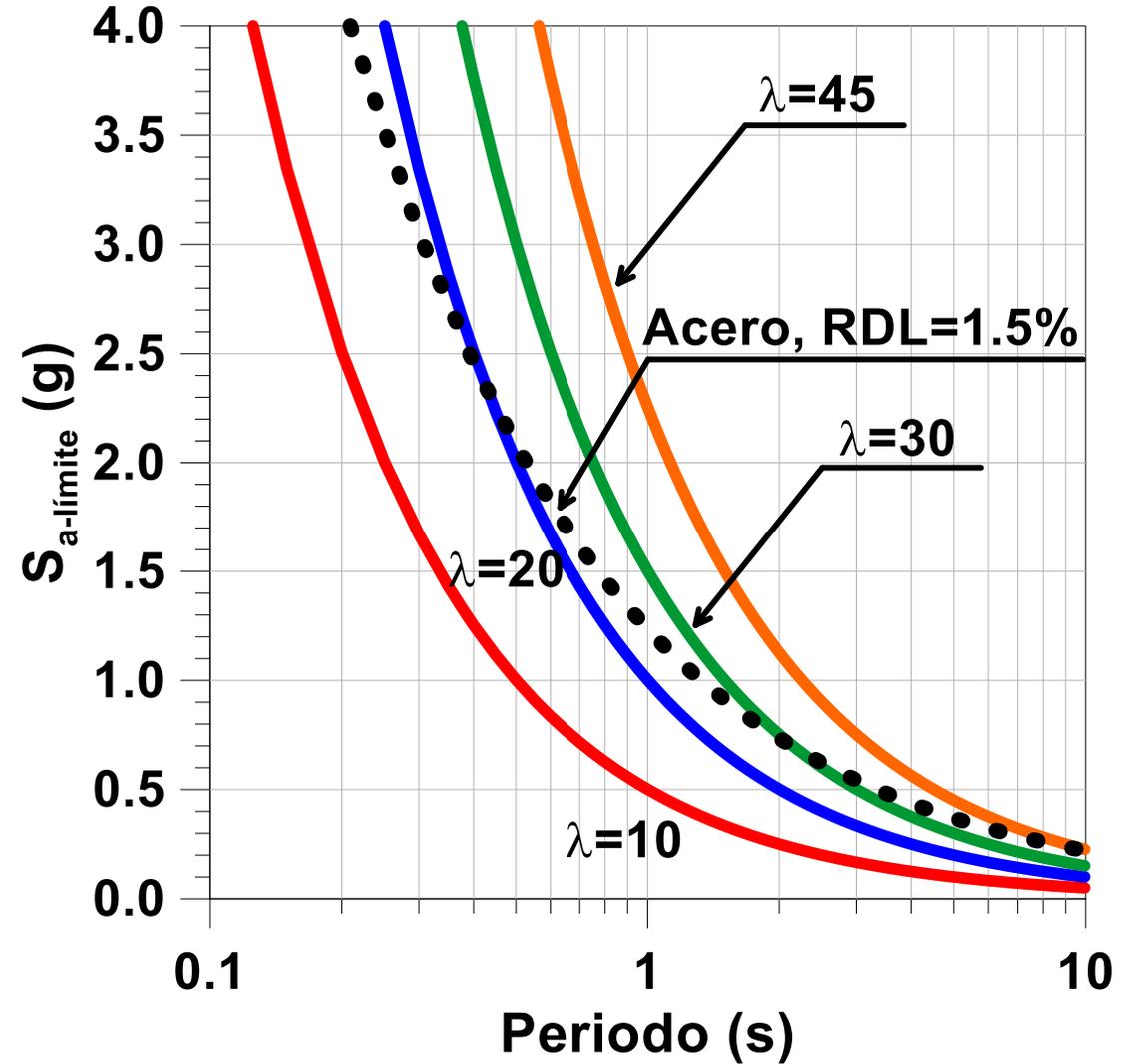
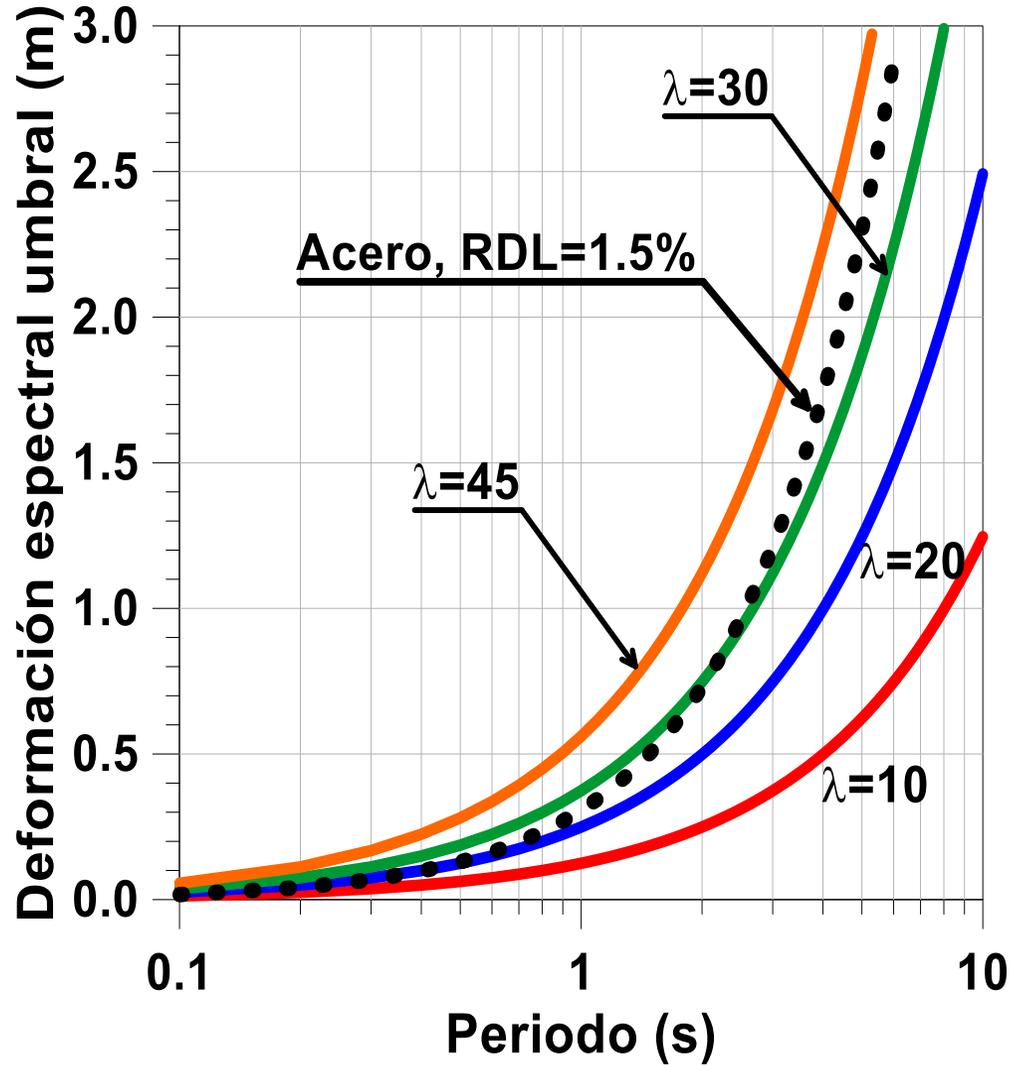
CONSIDERANDO EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO UNA DERIVA LÍMITE,  
 $RDL_{\text{Límite}} = 0.6\%$  (0.006), LA RELACIÓN ANTERIOR PERMITE ESTABLECER EL  
ESPECTRO ELÁSTICO DE DEFORMACIÓN UMBRAL:

$$S_{d-\text{límite}} = 0.01246 \lambda * T_f \quad (m)$$

TENIENDO PRESENTE QUE  $S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a$  SE OBTIENE EL ESPECTRO ELÁSTICO DE  
PSEUDO-ACELERACIÓN UMBRAL:

$$S_{a-\text{límite}} = \frac{0.4919 * \lambda}{T_f} \quad \left( \frac{m}{s^2} \right)$$

# ESPECTROS ELÁSTICO DE DESPLAZAMIENTO Y PSEUDO-ACELERACIÓN UMBRAL

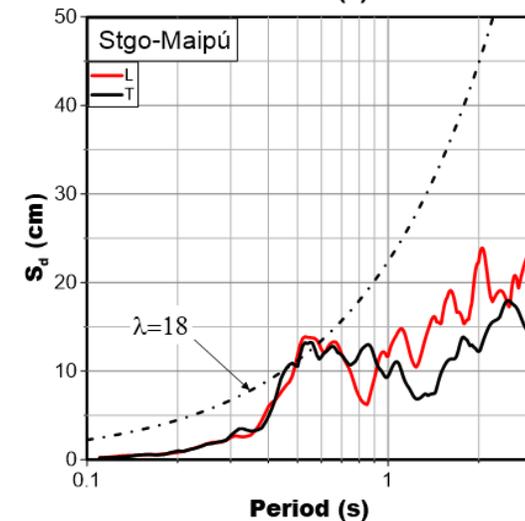
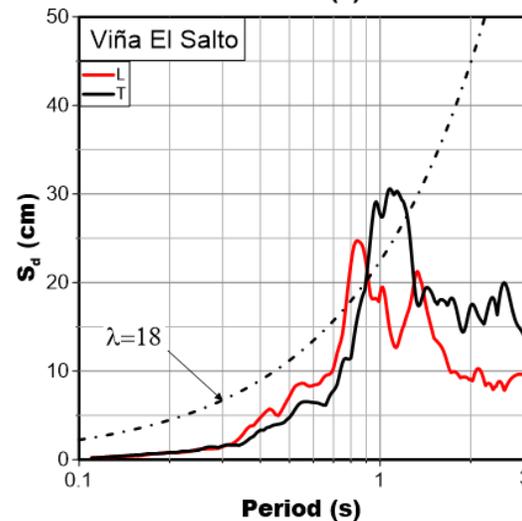
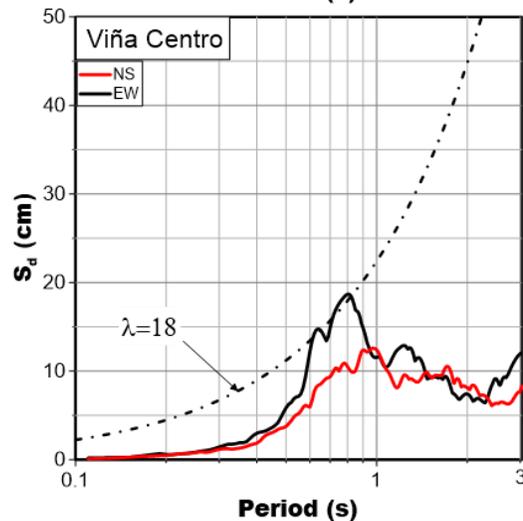
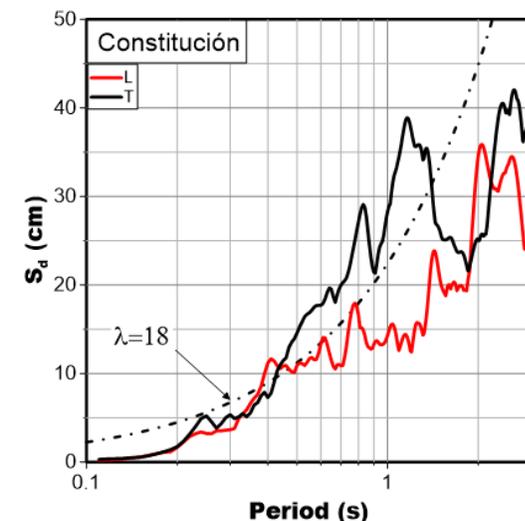
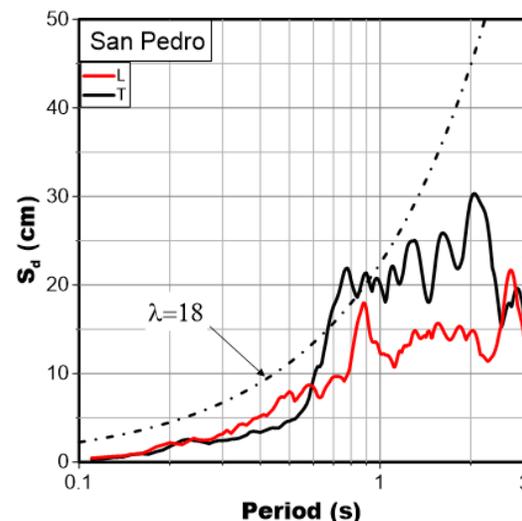
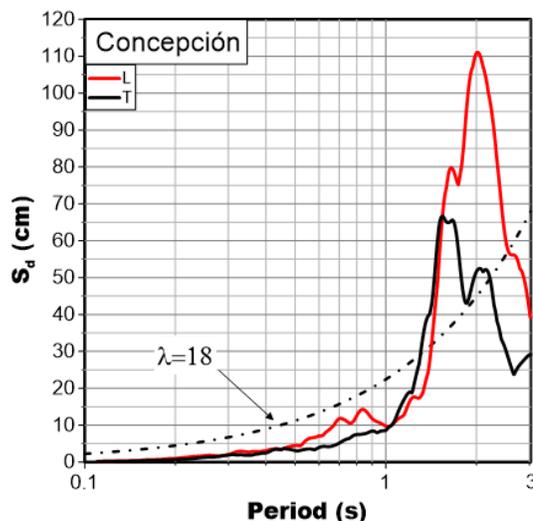


# **VERIFICACIÓN EMPÍRICA ESPECTRO DE DESPLAZAMIENTO LÍMITE O UMBRAL**

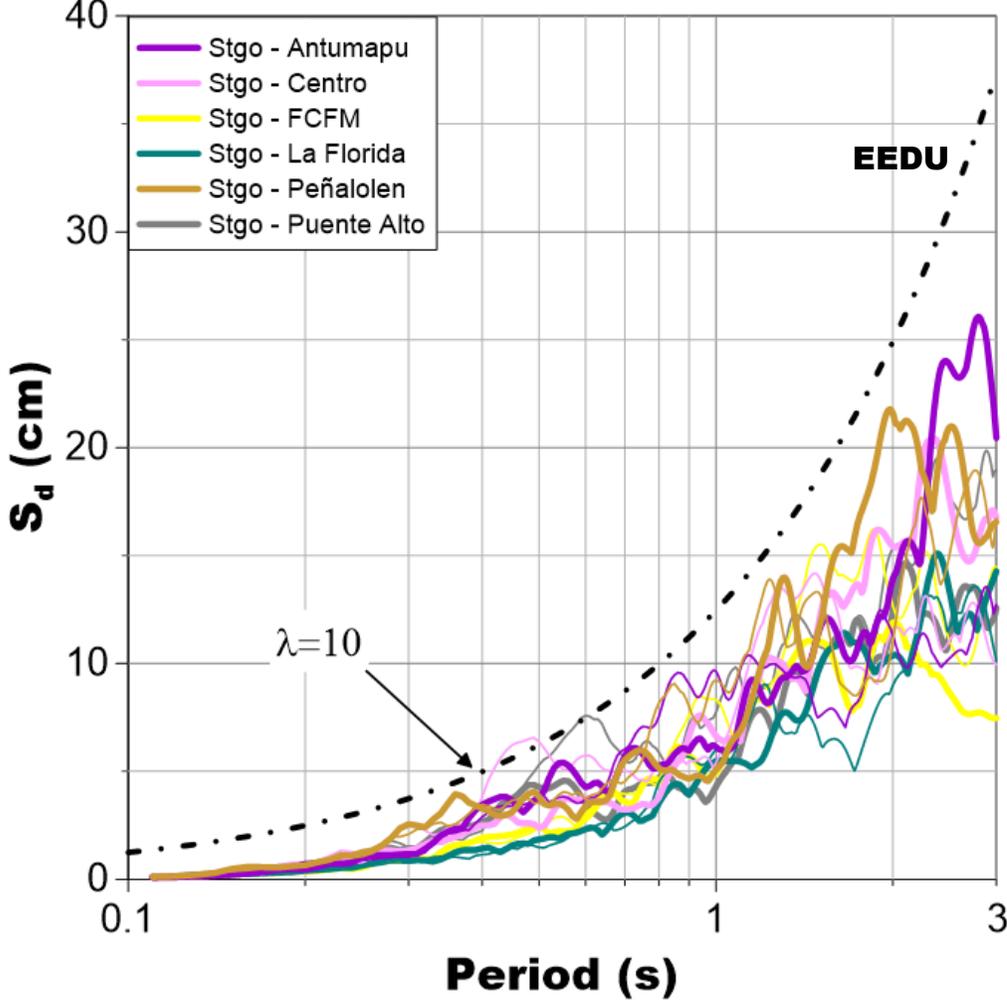
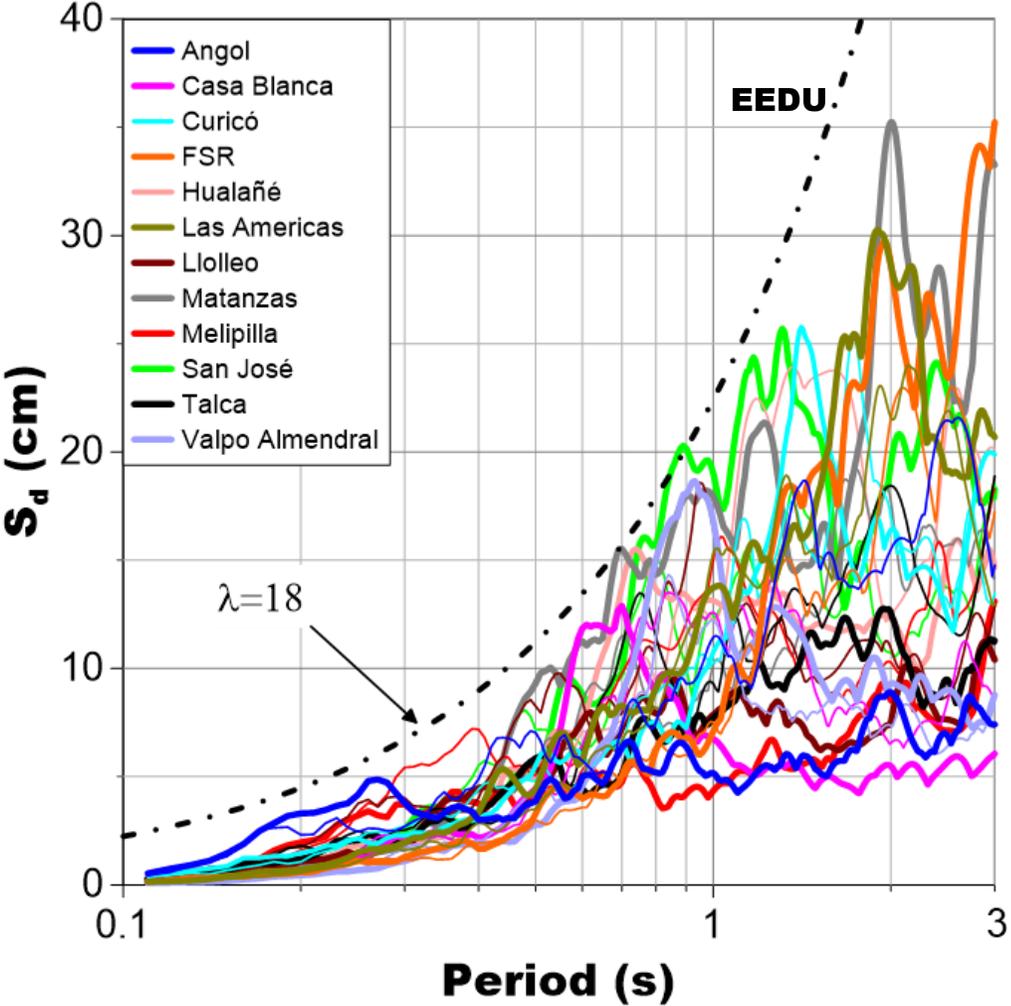
# ESPECTROS ELÁSTICOS DE DESPLAZAMIENTO EN ZONAS DE ALTO DAÑO, EL MAULE, Mw=8.8

EDIFICIOS CHILENOS DE HORMIGÓN ARMADO CON MUROS DE CORTE

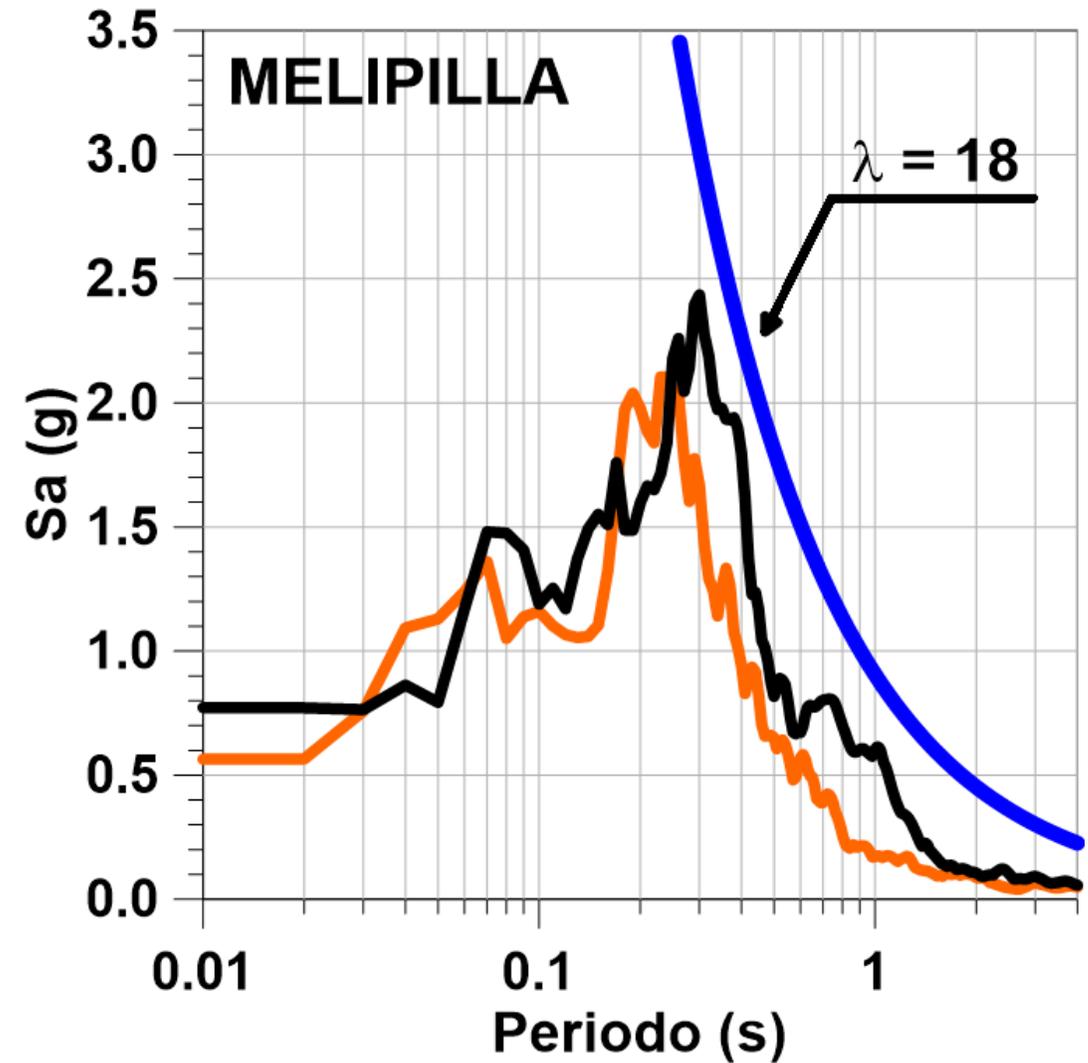
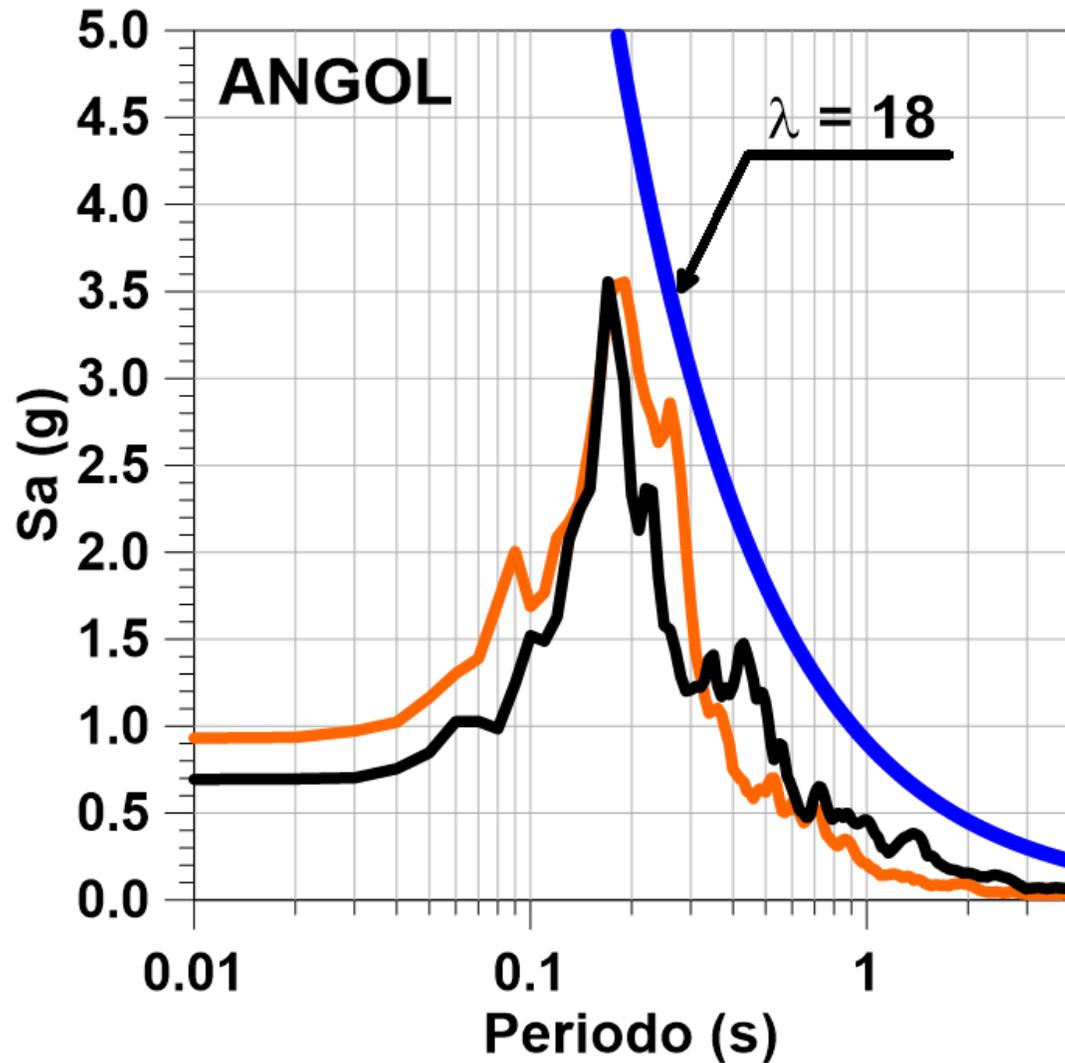
$$\lambda = 18$$



# ESPECTROS ELÁSTICOS DE DESPLAZAMIENTO EN ZONAS DE BAJO DAÑO, EL MAULE, Mw=8.8



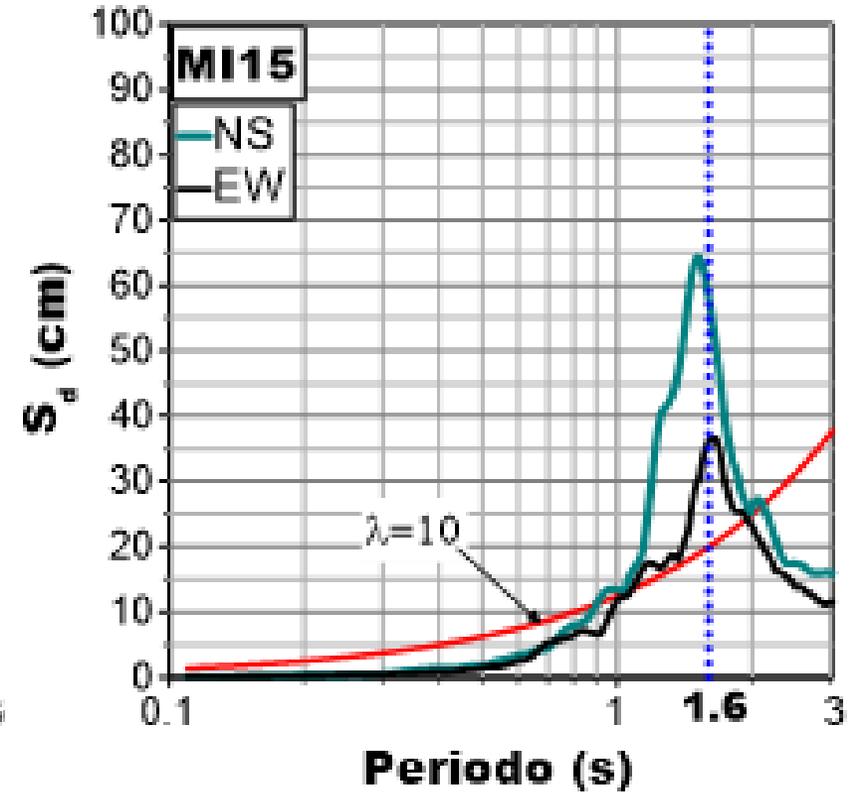
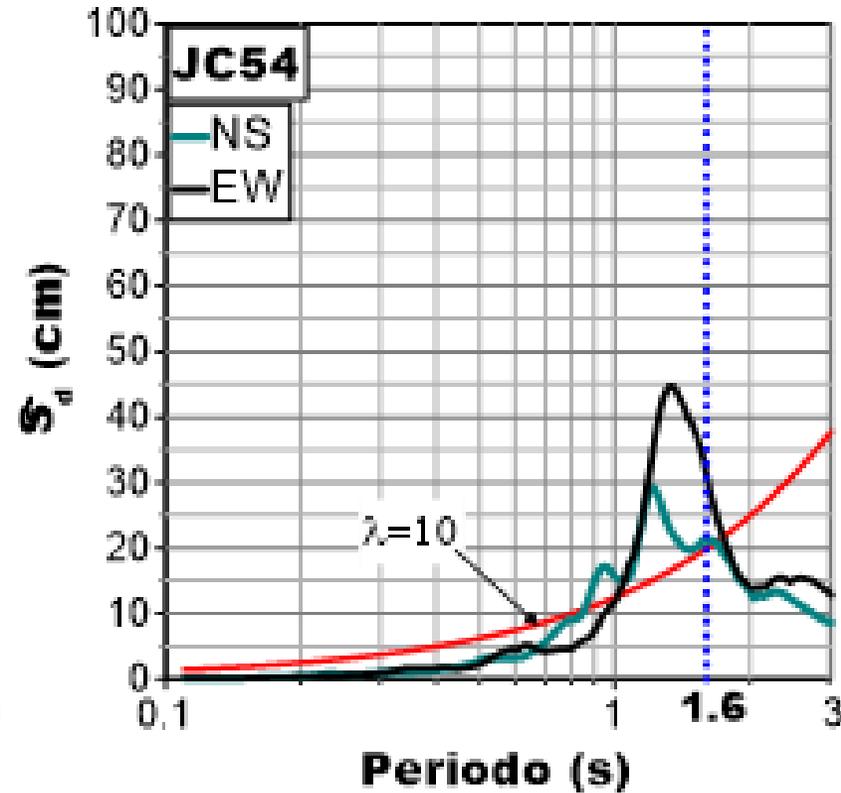
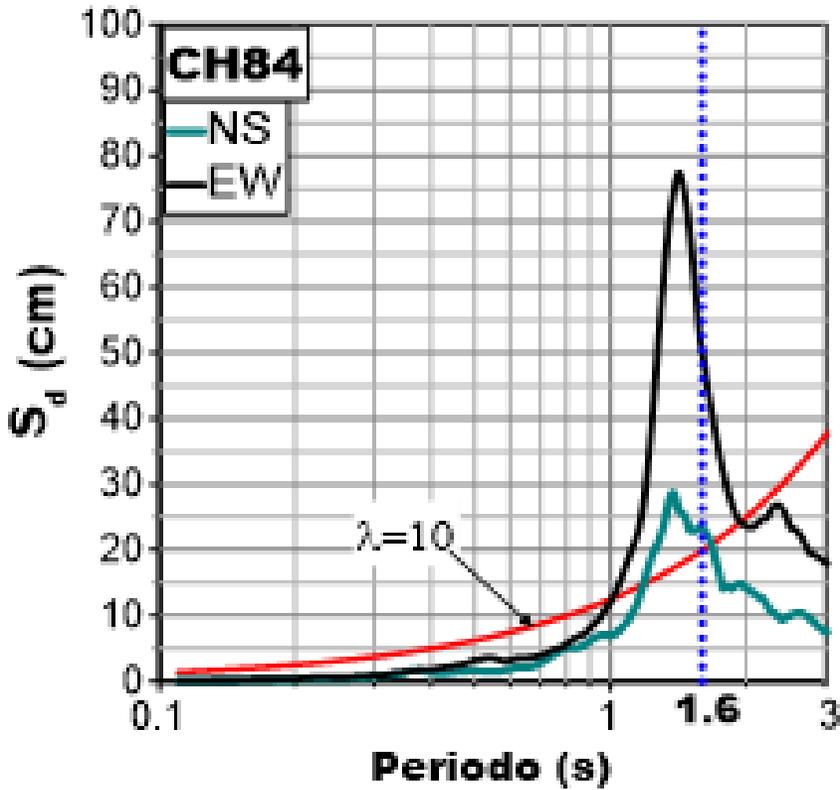
# ESPECTROS ELÁSTICOS DE PSEUDO-ACELERACIÓN DE REGISTROS Y UMBRAL



# TERREMOTO DE PUEBLA-MÉXICO 2017

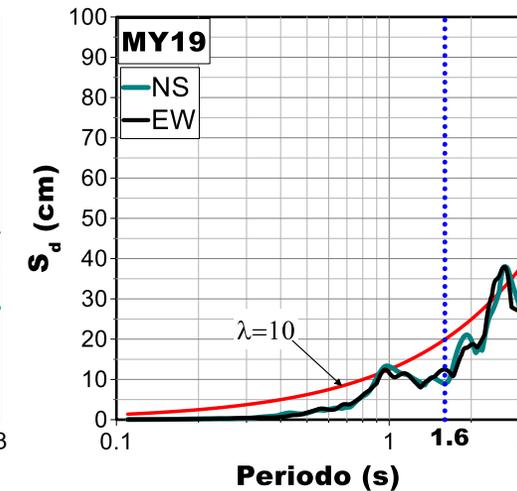
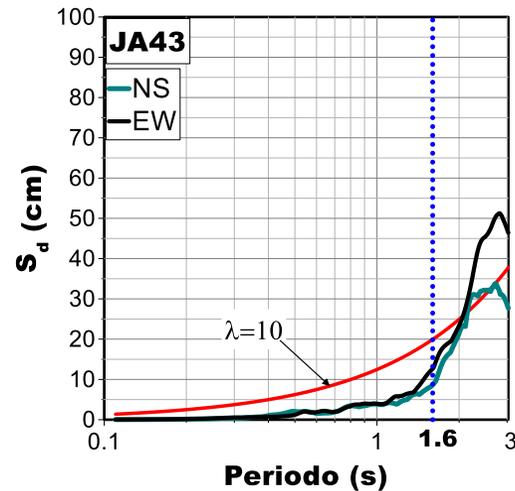
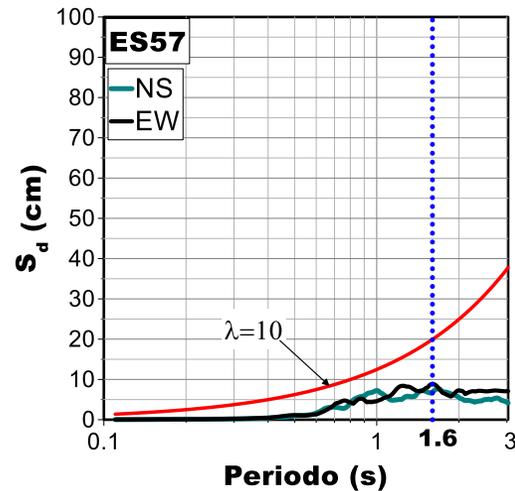
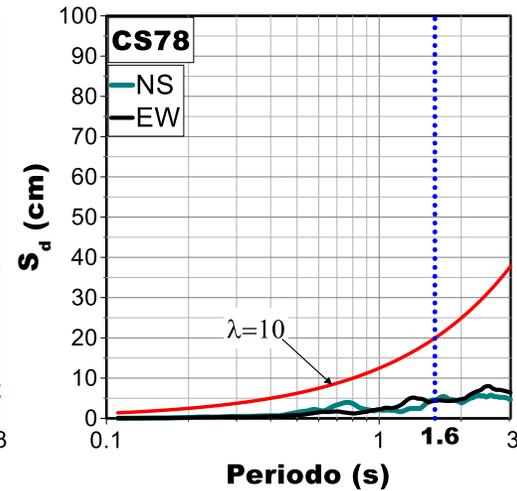
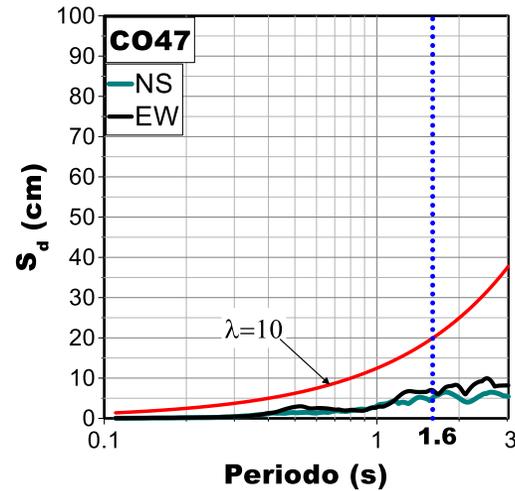
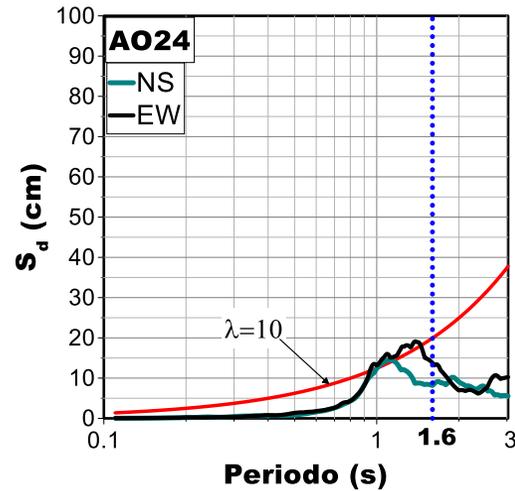
## EJEMPLOS DE ESTACIONES SÍSMICA DONDE SE SUPERA EL ESPECTRO ELÁSTICO DE DESPLAZAMIENTO UMBRAL

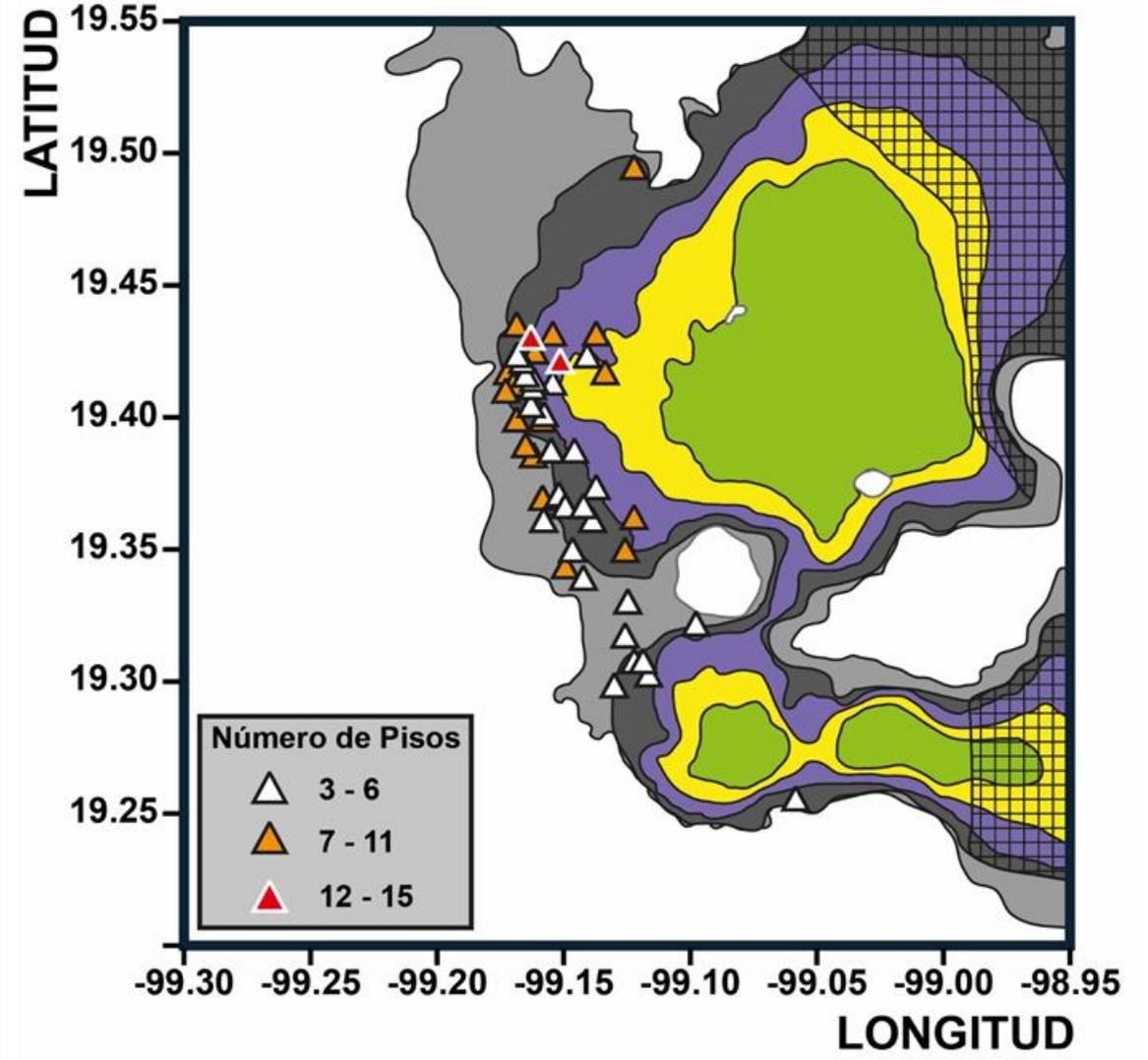
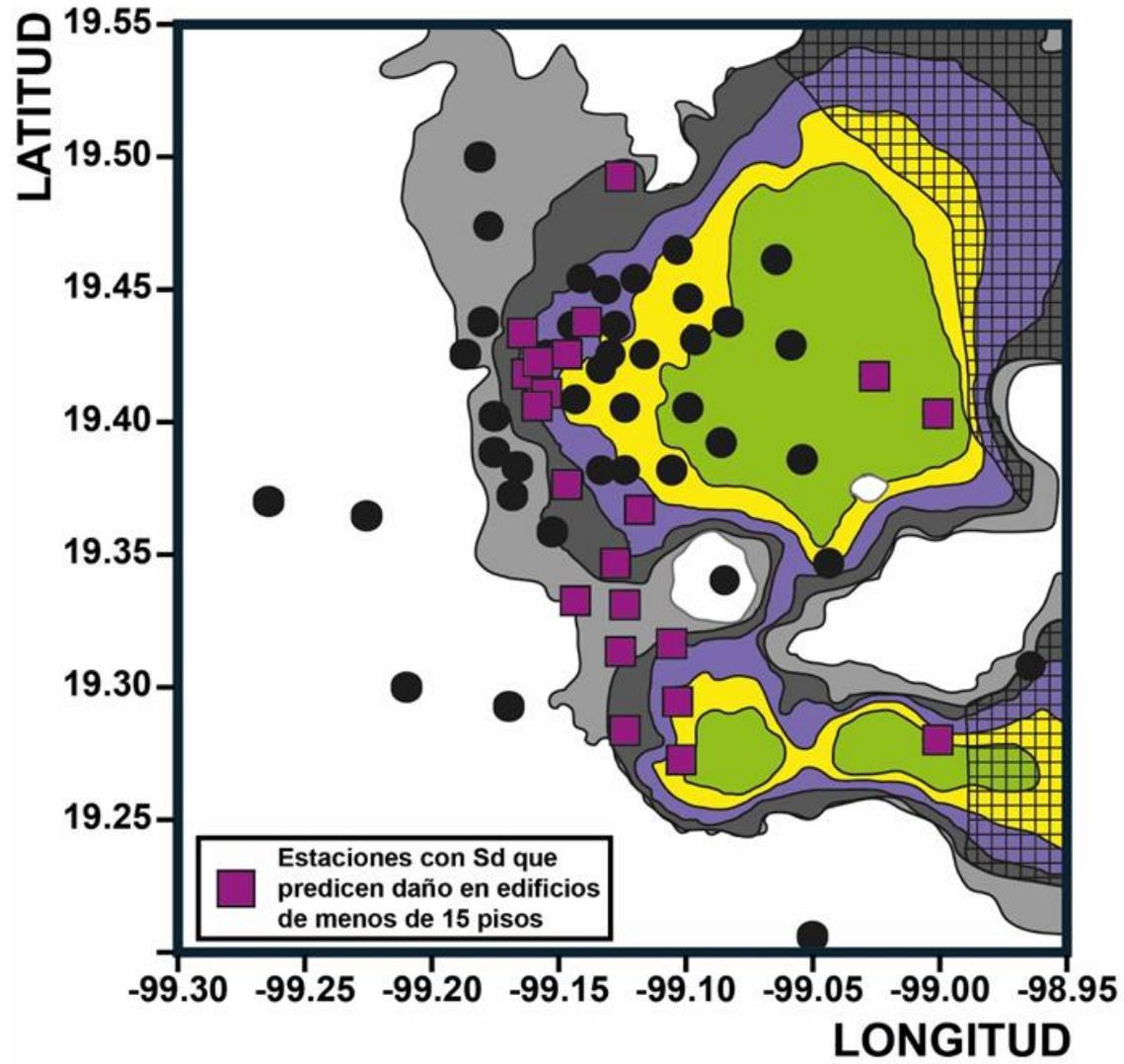
Los edificios en CM menores a 16 pisos se pueden caracterizar con  $\lambda \leq 10$



# TERREMOTO DE PUEBLA-MÉXICO 2017

## EJEMPLOS DE ESTACIONES SÍSMICA DONDE NO SE SUPERA EL ESPECTRO DE DESPLAZAMIENTO UMBRAL





# CLASIFICACIÓN SÍSMICA DE SITIO PROPUESTA EN EL CONTEXTO DE EDIFICIOS DE H.A.

| Suelo Tipo |   | $V_{S-30-E}$<br>(m/s)      | $T_{predominate}$<br>(segundos) | Rigidez<br>estructural |
|------------|---|----------------------------|---------------------------------|------------------------|
| <b>1</b>   | Roca, suelo con cementación, denso o de alta compacidad | $\geq 500$                 | $< 0.3$<br>(o H/V plano)        | $\lambda > 13$         |
| <b>2</b>   | Suelo de mediana compacidad o firme                     | $500 \geq V_{S30-E} > 180$ | $< 1.0$<br>(o H/V plano)        | $\lambda > 28$         |
| <b>3</b>   | Suelos de compacidad, o consistencia baja               | $\leq 180$                 |                                 | $\lambda > 32$         |

# CONCLUSIONES (1/2)

A pesar de los avances en el campo de la ingeniería sísmica, las pérdidas económicas dejadas por grandes sismos recientes son todavía considerables, lejos de cualquier estándar socio-económicamente satisfactorio. La sociedad moderna no solo desea protección de la vida, sino que también exige que los edificios se puedan ocupar inmediatamente después de un fuerte terremoto.

Se ha introducido una nueva herramienta de análisis, el espectro de Intensidad de Arias, que presenta una buena capacidad para identificar el período predominante de los registros sísmicos.

Los análisis de los datos disponibles permiten confirmar que la relación espectral H/V obtenida de vibraciones ambientales, o de micro-temblores, o de la coda de registros sísmicos, es útil para estimar el período predominante de un depósito de suelos.

## CONCLUSIONES (2/2)

El espectro de desplazamiento umbral, o límite, permite establecer la frontera de desplazamiento sobre la que se predice daño estructural.

Se ha mostrado la limitación del parámetro  $V_{S30}$  para estimar la respuesta sísmica de un sitio. Como alternativa se ha introducido la velocidad de onda de corte equivalente,  $V_{S30-E}$ , que reproduce la rigidez lateral dinámica de los 30 m superiores del suelo. Este parámetro captura de una mejor manera las características fundamentales de la respuesta sísmica de sitio.

Para caracterizar sísmicamente un sitio se propone utilizar  $V_{S30-E}$ , el periodo predominante obtenido por la razón espectral H/V y además, exigir una rigidez estructural mínima.

**MUCHAS GRACIAS**