



Taller:

"Divulgación de Insumos Técnicos para la Actualización de la Normativa Nacional para Diseño y Construcción en El Salvador"



Universidad Centroamericana
José Simeón Cañas



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICAS Y
DE TRANSPORTE



Colaboración del
Pueblo Japonés



CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES ÍNDICES Y MECÁNICAS DE SUELOS SALVADOREÑOS PARA ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO

David Francisco Barba Galdámez

CONTENIDO

- 1) Introducción
- 2) Propiedades dinámicas de los suelos
 - 2.1) Comportamiento esfuerzo-deformación de suelos sometidos a cargas cíclicas
 - 2.2) Métodos de determinación de propiedades dinámicas de los suelos
- 3) Ensayo de Columna Resonante
- 4) Evaluación de propiedades índices y mecánicas de suelos de El Salvador
- 5) Comentarios finales



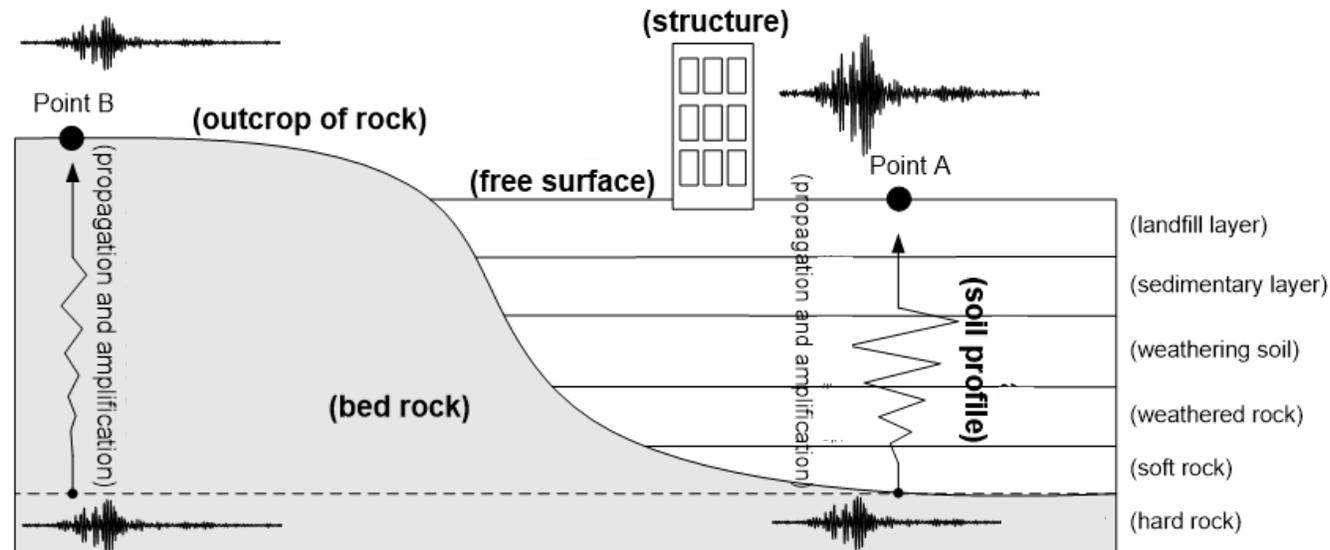
1) Introducción

CONTEXTO

- El estudio de las propiedades mecánicas de los suelos sometidos a cargas cíclicas es fundamental para el desarrollo de análisis de respuesta de sitio
- Ausencia de evaluación sistemática del comportamiento esfuerzo-deformación de suelos locales – Deformaciones angulares pequeñas y medianas

OBJETIVOS

- Crear capacidades técnicas para la ejecución de ensayos de laboratorio especializados
- Estudiar el comportamiento dinámico de los suelos encontrados en los pozos de exploración efectuados dentro del proyecto



Efectos de sitio (Kim, 2005)

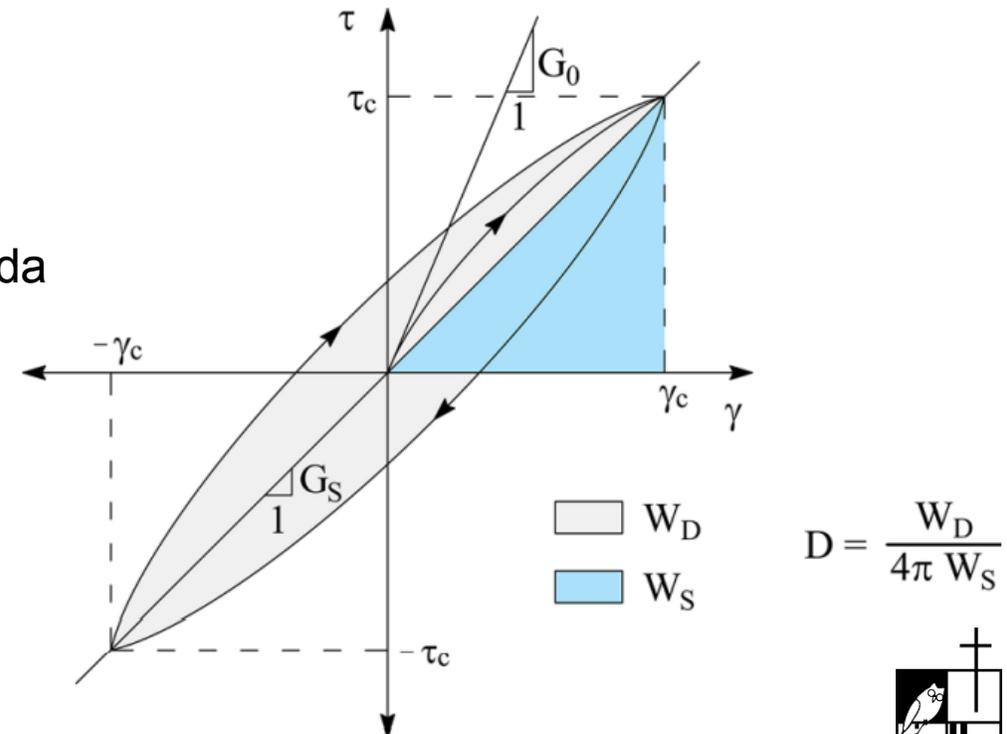


2) Propiedades dinámicas de los suelos - Comportamiento esfuerzo-deformación



MODELO LINEAL EQUIVALENTE

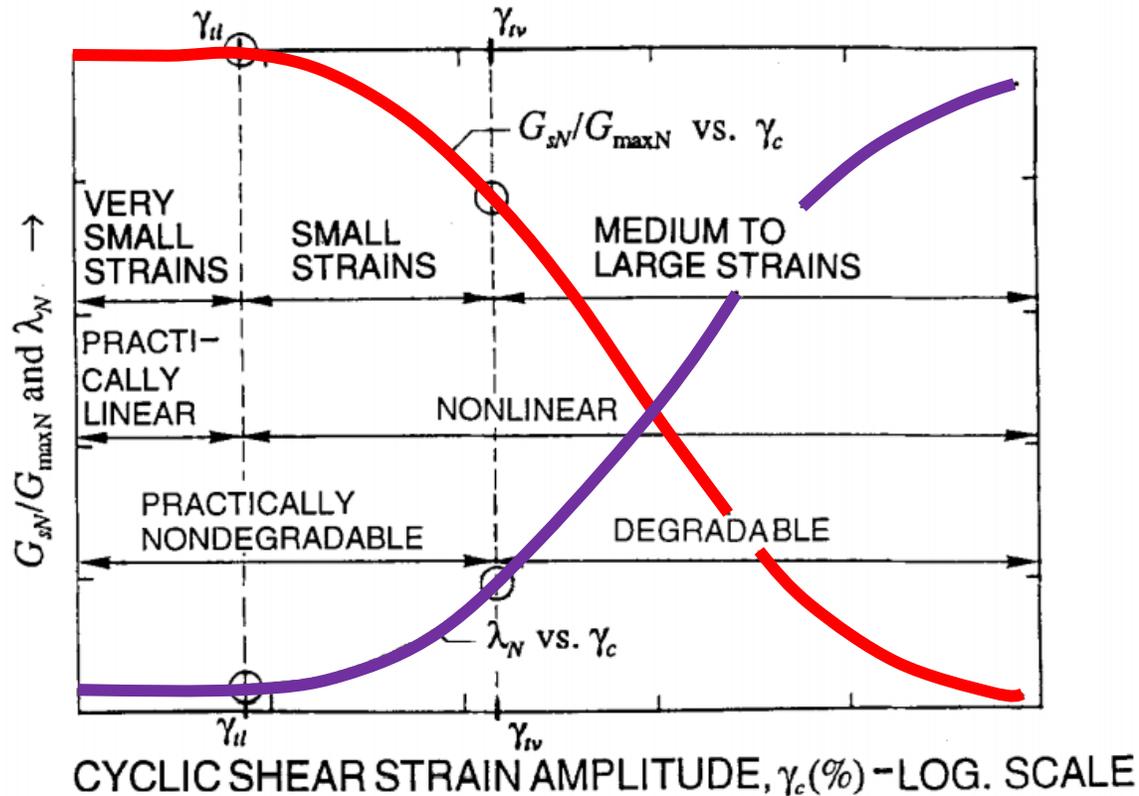
- Curva esfuerzo-deformación idealizada
- Comportamiento histerético:
 - ❖ **Módulo de rigidez al corte secante (G_s)**
 - ❖ **Relación de amortiguamiento (D)** → Energía disipada
- Aumento de deformación angular (γ):
 - ❖ Ablandamiento del suelo → Reducción de G_s
 - ❖ Mayor disipación de energía → Incremento de D
- No linealidad de los parámetros:
 - ❖ $G/G_0 - \gamma$
 - ❖ $D - \gamma$



Relación esfuerzo-deformación idealizada (Ciancimino *et al.*, 2018)



2) Propiedades dinámicas de los suelos - Comportamiento esfuerzo-deformación



RANGOS DE DEFORMACIÓN

- Deformaciones muy pequeñas ($<\gamma_{tl}$)
- Deformaciones pequeñas ($<\gamma_{tv}$)
- Deformaciones medianas a grandes ($>\gamma_{tv}$)

Módulo de rigidez al corte y relación de amortiguamiento contra deformación angular (Vucetic, 1994)

Parámetros
influyentes

- ❖ Propiedades índice (PI, C_u, D_{50})
- ❖ Esfuerzo medio de confinamiento (σ'_m)
- ❖ OCR, entre otros

Curvas
empíricas

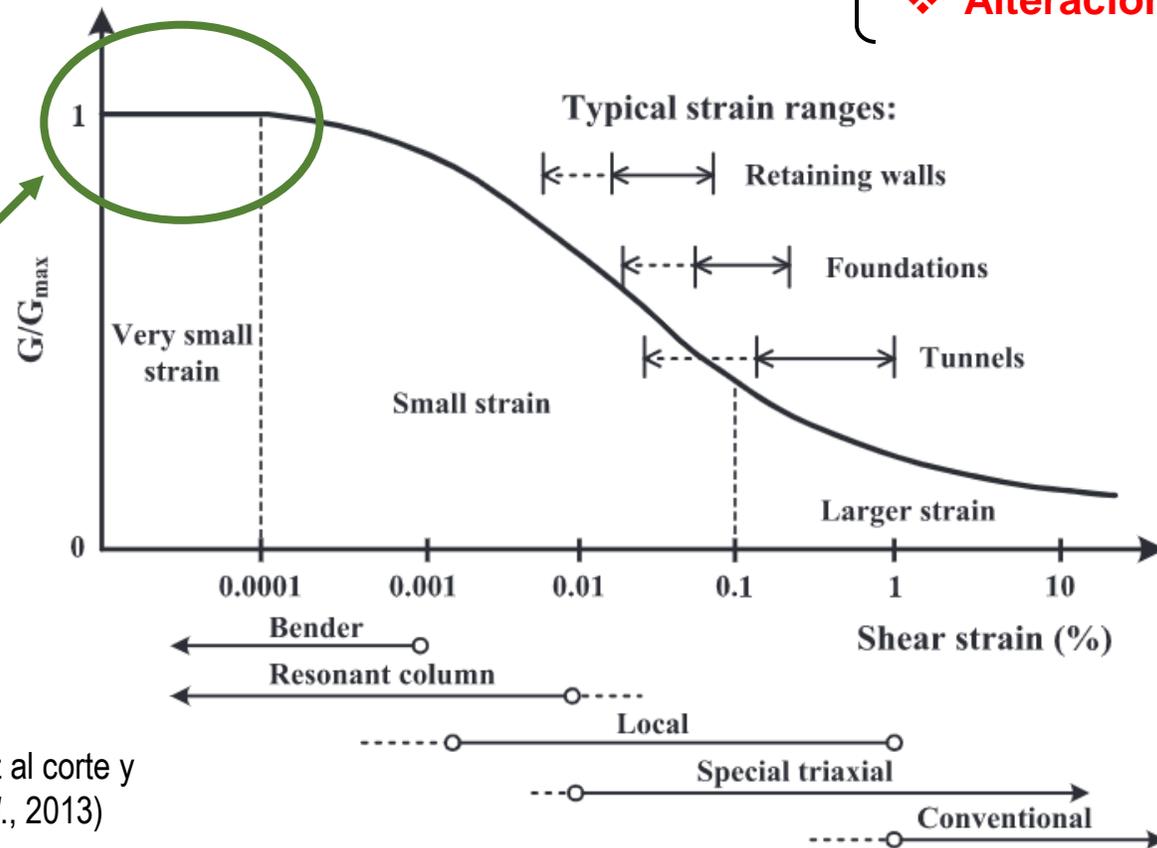


2) Propiedades dinámicas de los suelos – Métodos de determinación

No existe un único ensayo que cubra todo el intervalo de deformaciones



Rango de deformaciones alcanzadas ensayos de campo



Curva de degradación del módulo de rigidez al corte y ensayos de laboratorio (Likitlersuang *et al.*, 2013)

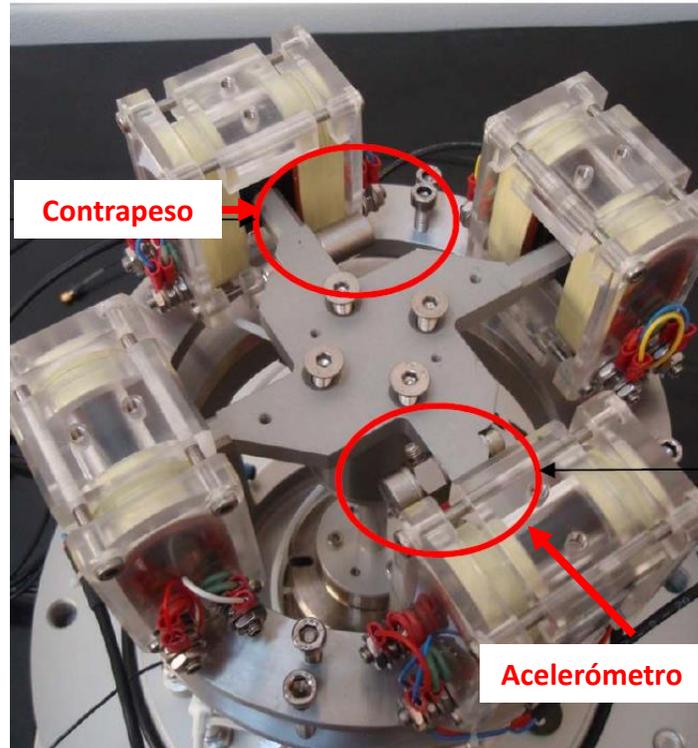


3) Ensayo de Columna Resonante - Generalidades

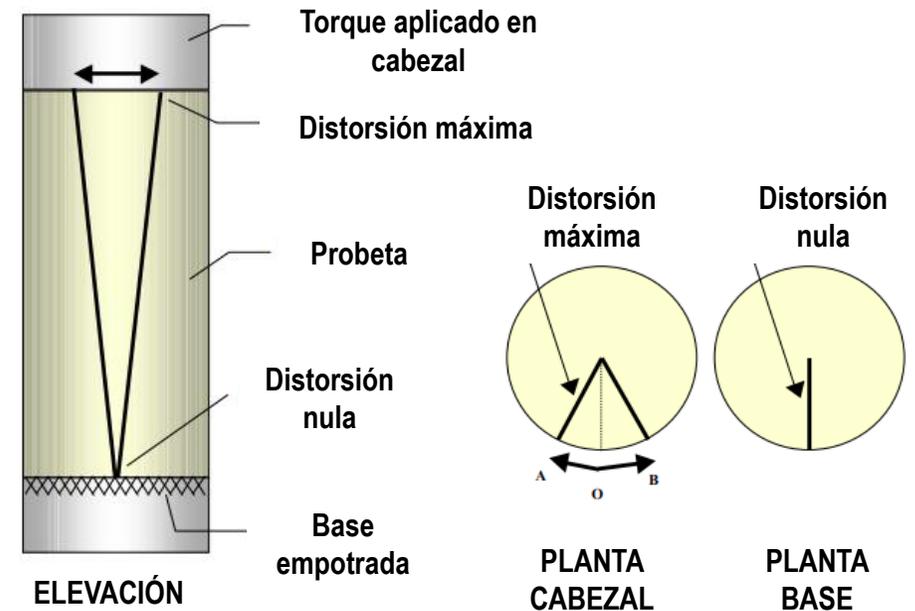
- Similar a equipo **triaxiales** (esfuerzo de confinamiento, presión de poro y carga/deformación axial)
- Muestra sometida a un **estado de vibración forzada torsional (sistema electromagnético)**
- **Respuesta del suelo** medida mediante un **acelerómetro** ubicado en la parte superior la muestra
- **Sistema** → **Oscilación forzada con un grado de libertad**



Equipo de columna resonante - UCA



Sistema electromagnético y acelerómetro



Condición de ensayo y descripción de deformación angular



3) Ensayo de Columna Resonante – Etapas y análisis de resultados

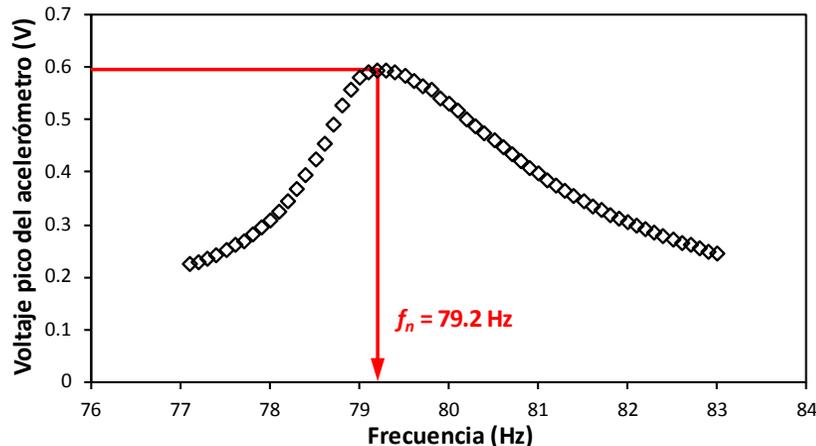


- Etapa de ensayo → Barrido de frecuencias hasta encontrar la frecuencia resonancia del espécimen f_n

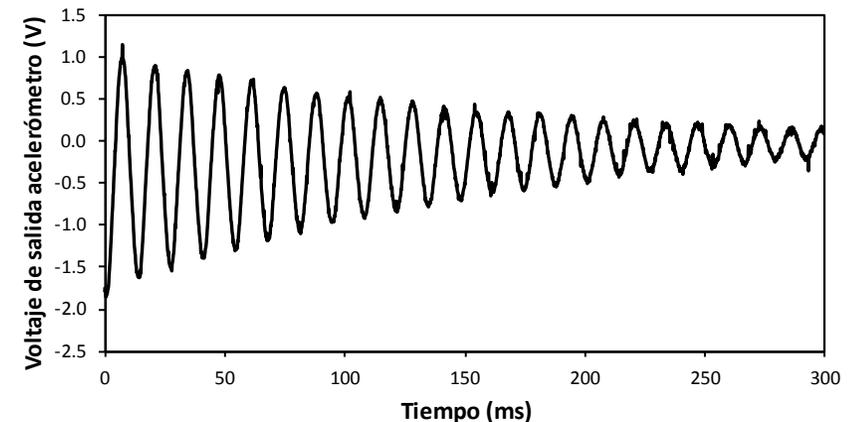
$$\frac{J}{J_0} = \frac{2\pi f_n H}{V_s} \tan\left(\frac{2\pi f_n H}{V_s}\right) \Rightarrow G = \rho V_s^2$$

- La fracción de amortiguamiento se calcula a partir de registro de vibración libre obtenido al suspender la corriente eléctrica de excitación y aplicando la expresión de decremento logarítmico (δ)

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}}$$



Barrido de frecuencias y determinación de frecuencia de resonancia



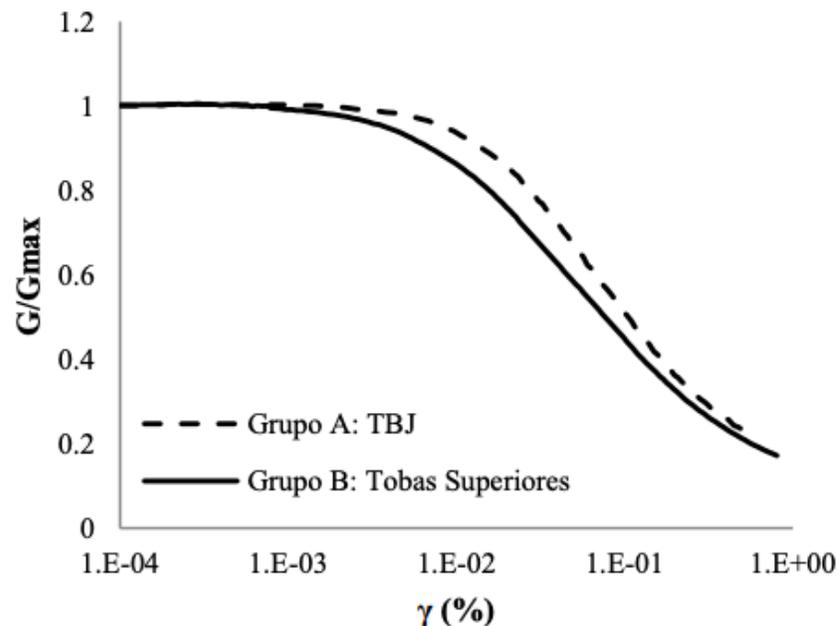
Registro de vibración libre para determinación de fracción de amortiguamiento



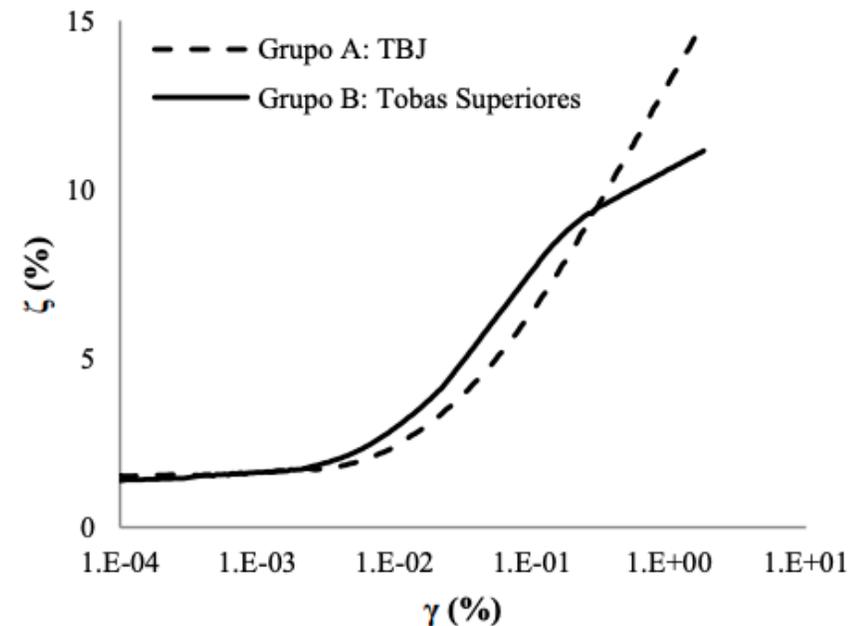
4) Evaluación de propiedades índices y mecánicas de suelos de El Salvador

ANTECEDENTES

- Información de **propiedades dinámicas de suelos** de El Salvador es **escasa**
- Mayoría de **estudios basados en pruebas de campo** → *Downhole, microtrepidación, MASW, etc.*
- **Principalmente** a suelos del **AMSS**
- **Investigación Italtekina (1988)** → Pruebas de columna resonante para determinar **$G/G_0 - \gamma$** y **$D - \gamma$** en TBJ y tobas del AMSS



Muestras alteradas de suelo extraídas del sondeo La Laguna (Chalatenango)
profundidad 0.0 a 9.6 m



Muestras alteradas de suelo extraídas del sondeo La Laguna (Chalatenango)
profundidad 0.0 a 9.6 m

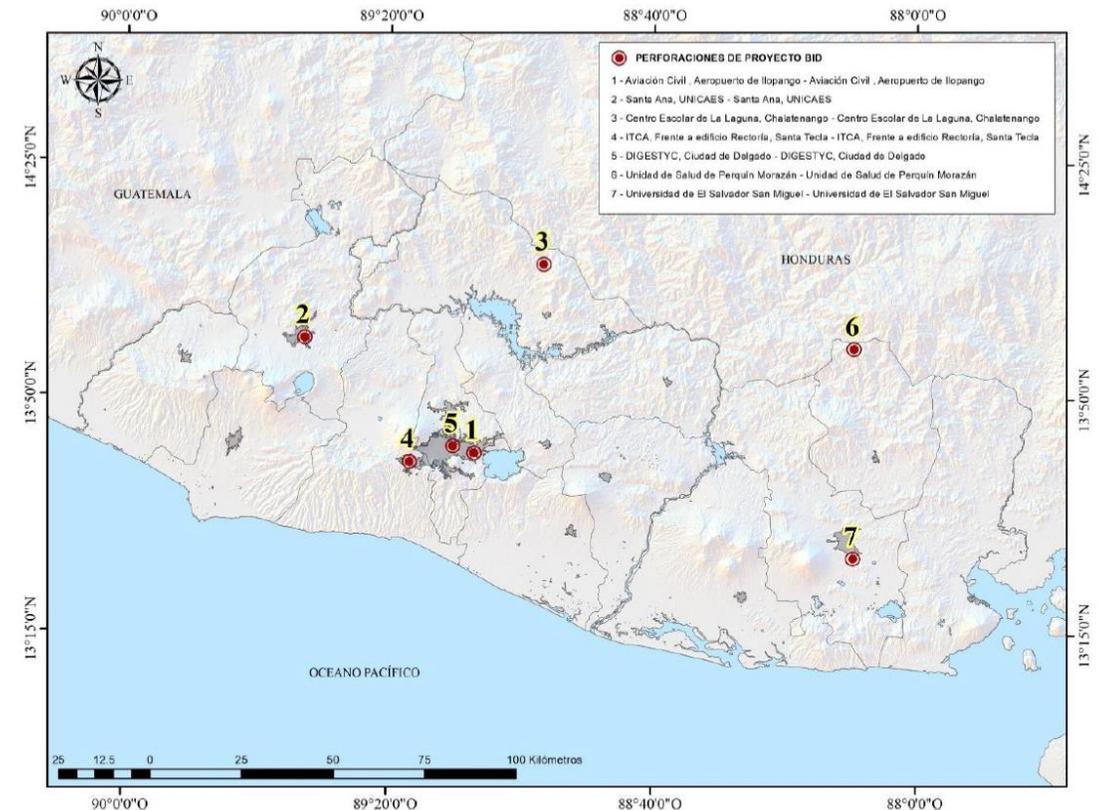


4) Evaluación de propiedades índices y mecánicas de suelos de El Salvador

Ejecución de 7 sondeos exploratorios mixtos (40 – 80 m profundidad):

- Prueba de penetración estándar (SPT)
- Muestreo inalterado con tubo de pared delgada (tubo Shelby)
- Perforación rotativa con extracción de núcleos
- Medición de velocidades de ondas de corte – **Downhole**

Añaden 8 sondeos adicionales desarrollados en proyecto hidrogeológico del MARN



Localización de sondeos proyecto BID. 1- Ilopango, 2- UNICAES, 3- La Laguna, 4- ITCA, 5- DIGESTYC, 6- Perquín, y 7- UES-San Miguel

Muestras alteradas de suelo extraídas del sondeo La Laguna (Chalatenango) profundidad 0.0 a 9.6 m

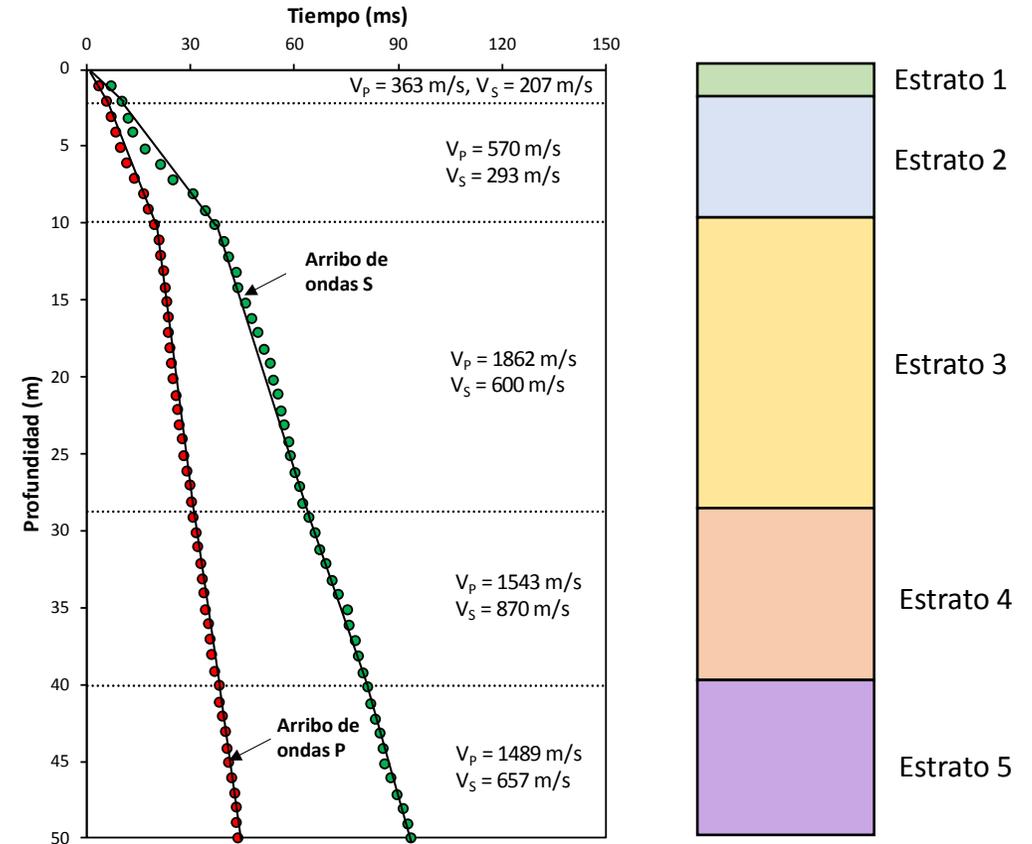


4) Evaluación de propiedades índices y mecánicas de suelos de El Salvador

Generación de perfiles litológicos y curvas domocrónicas

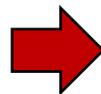


Perfil litológico sondeo UES – San Miguel



Curvas domocrónicas e interpretación ensayo Downhole sondeo UES – San Miguel

Módulos elásticos para bajas deformaciones



$$G_0 = \rho V_s^2$$

$$K = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$



4) Evaluación de propiedades índices y mecánicas de suelos de El Salvador

Generación de perfil geotécnico detallado de cada sondeo

- Clasificación de suelos SUCS
- Propiedades índice:

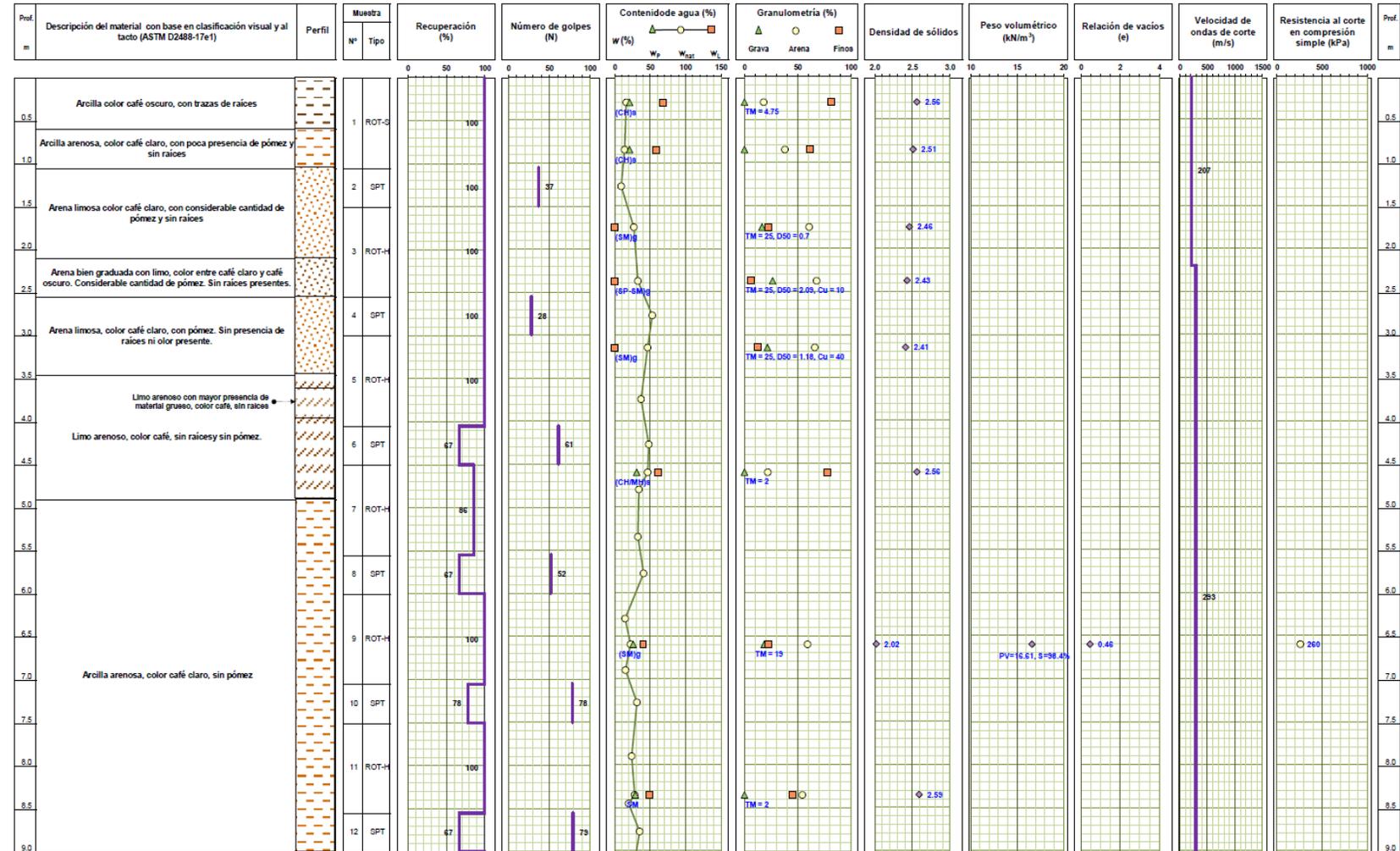
$$w, LL, PI, D_{50}, C_u$$
- Relaciones gravimétricas y volumétricas:

$$\gamma, \rho, e, S$$
- Resistencia al corte en compresión simple
- Índice de calidad de roca *RQD*



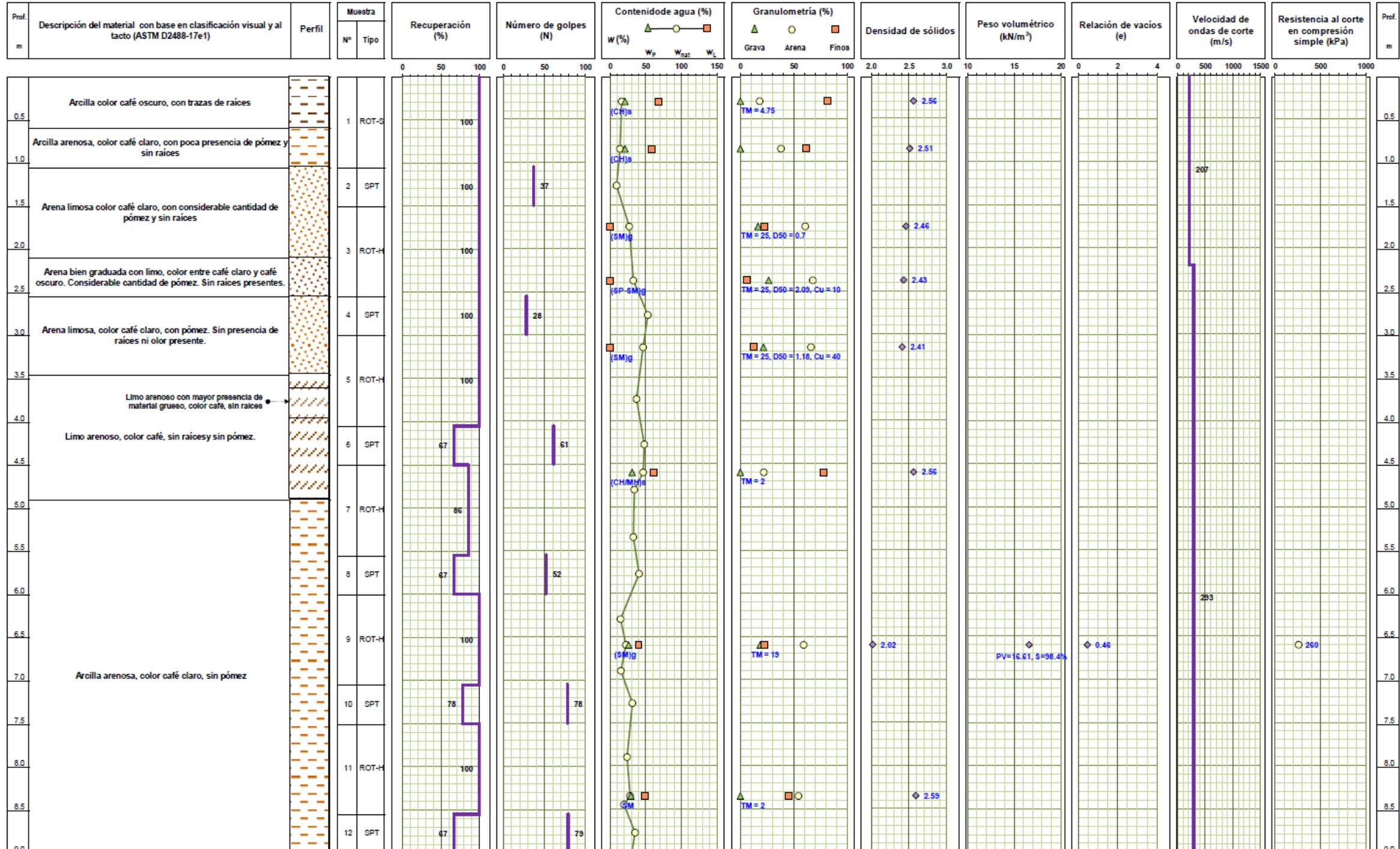
❖ Selección de muestras a ensayar en Columna Resonante

❖ Determinación de estado esfuerzo en campo $\rightarrow \sigma'_m$



Perfil geotécnico detallado del sondeo UES-San Miguel





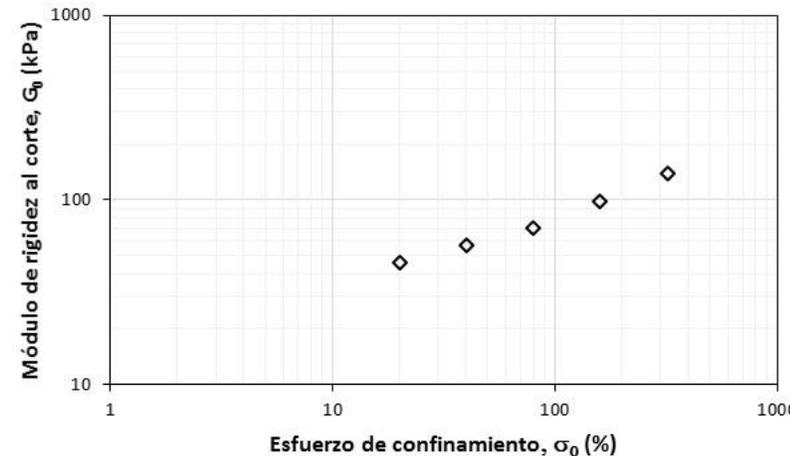
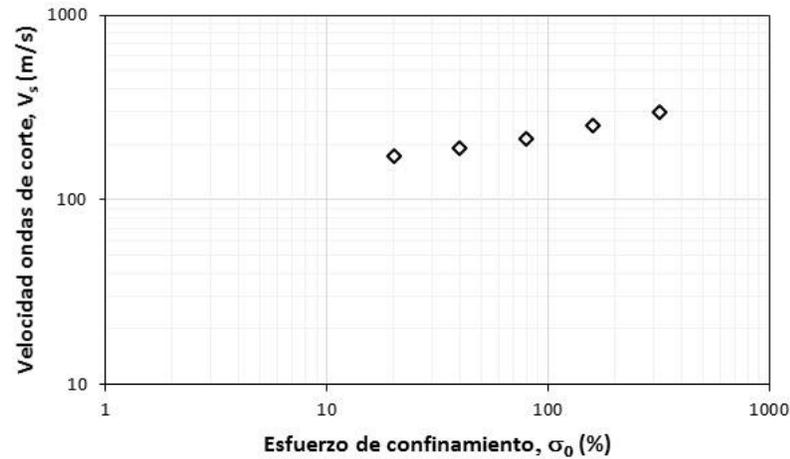
4) Evaluación de propiedades índices y mecánicas de suelos de El Salvador

Programa experimental para ensayos en Columna Resonante – Ensayos pilotos



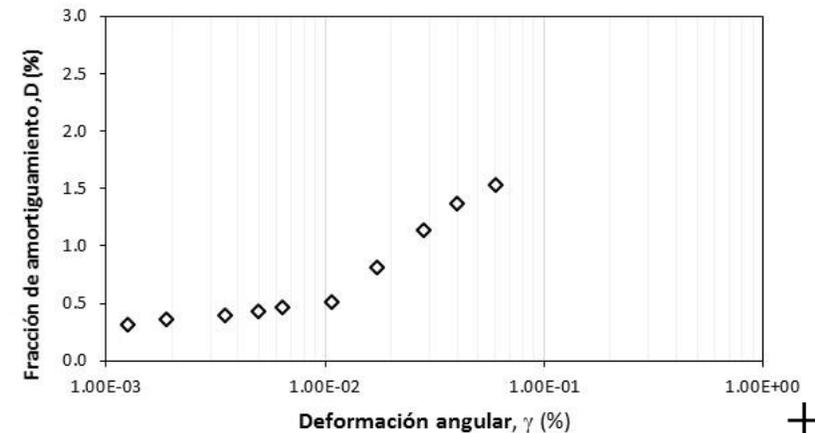
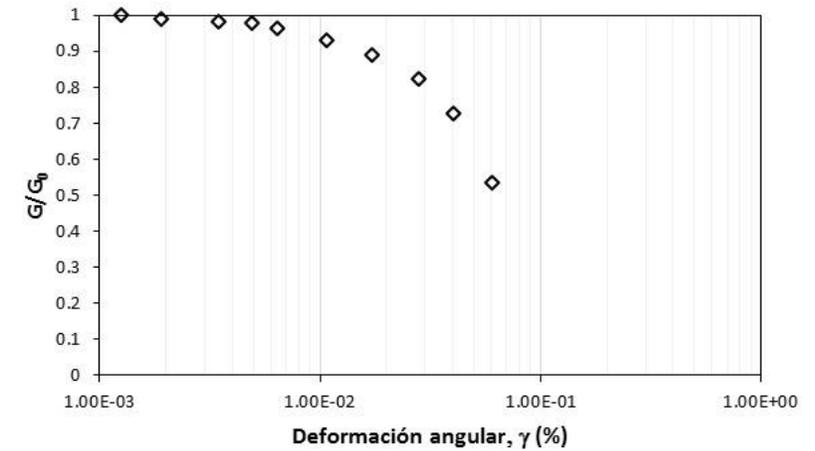
Ensayo piloto efectuado en muestra limo arenosa reconstituida

Efectos del confinamiento en V_s y G_0



Esfuerzos de confinamiento:
 $0.25 \sigma'_m, 0.5 \sigma'_m, 1.0 \sigma'_m, 2.0 \sigma'_m, 4.0 \sigma'_m,$

Curvas de degradación $G/G_0 - \gamma$ y $D - \gamma$



Esfuerzo de confinamiento σ'_m



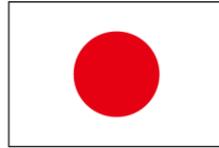
COMENTARIOS FINALES

- La adquisición del equipo de columna resonante ha fortalecido las capacidades técnicas del país para el estudio del comportamiento dinámico de los suelos locales, lo anterior permitirá proveer de insumos técnicos necesarios para el desarrollo de análisis de respuesta de sitio a nivel nacional.
- Con este proyecto, la UCA inicia una línea de investigación enfocada en la caracterización de las propiedades mecánicas de los suelos locales sometidos a cargas cíclicas. Se espera determinar la influencia de diferentes parámetros (propiedades índice, esfuerzo de confinamiento, etc.) en el comportamiento esfuerzo-deformación, así como evaluar la aplicabilidad de diferentes relaciones empíricas para predecir las curvas de degradación $G/G_0 - \gamma$ y $D - \gamma$ en el contexto salvadoreño.
- Se espera que, a mediano y largo plazo, la información recabada sea de utilidad para la actualización de la Normativa Nacional para Diseño y Construcción en El Salvador





Uníversidad Centroamericana
José Simeón Cañas



**Colaboración del
Pueblo Japonés**



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICAS Y
DE TRANSPORTE