

8ª JORNADA  
**COMISIÓN  
PERMANENTE**

del Código Modelo Sísmico para  
América Latina y El Caribe

# Influencia del Sitio en Diseño Sísmico por Desempeño

**Eduardo Miranda**  
Stanford University

San Salvador, El Salvador  
10 de octubre de 2025

[www.codigomodelosismico.org](http://www.codigomodelosismico.org)

# Agradecimientos



**Ministerio de Obras Públicas, El Salvador**



**Instituto de la Construcción, Chile**

- Rodrigo Narvaez Sotomayor, Chile
- Miguel Martínez, MOPT, El Salvador
- Edwin Portillo, Estructuristas Consultores, El Salvador
- Oscar Ramírez, O.M. Ramírez y Asociados, Panamá
- Johamy Meñlendez y Nancy Mejía, UNPD
- Katherine Casco Flores y Glenda Martínez, MOPT, El Salvador

## Una de las primeras observaciones de efectos de sitio



I fatti finora raccolti dimostrano che i danni in Liguria furono prevalentemente in terreni posti su terreno sciolto. Quindi per le nuove costruzioni che si faranno in quelle regioni converrà scandagliare, per quanto si può, la profondità a cui si trova, sotto il terreno sciolto, la roccia in posto e fondare su questa, con alcune delle cautele indicate nel testo e in alcune di queste note.

La evidencia recolectada hasta el momento muestra que el daño en Liguria ocurrió principalmente en sitios con suelos sueltos.

(Información cortesía de F.J. Sánchez Sesma, UNAM, 2024)

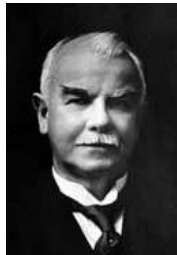
# Nacimiento formal de la Ingeniería Sísmica en el Continente

440

Prof. J. A. Ewing.

[Feb. 10,

III. "On a New Seismograph." By J. A. EWING, B.Sc., F.R.S.E., Professor of Mechanical Engineering in the University of Tokio, Japan. Communicated by Sir WILLIAM THOMSON, F.R.S. Received January 17, 1881.



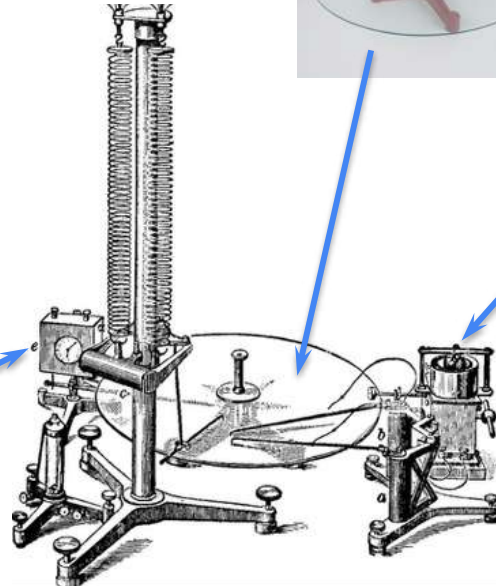
**Alfred Ewing**  
(1855 - 1935)



**John Milne**  
(1850 - 1913)



## *"On a New Seismograph"*



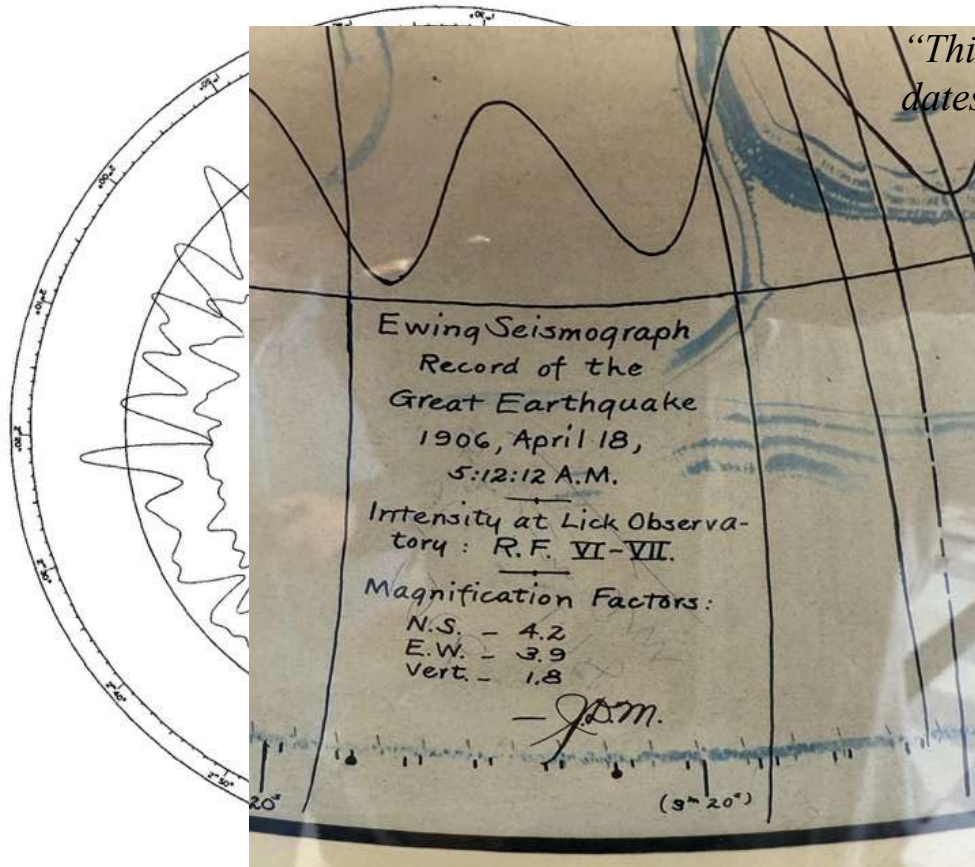
Three-component Ewing seismograph

(Taken from <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk>)

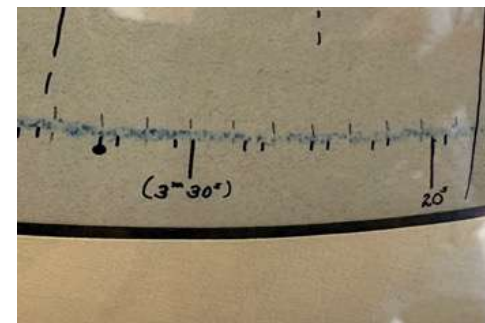
# Nacimiento formal de la Ingeniería Sísmica en el Continente

*“This awakening interest in the phenomena of earthquakes dates chiefly from the California earthquake of 1906”*

Andrew Lawson, BSSA 1(1), 1911



(From hand-tracing; reduced 1:2)



# Importancia de las condiciones del sitio

*“The change from strong effects to weak sometimes takes place rather abruptly within the distance of a block or two, or less.”*

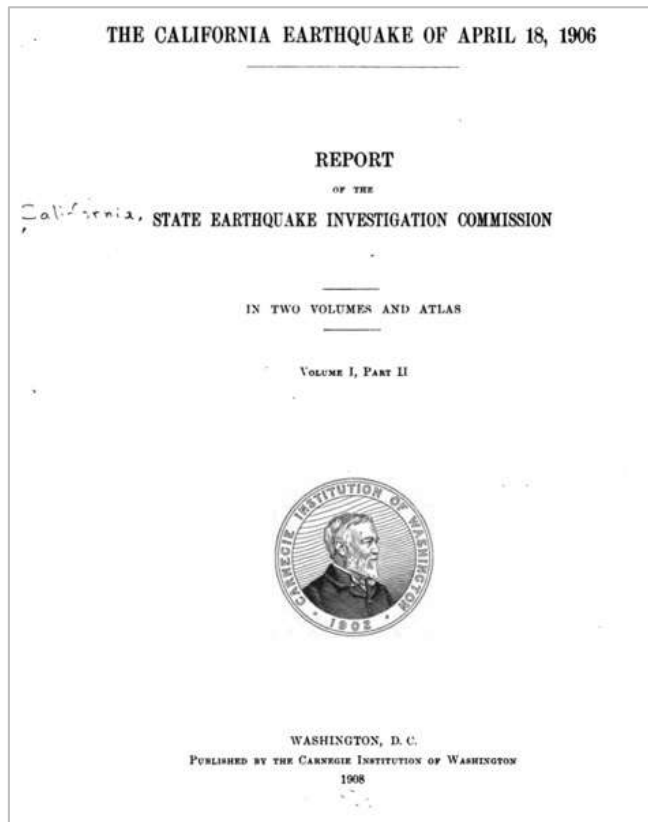
Page 223, The California Earthquake of April 18, 1906  
Report of the State Earthquake Investigation Commission (Lawson Report)



THE INFLUENCE OF THE FOUNDATION ON THE APPARENT INTENSITY.

THE GREATER DAMAGE ON ALLUVIUM.

Experience shows that the damage done by destructive earthquakes is much greater on alluvial soil than on solid rock. A glance at the isoseismal map No. 23 will show how well this was exemplified by the California earthquake. Probably the best example we have is the city of San Francisco itself, which is built variously on solid rock, on sand, on natural alluvium, and on "made ground." The description of the destruction done in the city



# Investigaciones pioneras en Stanford

## Primeros estudios analíticos y experimentales de respuesta de sitio

BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA

### MOTION OF A SOIL SUBJECTED TO A SIMPLE HARMONIC GROUND VIBRATION

By LYDIK S. JACOBSEN

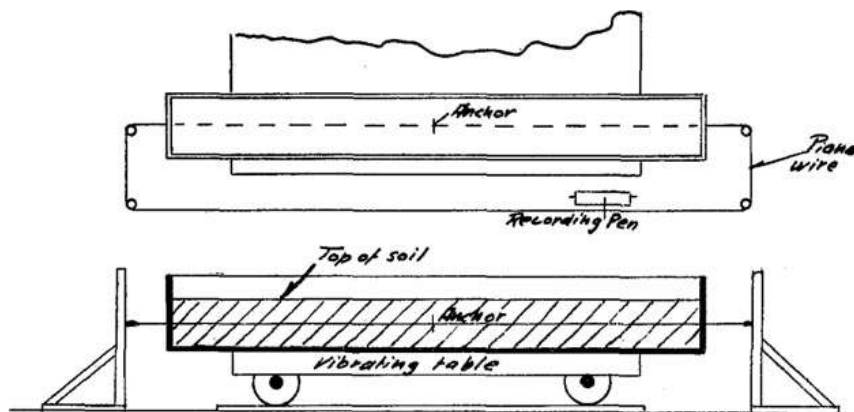


FIG. 1.—Diagram of mechanism for recording soil motion

Jacobsen, L. S. (1930). Motion of a soil subjected to a simple harmonic ground vibration. *Bulletin of the seismological society of America*, 20(3), 160-195.

Ecuación de onda

$$\frac{\mu}{gG} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

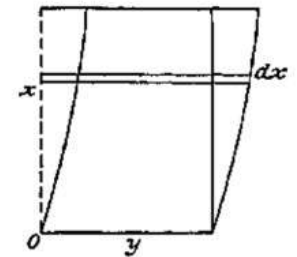


FIG. 25.

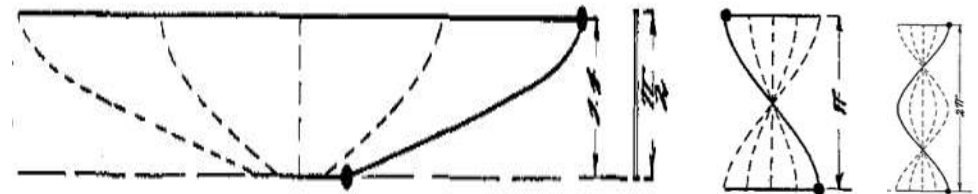


FIG. 6.—Theoretical distortion curves of deposits of different depths of a hypothetical, elastic soil with zero friction  
the maximum amplitude of the top layer will be

$$u_{\max} = E \sqrt{\frac{1}{\cosh^2 \beta h - \sin^2 \alpha h}}$$

**Aprox 30 años antes que H.B. Seed, Thompson, Haskel etc.**

## Concepto de periodo predominante del sitio y contraste de impedancia

### 16. Semi-empirical Formula for the Seismic Characteristics of the Ground.

By Kiyoshi KANAI,

Earthquake Research Institute.

(Read July 17, 1956; Feb. 26, Mar. 26, 1957.—Received Mar. 31, 1957.)

#### 3. Empirical formula for the seismic characteristics of the ground

Since in most cases the amplitude-period relation of earthquake motion is a resonance type curve<sup>3)</sup>, we will write the following formula for the seismic characteristics of the ground:

$$U_s = \frac{c_1 U_0}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right\}^2 + \left\{\tau \frac{T}{T_0}\right\}^2}}, \quad (1)$$

where  $U_s$  = absolute amplitude of earthquake motion at free surface,  
 $U_0$  = absolute amplitude of seismic waves reaching the bottom boundary of the surface layer,

$T_0$  = predominant period of the ground,

$T$  = period of seismic waves,

$\tau$  = apparent damping coefficient of the surface vibration,

$c_1$  = a coefficient which depends upon the impedance ratio of the two media and is independent of  $T_0$ .

### 23. The Requisite Conditions for the Predominant Vibration of Ground.

By Kiyoshi KANAI,

Earthquake Research Institute.

(Read July 17, 1956 and June 25, 1957.—Received June 30, 1957.)

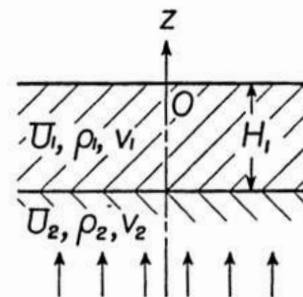


Fig. 1.

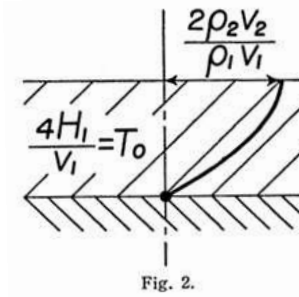
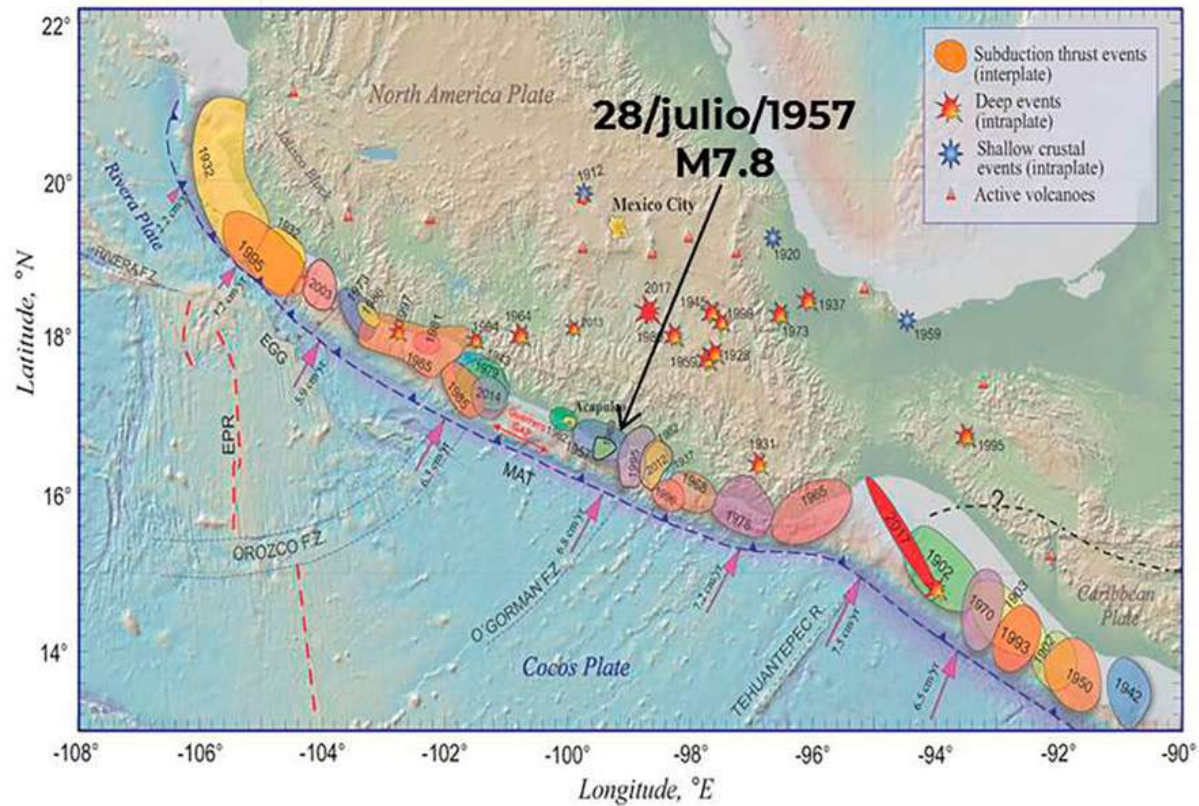


Fig. 2.

$$U_1 = \frac{2 \cos \left( q_1 \frac{x}{H_1} \right) \cos \{pt - \tan^{-1}(\alpha_1 \tan q_1)\}}{\sqrt{\cos^2 q_1 + \alpha_1^2 \sin^2 q_1}}$$

$$\alpha_n = \rho_n v_n / \rho_{n+1} v_{n+1},$$

# Importancia de las condiciones del sitio



<https://www.gob.mx/cenapred/articulos/aniversario-63-del-sismo-del-angel-de-1957>

8ª Jornada de la Comisión Permanente del Código Modelo Sísmico para América Latina y El Caribe

# Importancia de las condiciones del sitio

Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 54, No. 1, pp. 209-231. February, 1964

## STRONG GROUND MOTIONS RECORDED DURING EARTHQUAKES OF MAY THE 11TH AND 19TH, 1962 IN MEXICO CITY

By LEONARDO ZEEVAERT

### ABSTRACT

The ground accelerations during the earthquakes of May 11 and 19, 1962 were recorded in Mexico City on a soft clay bed that was formerly the floor of an old lake. Records were obtained from two accelerometers, one instrument was located in the basement of a multistory building and the other was located in a nearby park. Response spectra of the ground motions are presented and analysis is made of the local soil conditions with the view to explaining the characteristics of the spectrums.

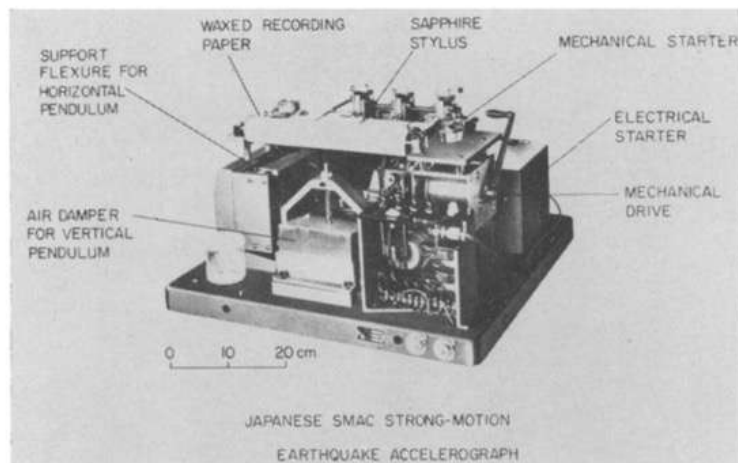


Fig. 4. The SMAC accelerometer.

8ª Jornada de la Comisión Permanente del Código Modelo Sísmico para América Latina y El Caribe

## Espectros de Desplazamientos

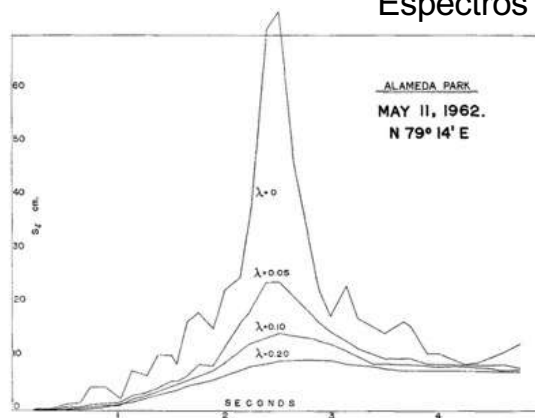


Fig. 10. C.I.T. relative displacement spectrum curves for Alameda Park, 11 May 1962, component N79E.

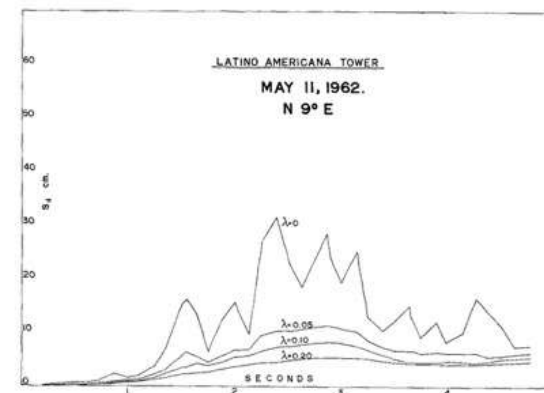


Fig. 9. C.I.T. relative displacement spectrum curves for Latino Americana Tower, 11 May 1962, component N9E.

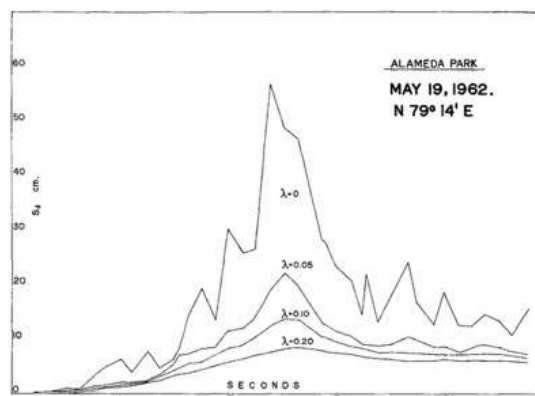


Fig. 14. C.I.T. relative displacement spectrum curves for Alameda Park, 19 May 1962, component N79E.

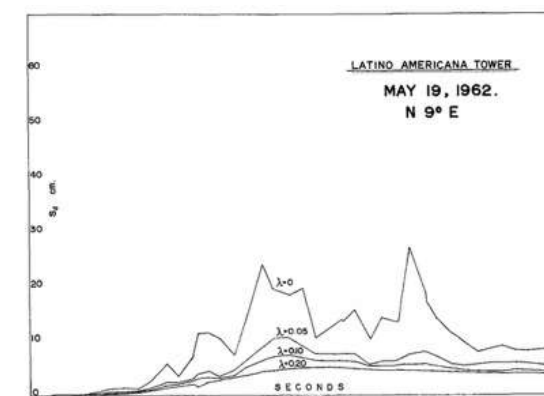
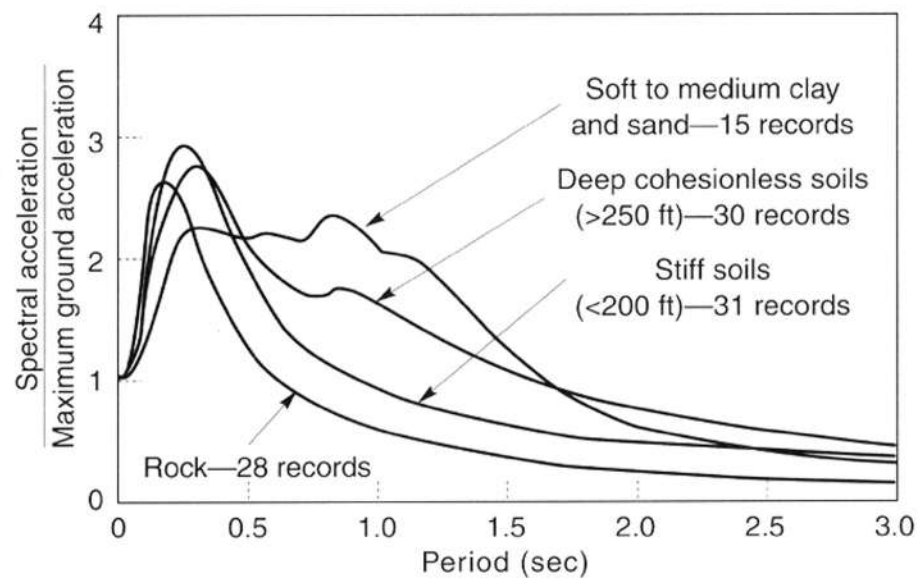


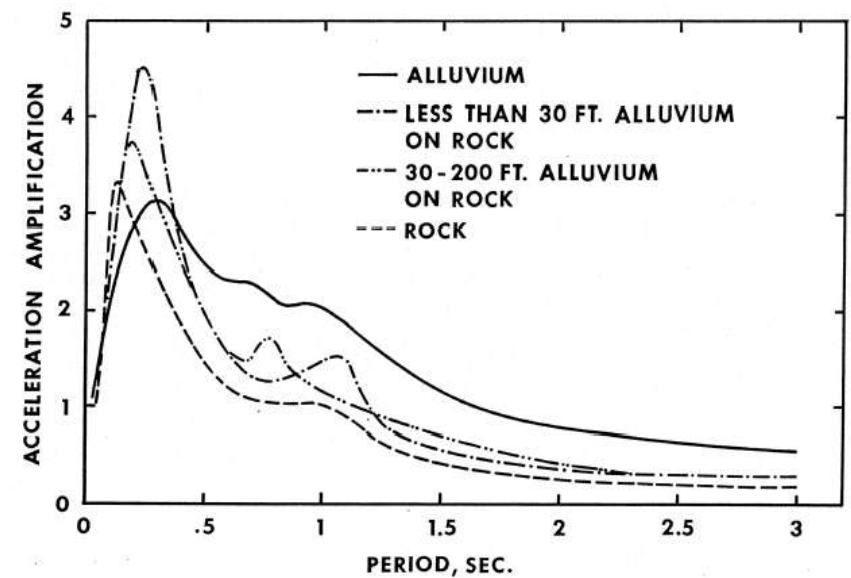
Fig. 13. C.I.T. relative displacement spectrum curves for Latino Americana Tower, 19 May 1962, component N9E.

(Fuente Zeevaert, 1964)

# Efecto del tipo de suelo en las formas espectrales



(After Seed et al. 1976)



(After Mohraz 1976)

# “Sorpresas” con suelos blandos

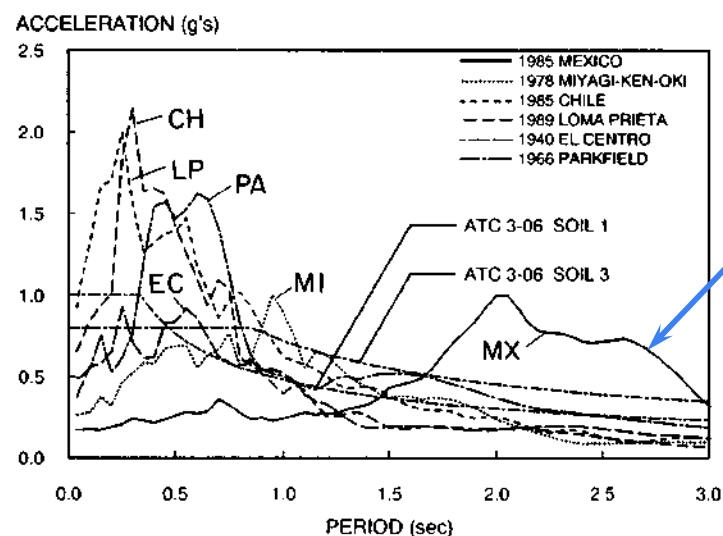


Fig. 5. Comparison of linear elastic response spectra for acceleration with 5% viscous damping for selected earthquakes. CH, Chile; LP, Loma Prieta; PA, Parkfield; EC, El Centro; MI, Miyagi-Ken-Oki; MX, Mexico. (Compiled by E. Miranda).

(Popov1993)

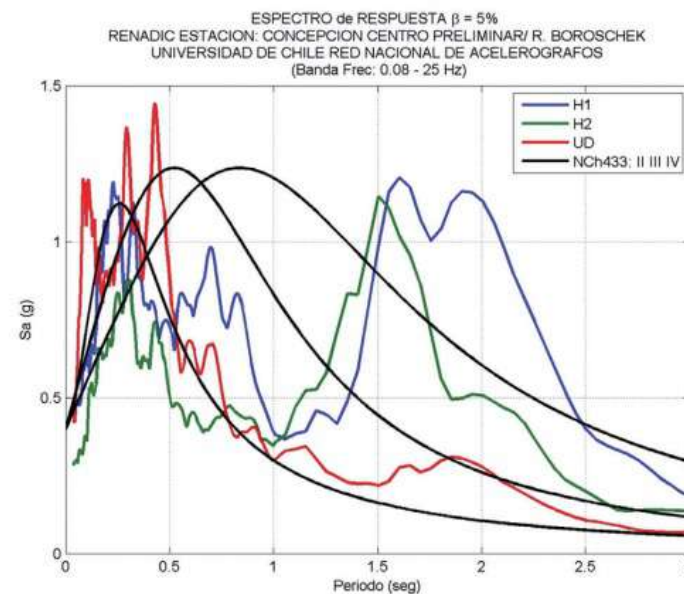
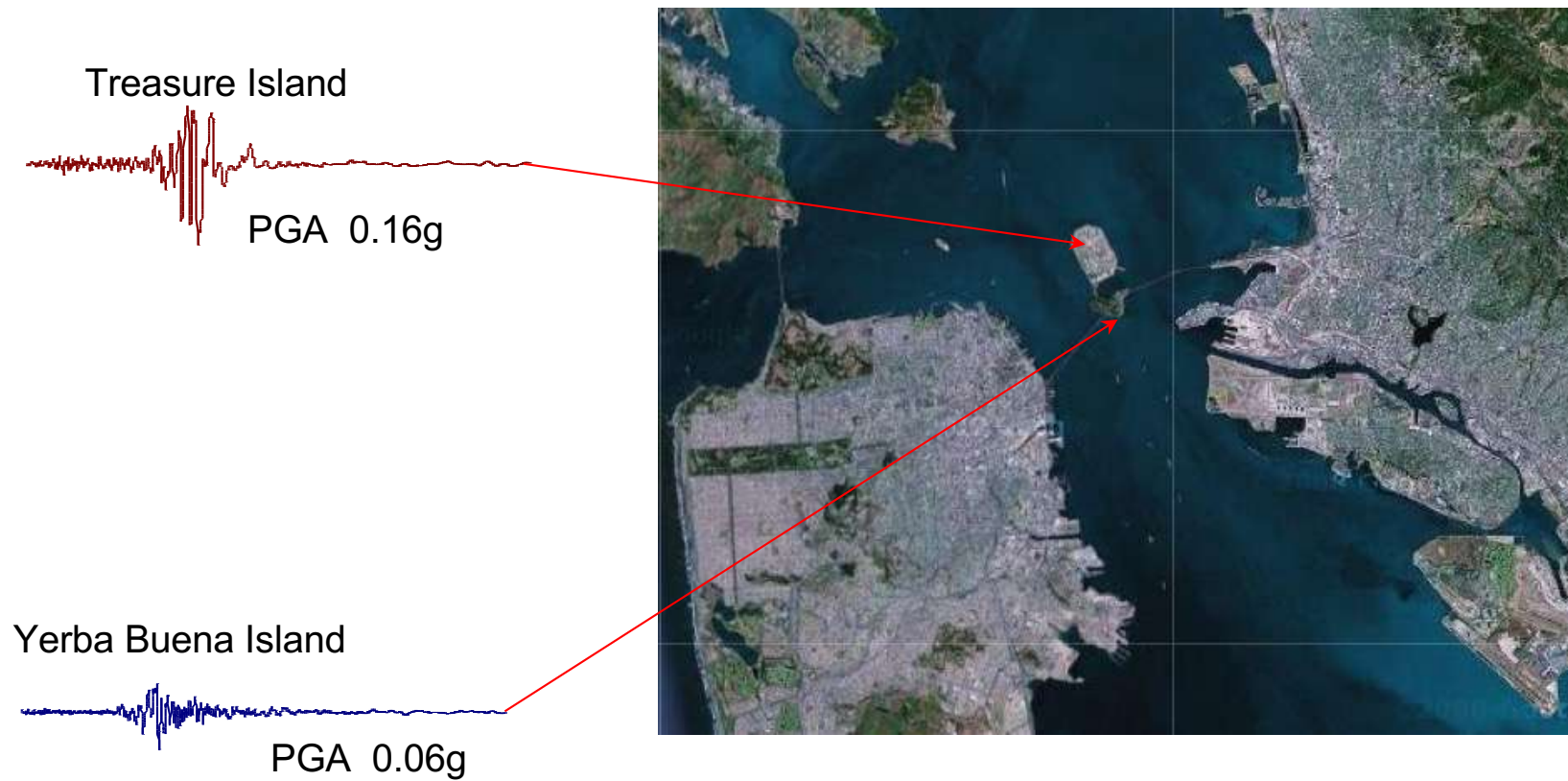


Figure 3. Acceleration response spectra for the Concepción downtown station showing greater vertical spectral response between 0 and 0.5 s and an important second peak in the horizontal spectral response at the period of 1.5 to 2.0 s due to soil amplification (Boroscchek *et al.*, 2010)

(Boroscchek et al. 2010)

## Efectos del tipo de suelo en PGA ( $A_0$ )



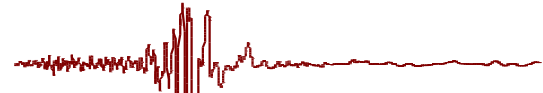
## Efectos del tipo de suelo en PGA ( $A_0$ )

Yerba Buena Island



PGA 0.06g

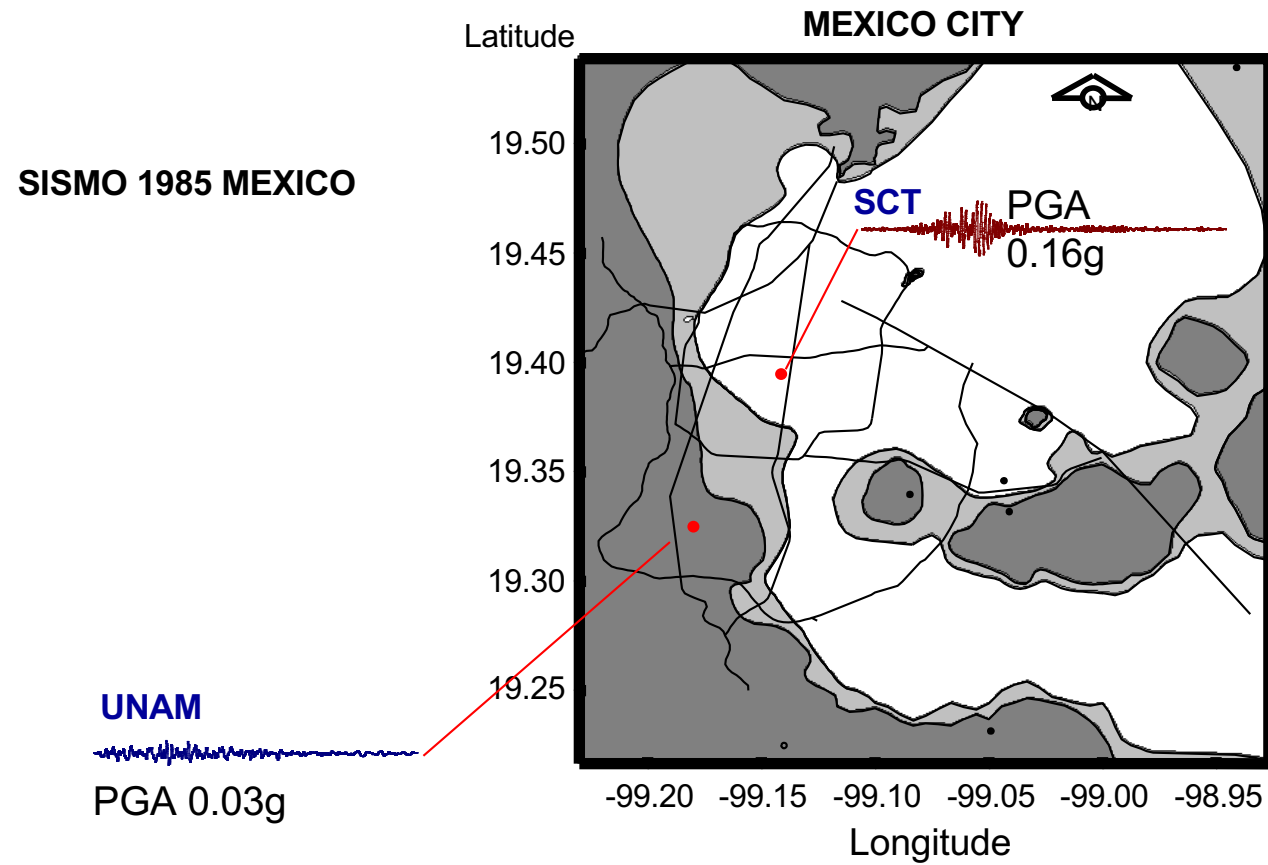
Treasure Island



PGA 0.16g

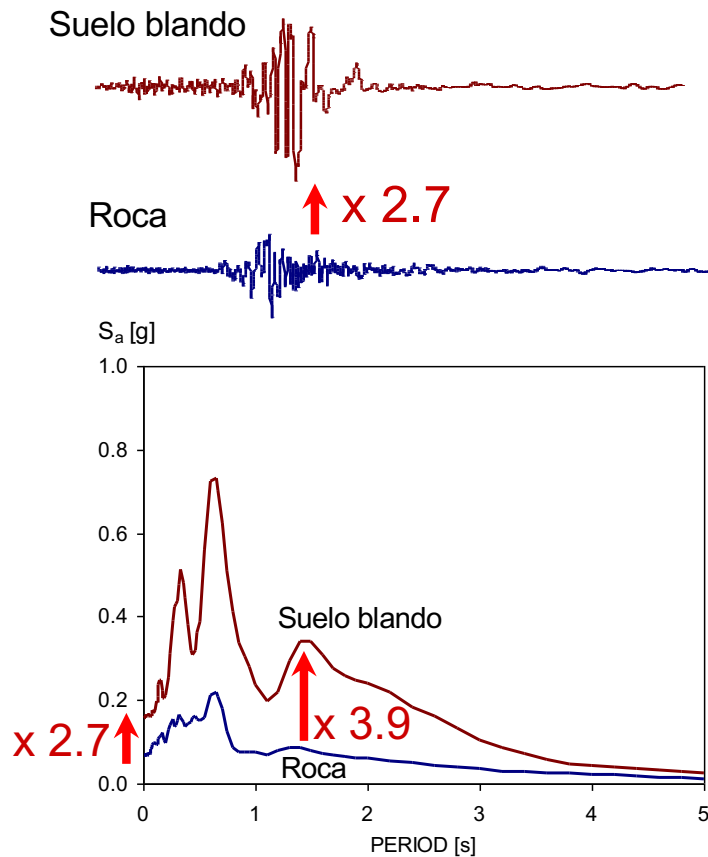


# Efectos del tipo de suelo en PGA ( $A_0$ )

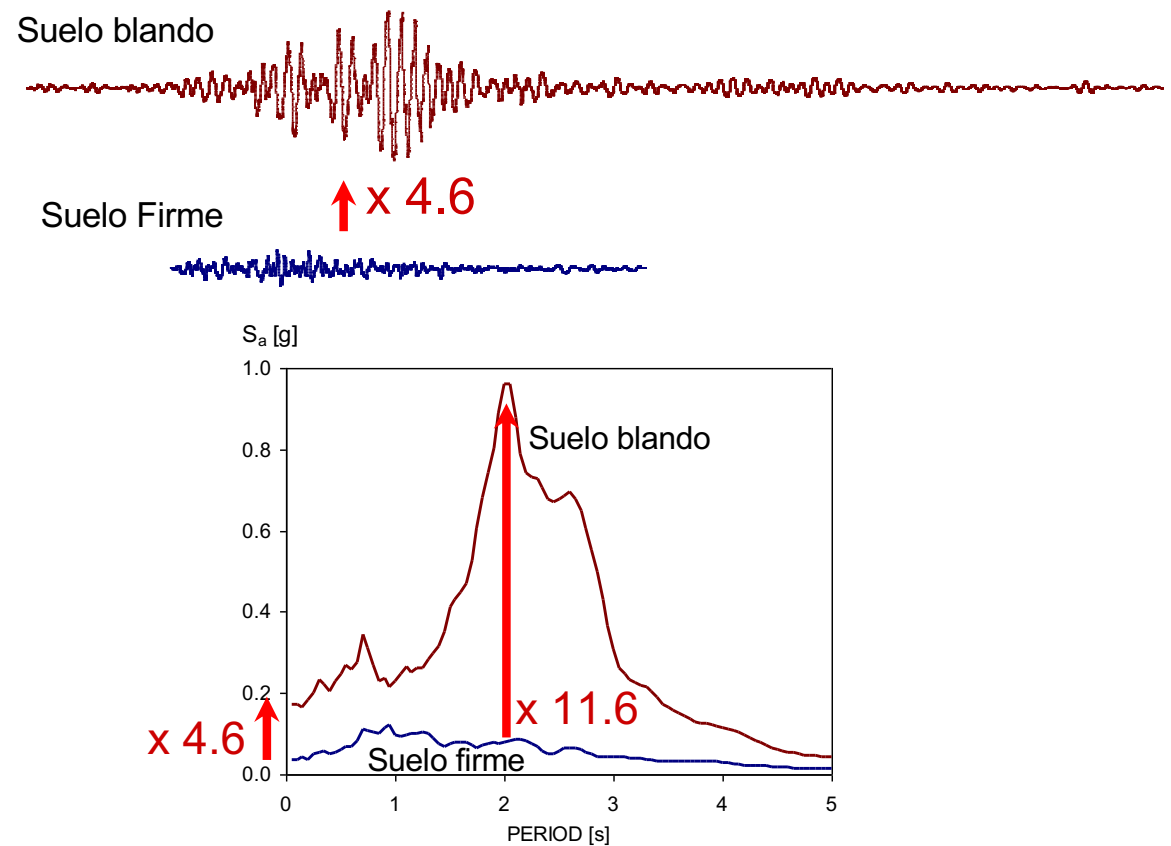


# Efecto del tipo de suelo en las formas espectrales

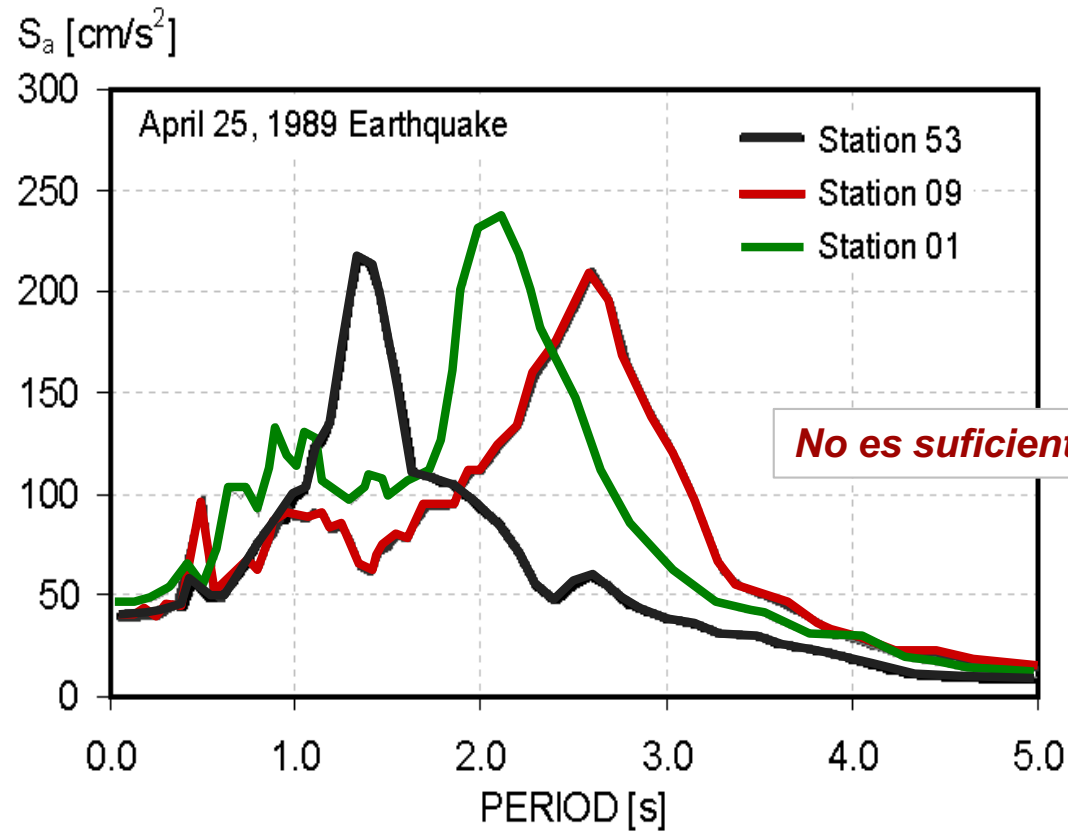
## SAN FRANCISCO BAY AREA



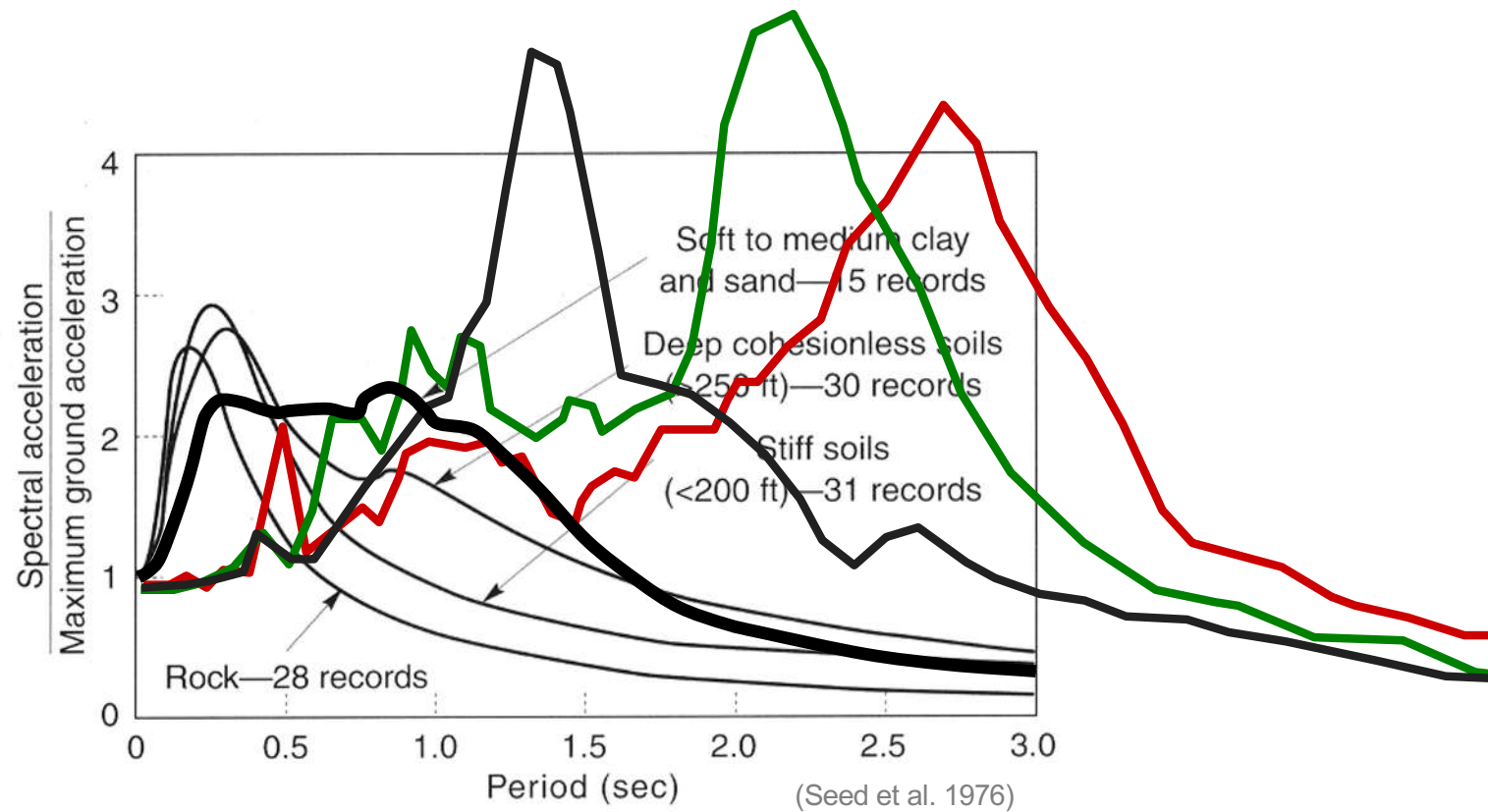
## MEXICO CITY



# Efecto de la profundidad de los depositos blandos



# Efecto del tipo de suelo en las formas espectrales



# Clasificación de suelos en la NCh 433 (Mod 2012)

NCh 433 Mod 2012

NCh433

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

Tabla 4.2 – Clasificación sísmica del terreno de fundación

|   | Suelo Tipo                                            | $V_{s30}$<br>(m/s) | RQD         | $q_u$<br>(MPa)                                 | $(N_1)$<br>(golpes/pie) | $S_u$<br>(MPa) |
|---|-------------------------------------------------------|--------------------|-------------|------------------------------------------------|-------------------------|----------------|
| A | Roca, suelo cementado                                 | $\geq 900$         | $\geq 50\%$ | $\geq 10$<br>( $\varepsilon_{qu} \leq 2\%$ )   |                         |                |
| B | Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme | $\geq 500$         |             | $\geq 0,40$<br>( $\varepsilon_{qu} \leq 2\%$ ) | $\geq 50$               |                |
| C | Suelo denso o firme                                   | $\geq 350$         |             | $\geq 0,30$<br>( $\varepsilon_{qu} \leq 2\%$ ) | $\geq 40$               |                |
| D | Suelo medianamente denso, o firme                     | $\geq 180$         |             |                                                | $\geq 30$               | $\geq 0,05$    |
| E | Suelo de compactidad, o consistencia mediana          | $< 180$            |             |                                                | $\geq 20$               | $< 0,05$       |
| F | Suelos Especiales                                     | *                  | *           | *                                              | *                       | *              |

$N_1$ : Índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 0,1 MPa. Aplicable sólo a suelos que clasifican como arenas

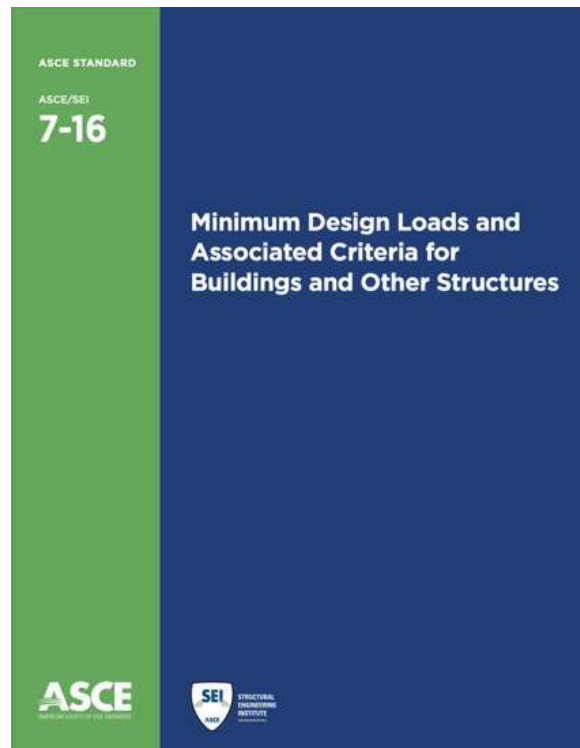
RQD: Rock Quality Designation, según norma ASTM D 6032

$q_u$ : Resistencia a la compresión simple del suelo

$\varepsilon_{qu}$ : Deformación unitaria del suelo desarrollada cuando se alcanza la resistencia máxima en el ensayo de compresión simple

$S_u$ : Resistencia al corte no-drenada del suelo

# Clasificación de suelos en ASCE 7-16



$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$



$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}}$$



$$\bar{s}_u = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^k \frac{d_i}{s_{ui}}}$$



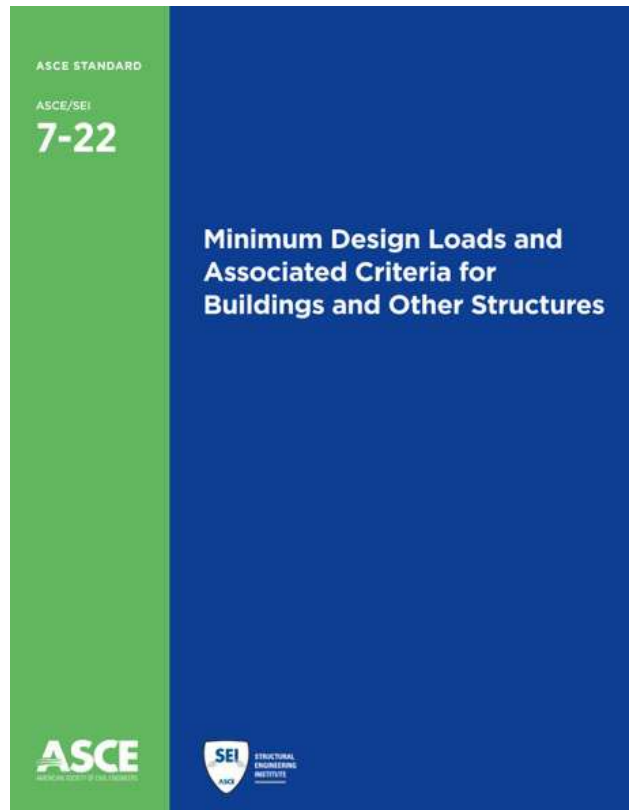
Table 20.3-1 Site Classification

| Site Class                                                                       | $\bar{v}_s$         | $\bar{N}$ or $\bar{N}_{ch}$ | $\bar{s}_u$                       |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| A. Hard rock                                                                     | >5,000 ft/s         | NA                          | NA                                |
| B. Rock                                                                          | 2,500 to 5,000 ft/s | NA                          | NA                                |
| C. Very dense soil and soft rock                                                 | 1,200 to 2,500 ft/s | >50 blows/ft                | >2,000 lb/ft <sup>2</sup>         |
| D. Stiff soil                                                                    | 600 to 1,200 ft/s   | 15 to 50 blows/ft           | 1,000 to 2,000 lb/ft <sup>2</sup> |
| E. Soft clay soil                                                                | <600 ft/s           | <15 blows/ft                | <1,000 lb/ft <sup>2</sup>         |
| Any profile with more than 10 ft of soil that has the following characteristics: |                     |                             |                                   |
| — Plasticity index $PI > 20$ ,                                                   |                     |                             |                                   |
| — Moisture content $w \geq 40\%$ ,                                               |                     |                             |                                   |
| — Undrained shear strength $\bar{s}_u < 500$ lb/ft <sup>2</sup>                  |                     |                             |                                   |
| F. Soils requiring site response analysis in accordance with Section 21.1        | See Section 20.3.1  |                             |                                   |

Note: For SI: 1 ft = 0.3048 m; 1 ft/s = 0.3048 m/s; 1 lb/ft<sup>2</sup> = 0.0479 kN/m<sup>2</sup>.

# Clasificación de suelos en ASCE 7-22

## ASCE 7-22



### 20.4 DEFINITIONS OF SITE CLASS PARAMETERS

The definitions presented in this section shall apply to the upper 100 ft (30 m) of the site profile. Profiles containing distinct soil and rock layers shall be subdivided into those layers designated by a number that ranges from 1 to  $n$  at the bottom, where there is a total of  $n$  distinct layers in the upper 100 ft (30 m). The symbol  $i$  refers to any one of the layers between 1 and  $n$ .

**20.4.1  $\bar{v}_s$ , Average Shear Wave Velocity** The average shear wave velocity,  $\bar{v}_s$ , shall be determined in accordance with the following formula:

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad (20.4-1)$$

where

$d_i$  = Thickness of any layer between 0 and 100 ft (30 m),

$v_{si}$  = Shear wave velocity in ft/s (m/s), and

**Table 20.2-1. Site Classification.**

| Site Class                                                                | $\bar{v}_s$ Calculated Using Measured or Estimated Shear Wave Velocity Profile (ft/s) |                   |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| A. Hard rock                                                              | >5,000                                                                                | > 1524 m/s        |
| B. Medium hard rock                                                       | >3,000 to 5,000                                                                       | > 914 to 1524 m/s |
| BC. Soft rock                                                             | >2,100 to 3,000                                                                       | > 640 to 914 m/s  |
| C. Very dense sand or hard clay                                           | >1,450 to 2,100                                                                       | > 441 to 640 m/s  |
| CD. Dense sand or very stiff clay                                         | >1,000 to 1,450                                                                       | > 640 to 441 m/s  |
| D. Medium dense sand or stiff clay                                        | >700 to 1,000                                                                         | > 213 to 640 m/s  |
| DE. Loose sand or medium stiff clay                                       | >500 to 700                                                                           | > 152 to 213 m/s  |
| E. Very loose sand or soft clay                                           | ≥500                                                                                  |                   |
| F. Soils requiring site response analysis in accordance with Section 21.1 | See Section 20.2.1                                                                    |                   |

Note: For SI: 1 ft = 0.3048 m; 1 ft/s = 0.3048 m/s.

# Clasificación de suelos en el CMS

## J.3. Clasificación sísmica del suelo de fundación

| Suelo tipo                                           | $V_{s30}$ (m/s) | $T_{Nak}$ (s)          |
|------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|
| A. Roca, suelo cementado                             | $\geq 900$      | $< 0.15$ (o H/V plano) |
| B. Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o firme | $\geq 500$      | $< 0.30$ (o H/V plano) |
| C. Suelo denso o firme                               | $\geq 350$      | $< 0.40$ (o H/V plano) |
| D. Suelo medianamente denso, o firme                 | $\geq 180$      | $< 1.0$                |
| E. Suelo de compacidad, o consistencia mediana       | $< 180$         | -                      |
| F. Suelos Especiales                                 | *               |                        |

**Tabla 10.** Clasificación sísmica del suelo de fundación

Donde:

- $T_{Nak}$  Período predominante del terreno estimado mediante la razón espectral H/V (método de Nakamura)
- $H/V$  plano Razón espectral H/V sin un valor máximo definido

La clasificación de un sitio se **deberá** realizar utilizando la **Tabla 10** con el valor de  $V_{s30}$  del sitio como primer requisito, lo que establecerá una primera posible clasificación. Para confirmarlo, se **deberá** verificar en la misma tabla el cumplimiento del período predominante,  $T_{Nak}$ , determinado para el sitio.

En caso de no cumplir con el segundo requisito (período predominante,  $T_{Nak}$ ) especificado en la Tabla 1, la primera clasificación **deberá** degradarse en un nivel.

- Por ejemplo, si un sitio posee  $V_{s30} = 520$  m/s y  $T_{Nak} = 0.51$  s, la primera clasificación sería Suelo Tipo B. Sin embargo, dado que el período predominante no cumple con la condición (debería ser  $< 0.3$  s y es 0.51 s), se degradará su clasificación.

Se **deberán** investigar las propiedades dinámicas del suelo bajo la estructura. No obstante, en proyectos de pequeña envergadura, donde exploraciones exhaustivas pueden ser inviables, se **podrán** evaluar condiciones especiales que permitan un estudio menos detallado sin comprometer el correcto desempeño de la edificación.

# Formas espectrales para diferentes tipos de suelo

## 6.3.5 Espectro de diseño

NCh 433 Mod 2012

6.3.5.1 El espectro de diseño de pseudo-aceleraciones que determina la resistencia sísmica de la estructura está definido por:

$$S_d = \frac{S A_s \alpha}{(R^2 / I)} \quad (6-8)$$

en que los valores del  $I$  y  $A_s$  se determinan en la forma estipulada en 6.2.3.

6.3.5.2 El factor de amplificación  $\alpha$  se determina para cada modo de vibrar  $n$ , de acuerdo con la expresión:

$$\alpha = \frac{1 + 4,5 \left( \frac{T_n}{T_g} \right)^p}{1 + \left( \frac{T_n}{T_g} \right)^1} \quad (6-9)$$

en que:

$T_n$  = período de vibración del modo  $n$ ;

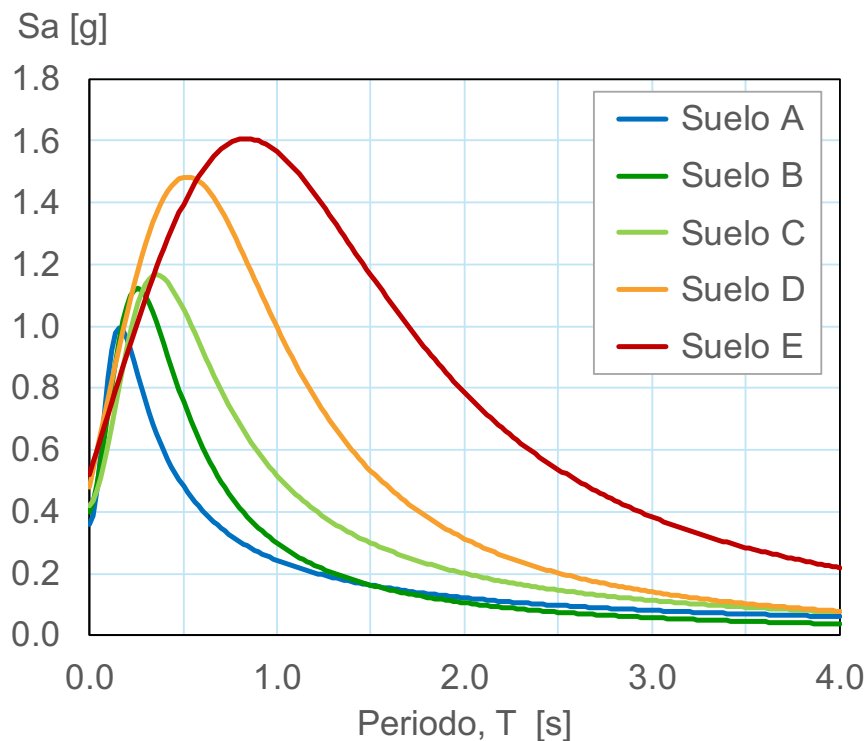
$T_g, p$  = parámetros relativos al tipo de suelo de fundación que se determinan de Tabla 6.3 según la clasificación de Tabla 4.2.

Tabla 6.2 - Valor de la aceleración efectiva  $A_g$

| Zona sísmica | $A_g$  |
|--------------|--------|
| 1            | 0,20 g |
| 2            | 0,30 g |
| 3            | 0,40 g |

Tabla 6.3 - Valor de los parámetros que dependen del tipo de suelo

| Tipo de Suelo | $S$  | $T_g$ (s) | $T^*$ (s) | $n$  | $p$ |
|---------------|------|-----------|-----------|------|-----|
| A             | 0.90 | 0.15      | 0.20      | 1.00 | 2.0 |
| B             | 1.00 | 0.30      | 0.35      | 1.33 | 1.5 |
| C             | 1.05 | 0.40      | 0.45      | 1.40 | 1.6 |
| D             | 1.20 | 0.75      | 0.85      | 1.80 | 1.0 |
| E             | 1.30 | 1.20      | 1.35      | 1.80 | 1.0 |
| F             | *    | *         | *         | *    | *   |



# Cambios en formas espectrales en EUA

ASCE STANDARD

ASCE/SEI

7-16

ASCE STANDARD

ASCE/SEI

7-22

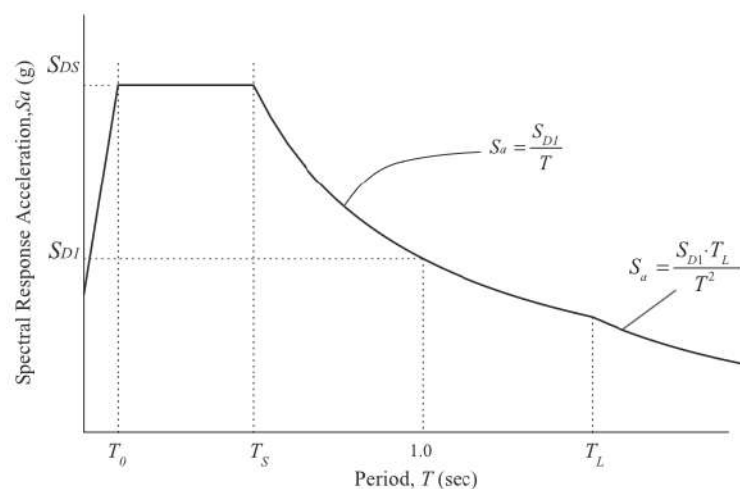


Figure 11.4-1. Two-period design response spectrum.

**11.4.5.1 Multi-Period Design Response Spectrum** The multi-period design response spectrum shall be developed as follows:

1. At discrete values of period,  $T$ , equal to 0.0 s, 0.01 s, 0.02 s, 0.03 s, 0.05 s, 0.075 s, 0.1 s, 0.15 s, 0.2 s, 0.25 s, 0.3 s, 0.4 s, 0.5 s, 0.75 s, 1.0 s, 1.5 s, 2.0 s, 3.0 s, 4.0 s, 5.0 s, 7.5 s, and 10 s, the 5%-damped design spectral response acceleration parameter,  $S_a$ , shall be taken as 2/3 of the multi-period 5%-damped  $MCE_R$  response spectrum from the USGS Seismic Design Geodatabase for the applicable site class.

# Efecto del tipo de suelo en espectros de diseño

## ASCE HAZARD TOOL

1 Enter Structure Information

Enter Location

☒ Snap to Address

ADDRESS

LAT/LONG

FIND ON MAP

Click on Map to select location

2 Requested Data

Standard Version

ASCE/SEI 7-22

NEW! ASCE/SEI 41 now available

Risk Category

Select Risk

Site Soil Class

Default

Measurements

☒ Customary

☐ SI

Load Types

Select all

☐ Wind

☐ Ice

☐ Rain

☐ Tsunami

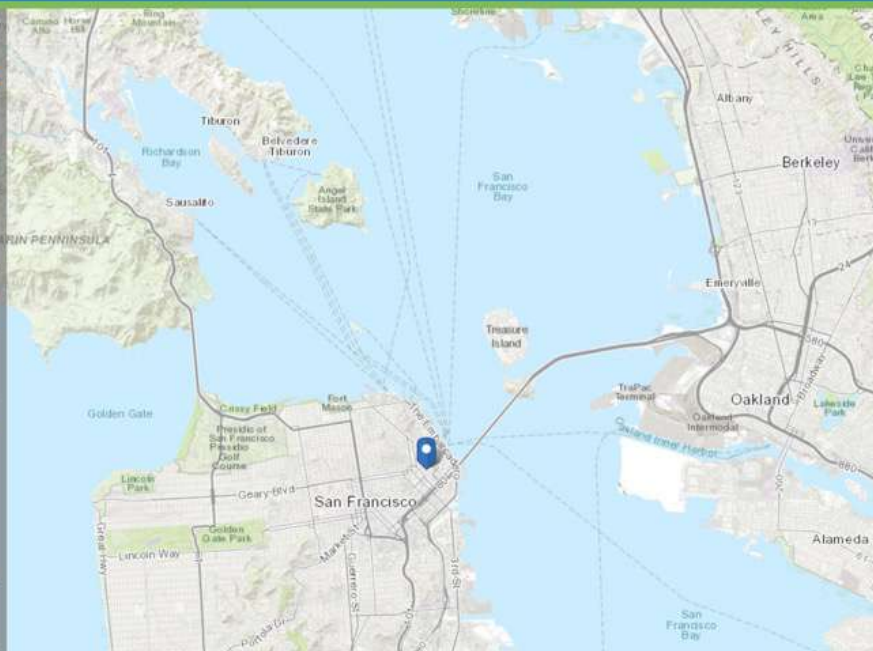
☐ Seismic

☐ Snow

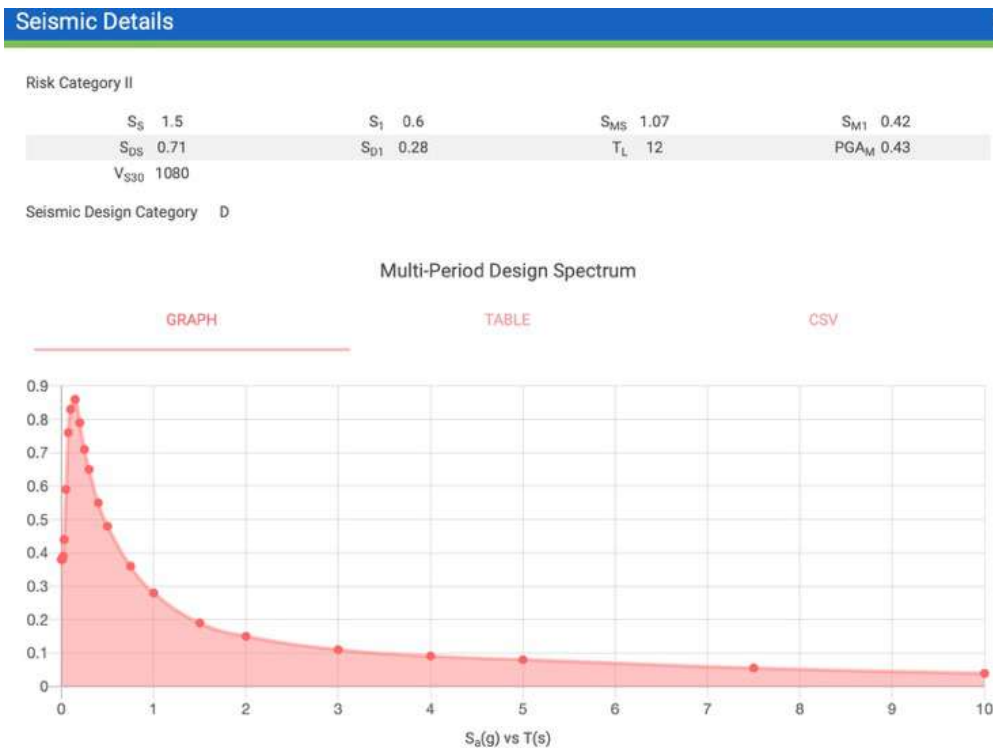
☐ Flood

☐ Tornado

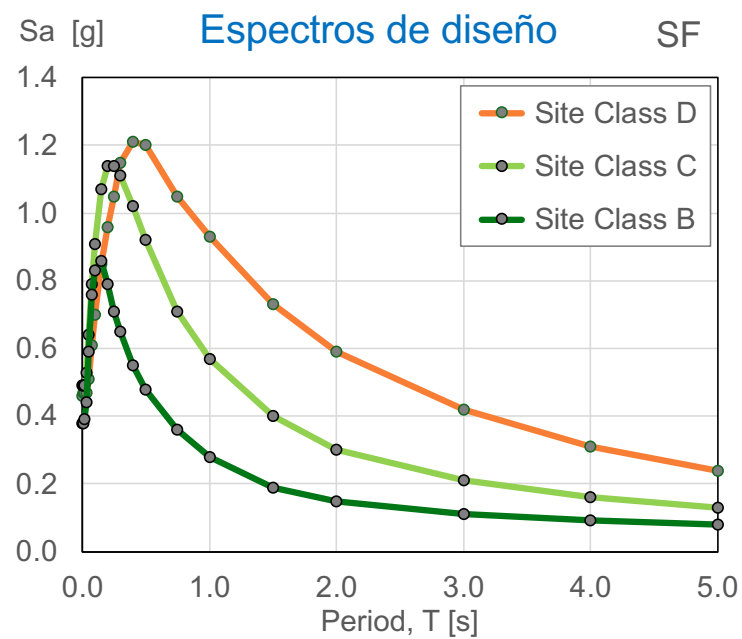
VIEW RESULTS



# Efecto del tipo de suelo en espectros de diseño



# Efecto del tipo de suelo en espectros de diseño



# Efecto del tipo de suelo en espectros de diseño

## PROBLEMA #1

Los modelos (GMMs) que se usan actualmente NO son capaces de predecir amplificaciones (“resonancias”) locales

Comparación de estimaciones de un modelo GMM NGA-2 (BSSA14) vs registros en SF

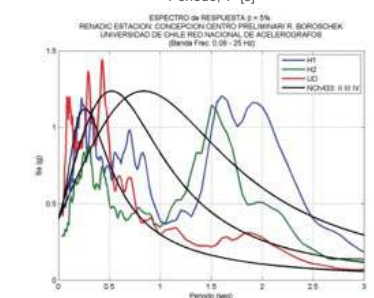
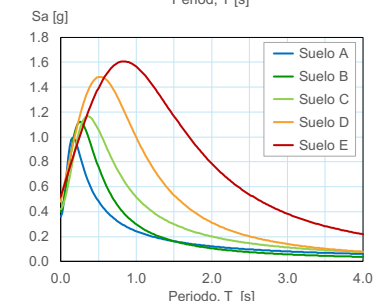
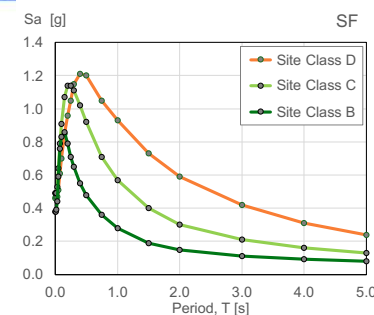
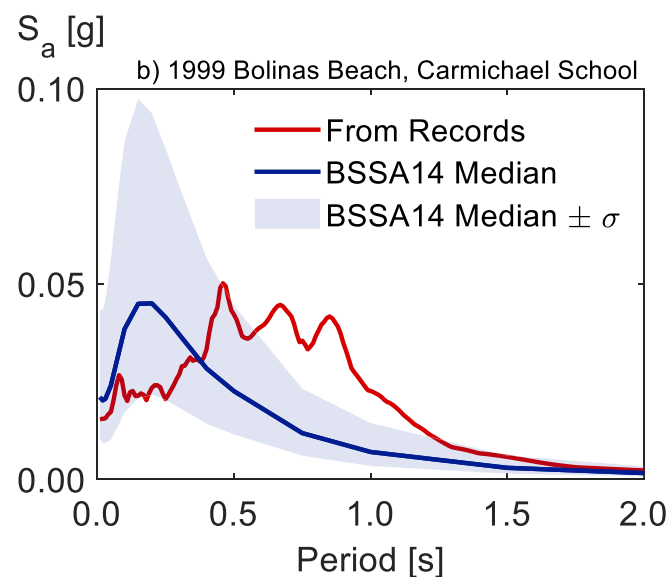
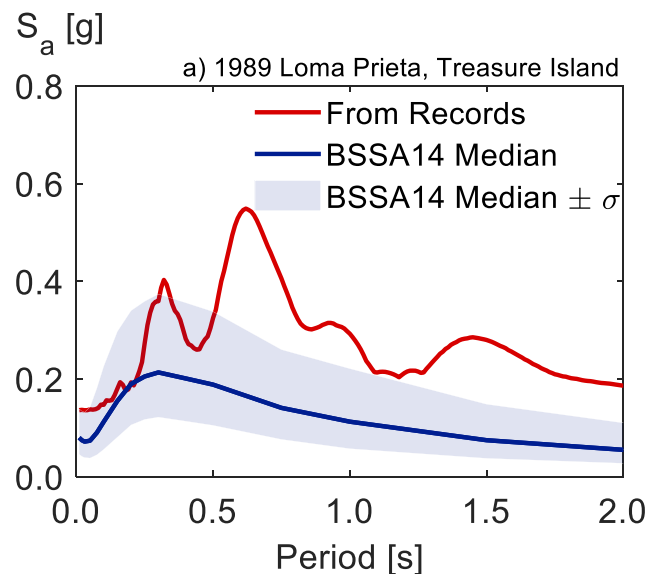
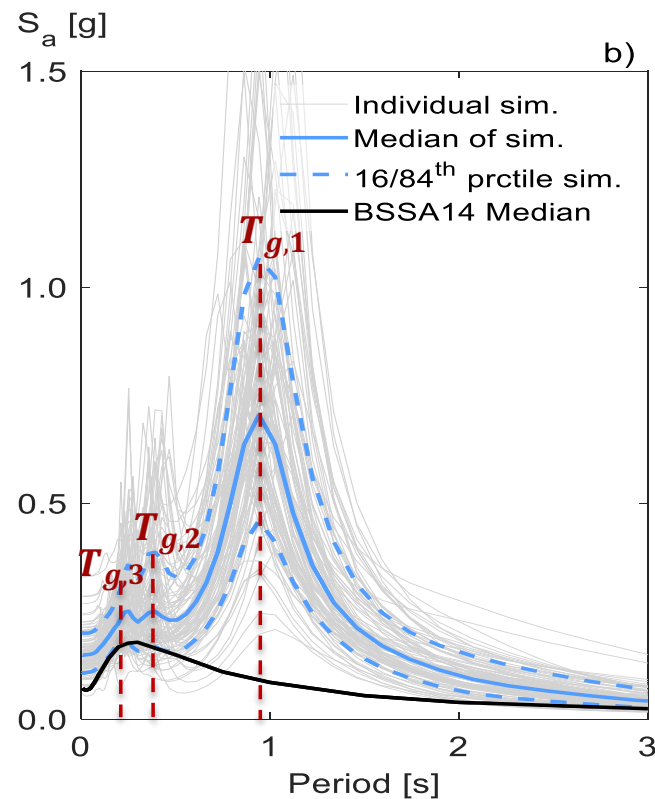
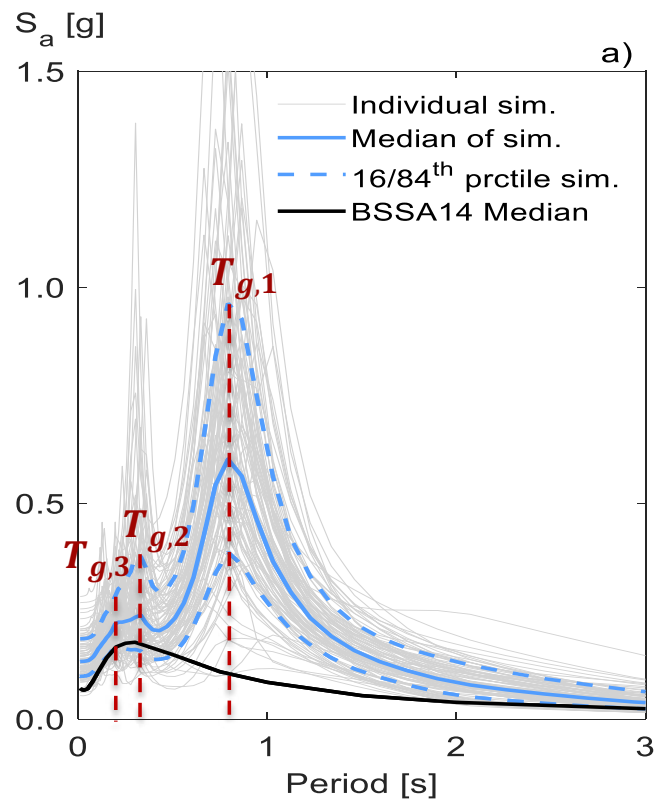


Figure 3. Acceleration response spectra for the Concepción downtown station showing greater vertical spectral response between 0 and 0.5 s and an important second peak in the horizontal spectral response at the period of 1.5 to 2.0 s due to soil amplification (Boroschok et al., 2010).

# Efecto del tipo de suelo en espectros de respuesta

## PROBLEMA #1

Los modelos (GMMs) que se usan actualmente NO son capaces de predecir amplificaciones (“resonancias”) locales

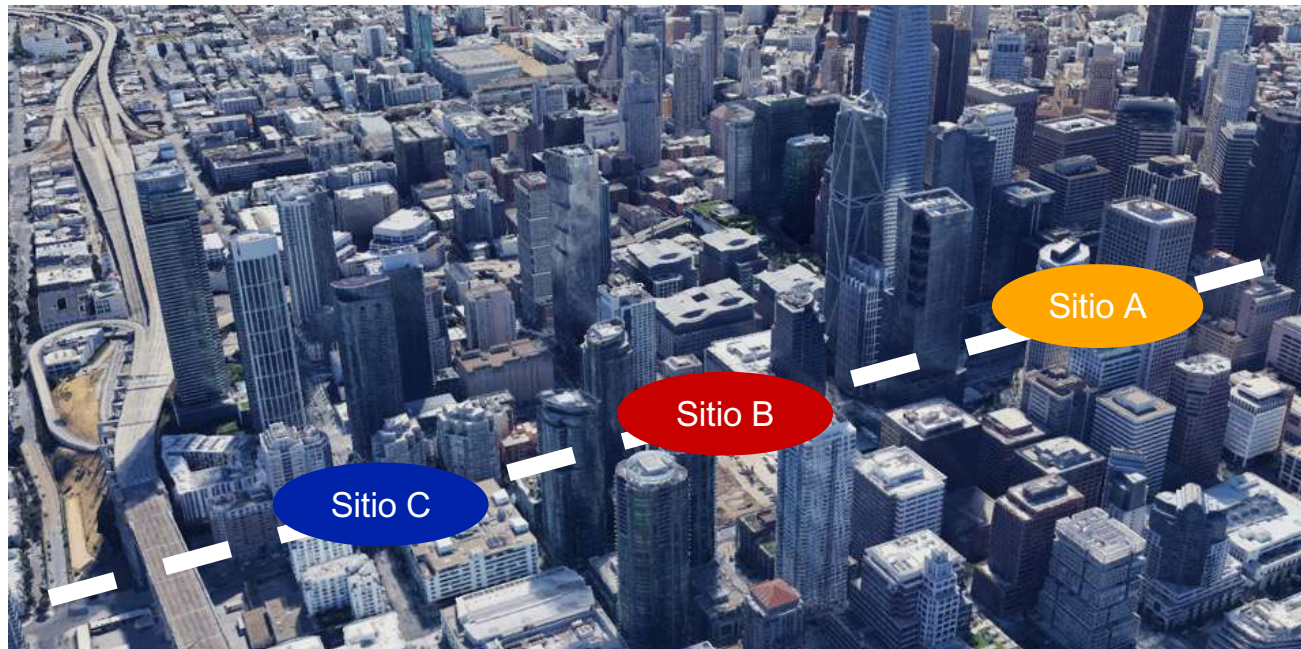


Dos sitios de suelo tipo D en el centro de la ciudad de SF

# Efecto del tipo de suelo en espectros de respuesta

“The change from strong effects (damage) to weak sometimes takes place rather abruptly within the distance of a block or two, or less.”

Lawson Report (1969) on The California Earthquake of April 18, 1906

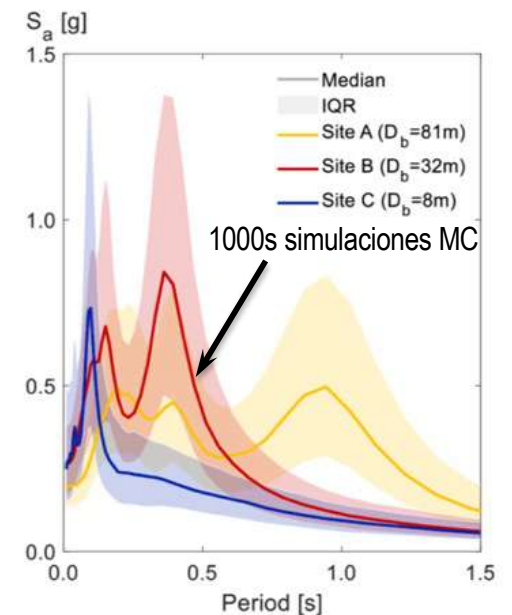
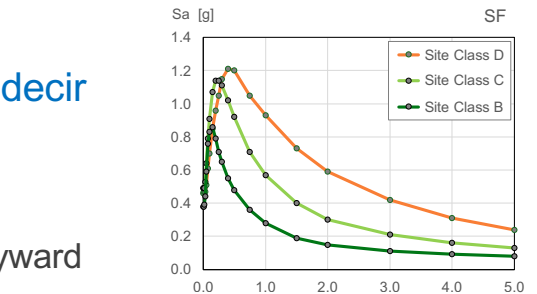
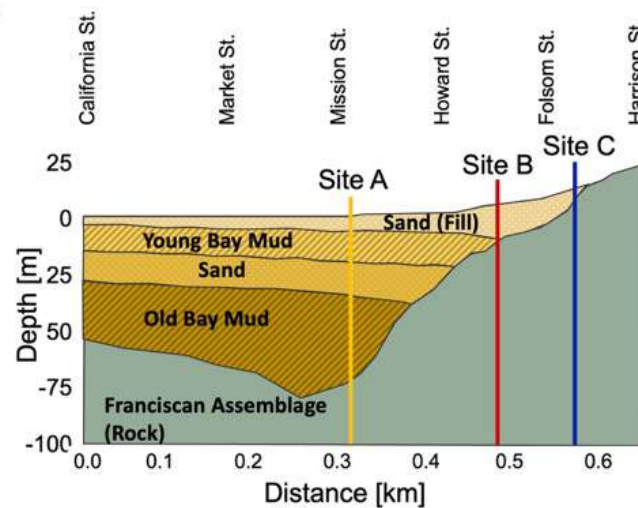


# Efecto del tipo de suelo en espectros de diseño

## PROBLEMA #1

Los modelos (GMMs) que se usan actualmente NO son capaces de predecir amplificaciones (“resonancias”) locales

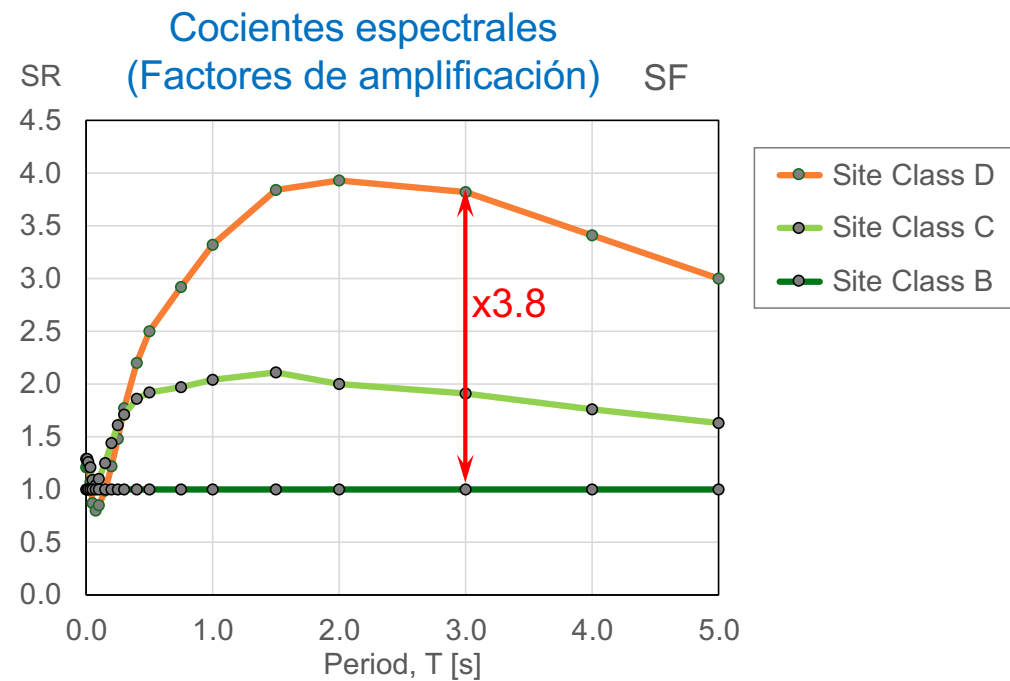
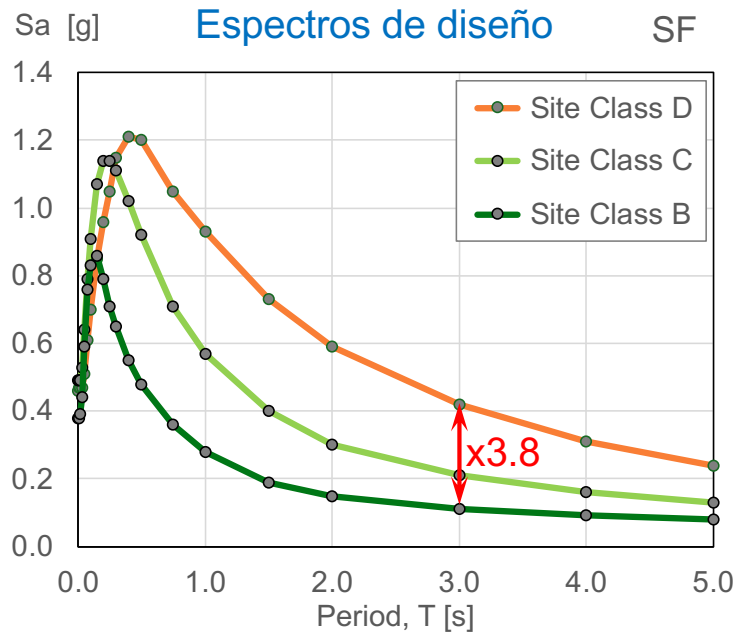
Tres sitios en SF, CA a 300m uno del otro en un sismo hipotético  $M_w$  7.0 en la falla de Hayward



# Efecto del tipo de suelo en espectros de diseño

## PROBLEMA #2

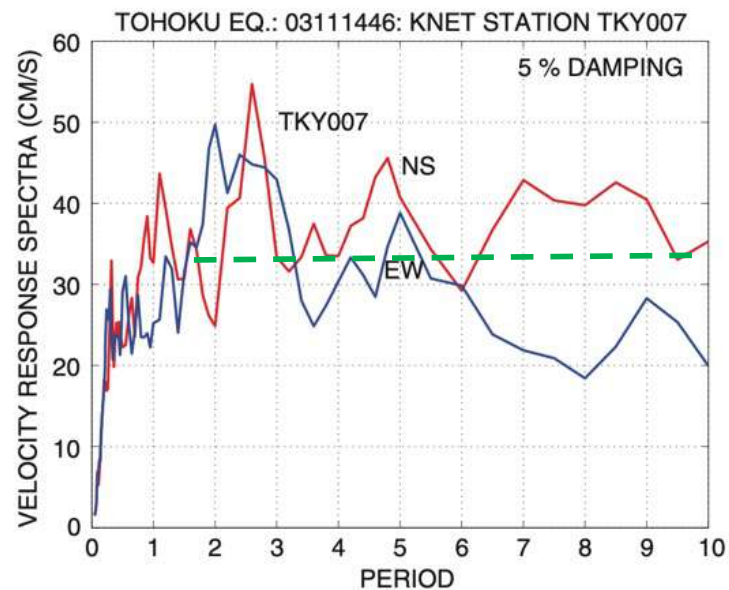
Sobre-predicción de amplificación en periodo largo en sitios con depósitos blandos que no son muy profundos



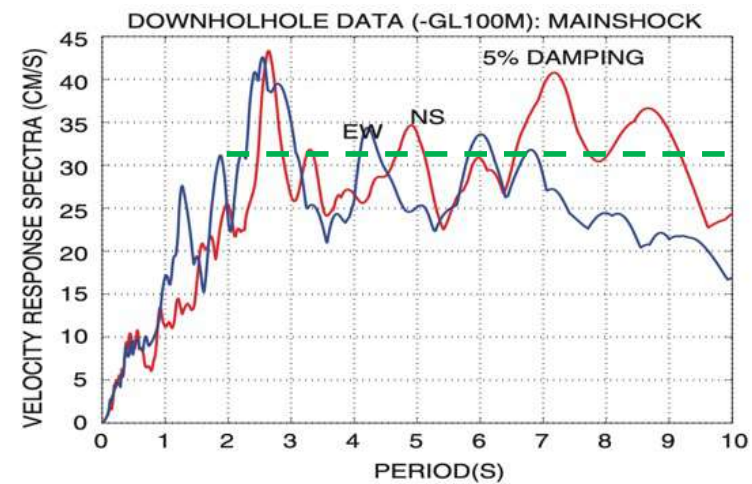
# Problemas de sobrestimación de amplificación

*Ejemplo de registros en Tokio en una estación de la red KNET durante el sismo de Tohuko, Mw 9 de 2011*

Espectro de velocidad en superficie



Espectro de velocidad en pozo a 100m de prof.

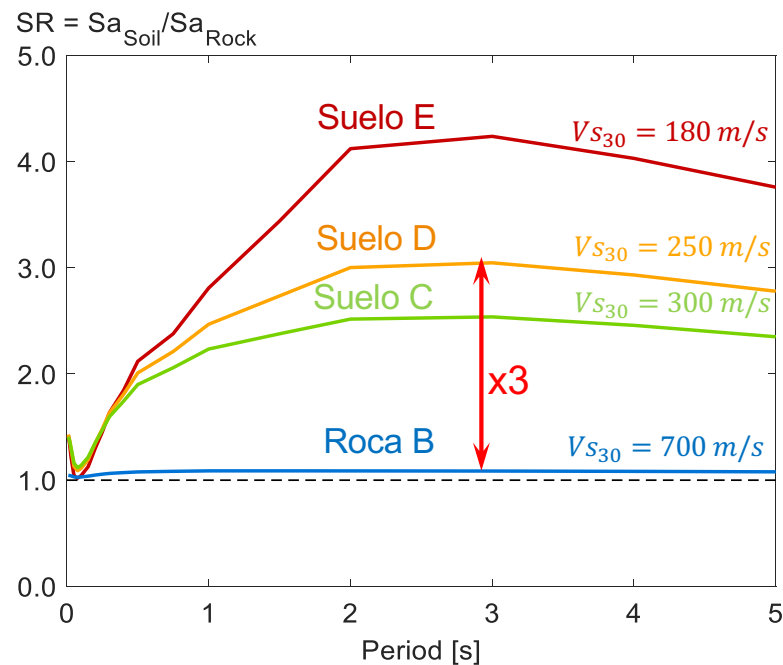


(Celebi et al., 2016)

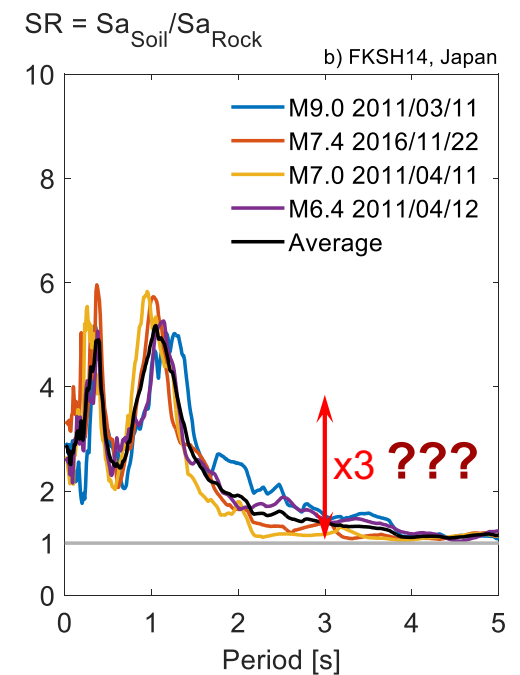
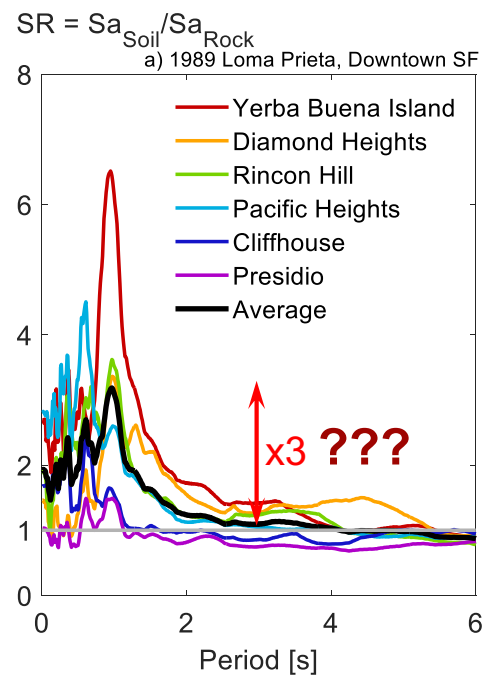
***Prácticamente no hay amplificación para  $T > 2s$  a pesar de ser un sitio de suelo blando !***

# Efecto del tipo de suelo en espectros de diseño

Cocientes espectrales de  
GMM-NGA2 (BSSA14)  
(Factores de amplificación)



Cocientes espectrales de  
Suelo/Roca en registros  
(Factores de amplificación)



# Efecto del tipo de suelo en espectros de diseño

Enormes implicaciones para sitios como estos

Ciudad de San Francisco, CA



(Foto E. Miranda)

Ciudad de Panamá



© Ronald Kötz

# Breves comentarios sobre el uso de Vs30

*“While a growing body of literature is dedicated to the improvement or calibration of  $V_{S30}$  models inferred from geomorphological and/or geological proxies, it is easy to lose perspective of the purpose that such models serve in terms of risk analysis, which is to characterize the site amplification itself.  $V_{S30}$  serves only as a proxy for this purpose.”*

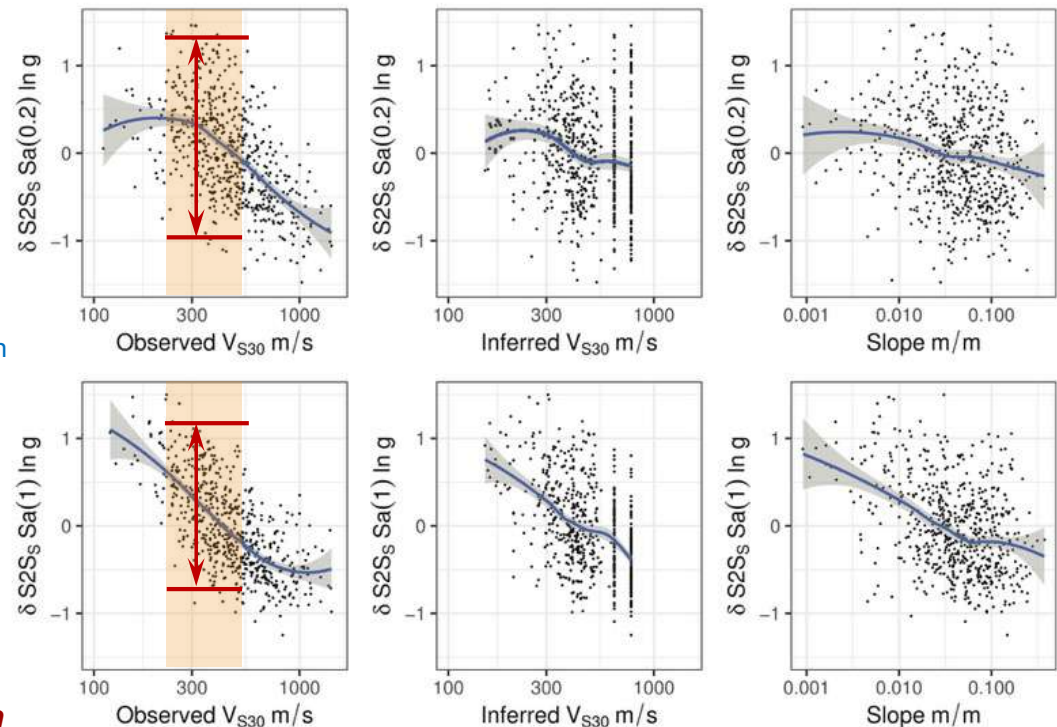
Ordenada en suelo      Ordenada en roca      Factor de Amplificación

$$\ln(Y_{es}|T) = \ln(Y_{es}^{ref}|T) + \ln Amp_{es}(T, X_s)$$

Factor de Amplificación      Mediana      Variabilidad (lognormal)

$$\ln Amp_{es}(T, X_s) = \mu_{es}^{Amp}(T, X_s) + \delta S2S_s + \delta Amp_{es}$$

**Enorme variabilidad en el factor de amplificación de la ordenada espectral aun si  $V_{S30}$  es conocido y mucho mayor si  $V_{S30}$  inferido**

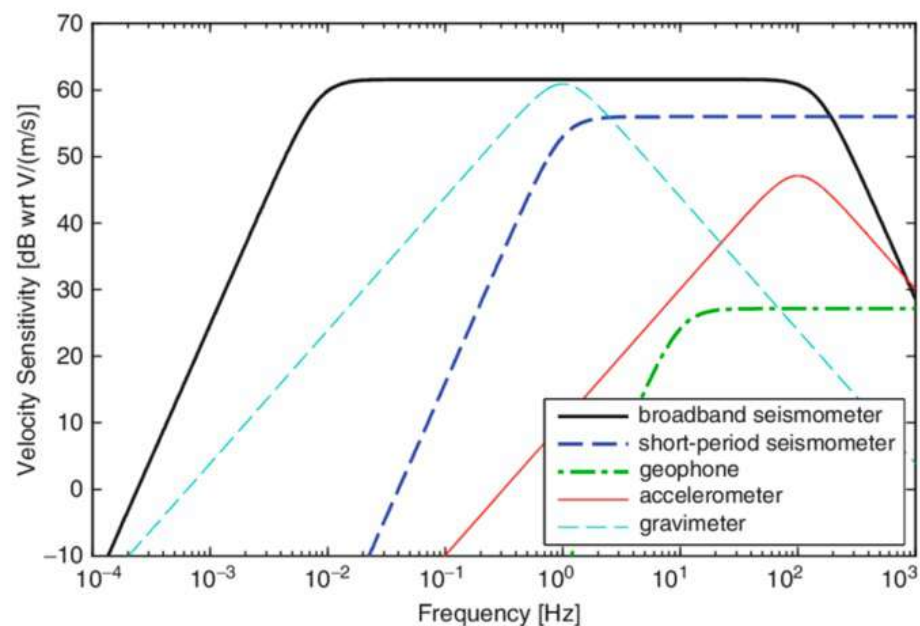


Variabilidad de los residuales de la amplificación espectral de un sitio a otro en función de Vs30 y pendiente.

(Tomado de Weatherhill et al., 2020)

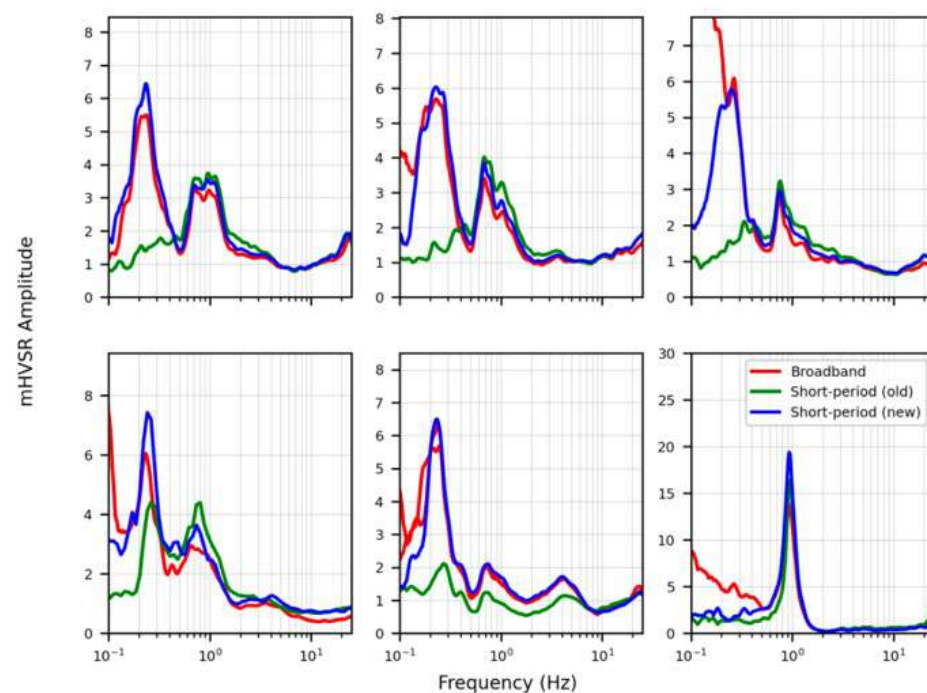
# Breves comentarios sobre el uso de HVSRs

## El tipo de instrumento es muy importante



Sensibilidad de la velocidad en diferentes tipos de instrumentos

(Tomado de Ackerly *et al.*, 2014)

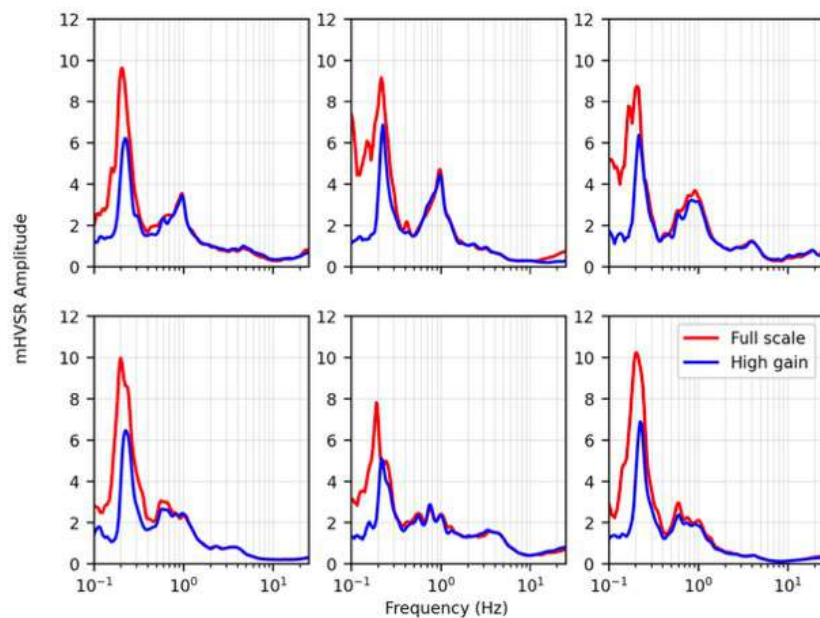


Efecto del tipo de instrumento en HVSr

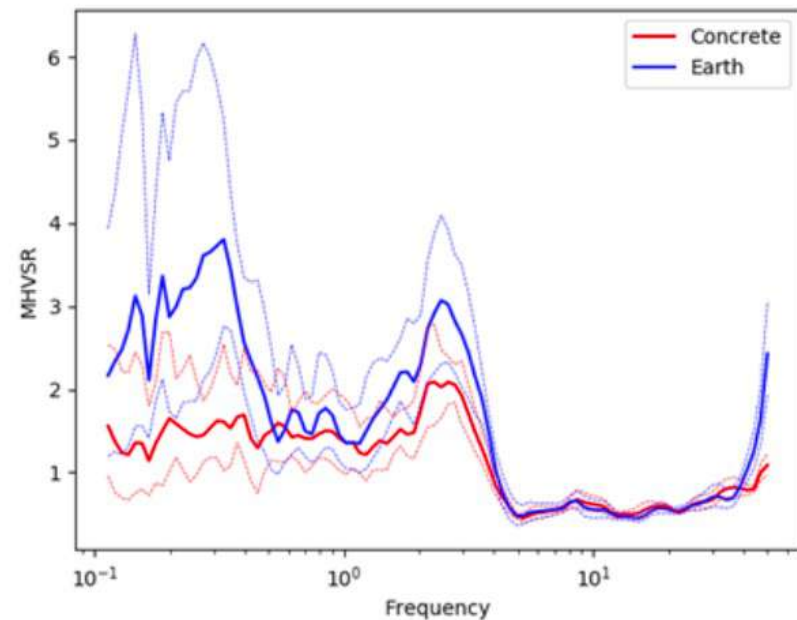
(Tomado de Sirohey and Molnar., 2022)

# Breves comentarios sobre el uso de HVSRs

## Efecto de la ganancia y tipo de superficie en HVSRs



Efecto de la ganancia en la medición de HVSR



Efecto de la superficie en que se hace la medición de HVSR

(Tomado de Sirohey and Molnar., 2022)

# Breves comentarios sobre el uso de HVSRs

## Problemas con el ruido urbano

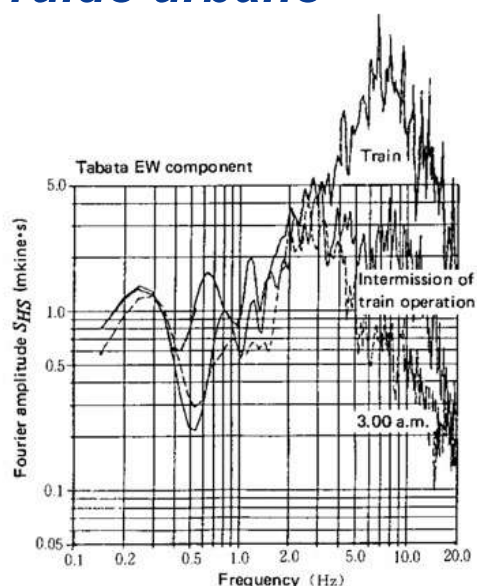
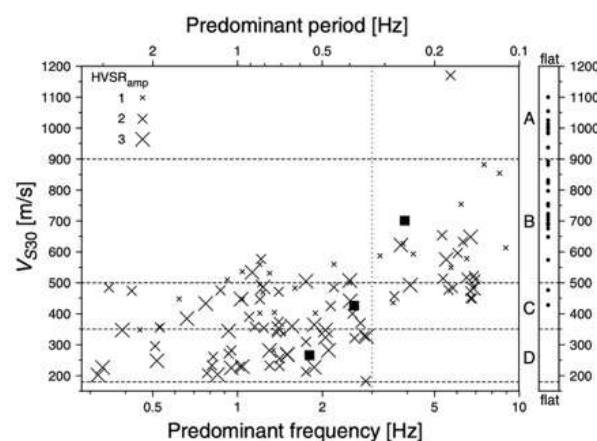


Fig. 8 Comparison of tremor spectra between train induced tremor and quiet time span (intermission of train operation and 3.00 a.m.)

(Nakamura, 1989)

## Geophysical Characterization of the Chilean Seismological Stations: First Results

by F. Leyton, A. Leopold, G. Hurtado, C. Pastén, S. Ruiz, G. Montalva, and E. Saéz



▲ **Figure 4.** Average  $S$ -wave velocity in the upper 30 m ( $V_{S30}$ ) as a function of the predominant frequency (bottom scale) or period (upper scale) for the all the site studied here. The size of each cross is proportional to the amplitude classification ( $HVSR_{amp}$ ), following the legend in the upper left corner. The black squares shows the average predominant frequency for classes B, C, and D. Thin black lines mark the classification used in this study, also presented in Table 1; the vertical dotted line marks the 3 Hz predominant frequency. The right panel shows the  $V_{S30}$  for sites with flat curves (e.g.,  $HVSR_{amp} = 0$ ).

Seismological Research Letters Volume 89, Number 2A March/April 2018

## FINAL COMMENTS

In this study, we report preliminary results of the geophysical characterization of the Chilean Seismological Network, managed by CSN, mostly using active- and passive-source surface-wave array methods, and the HVSR method. The geophysical characterization using these methods was particularly difficult due to the fact that most of these stations are located in moderate-to-large cities, with high urban noise. We successfully explore 163 stations, using array-based and three-component microtremor measurements. The most reliable methods used in the present study were SPAC (Aki, 1957) and its extension to higher frequency considering only the zero crossings (Ekström *et al.*, 2009; Ekström, 2014). We found that there is no clear correlation between the site's predominant frequency and the HVSR amplitude ( $HVSR_{amp}$ ); however, there seems to be a slight correlation between the average  $S$ -wave velocity in the upper 30 m ( $V_{S30}$ ) and the predominant frequency: from our results, sites with  $V_{S30} \leq 500$  m/s appear to have a predominant frequency lower than 3 Hz. We believe that this information will contribute to the understanding of the strong-motion shaking produced by large-to-moderate earthquakes, especially in sites where most of the Chilean population live.

# Breves comentarios sobre el uso de HVSRs

## Problemas para capturar modos superiores

### A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface

Yutaka NAKAMURA\*, Dr. Eng.

As methods for dynamic characteristics estimation of surface layers, investigation with boring and a method which employs microtremor are well known so far. Boring investigation, one of the most accurate methods is costly and time consuming and is not available all the time. The method that employs microtremor is handy but has not produced satisfactory result to this day.

This paper describes a new processing method that employs microtremor observation yet producing accurate estimation of characteristics of the ground motions. The method uses vertical component and horizontal components.

As a result, the spectrum ratio of the horizontal components and vertical component of microtremor bears resemblance to transfer function for horizontal motion of surface layers.

(Nakamura, 1989)

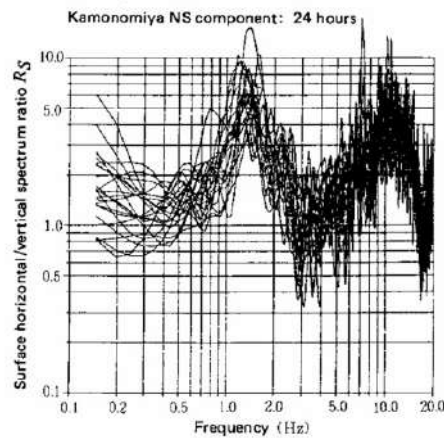
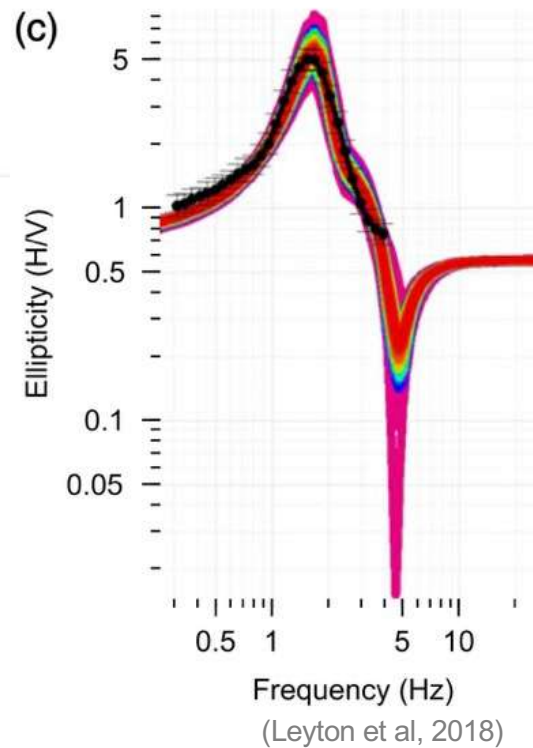


Fig. 11 Time change of horizontal/vertical spectrum ratio on the surface (Nakamura, 1989)



(Leyton et al, 2018)

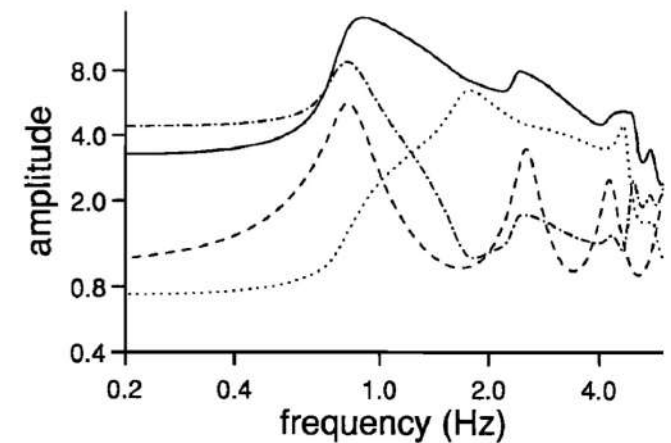
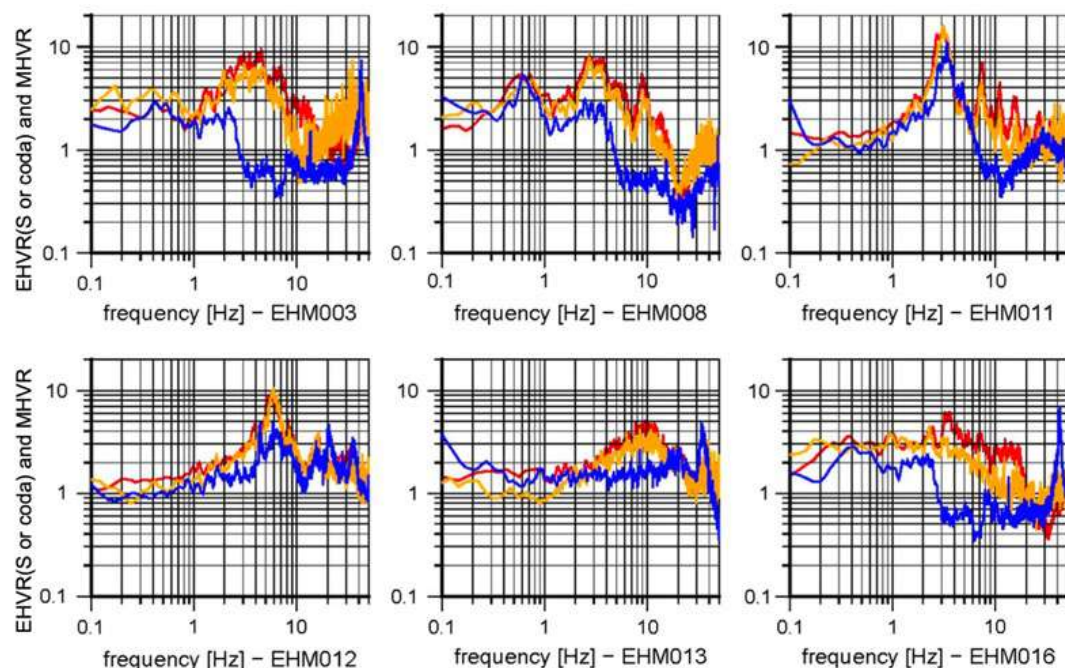


Figure 2. The horizontal- and vertical-component spectra (solid and dotted lines respectively) predicted by our model. The ratio of horizontal to vertical components is represented by the dot-dashed line, and the dashed line represents the site response predicted for vertically incident shear waves.

(Field & Jacob, 1993)

## Problemas para capturar modos superiores



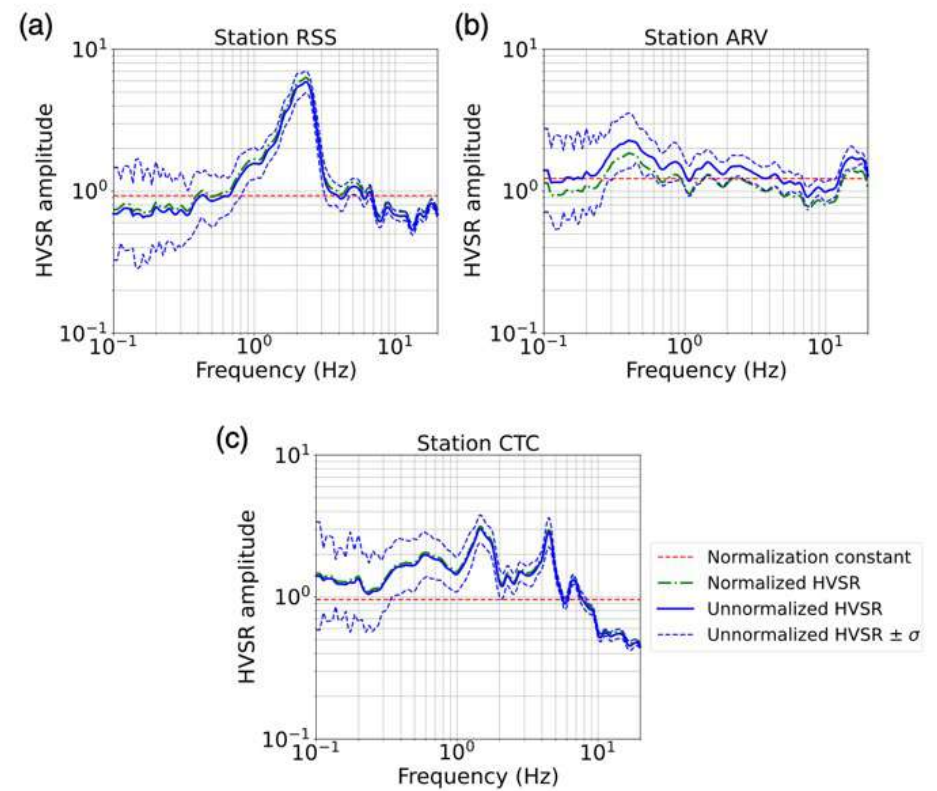
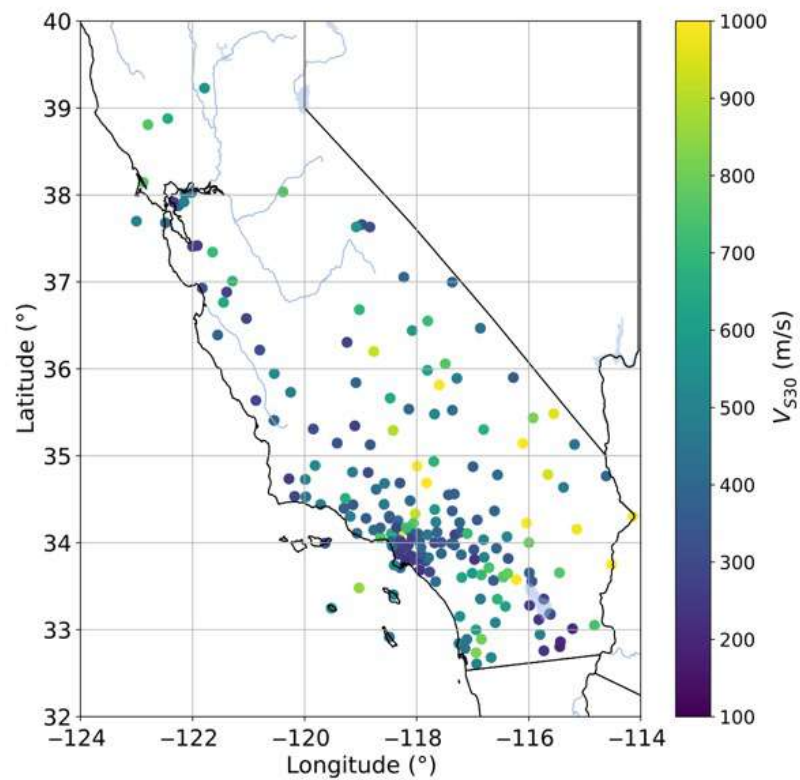
**Fig. 8** Direct comparison of the average EHVRs of S-wave (red), the average EHVRs of S-coda (orange), and the average MHVRs for microtremors (blue) at six sites in Ehime Prefecture. MHVRs and EHVRs are quite similar for some sites, but MHVRs tend to be smaller for most of the sites

## Conclusions

In this study, we calculated the horizontal-to-vertical spectral ratios (HVR) from observed microtremors (MHVR) as well as those of observed weak earthquake ground motions (EHVR) and compared predominant peak frequencies and amplitudes at these peak frequencies of the MHVRs and EHVRs with those calculated theoretically from S-wave velocity models based on the diffuse wave concept. When we compare MHVRs and EHVRs, we found that they share similarities but have significant differences in their shapes, especially after the fundamental peak frequency in MHVRs. This is because MHVR mainly consists of surface waves so that peaks associated with higher modes would not be as prominent as that of EHVR.

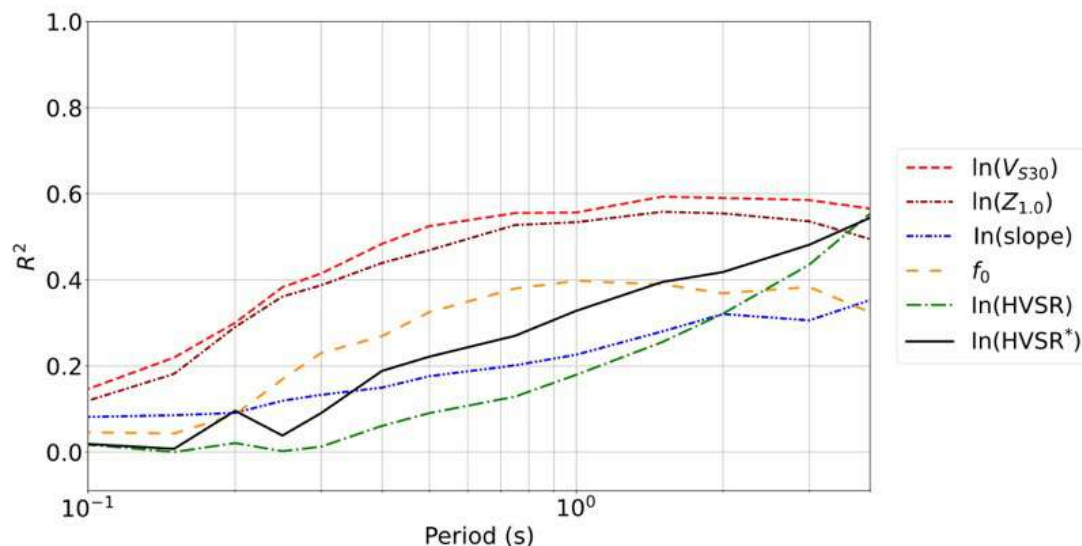
(H Kawase, Y Mori and F Nagashima, 2018)

# Estudio reciente de HVSR



(Pinilla-Ramos, C., N. Abrahamson, and R. Kayen, 2022)

## Estudio reciente de HVSR



Overall, the  $R^2$  values shown in Figure 12 indicate that  $\ln(V_{S30})$  is a much better predictor of site amplification than  $\ln(\text{HVSR}^*)$  at short and intermediate periods, but they become more similar as the period increases. This comparison shows that while the  $f_0$  and the  $\text{mHVSR}^*(T)$  does not predict site amplification for California sites as well as  $V_{S30}$ , they do provide useful information on the site amplification, particularly for periods greater than 0.5 s. These results apply only to California sites. For sites in other regions with strong site resonances, the parameter that has the highest correlation with the site terms may be different. For example, in regions with strong site resonances, the  $f_0$  may be a better parameter than  $V_{S30}$  for estimating the site terms.

(Pinilla-Ramos, C., N. Abrahamson, and R. Kayen, 2022)

# Importancia de los depósitos profundos en sismos grandes

Estudios de hace 25 años en que sólo se puso atención a los depósitos superficiales

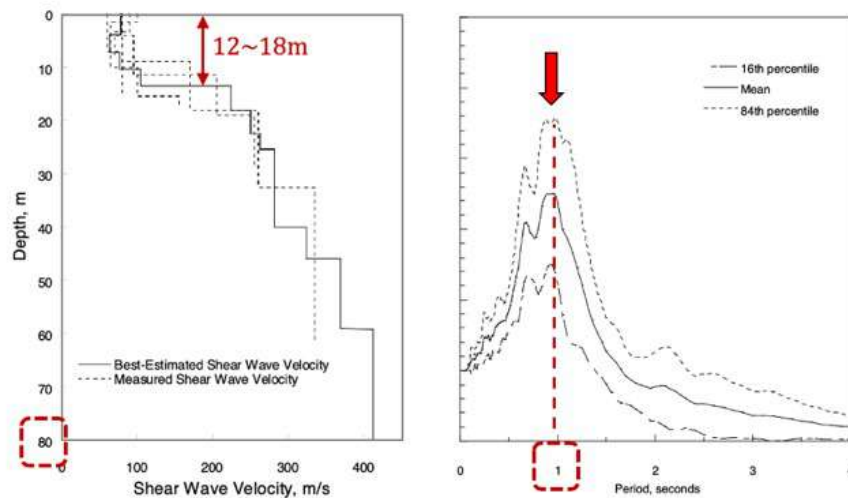


Figure 1: Comparison of measured shear wave velocity profile to best-estimate profile for Bangkok based on empirical correlations.

(After Ashford et al., 2000)

Shear wave velocities of shallow deposits in Bangkok

Figure 2: Best-estimate normalized acceleration response spectra for Bangkok.

(After Ashford et al., 2000)

Best estimate of response spectrum for Bangkok in 2000

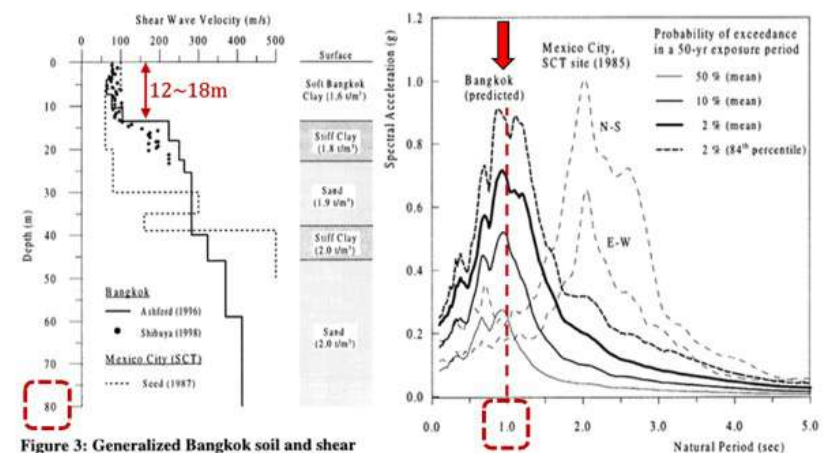


Figure 3: Generalized Bangkok soil and shear wave velocity profiles

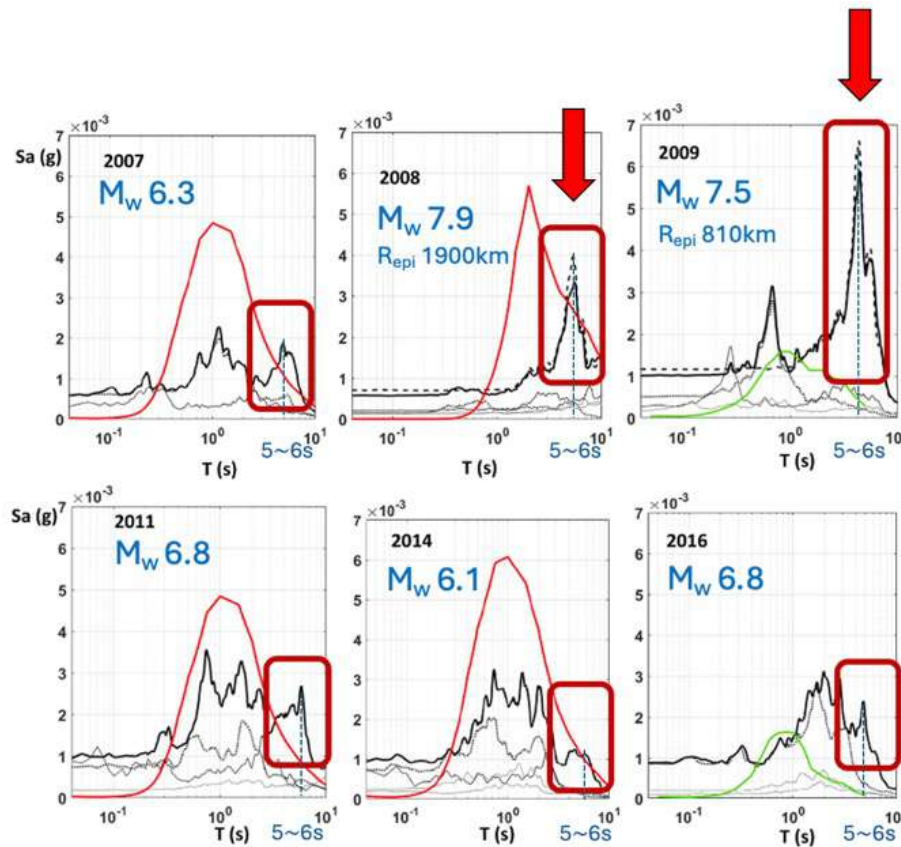
Shear wave velocities of shallow deposits in Bangkok

Figure 5: Comparison between the elastic response spectra of predicted ground motions and the spectra of the damaging ground motions in Mexico City

(After Warnitchai et al., 2000)

Best estimate of response spectrum for Bangkok in 2000

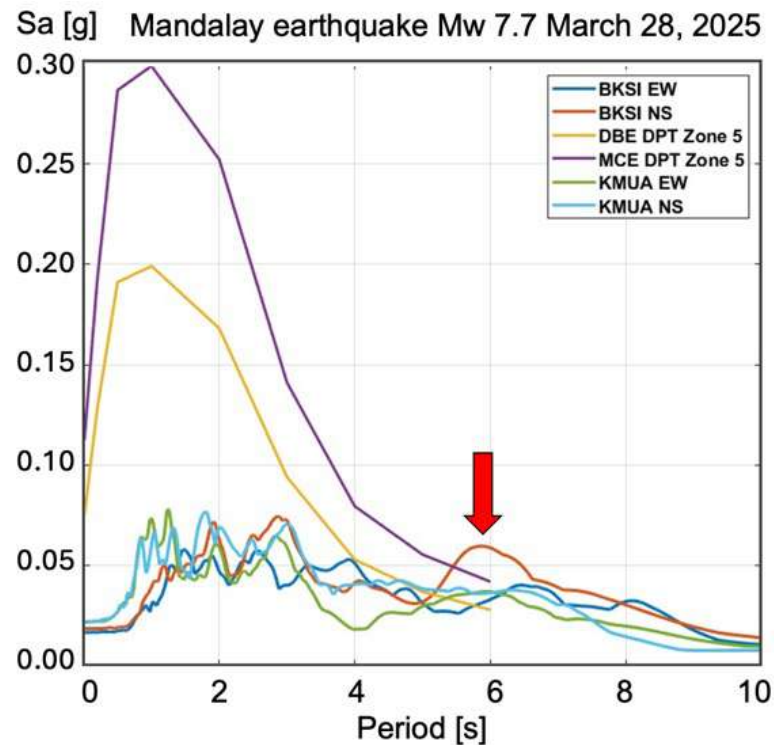
# Importancia de los depósitos profundos en sismos grandes



(Modified from Ornthammarath et al. 2023)

Depósitos profundos pueden producir grandes amplificaciones en periodos muy largos que son muy importantes para edificios altos.

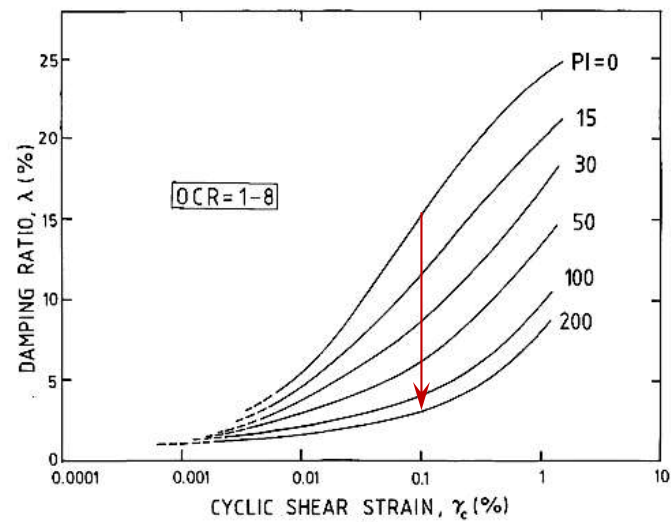
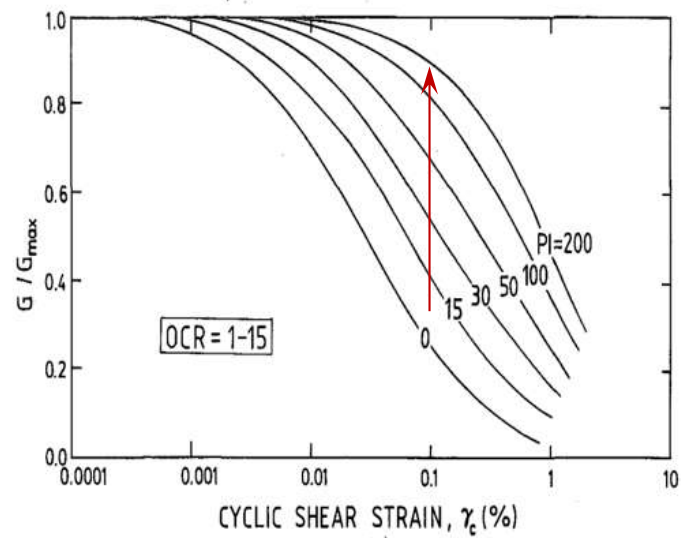
# Importancia de los depósitos profundos en sismos grandes



(Image courtesy of Profs. Ornthammarath and Warnitchai)

Depósitos profundos dieron lugar a picos espectrales grandes en periodos muy largos que produjeron grandes demandas de desplazamiento lateral

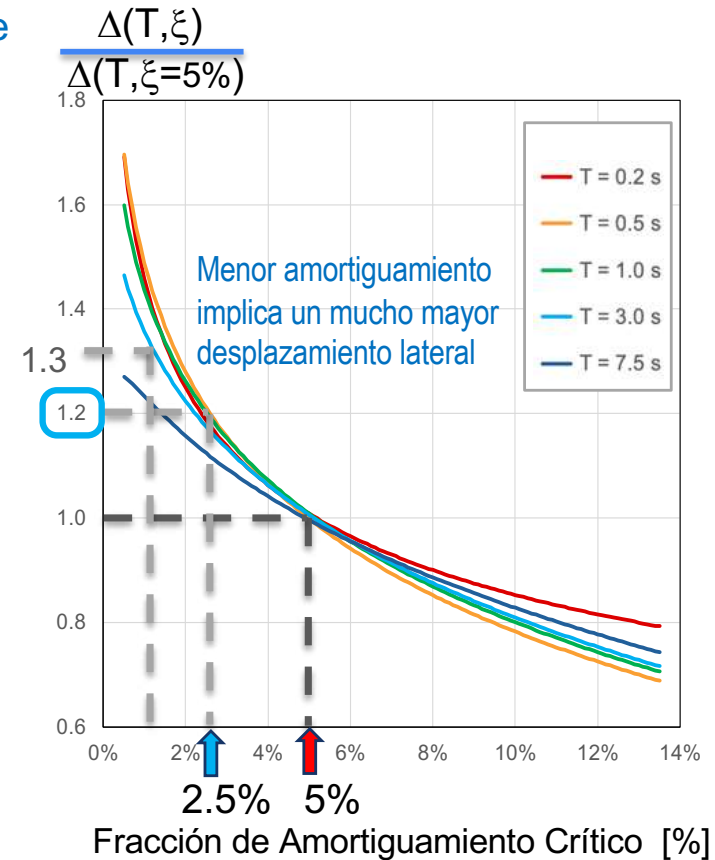
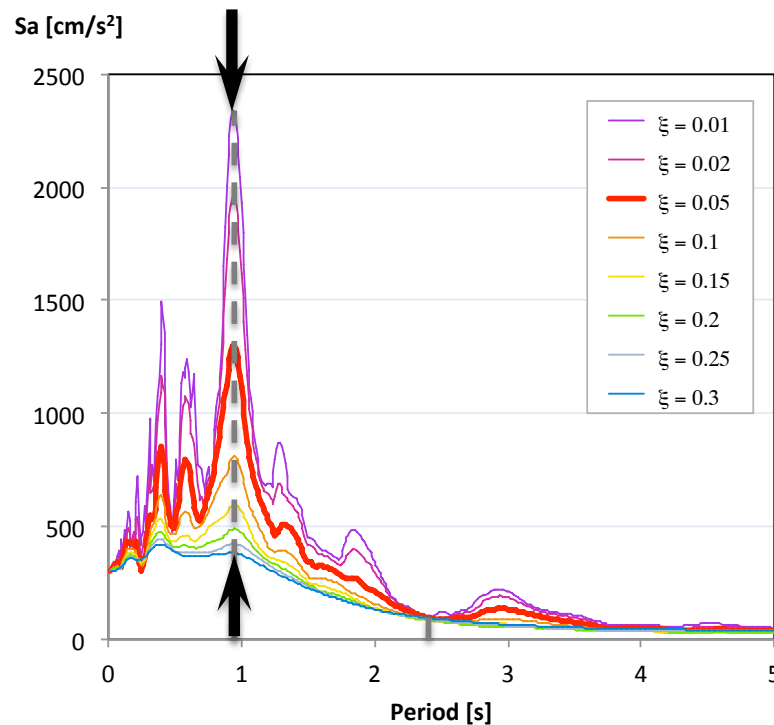
# Importancia del índice de plasticidad en arcillas



(After Vucetic and Dobry, 1991)

# Efecto del amortiguamiento de la respuesta estructura máxima

## Efecto del amortiguamiento en edificios en roca o suelo firme



(Modified from Rezaeian et al 2015)

## Cuál es el amortiguamiento en edificios ?

### Ejemplo de la NCh 433

$$\xi = 5\%$$

### Ejemplo de la NCh 2369

Tabla 5.5 - Razones de amortiguamiento

| Sistema resistente                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $\xi$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Manto de acero soldado; chimeneas, silos, tolvas, tanques a presión, torres de proceso, cañerías, etc.                                                                                                                                                                                                                                            | 0,02  |
| Manto de acero apernado o remachado                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,03  |
| Marcos de acero soldados con o sin arriostamiento                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,02  |
| Marcos de acero con uniones de terreno apernadas, con o sin arriostamiento                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,03  |
| Estructuras de hormigón armado y albañilería                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 0,05  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado puramente gravitacionales                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,05  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado con uniones húmedas, no dilatadas de los elementos no estructurales e incorporados en el modelo estructural                                                                                                                                                                                          | 0,05  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado con uniones húmedas dilatadas de los elementos no estructurales                                                                                                                                                                                                                                      | 0,03  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado con uniones secas, dilatadas y no dilatadas:                                                                                                                                                                                                                                                         |       |
| Con conexiones apernadas y conexiones mediante barras embebidas en mortero de relleno                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,03  |
| Con conexiones soldadas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,02  |
| Otras estructuras no incluidas o asimilables a las de esta lista                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0,02  |
| NOTAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |
| 1) En caso que se use un análisis con interacción suelo-estructura en que resulten valores de la razón de amortiguamiento del primer modo mayores que los indicados en esta tabla, el incremento de esta razón no podrá ser superior al 50% de los valores indicados. Los valores para los restantes modos deben ser los indicados en esta tabla. |       |
| 2) En caso de duda sobre la clasificación de un sistema resistente, debe aplicarse la disposición 4.7.                                                                                                                                                                                                                                            |       |



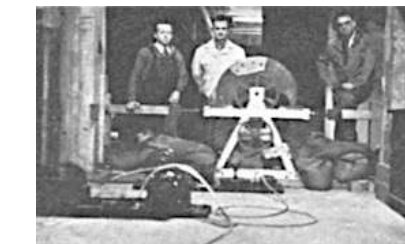
## Cuál es el amortiguamiento en edificios ?



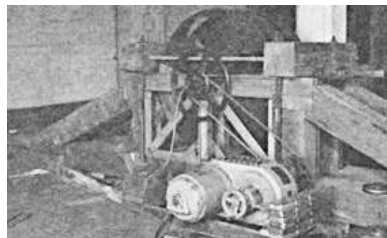
(Fotos de E. Miranda, Enero 2020)

*Ejemplos de edificios instrumentados en Puerto Rico por la UPRM y el PRSMP*

## Cuál es el amortiguamiento en edificios ?



Bank of America Bldg, San Jose  
J.A. Blume and L. Jacobsen, 1935

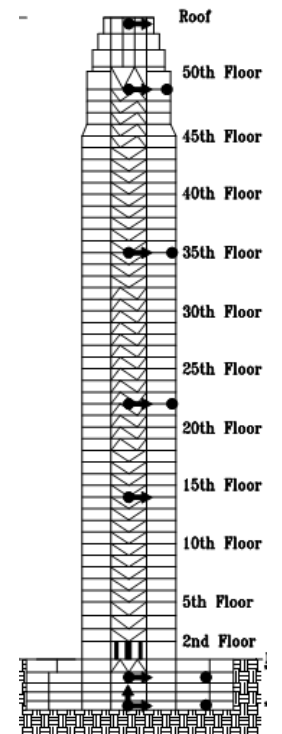
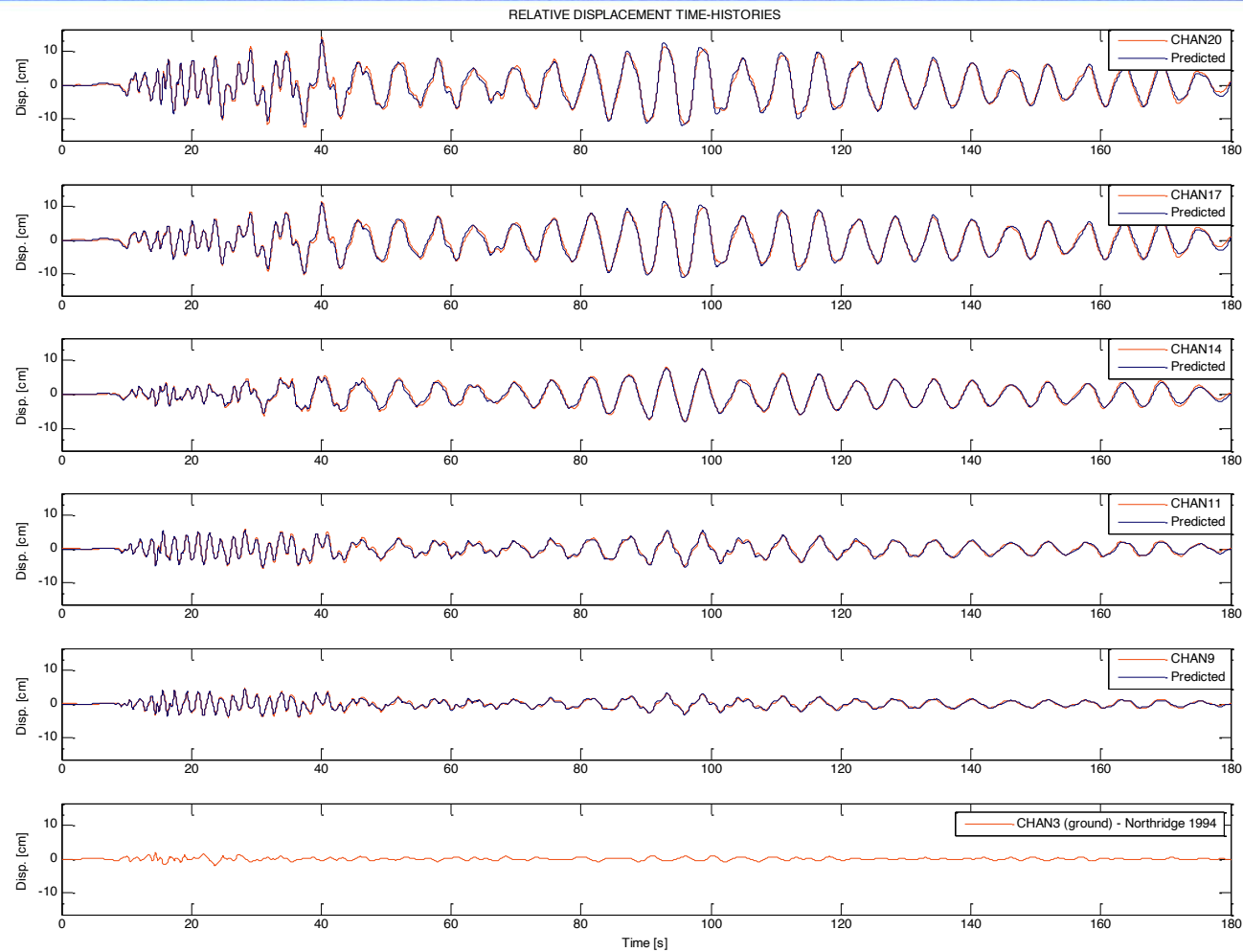


Four-Story RC Building on Commercial  
St in Los Angeles  
J.L. Alford and G.W. Housner, 1953



Hollywood Storage Building  
Oct 1993 Long Beach Aftershock  
R.R. Martel and M.P. White, 1951

# Cuál es el amortiguamiento en edificios ?



# Amortiguamiento “inherente” en edificios

Estudio más o menos recientes sobre el amortiguamiento en edificios



## Damping Ratios of the First Mode for the Seismic Analysis of Buildings

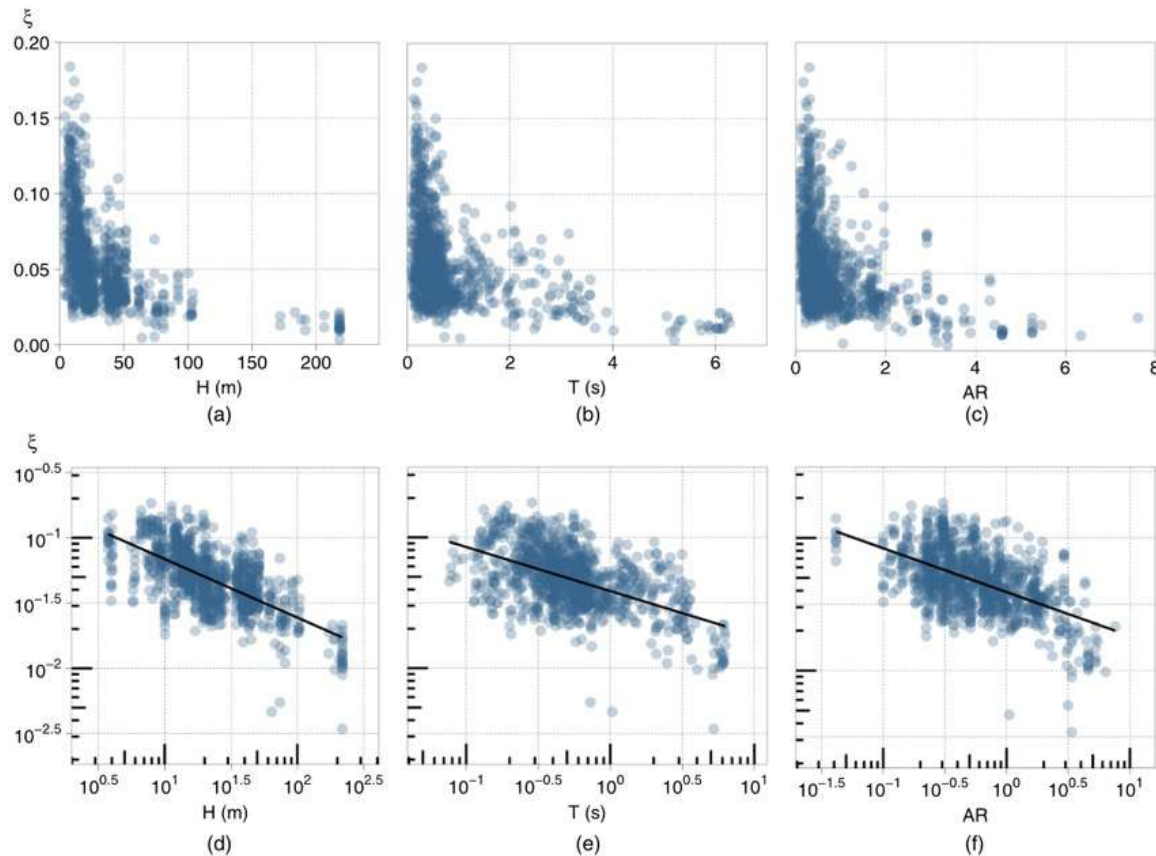
Cristian Cruz<sup>1</sup> and Eduardo Miranda<sup>2</sup>

**Abstract:** This paper analyzed damping ratios inferred from 1,335 seismic responses recorded in 154 instrumented buildings in California. These values were inferred using a parametric system identification technique in the time domain, and subjected to a series of reliability screening tests to retain only high-quality data. The resulting damping ratios conformed a data set of 1,037 high-quality values inferred exclusively from the seismic response of buildings, a database several times larger than previous studies of damping inferred from seismic response. The data set was analyzed using a linear mixed-effects statistical model to account for the fact that many of the data points were clustered, because they came from damping ratios in the same building shaken by various earthquakes. It was shown that damping decreases with increasing building height, which is the factor that best explained the relatively large variance observed in the data. Contrary to some previous recommendations, it was found that once the variation with height is taken into account, the primary structural building material is not statistically significant in the damping ratio of buildings subjected to earthquakes. However, when including the combined material and lateral resistant system as a factor in the statistical model, an additional 6% of the variance was explained. Results showed that steel buildings with moment-resistant frames have, on average, a slightly higher damping ratio than those with steel braced frames. The amplitude dependency of damping showed that there was no significant correlation between damping ratio and the overall lateral deformation demand in the building as measured by the peak roof drift ratio for amplitudes typically observed during moderate earthquake motions once a minimum level of amplitude is exceeded. DOI: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002873](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002873). © 2020 American Society of Civil Engineers.

(Cruz y Miranda, 2020)

# Amortiguamiento “inherente” en edificios

Estudio más o menos reciente sobre el amortiguamiento en edificios



Reducción lineal en log-log con el incremento en  $H$ ,  $T$  o relación de esbeltez

(Cruz y Miranda, 2020) y El Caribe

# Variación del amortiguamiento con el incremento de periodo

## Amortiguamiento en un depósito de suelo

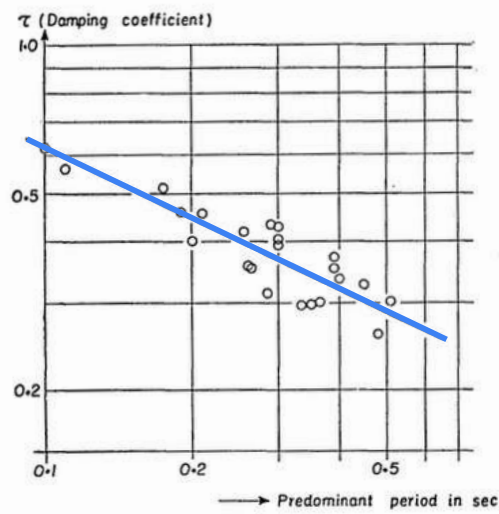


Fig. 8.

These values are plotted in Fig. 8, from which we obtain an empirical formula,

$$\tau = \frac{0.2}{\sqrt{T_0}} \quad (3)$$

the semi-empirical formula for spectral response of ground vibration,

$$U_s = \frac{cT}{0.3 \sqrt{\left\{1 - \left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right\}^2 + \left\{\frac{0.2}{\sqrt{T_0}} \left(\frac{T}{T_0}\right)\right\}^2}} \quad (25) \quad (\text{Kanai, 1957})$$

## Amortiguamiento inferido en edificios en Japón

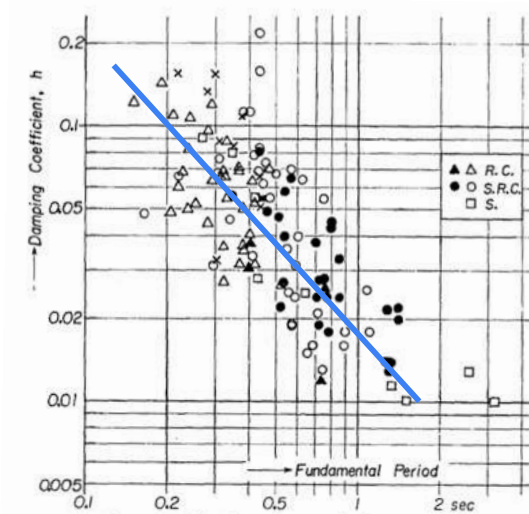
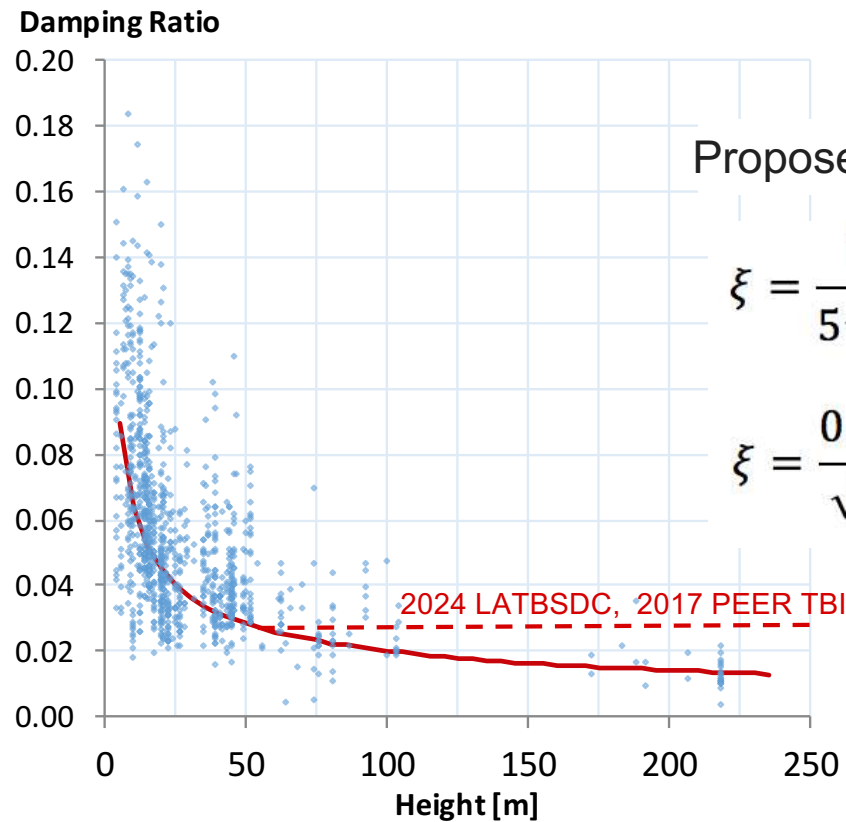


Fig. 12. Relation between the damping coefficients and the fundamental periods of the buildings. Solid and hollow marks are the results obtained from the strong-motion seismograph records and those from the vibration tests, respectively.

(Tanaka et al., 1969)

## Cuál es el amortiguamiento en edificios ?



Proposed simplified equations:

$$\xi = \frac{1}{5\sqrt{H}} \geq 0.05 \quad \text{if } H \text{ in } m$$

$$\xi = \frac{0.36}{\sqrt{H}} \geq 0.05 \quad \text{if } H \text{ in } ft$$

# Recomendaciones para edificios altos en California

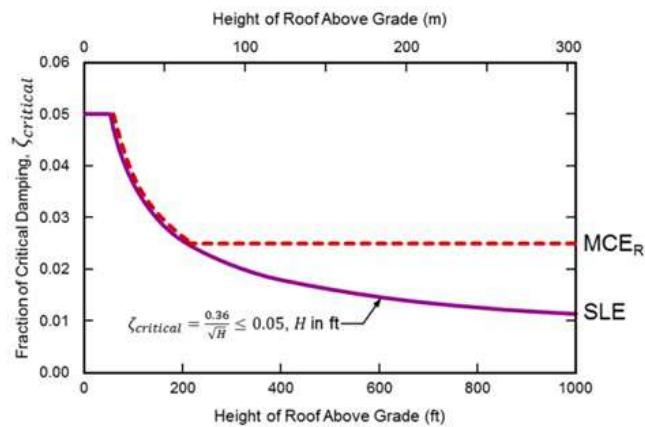
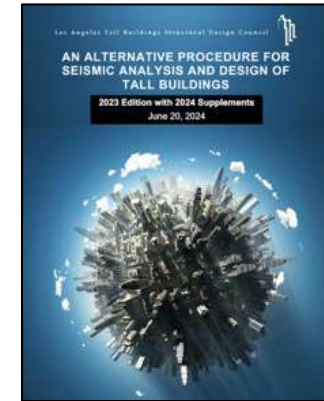
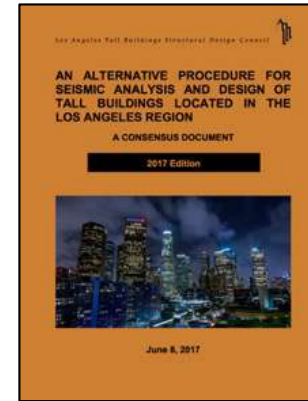
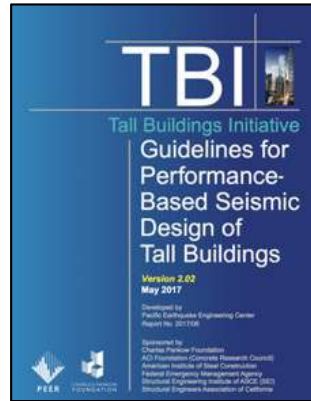


Figure 4-2 Equivalent viscous damping versus building height based on Equation (4-1).

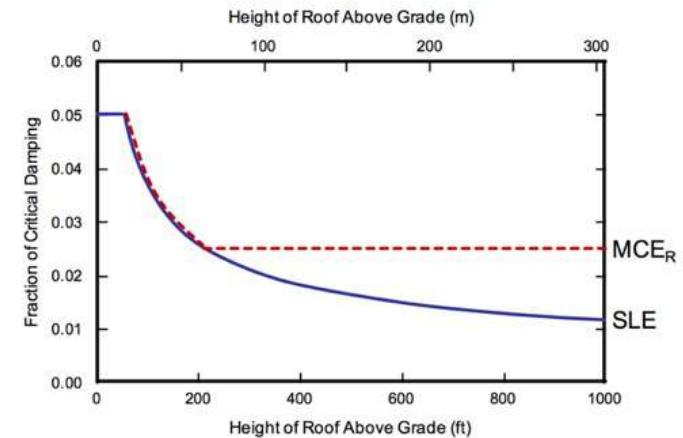
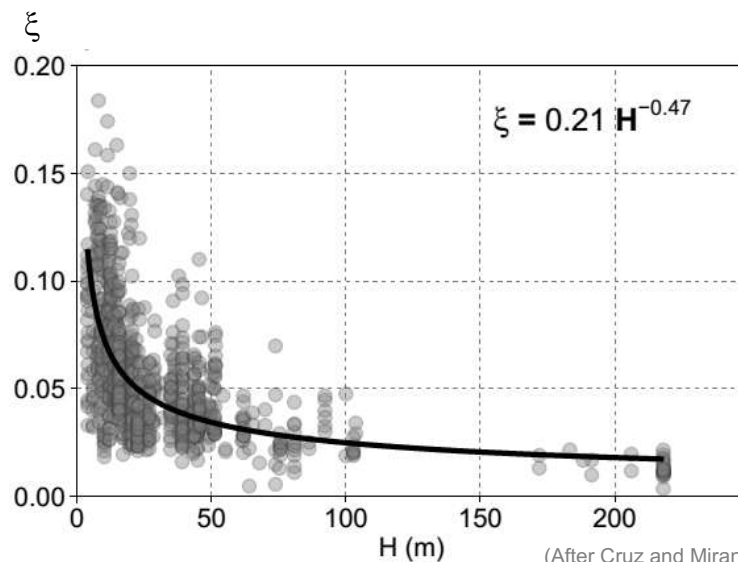


Figure 1. Equivalent viscous damping versus building height

# Amortiguamiento “inherente” en edificios

Estudio más o menos recientes sobre el amortiguamiento en edificios



La curva anterior se simplificó para ser incluida en los documentos TBI y LATBSDC para el diseño basado en desempeño de edificios altos

$$\zeta = \frac{0.36}{\sqrt{H}} \quad H \text{ en ft}$$

$$\zeta = \frac{0.2}{\sqrt{H}} \quad H \text{ en m}$$

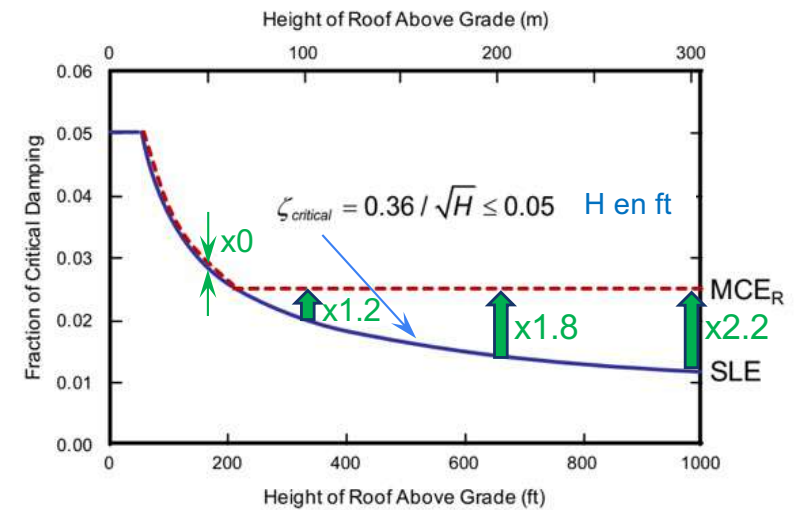


Figure 1. Equivalent viscous damping versus building height (LATBSDC, 2024)

- 1) Usar  $\xi = 0.025$  en  $MCE_R$  no tiene sustento alguno
- 2) Es absurdo e irracional que el incremento en el amortiguamiento de SLE a  $MCE_R$  sea función de la altura del edificio.

**NO USEN  $\xi = 0.025$**

# Amortiguamiento "inherente" en edificios

## Efecto del nivel de deformación en el amortiguamiento

Damping in Percentage of Critical Damping

| Test No. | Displacement Amplitude Ratio | Standard Method | Using Mode Shape | Hudson's Method |
|----------|------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 5a       | 1                            | 1.16            | 1.24             | 1.44            |
| 5b       | 1.62                         | 1.45            | 1.35             | *               |
| 5c       | 1.97                         | 1.48            | 1.39             | 1.51            |
| 8a       | 2.45                         | 1.75**          | 1.49             | 1.88            |
| 8b       | 3.02                         | 1.64            | 1.60             | 1.93            |
| 8c       | 0.79                         | 1.54            | 1.47             | 1.74            |

\* Only the response of the peak was measured, so it is not possible to apply this method.

Damping in Percentage of Critical Damping

| Test No.         | Displacement Amplitude Ratio | Standard Method | Using Mode Shape | Hudson's Method |
|------------------|------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 10b              | 1.00                         | .69             | .80              | .97             |
| 10c              | 1.71                         | 1.06            | .89              | .96             |
| 10d              | 2.74                         | 1.12            | .97              | 1.17            |
| 10e              | 3.44                         | 1.12            | 1.01             | 1.15            |
| 10f              | 4.38                         | 1.21            | 1.16             | *               |
| 10g              | 5.08                         | 1.48            | 1.20             | 1.50            |
| 10g <sup>†</sup> | 5.20                         | 1.70            | 1.16             | 1.46            |

\* Only frequencies close to the peak were measured, so it is not possible to apply this method.

(After Kuroiwa and Jennings, 1979)

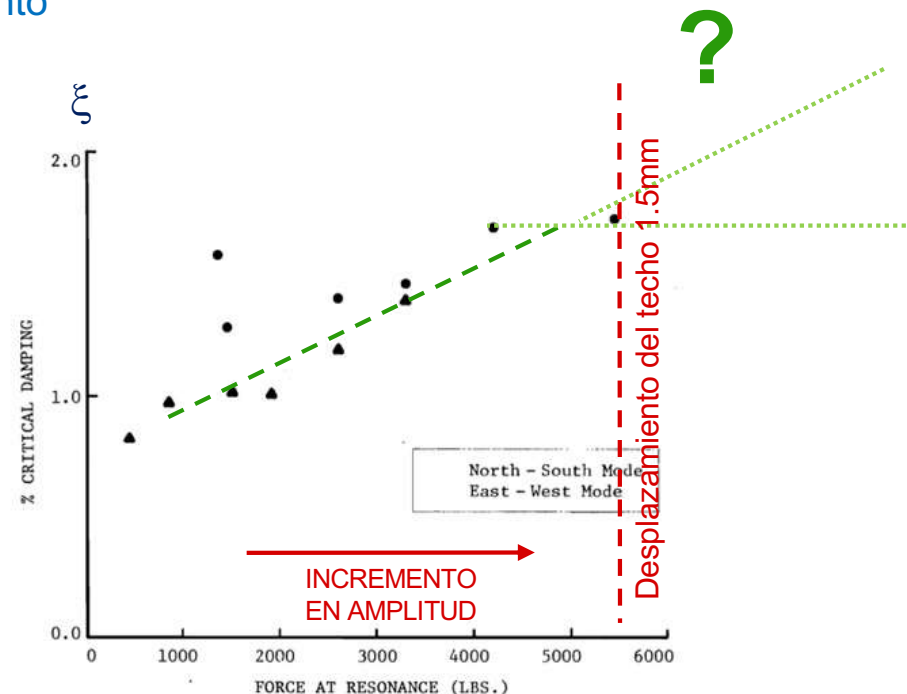


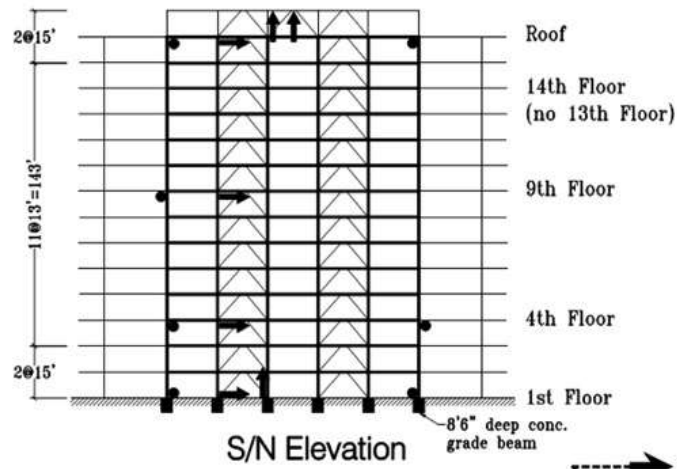
FIGURE 17

% CRITICAL DAMPING VS. FORCE AT RESONANCE  
MILLIKAN LIBRARY BUILDING  
(Drawn from Data given in Reference 35)

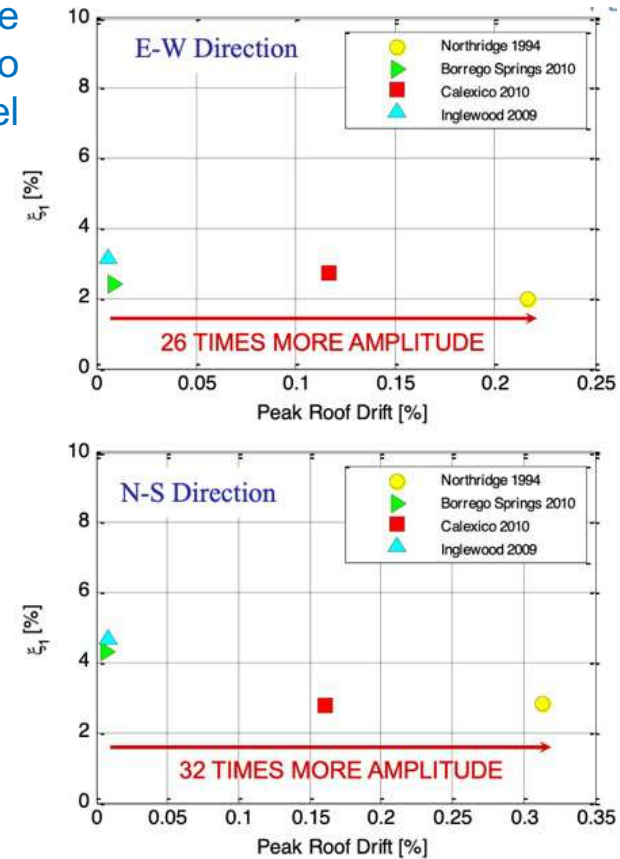
(After Haviland, 1979)

# Amortiguamiento “inherente” en edificios

Una vez que ocurre un cierto nivel de deformación lateral (de menos de 5mm), ya no se incrementa el amortiguamiento con el incremento en deformación lateral en el amortiguamiento



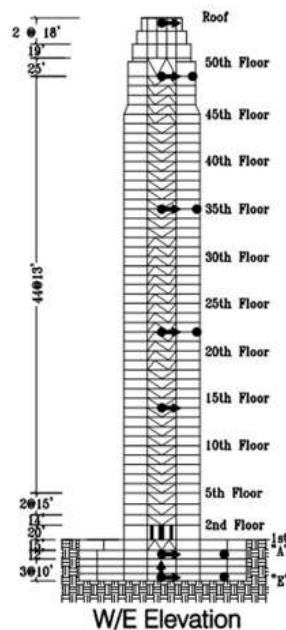
- El Segundo - I4S
- Showing results for the first mode only



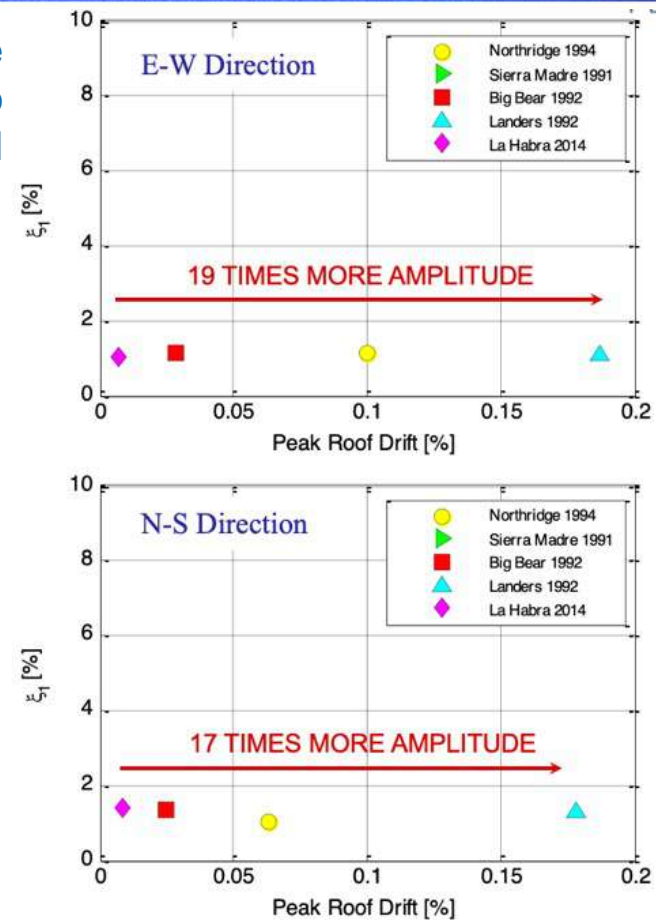
(After Cruz and Miranda, 2019)

# Amortiguamiento “inherente” en edificios

Una vez que ocurre un cierto nivel de deformación lateral (de menos de 5mm), ya no se incrementa el amortiguamiento con el incremento en deformación lateral en el amortiguamiento



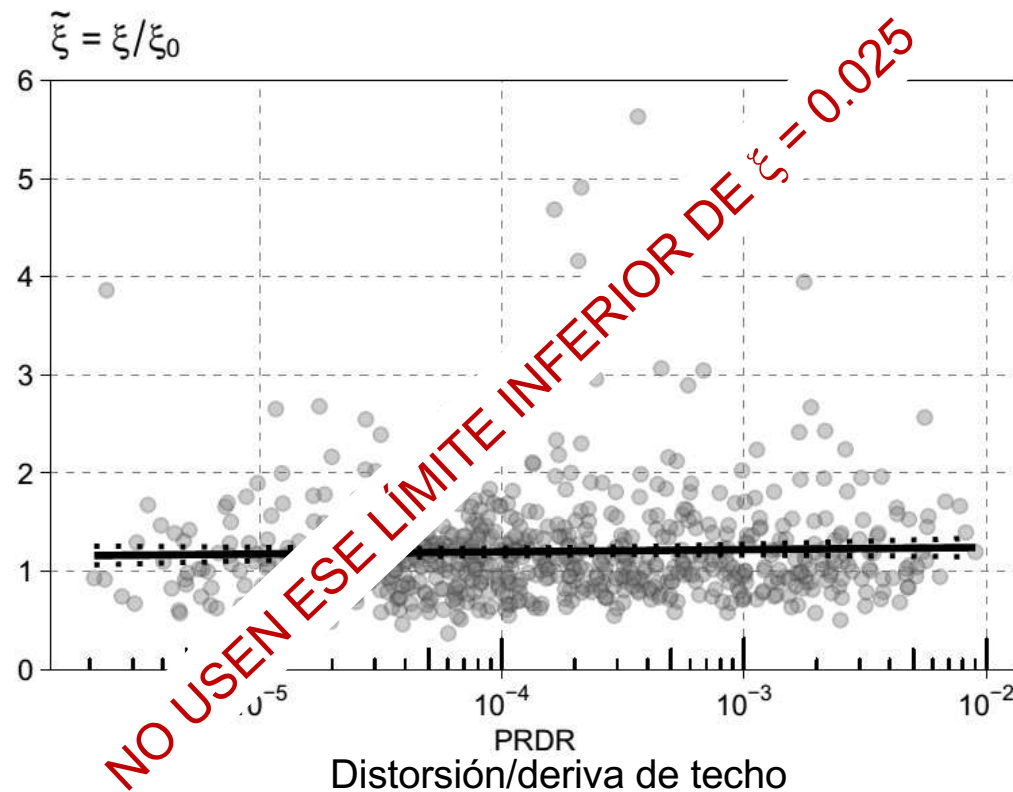
- Los Angeles - 52S
- Showing results for the first mode only



(After Cruz and Miranda, 2019)

## Amortiguamiento “inherente” en edificios

Una vez que ocurre un cierto nivel de deformación lateral (de menos de 5mm), ya no se incrementa el amortiguamiento con el incremento en deformación lateral en el amortiguamiento



(After Cruz and Miranda, 2019)

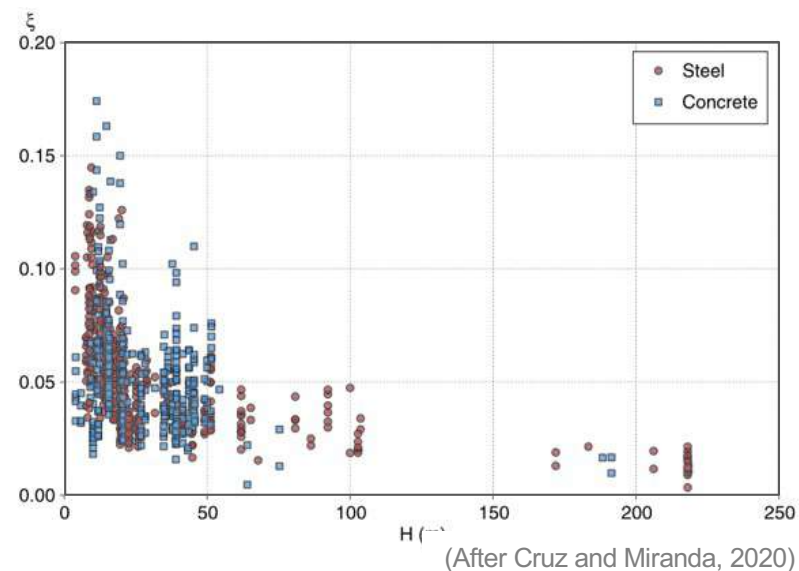
# Amortiguamiento “inherente” en edificios

## Ejemplo de la NCh 2369

Tabla 5.5 - Razones de amortiguamiento

| Sistema resistente                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $\xi$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Manto de acero soldado; chimeneas, silos, tolvas, tanques a presión, torres de proceso, cañerías, etc.                                                                                                                                                                                                                                             | 0,02  |
| Manto de acero apernado o remachado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,03  |
| Marcos de acero soldados con o sin arriostramiento                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,02  |
| Marcos de acero con uniones de terreno apernadas, con o sin arriostramiento                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,03  |
| Estructuras de hormigón armado y albañilería                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 0,05  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado puramente gravitacionales                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,05  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado con uniones húmedas, no dilatadas de los elementos no estructurales e incorporados en el modelo estructural                                                                                                                                                                                           | 0,05  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado con uniones húmedas dilatadas de los elementos no estructurales                                                                                                                                                                                                                                       | 0,03  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado con uniones secas, dilatadas y no dilatadas:                                                                                                                                                                                                                                                          |       |
| Con conexiones apernadas y conexiones mediante barras embebidas en mortero de relleno                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,03  |
| Con conexiones soldadas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,02  |
| Otras estructuras no incluidas o asimilables a las de esta lista                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,02  |
| NOTAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |       |
| 1) En caso que se use un análisis con interacción suelo-estructura en que resulten valores de la razón de amortiguamiento del primer modo mayores que los indicados en esta tablas, el incremento de esta razón no podrá ser superior al 50% de los valores indicados. Los valores para los restantes modos deben ser los indicados en esta tabla. |       |
| 2) En caso de duda sobre la clasificación de un sistema resistente, debe aplicarse la disposición 4.7.                                                                                                                                                                                                                                             |       |

Es un mito que las estructuras de concreto/hormigón tienen más amortiguamiento que las de acero.



**No les recomiendo que usen la tabla de la izquierda.**

# De dónde viene la mayoría de ese amortiguamiento ?

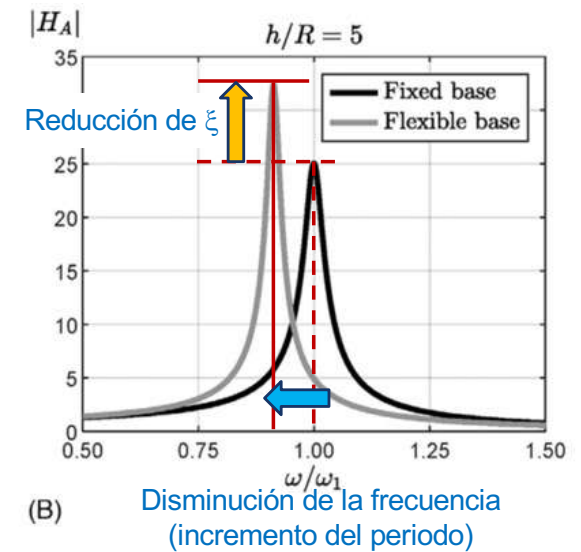
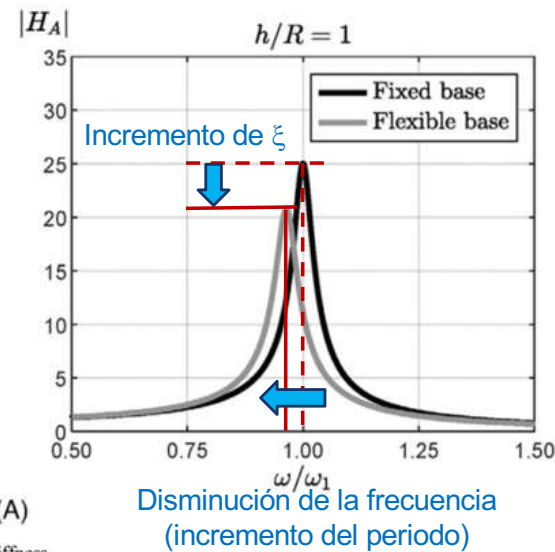
La mayor parte del amortiguamiento es por radiación (ISE/SSI)

Received: 21 March 2020 | Revised: 14 September 2020 | Accepted: 15 September 2020  
DOI: 10.1002/eqe.3356

## RESEARCH ARTICLE

### Insights into damping ratios in buildings

Cristian Cruz<sup>1</sup> | Eduardo Miranda<sup>2</sup>

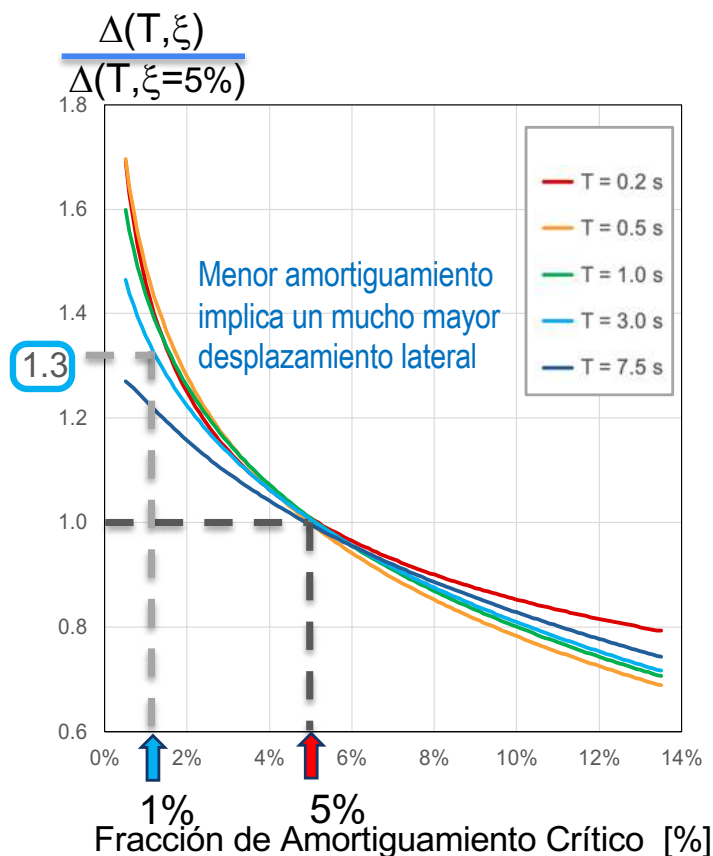


(After Cruz and Miranda, 2020)

En estructuras esbeltas la ISE (SSI) produce una **REDUCCIÓN** en el amortiguamiento efectivo

# Efecto del amortiguamiento de la respuesta estructura máxima

## Efecto del amortiguamiento en edificios en roca o suelo firme



### DIARIO OFICIAL DE LA REPUBLICA DE CHILE

#### Artículo 1°.-

El diseño sísmico de edificios deberá realizarse de conformidad a las exigencias establecidas en el presente decreto y en lo que no se contraponga con éstas, supletoriamente, por lo establecido en la Norma Técnica NCh 433, aprobada mediante DS N° 172 (V. y U.), de 1996 y su modificación del año 2009, oficializada por DS exento N° 406 (V. y U.), de 2010, en adelante NCh 433. Of. 1996, mod. 2009.

#### Artículo 9°.- Deformaciones Sísmicas

9.1. Para efecto del análisis estructural, se deberá respetar la cláusula 5.9 de la norma NCh433.Of1996, mod.2009.

9.2. Para efectos de diseño de estructuras de hormigón armado, el desplazamiento lateral de diseño en el techo,  $\delta u$ , se debe considerar igual a la ordenada del espectro elástico de desplazamientos  $S_{de}$ , para un 5% de amortiguamiento respecto al crítico, correspondiente al período de mayor masa traslacional en la dirección del análisis, multiplicada por un factor igual a 1.3.

$$\delta u = 1.3 S_{de} (T_{ag})$$

Donde  $T_{ag}$  es el período de mayor masa traslacional en la dirección de análisis, considerando en su cálculo la influencia del acero y la pérdida de rigidez debido al agrietamiento del hormigón en la rigidez elástica inicial. Si el período ha sido calculado con las secciones brutas, es decir, sin considerar la influencia del acero y la pérdida de la rigidez debido al agrietamiento del hormigón, el período de mayor masa traslacional en la dirección de análisis de la estructura se puede aproximar a 1,5 veces al calculado sin considerar estos efectos.

El espectro elástico de desplazamientos  $S_{de} (T_n)$  se calcula según la expresión del artículo 13 del presente decreto.

# Ejemplo de subestimaciones importantes que ocurren

Posibles subestimaciones importantes en desplazamientos laterales

## Gran Torre Costanera



Subestimación por usar  $\xi=5\%$  en lugar de  $\xi=1\%$

Aprox. 30%

Subestimación por usar esta expresión para calcular el desplazamiento lateral en el techo

$$\delta u = 1.3 S_{de} (T_{ag})$$

Aprox. 20%

Subestimación total

Aprox. 43% !!!

### Height

|               |                               |
|---------------|-------------------------------|
| Architectural | 300 m (984 ft)                |
| Top floor     | 261 m (856 ft) <sup>[1]</sup> |

## DIARIO OFICIAL DE LA REPUBLICA DE CHILE

### Artículo 1º.-

El diseño sísmico de edificios deberá realizarse de conformidad a las exigencias establecidas en el presente decreto y en lo que no se contraponga con éstas, supletoriamente, por lo establecido en la Norma Técnica NCh 433, aprobada mediante DS N° 172 (V. y U.), de 1996 y su modificación del año 2009, oficializada por DS exento N° 406 (V. y U.), de 2010, y la Norma NCh 433. Of. 1996, mod. 2009.

### Artículo 9º.- Deformaciones Sísmicas

9.1. Para efecto del análisis estructural, se deberá respetar la cláusula 5.9 de la norma NCh433.Of1996, mod. 2009.

9.2. Para efectos de diseño de estructuras de hormigón armado, el desplazamiento lateral de diseño,  $\delta u$ , se debe considerar igual a la ordenada del espectro elástico de desplazamientos  $S_{de}$ , para un 5% de amortiguamiento respecto al crítico, correspondiente al período de mayor masa traslacional en la dirección del análisis, multiplicada por un factor igual a 1.3.

$$\delta u = 1.3 S_{de} (T_{ag})$$

Donde  $T_{ag}$  es el período de mayor masa traslacional en la dirección de análisis considerando en su cálculo la influencia del acero y la pérdida de rigidez debido al agrietamiento del hormigón en la rigidez elástica inicial. Si el período ha sido calculado con las secciones brutas, es decir, sin considerar la influencia del acero y la pérdida de la rigidez debido al agrietamiento del hormigón, el período de mayor masa traslacional en la dirección de análisis de la estructura se puede aproximar a 1,5 veces al calculado sin considerar estos efectos.

El espectro elástico de desplazamientos  $S_{de} (T_n)$  se calcula según la expresión del artículo 13 del presente decreto.

# Atención con las implicaciones de esto

## Ejemplo de la NCh 2369

Tabla 5.5 - Razones de amortiguamiento

| Sistema resistente                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $\xi$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Manto de acero soldado; chimeneas, silos, tolvas, tanques a presión, torres de proceso, cañerías, etc.                                                                                                                                                                                                                                             | 0,02  |
| Manto de acero apernado o remachado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,03  |
| Marcos de acero soldados con o sin arriostramiento                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,02  |
| Marcos de acero con uniones de terreno apernadas, con o sin arriostramiento                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,03  |
| Estructuras de hormigón armado y albañilería                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 0,05  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado puramente gravitacionales                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,05  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado con uniones húmedas, no dilatadas de los elementos no estructurales e incorporados en el modelo estructural                                                                                                                                                                                           | 0,05  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado con uniones húmedas dilatadas de los elementos no estructurales                                                                                                                                                                                                                                       | 0,03  |
| Estructuras prefabricadas de hormigón armado con uniones secas, dilatadas y no dilatadas:                                                                                                                                                                                                                                                          |       |
| Con conexiones apernadas y conexiones mediante barras embebidas en mortero de relleno                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,03  |
| Con conexiones soldadas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,02  |
| Otras estructuras no incluidas o asimilables a las de esta lista                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,02  |
| NOTAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |       |
| 1) En caso que se use un análisis con interacción suelo-estructura en que resulten valores de la razón de amortiguamiento del primer modo mayores que los indicados en esta tablas, el incremento de esta razón no podrá ser superior al 50% de los valores indicados. Los valores para los restantes modos deben ser los indicados en esta tabla. |       |
| 2) En caso de duda sobre la clasificación de un sistema resistente, debe aplicarse la disposición 4.7.                                                                                                                                                                                                                                             |       |

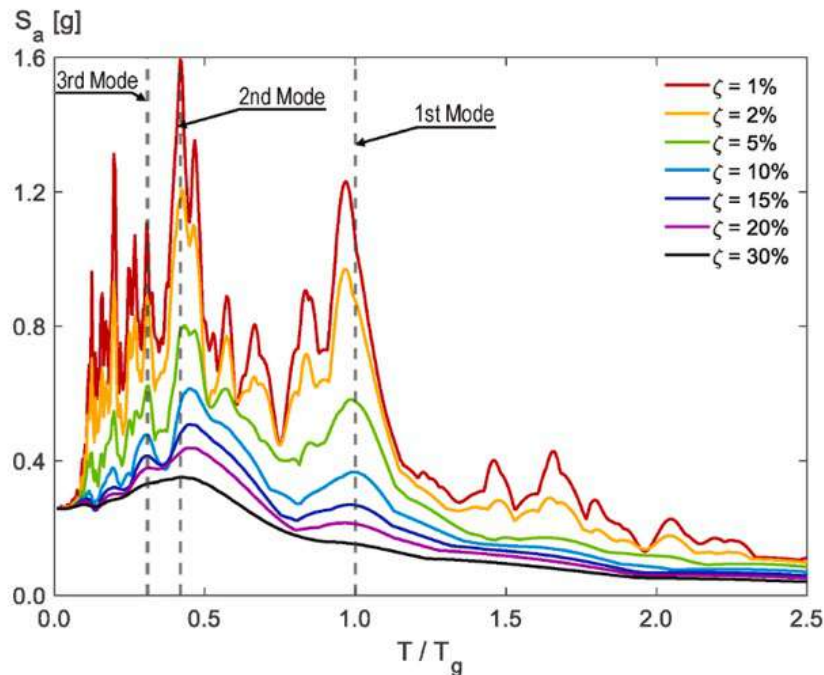
Termoeléctrica en Coronel, Chile



En estructuras esbeltas la ISE (SSI) produce una REDUCCIÓN en el amortiguamiento efectivo, no un incremento como muchos creen

## Efecto del amortiguamiento de la respuesta estructura máxima

Efecto del amortiguamiento puede ser mucho mayor en edificios en suelo blando



**Fig. 1.** Pseudo-acceleration response spectra for seven damping ratios with periods of vibration normalized by the predominant period of the site for the North-South component of the ground motion recorded at the Foster City-Redwood Shores CSMIP Station 58375 during the 1989 Loma Prieta earthquake. Vertical dashed black lines show normalized period values of the first three modal periods of the soil deposit.

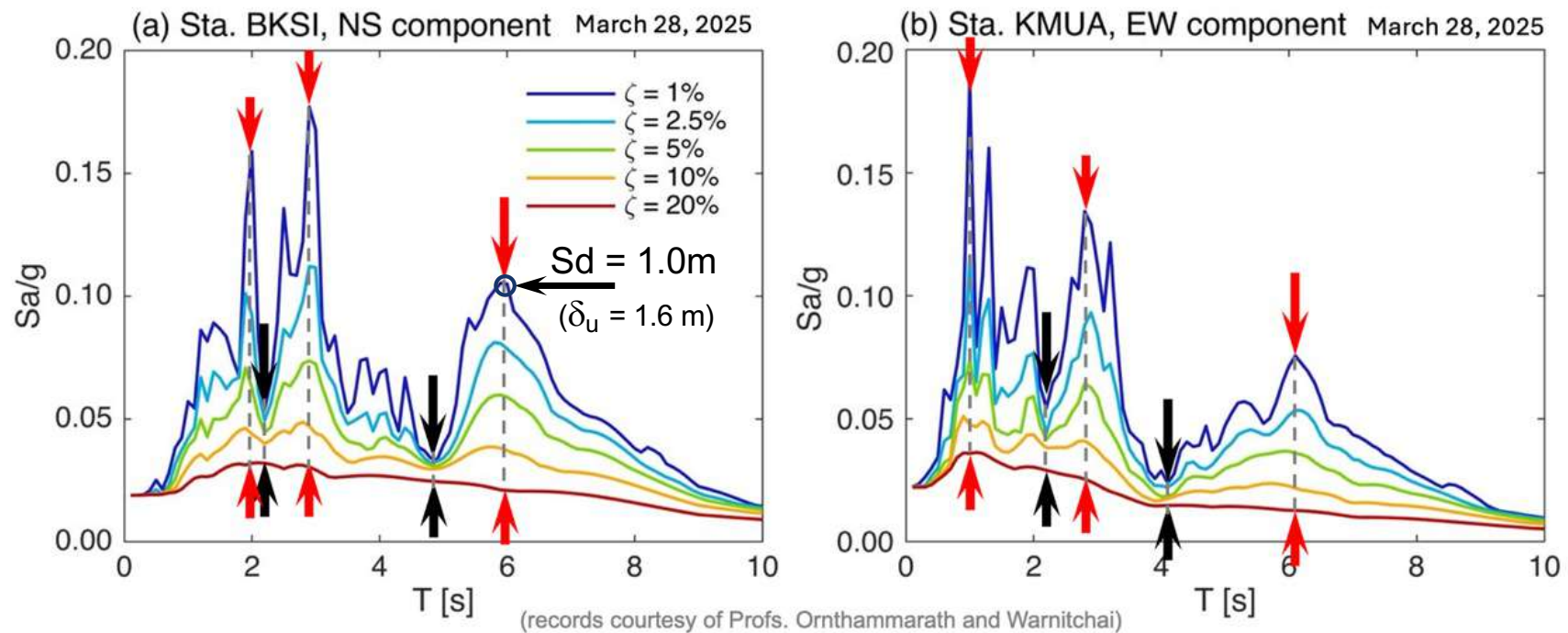
(After Bantis et al, 2025)

El efecto es mucho mayor para estructuras con periodos iguales o cercanos a los periodos de vibración del depósito de suelo.

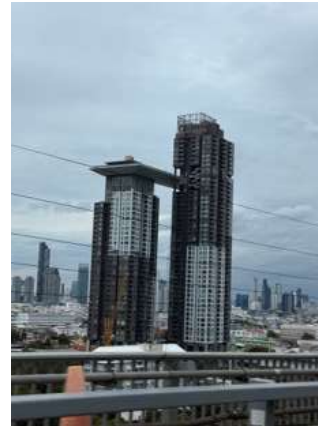
No conozco ningún reglamento en el mundo que tome en cuenta esta importante diferencia. Suele usarse un efecto promedio de lo que ocurre en picos y valles espectrales y, por lo tanto, se subestima SISTEMATICAMENTE el efecto del amortiguamiento en picos espectrales y se sobreestima en valles espectrales.

# Efecto del amortiguamiento de la respuesta estructura máxima

Ejemplo de dos movimientos en suelo blando de Bangkok durante el sismo de Myanmar de este año

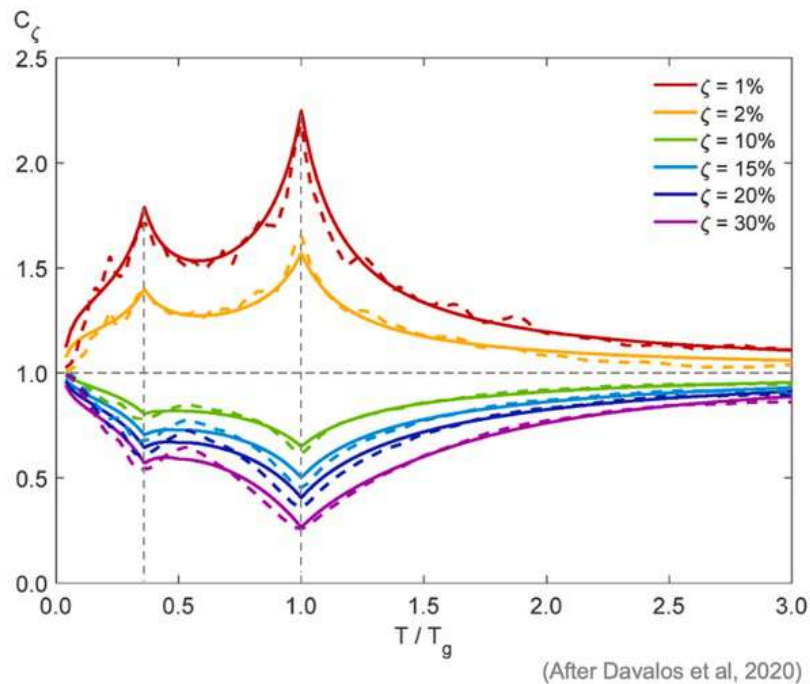


# Edificios altos en Bangkok, Tailandia

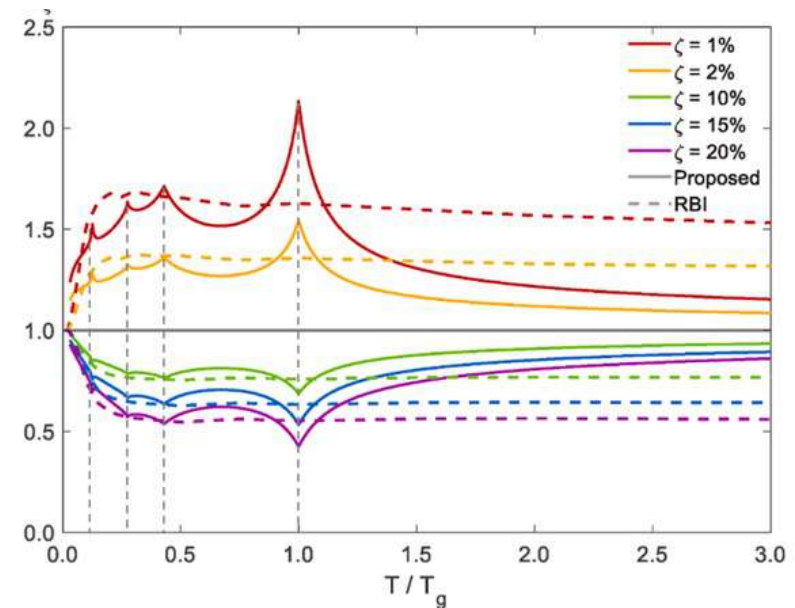


# Efecto del amortiguamiento de la respuesta estructura máxima

## Modelo basado en movimientos de la CDMX



## Modelo basado en movimientos del área de la bahía de San Francisco, California



**Fig. 14.** Proposed San Francisco Bay Area soft soil mean DMFs, shown in solid lines, and the Rezaeian et al. [16] proposed mean DMFs, shown in dashed lines, plotted against period of vibration normalized by site period assuming a 1 s site period,  $M_w 6.9$  event, and source-to-site distance of 100 km for five different damping ratios.

(After Bantis et al, 2025)

# Clasificación de suelos en el CMS

## J.3. Clasificación sísmica del suelo de fundación

| Suelo tipo                                           | $V_{s30}$ (m/s) | $T_{Nak}$ (s)          |
|------------------------------------------------------|-----------------|------------------------|
| A. Roca, suelo cementado                             | $\geq 900$      | $< 0.15$ (o H/V plano) |
| B. Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o firme | $\geq 500$      | $< 0.30$ (o H/V plano) |
| C. Suelo denso o firme                               | $\geq 350$      | $< 0.40$ (o H/V plano) |
| D. Suelo medianamente denso, o firme                 | $\geq 180$      | $< 1.0$                |
| E. Suelo de compacidad, o consistencia mediana       | $< 180$         | -                      |
| F. Suelos Especiales                                 | *               |                        |

**Tabla 10.** Clasificación sísmica del suelo de fundación

Donde:

- $T_{Nak}$  Período predominante del terreno estimado mediante la razón espectral H/V (método de Nakamura)
- $H/V$  plano Razón espectral H/V sin un valor máximo definido

La clasificación de un sitio se **deberá** realizar utilizando la **Tabla 10** con el valor de  $V_{s30}$  del sitio como primer requisito, lo que establecerá una primera posible clasificación. Para confirmarlo, se **deberá** verificar en la misma tabla el cumplimiento del período predominante,  $T_{Nak}$ , determinado para el sitio.

En caso de no cumplir con el segundo requisito (período predominante,  $T_{Nak}$ ) especificado en la Tabla 1, la primera clasificación **deberá** degradarse en un nivel.

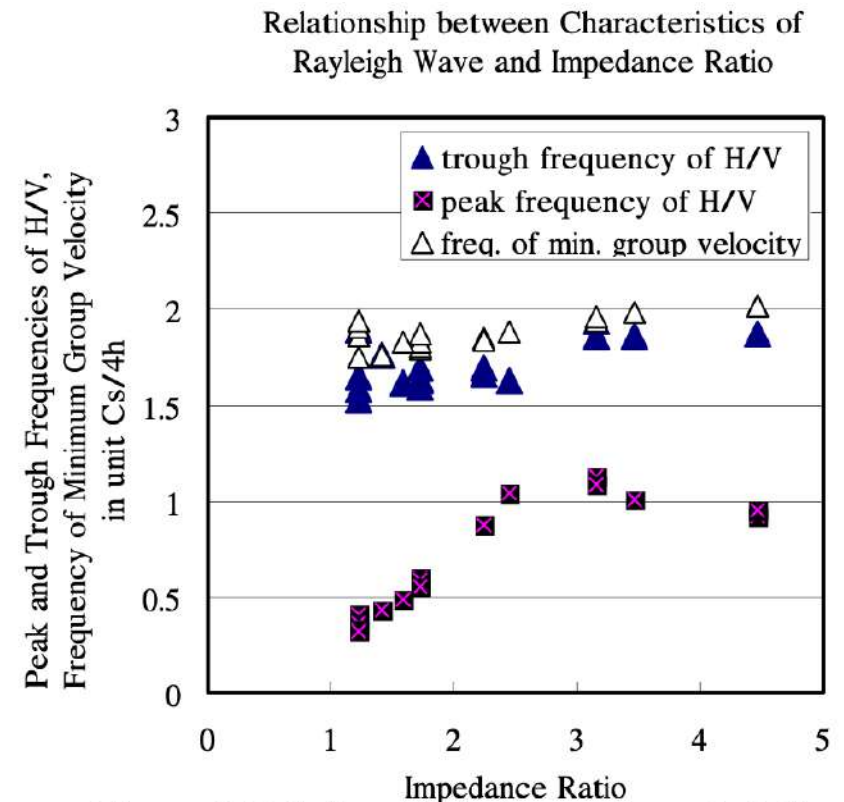
- Por ejemplo, si un sitio posee  $V_{s30} = 520$  m/s y  $T_{Nak} = 0.51$  s, la primera clasificación sería Suelo Tipo B. Sin embargo, dado que el período predominante no cumple con la condición (debería ser  $< 0.3$  s y es 0.51 s), se degradará su clasificación.

Se **deberán** investigar las propiedades dinámicas del suelo bajo la estructura. No obstante, en proyectos de pequeña envergadura, donde exploraciones exhaustivas pueden ser inviables, se **podrán** evaluar condiciones especiales que permitan un estudio menos detallado sin comprometer el correcto desempeño de la edificación.

## Recomendaciones puntuales para el CMS

Además de  $V_{s30}$  (m/s) y  $T_{Nak}$  (s) hay otros parámetros de suma importancia que recomiendo incluir:

1. Profundidad a roca o  $Z_1$
2. Contraste de impedancia,  $c$
3. En arcillas, el índice de plasticidad
4. Pendiente de terreno si es  $> 0.1$  m/m



**Figure 6. Relationship between characteristics of Rayleigh wave and impedance ratio.**

(Nakamura, 2000)

## M.3. Componentes direccionales

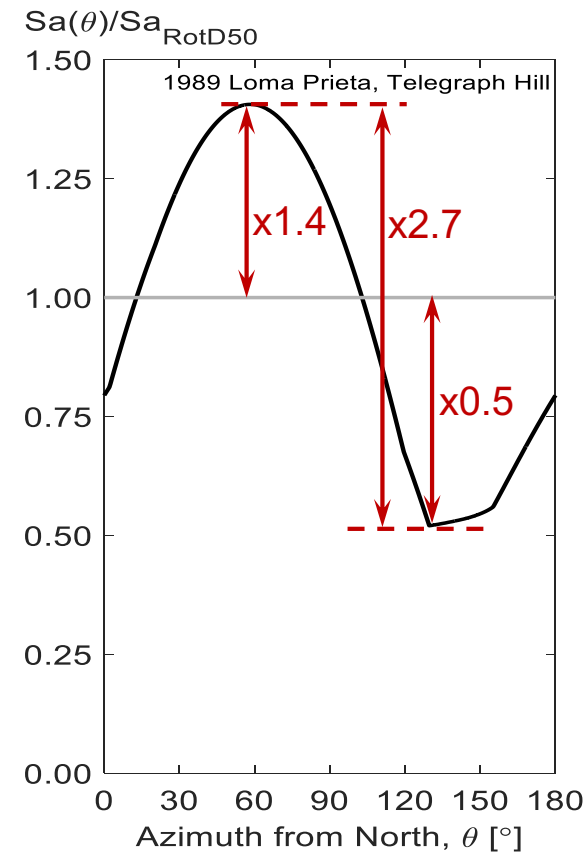
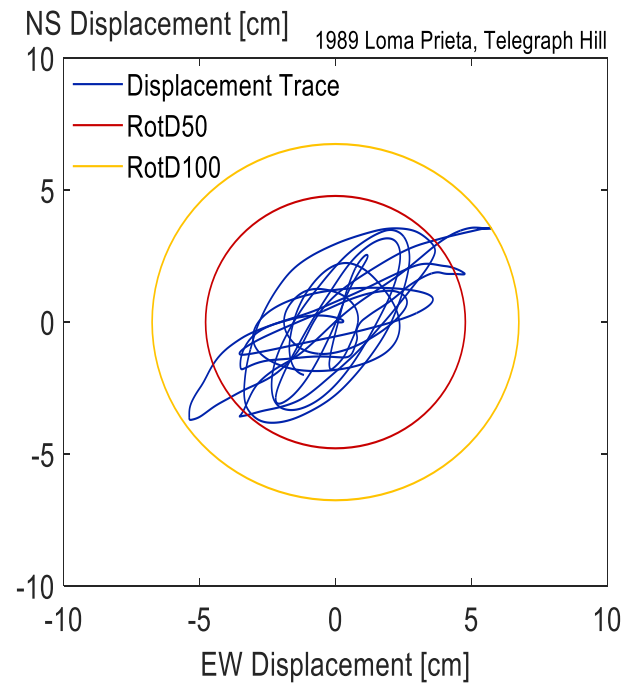
Toda estructura deberá ser diseñada para resistir solicitaciones sísmicas horizontales en dos direcciones ortogonales. El análisis en cada dirección podrá realizarse de manera independiente. Las solicitaciones sísmicas horizontales deberán considerarse como la suma vectorial de los efectos en una dirección y un porcentaje de los efectos en la otra dirección. Este proceso deberá llevarse a cabo en ambas direcciones.

Para métodos de análisis lineales, como el estático equivalente y el dinámico modal espectral, se suele combinar vectorialmente el 100% de la solicitud en una dirección con el 30% o 40% de la solicitud en la dirección ortogonal. Algunas especificaciones permiten omitir esta combinación en casos de sistemas sismorresistentes regulares.

Para edificaciones, elementos o componentes vulnerables a la acción vertical del sismo, se deberá considerar el efecto de esta componente, en algún porcentaje acorde con el contexto normativo nacional.

***Recomiendo eliminar esa oración. El nivel de carga sísmica en direcciones ortogonales tiene que ver con la direccionalidad del movimiento de terreno y NO CON LA REGULARIDAD DE UNA ESTRUCTURA.***

# Direccionalidad del movimiento de terreno



# Direccionalidad del movimiento de terreno

- Poulos, A., & Miranda, E. (2022). Proposal of orientation-independent measure of intensity for earthquake-resistant design. *Earthquake Spectra*, 38(1), 235-253.
- Poulos, A., & Miranda, E. (2021). Relations between MaxRotD50 and some horizontal components of ground-motion intensity used in practice. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(4), 2167-2176.
- Poulos, A., Miranda, E., & Baker, J. W. (2022). Evaluation of earthquake response spectra directionality using stochastic simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112(1), 307-315.
- Poulos, A., & Miranda, E. (2022). Probabilistic characterization of the directionality of horizontal earthquake response spectra. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(9), 2077-2090.
- Poulos, A., & Miranda, E. (2023). Effect of style of faulting on the orientation of maximum horizontal earthquake response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(5), 2092-2105.
- Poulos, A., & Miranda, E. (2023). Modification of ground-motion models to estimate orientation-dependent horizontal response spectra in strike-slip earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(6), 2718-2729.
- Poulos, A., & Miranda, E. (2024). Directionality characteristics of horizontal response spectra from the 2022 Mw 6.9 Chihshang, Taiwan earthquake. *Earthquake Spectra*, 40(3), 1683-1696.
- Poulos, A., & Miranda, E. (2025). Accounting for ground motion directionality and building orientations in urban seismic risk analysis. *Earthquake Spectra*, 41(2), 1780-1800.

Open Access Article

**Correction Factors to Account for Seismic Directionality Effects: Case Study of the Costa Rican Strong Motion Database**

by Luis A. Pinzón<sup>1,2,\*</sup>, Diego A. Hidalgo-Leiva<sup>3</sup> and Luis G. Pujades<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Scientific and Technological Research Center, Universidad Católica Santa María La Antigua (USMA), Panama City 0819, Panama

<sup>2</sup> Sistema Nacional de Investigación (SNI), Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), Panama City 0824, Panama

<sup>3</sup> Earthquake Engineering Laboratory, Universidad de Costa Rica, San Jose 3620-60, Costa Rica

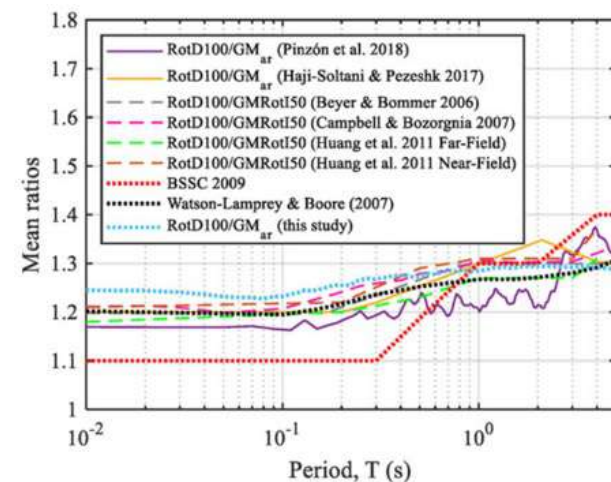
<sup>4</sup> Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona-Tech (UPC), 08034 Barcelona, Spain

\* Author to whom correspondence should be addressed.

Geosciences 2024, 14(5), 139; <https://doi.org/10.3390/geosciences14050139>

Submission received: 28 February 2024 / Revised: 2 May 2024 / Accepted: 16 May 2024 / Published: 18 May 2024

(This article belongs to the Special Issue New Trends in Earthquake Engineering and Seismotectonics)



# Direccionalidad del movimiento de terreno

RESEARCH ARTICLE

## Scale Factor Model to Estimate the Maximum Bidirectional Spectral Demand in the South American Region

Arnold R. Mendo | Victor I. Fernandez-Davila

Pontifical Catholic University of Peru, San Miguel, Lima, Peru

Correspondence: Arnold R. Mendo (arnold.mendo@pucp.pe) | Victor I. Fernandez-Davila (vfernandezdavila@pucp.edu.pe)

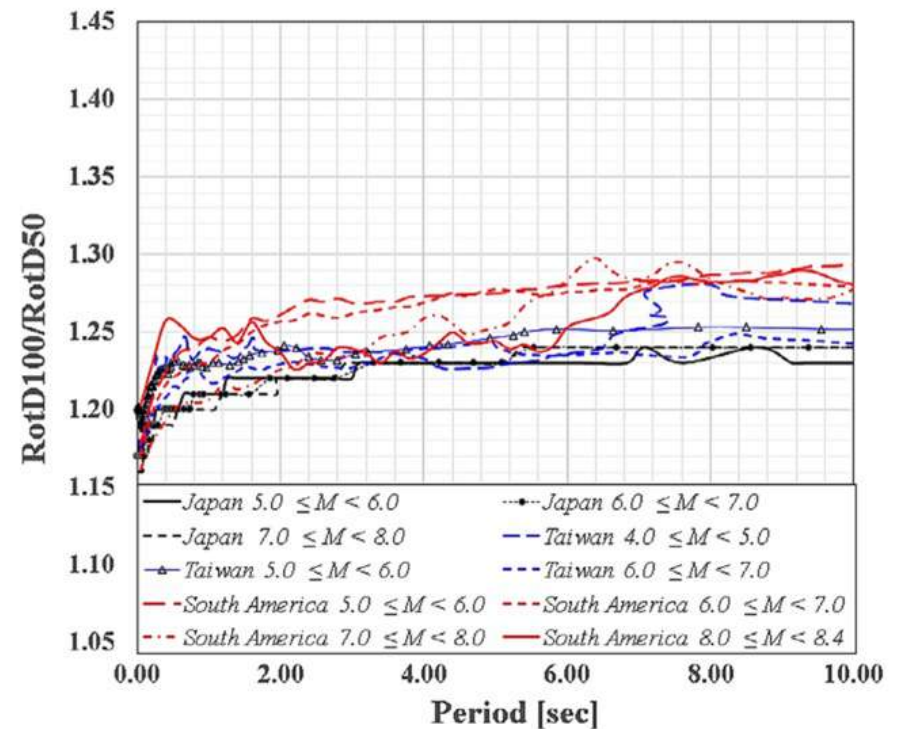
Received: 8 March 2024 | Revised: 18 March 2025 | Accepted: 24 May 2025

Funding: The authors received no specific funding for this work.

### ABSTRACT

The intensity of seismic motion varies considerably with changes in direction, which is commonly known as the directionality of ground motion (GM). Different seismic design codes have adopted various methods for combining the intensity of horizontal GMs. These methods typically use the median spectral ordinate over all non-redundant orientations, referred to as RotD50, and the maximum spectral ordinate over all non-redundant orientations, referred to as RotD100. More recently, an intensity measure called MaxRotD50 has also been proposed and considered, which is calculated as the 50th percentile of the maximum spectral ordinates from two orthogonal horizontal directions for all non-redundant rotation angles. This measure, which always lies between RotD50 and RotD100, offers several advantages over other intensity measures. In contrast to the approach in ASCE 7 (2010, 2022), which uses RotD100 for the design of all structures, this study proposes to use RotD100 only for the design of axisymmetric structures, that is, structures with vertical cylindrical symmetry and similar properties in terms of mass, lateral stiffness and strength. It is also proposed to use MaxRotD50 for the design of structures where the probability of exceeding the intensity of GM in at least one of the two horizontal principal components is high. Likewise, this study complements and compares the RotD100/RotD50 and MaxRotD50/RotD50 ratios, which can be used as a multiplicative factor with the RotD50 predictions to predict the RotD100 or MaxRotD50 of the GM intensity. A database of 3853 seismic acceleration records from 283 events in the South American subduction region is used for this purpose. The influence of GM parameters such as moment magnitude, significant duration, rupture distance, and mean soil period, was evaluated. The results were compared with those of previous studies for different regions of the world. It was found that the RotD100/RotD50 ratios in South America are like those in other subduction regions such as Taiwan and Japan and that the Max RotD50/RotD50 ratios are comparable to other shallow crustal earthquakes in active tectonic regions. Finally, equations are also proposed to estimate ratios depending on the different parameters of the evaluated GM to account for the found influence on the ratios.

## Factores de amplificación para estimar RotD100 a partir del RotD50 de las GMMs



*Gracias por su atención*



**Gracias por su atención**



América Latina y El Caribe

[www.codigomodelosismico.org](http://www.codigomodelosismico.org)



**MOPT**

