

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Título del trabajo:

**“PROPUESTA PARA LA INCLUSIÓN DE LA AMPLIFICACIÓN  
DE SEÑAL SÍSMICA EN LAS NORMAS PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE OBRAS EN LOS DEPÓSITOS  
ALUVIALES DE GUAYAQUIL”**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO CIVIL**

Presentado por:

**TAMARA MICHELLE SALAZAR BELTRÁN**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**2018**

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedico a mis padres, como constancia de mi esfuerzo y dedicación en estos años de carrera universitaria.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que colaboraron en el desarrollo de esta tesis y a quienes impartieron sus conocimientos durante mi aprendizaje.

# EVALUADORES

---

Ing. Miguel Chávez M., M.Sc. Ph.D

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

Ing. Guillermo Muñoz, M.Sc.

**TUTOR DE PROYECTO**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

---

**TAMARA MICHELLE SALAZAR BELTRÁN**

## RESUMEN

En el presente proyecto se realiza un análisis de respuesta de sitio que se puede tener en los suelos aluviales de Guayaquil, enfocándose especialmente en los depósitos blandos.

El objetivo es realizar un espectro de diseño que permita guiar el análisis de estructuras sísmo resistentes que se construyan en un futuro en las áreas cercanas del sitio estudiado. Se evidencia que los suelos deltaicos estuarinos son suelos blandos, estudios realizados demuestran que este tipo de suelos expuestos a cargas cíclicas, tienen un comportamiento no lineal y depende de factores de amplitud de carga, número de ciclos, tipo de suelo y confinamiento.

Para el análisis de respuesta de sitio se usó información de un estudio de probabilidad de peligrosidad sísmica para conocer que sismos tienen mayor probabilidad de ocurrencia en la zona de subducción, curvas dinámicas que representan el suelo de estudio en su condición dinámica y dos metodologías, una denominada lineal equivalente, la otra no lineal. Para estos efectos se utiliza el programa Deepsoil v7 para predecir la respuesta real del suelo.

Con los resultados obtenidos se compararon las dos metodologías con los espectros en roca y se demostró la importancia del contraste de impedancia que existe en los suelos aluviales contiguos a la roca.

**Palabras Clave:** respuesta dinámica, amortiguamiento, módulo de corte, efecto de sitio, espectros

## **ABSTRACT**

*In the present project, a site response analysis is developed about alluvial soil of Guayaquil, approach exclusively on soft soils.*

*The objective is providing a design spectrum that will guide the analysis of earthquake resistant structures that will be built in the future in the areas close to the studied site. Estuarine deltaic soils are considered soft soils and studies show that this type of soils exposed to cyclic loads, have a non-linear behavior and depends on factors of load amplitude, number of cycles, soil type and confinement.*

*For the site response analysis, information from a seismic hazard probability study (PHSA) was used to know which earthquakes are more likely to occur in the subduction zone, was used dynamic curves that represent the soil in its dynamic condition and two methodologies, one called equivalent linear and other non-linear. For that, Deepsoil v7 program is used to predict the real response of the soil.*

*With the results obtained, the two methodologies were compared with the rock seismic record, and the importance of the impedance contrast exists in the alluvial soils contiguous to the rock was demonstrated.*

*Keywords: dynamic response, material damping, shear modulus, site effect, spectra*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ÍNDICE DE FIGURAS .....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación .....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general .....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Marco teórico .....	5
1.4.1. Área de estudio .....	5
1.4.2. Marco geológico de la ciudad de Guayaquil.....	5
1.4.2.1. Geología de los suelos aluviales deltaicos estuarinos .....	7
1.4.3. Peligro sísmico probabilista en roca .....	8
1.4.4. Perfil de velocidad de ondas de corte.....	9
1.4.5. Curvas de amortiguamiento y módulo de degradación .....	10
1.4.5.1. Modelo de Darendeli (2001).....	11
1.4.5.2. Modelo de Menq (2003) .....	12
1.4.5.3. Modelo Matasovic y Vucetic (1993), .....	12
1.4.6. Análisis de respuesta dinámica.....	15
1.4.6.1. Efecto de sitio.....	15
1.4.6.2. Función de transferencia.....	16

1.4.6.3. Análisis lineal equivalente .....	17
1.4.6.4. Análisis No lineal.....	18
CAPÍTULO 2.....	20
2. METODOLOGÍA .....	20
2.1. Selección de registros en roca.....	20
2.2. Selección de registros de aceleración .....	22
2.3. Identificación de perfil de suelo.....	27
2.4. Perfil de velocidad de onda de corte.....	30
2.5. Selección de las curvas dinámicas .....	31
2.6. Análisis de respuesta de sitio .....	34
CAPÍTULO 3.....	38
3. RESULTADOS OBTENIDOS.....	38
3.1 Análisis Lineal Equivalente (EQL).....	39
3.2 Análisis No lineal (NL) .....	40
3.3 Análisis de resultados.....	42
3.1 Análisis de sensibilidad.....	45
CAPÍTULO 4.....	48
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	48
4.1. Conclusiones .....	48
4.2. Recomendaciones .....	49
BIBLIOGRAFÍA .....	50
APÉNDICE .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 (A)MAPA DE ECUADOR, (B) MAPA DE LA PROVINCIA DEL GUAYAS (C) MAPA DE ZONIFICACIÓN GEOLÓGICA DE GUAYAQUIL [BENITEZ ET AL., 2005].....	6
FIGURA 1. 2 UBICACIÓN DE LA PERFORACIÓN ERU [GOOGLE EARTH] .....	8
FIGURA 1. 3 REPRESENTACIÓN DEL EFECTO DE SITIO POR NIKOLAOU ET AL. [CARLTON, 2014] .....	15
FIGURA 1. 4 REPRESENTACIÓN DE LA DECONVOLUCIÓN EN EL SUELO. [SCHNABEL ET AL., 1972] .....	16
FIGURA 1. 5 REPRESENTACIÓN UNIDIMENSIONAL DEL MODELO DE SUELO DISCRETIZADO PARA LA PROPAGACIÓN DE ONDA. [HASHASH, PHILLIPS, & GROHOLSKI, 2010] .....	19
FIGURA 2. 1 UBICACIÓN DE LAS TRES ZONAS DEL PSHA EN EL MAPA GEOLÓGICO. [GOOGLE EARTH] .....	20
FIGURA 2. 2 CURVA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DE LA ZONA 1 [BEAUVAL ET AL., 2018] .....	21
FIGURA 2. 3 ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME DEL PSHA. [BEAUVAL ET AL., 2018].....	22
FIGURA 2. 4 EJEMPLO DE REGISTRO SÍSMICO EN ROCA. [BASE DE DATOS].....	22
FIGURA 2. 5 ESPECTROS EN ROCA ESCALADOS Y CURVA UHS. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	23
FIGURA 2. 6 COMPARACIÓN DEL PROMEDIO DE LOS ESPECTROS SELECCIONADOS (LÍNEA ROJA) CON LA CURVA TARGET. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	25
FIGURA 2. 7 ESPECTROS EN ROCA DEL SISMO DE PEDERNALES Y CURVA UHS. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	26
FIGURA 2. 8 ESPECTROS SELECCIONADOS CON LA CURVA TARGET. [ELABORACIÓN PROPIA] ..	26
FIGURA 2. 9 PERFIL DE SUELO DE LA PERFORACIÓN ERU. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	29
FIGURA 2. 10 PERFIL DE VELOCIDAD PARA LA PERFORACIÓN ERU. [VERA, 2014] .....	30
FIGURA 2. 11 EFECTO DE LA CEMENTACIÓN SOBRE LA CURVA DE DARENDELI 2001. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	31
FIGURA 2. 12 EFECTO DE LA CEMENTACIÓN SOBRE LA CURVA DE AMORTIGUAMIENTO DE DARENDELI 2001. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	32
FIGURA 2. 13 CURVAS DE DEGRADACIÓN DEL MODELO MENQ 2003 [ELABORACIÓN PROPIA] .	33
FIGURA 2. 14 CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO DEL MODELO MENQ 2003 [ELABORACIÓN PROPIA] .....	33
FIGURA 2. 15 DISCRETIZACIÓN DEL PERFIL DE SUELO ERU. [DEEPSOIL V7] .....	35
FIGURA 2. 16 EJEMPLO DE CORRECCIÓN POR LÍNEA BASE DEL REGISTRO SÍSMICO TARAPACÁ-PISAGUA H1. [DEEPSOIL V7] .....	36

FIGURA 2. 17 EJEMPLO DE REGISTROS SÍSMICOS EN SUPERFICIE OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE RESPUESTA DINÁMICA. [DEEPSOIL V7] .....	37
FIGURA 3. 1 ESPECTROS EN ROCA (LINEA DE COLORES), ESPECTRO MEDIO DE TODOS LOS REGISTROS SELECCIONADOS (GEOMEAN) Y, ESPECTRO DE ROCA UHS (LINEA AZUL). [ELABORACIÓN PROPIA] .....	38
FIGURA 3. 2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS EQL PARA EL PERFIL ERU. [ELABORACIÓN PROPIA]	39
FIGURA 3. 3 ESPECTRO EN SUPERFICIE (LÍNEAS DE COLORES) Y ESPECTRO ELÁSTICO MEDIO (GEOMEAN) DEL PERFIL ERU CON EL MÉTODO EQL. [ELABORACIÓN PROPIA].....	40
FIGURA 3. 4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS NL DEL PERFIL ERU. [ELABORACIÓN PROPIA].....	41
FIGURA 3. 5 ESPECTRO EN SUPERFICIE (LÍNEAS DE COLORES) Y ESPECTRO ELÁSTICO MEDIO (GEOMEAN) DEL PERFIL ERU CON EL MÉTODO NL. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	42
FIGURA 3. 6 REGISTROS SÍSMICOS EN LA DIRECCIÓN NS Y WE DEL SISMO DE PEDERNALES EN EL 2016. [ELABORACIÓN PROPIA].....	43
FIGURA 3. 7 ESPECTRO EN SUPERFICIE DEL REGISTRO MEDIDO EN ERU PARA EL SISMO DE PEDERNALES. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	43
FIGURA 3. 8 ANÁLISIS DE RESULTADOS [ELABORACIÓN PROPIA] .....	44
FIGURA 3. 9 PERFIL DE SUELO ARBITRARIO CON LAS MISMAS PROPIEDADES ELEGIDAS PARA EL ANÁLISIS DE RESPUESTA DINÁMICA. [ELABORACIÓN PROPIA].....	45
FIGURA 3. 10 ESPECTRO EN ROCA DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD. [ELABORACIÓN PROPIA] ...	46
FIGURA 3. 11 ESPECTRO EN SUPERFICIE DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA CURVAS MODIFICADAS CON UN FACTOR DE 0.9. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	46
FIGURA 3. 12 ESPECTRO EN SUPERFICIE DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA CURVA DE AMORTIGUAMIENTO MODIFICADA CON UN FACTOR DE 0.9. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	47
FIGURA A 1 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA. [BEAUVAL ET AL., 2018].....	51
FIGURA A 2 VARIABLES DE INGRESO DEL MÉTODO EQUIVALENTE LINEAL. [ELABORACIÓN PROPIA].....	53
FIGURA A 3 VARIABLES DE INGRESO DEL MÉTODO NO LINEAL DE ESFUERZOS EFECTIVOS. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	55
FIGURA A 4 DISGREGACIÓN DE LA CURVA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA. PGA 475 YRS (0.261G) [BEHAUVAL, 2018].....	56
FIGURA A 5 COMPARACIÓN DE ESPECTROS DE REPUESTA EN SITIO CON ESPECTRO MEDIDO EN SUPERFICIE. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	56

FIGURA A 6 REGISTROS SÍSMICOS ELEGIDOS PARA EL ANÁLISIS DE RESPUESTA DINÁMICA [ELABORACIÓN PROPIA] .....	57
FIGURA A 7 REGISTROS SÍSMICOS EN SUPERFICIE DEL MÉTODO EQUIVALENTE LINEAL. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	60
FIGURA A 8 REGISTROS SÍSMICOS EN SUPERFICIE CON EL MÉTODO NO LINEAL. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. 1 DESCRIPCIÓN DE LA PERFORACIÓN ERU.....	7
TABLA 2. 1 UBICACIÓN DE LAS TRES ZONAS DEL ESTUDIO PSHA. [BEAUVAL ET AL, 2018].....	21
TABLA 2. 2 FILOSOFÍA DE DISEÑO SÍSMICO. [NEWMARK- HALL].....	21
TABLA 2. 3 PROPIEDADES DE LOS SISMOS DE SUBDUCCIÓN. [BASE DE DATOS] .....	24
TABLA 2. 4 PROPIEDADES DE LOS SISMOS DE SUBDUCCIÓN PERTENECIENTES AL SISMO PEDERNALES [IG EPN].....	25
TABLA 2. 5 UBICACIÓN DE LA PERFORACIÓN BSF. [VERA, 2005].....	31
TABLA A 1 ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME DE LA ZONA 1. [BEAUVAL ET AL, 2018].....	51

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

América del Sur ha sido la fuente de algunos de los mayores terremotos en el mundo; algunos de los eventos más grandes conocidos, fue el terremoto de 1960 M 9.5 en Chile, el evento Ecuador 1906 M 8.8 y uno de los terremotos intraplaca más grandes fue el devastador terremoto en el centro-oeste en 1970 en Perú con M 7.9, que ocasionó la muerte de aproximadamente 70.000 personas (Beck y Ruff, 1989).

Las fuentes de sismicidad en Ecuador incluyen fallas corticales poco profundas, y los de interplaca e intraplaca de la zona de subducción de América del Sur. Los terremotos debido a fallas corticales tienen profundidades menores de 30 a 40 km, los terremotos de interplaca ocurren a lo largo de la interfaz entre las placas de Sudamérica y Nazca, y los sismos de intraplaca se produce en la corteza de América del Sur y dentro de la placa de Nazca.

Durante muchos años se ha cuestionado la importancia de los efectos locales de sitio en un evento sísmico para el diseño de estructuras. Se ha comprobado que la señal sísmica sufre modificaciones en su duración y frecuencia cuando pasa por estratos de suelos especiales; como la reflexión múltiple de las ondas y la variación de las propiedades del suelo, que genera un impacto directo en la respuesta de las estructuras durante los eventos sísmicos. Fue estudiada desde 1985 con el terremoto de la Ciudad de México, seguido por Loma Prieta (1989) en EE.UU., Hyogo-Ken Nanbu (1995) en Japón, y entre otros que tuvieron el mismo efecto; por tal razón, los países sísmicos han buscado la manera de incorporar en sus normas de construcción, un espectro de diseño dependiente del sitio.

No queda duda que Ecuador está expuesto a sismos de gran magnitud debido a la zona de subducción, el ejemplo más reciente se dio en abril del 2016; el sismo de Pedernales con magnitud de momento Mw 7.8, que afectó de gran manera las seis ciudades de la región costa incluyendo Guayaquil, que fue afectado significativamente aun estando a casi 400 km de distancia del epicentro, evidenciando el efecto de sitio.

El Proyecto Radius (1998-1999), realizó avances importantes respecto a la caracterización geotécnica de los suelos de Guayaquil y su comportamiento dinámico, debido al riesgo sísmico que presenta la ciudad. Posteriormente se efectuó el informe de Investigación y Estudio del comportamiento dinámico del subsuelo y Microzonificación sísmica de la ciudad de Guayaquil (2005) y, en 2014 por la Secretaría de Gestión de Riesgos presentó la Microzonificación sísmica y geotécnica de la ciudad de Guayaquil según la Norma ecuatoriana de la construcción 2011. Con esto, se ha actualizado el mapa geológico de la ciudad con el fin de definir los suelos de Guayaquil.

## 1.2. Justificación

Los depósitos aluviales siempre han sido el mayor reto en la ingeniería porque se forman a partir de sedimentos de los ríos, teniendo como consecuencia suelos blandos y con propiedades exclusivas de los fenómenos de la naturaleza. Los estudios geológicos realizados desde el año 2000, han demostrado que la zona central y sur de la ciudad de Guayaquil está mayormente compuesta por suelos aluviales deltáicos estuarinos; clasificados como suelos blandos; Tipo F según la clasificación de ASCE-7 (2010).

El país está expuesto a un alto riesgo sísmico, sin embargo, se han construido obras sin la participación de profesionales de la ingeniería. Como consecuencia del sismo de Pedernales (2016), las construcciones en Guayaquil fallaron no solo por el tipo de materiales utilizados, sino también por no tener en cuenta el sitio donde las obras afectadas fueron construidas.

Se prevé con optimismo que en el futuro se construyan obras de gran importancia en esas zonas de la ciudad; por lo tanto, resulta obligatorio un estudio exhaustivo de la respuesta dinámica de estos suelos e incluir los efectos de sitio en los espectros de diseño. Es importante que los diseños de edificaciones tengan en cuenta una caracterización dinámica de los suelos donde se construyen.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Implementar la metodología propuesta por la NEC-15, para la generación de espectros de pseudo aceleración dependiente del sitio, en los suelos aluviales de la ciudad de Guayaquil.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Estimar los parámetros de comportamiento dinámico de un suelo a partir de resultados de ensayos.
- Escalar y seleccionar los registros de historia-tiempo compatibles con el Espectro de Peligro Uniforme (UHS) obtenido de un estudio probabilístico.
- Analizar las pseudo aceleraciones y parámetros dinámicos de la respuesta dinámica con el Método Lineal Equivalente y el Método No Lineal usando el programa Deepsoil v7.
- Realizar un análisis de sensibilidad de las curvas dinámicas.

## **1.4. Marco teórico**

### **1.4.1. Área de estudio**

Ecuador se encuentra ubicada sobre la línea Ecuatorial en el extremo noroeste de América del Sur, y ocupa las posiciones de latitud y longitud del 2°S y 77°30'W. Su zona según el sistema de coordenadas UTM WGS 84 es 17M en casi todo el territorio ecuatoriano; excepto al Este del país con zona 18M, limítrofe con Perú. La ciudad de Guayaquil se encuentra en la provincia del Guayas en latitud y longitud 02°15'S y 79°52', su extensión es de 344,5 km<sup>2</sup> de gran planicie y relativamente alejada de la Cordillera de los Andes. Figura 1.1(A)

### **1.4.2. Marco geológico de la ciudad de Guayaquil**

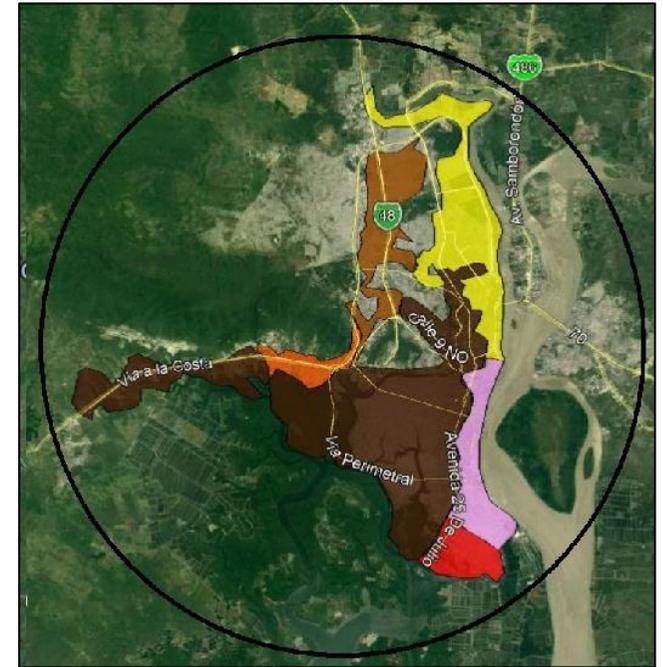
En la investigación realizada por Benítez et al. a partir del año 2005, contribuyó con la actualización del Mapa Geológico de la ciudad de Guayaquil, se ha demostrado que Guayaquil está conformada por depósitos aluviales, coluviales, deltaicos estuarinos y formaciones rocosas, tal como formación Piñón y formación Cayo. Divide a la ciudad en 7 Zonas Geotécnicas de importantes características, desde la D1 a la D7. Las primeras tres zonas están conformadas por los depósitos deltaicos estuarinos; la Zona D1 corresponde a la zona central y sureste de la ciudad de Guayaquil, la Zona D2 al sur y, la Zona D3 al noreste y suroeste. La zona D4 y D5 está conformada por suelos aluviales proveniente de los ríos Daule y Babahoyo, la zona D6 está conformada por suelos coluviales provenientes de las colinas de la Cordillera Chongón-Colonche, y finalmente, la zona D7 está conformada por los depósitos residuales y la formación rocosa de la formación Guayaquil y formación Cayo. (Figura 1.1 C)



(A)



(B)



**Leyenda**

- D1 Depósitos deltaico-estuarino (ESTE-CENTRO)
- D2 Depósitos deltaico-estuarino (SUR)
- D3 Depósitos deltaico-estuarino (OESTE-NORTE-TRINITARIA)
- D4 Depósitos Aluviales
- D5 Depósitos Aluvio-Lacustres
- D6 Depósitos Coluviales

(C)

Figura 1. 1 (A) Mapa de Ecuador, (B) Mapa de la provincia del Guayas (C) Mapa de zonificación geológica de Guayaquil [Benitez et al., 2005]

#### **1.4.2.1. Geología de los suelos aluviales deltaicos estuarinos**

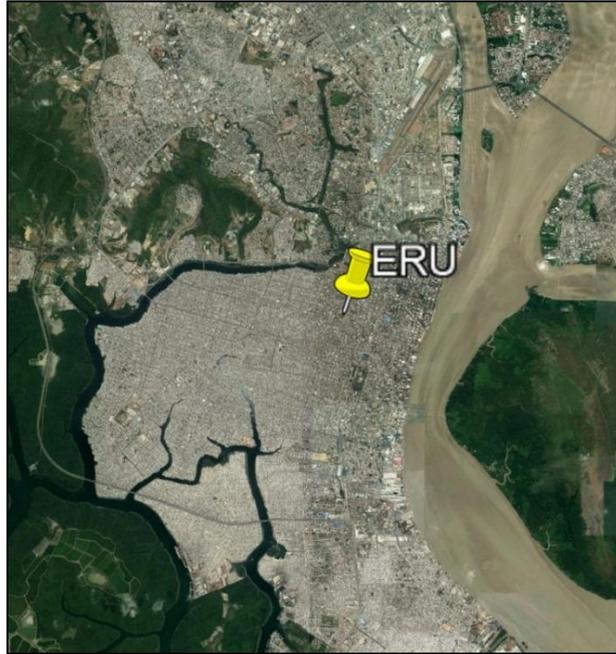
Los suelos deltaicos estuarinos se han formado por acción del transporte y deposición del conjunto de canales, que se conectan del río Guayas con el Golfo Guayaquil, y está conformada por una gran extensión al sur y centro de la ciudad. Los suelos deltaicos estuarinos se componen por arcillas limosas con pequeñas capas de arena limosa, y bancos de arena con residuos de concha, que le dan la propiedad de suelo blando al ser alterados. Se diferencian de los suelos aluviales por la cementación de pirita; un elemento químico proveniente del limo, que se forma comúnmente en sedimentos marinos (Benitez et al., 2005).

La composición de azufre de la pirita le da la propiedad de salinidad y actúa como un agente cementante de los suelos. No obstante, la lixiviación de las arcillas permite el incremento de la cementación y como consecuencia se desarrolla una arcilla sensitiva. La característica principal de los suelos cementantes es su mecanismo de colapso; los suelos de deltaicos estuarinos tienen el mecanismo de adherencia de las arcillas en la superficie de las partículas de arenas, que es un indicio más sobre su característica de suelo especial. Sin embargo, estas zonas de suelo deltaico estuarino tienen el nivel freático alto dando la característica de suelo blando

El perfil de suelo de estudio está ubicado en la zona centro-sur de Guayaquil, denominado ERU (Figura 1.2) y es la representación de tipo de suelo aluvial deltaico estuarino que se usará en este análisis. Su descripción se encuentra en la Tabla 1.1.

**Tabla 1. 1 Descripción de la perforación ERU.**

<b>Perforación</b>	<b>Coordenadas</b>	
Estadio Ramón Unamuno	622523.60	9756975.46



**Figura 1. 2 Ubicación de la perforación ERU [Google Earth]**

#### **1.4.3. Peligro sísmico probabilista en roca**

El estudio probabilístico sirve para evaluar la amenaza sísmica de un sitio, el cual fue propuesto por Esteva y Cornell en 1968. La amenaza sísmica se define como la probabilidad de que, en un sitio se excedan los valores de intensidad en un tiempo dado; en otras palabras, conocer la ocurrencia y severidad de los posibles eventos sísmicos.

Los factores que definen el nivel de movimiento de un sismo son, la geometría, dimensiones de la ruptura, orientación de la falla, la distancia de ruptura a la fuente, magnitud del sismo, relación de atenuación a lo largo de la propagación de la onda y factores de sitio dependientes del tipo de suelo en la superficie. Dada esta naturaleza impredecible, es que se utiliza el proceso de Poisson; comúnmente usado en regiones donde no hay suficiente información y gran incertidumbre de variables para definir la ocurrencia de un sismo.

La probabilidad de que un parámetro de movimiento de suelo “m” exceda a uno especificado “M” en un periodo de tiempo “tr” se da con la siguiente expresión:

$$P(m > M, tr) = 1 - e^{-v(M)*tr} \quad (1.1)$$

Donde  $v(M)$  es la probabilidad anual de que un evento  $m$  exceda a otro  $M$  y se obtiene sumando las contribuciones de todas las fuentes, esto es:

$$v(M) = \sum v(M) \quad (1.2)$$

$$v(M) = \sum_i \sum_j \beta_n(mi) * P(R = r_j|mi) * P(m > M|mi, r_j) \quad (1.3)$$

$\beta(mi)$	Probabilidad anual de ocurrencia de un sismo $m$ de la fuente $n$ .
$P(R = r_j mi)$	Probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud $m$ en la fuente $n$ , donde $r$ es el incremento de distancia más cercano desde la superficie de ruptura al sitio.
$P(m > M mi, r_j)$	Probabilidad de que un sismo de magnitud $m$ a una distancia de $r$ , exceda el nivel especificado $M$ .

Los resultados del PSHA de un sitio se presentan en términos de la probabilidad anual de excedencia y es la inversa del periodo de retorno de un sismo. Las curvas de peligro sísmico parten de la distribución log normal específica de eventos para una región de interés a partir del modelo de Poisson y, los espectros de peligro uniforme se obtienen para una probabilidad anual de excedencia de interés.

#### 1.4.4. Perfil de velocidad de ondas de corte.

La clasificación estática y dinámica de los suelos se usa para identificar el suelo del sitio de interés. Para la realización de un modelo geotécnico es necesario obtener suficiente información sobre las características del suelo porque la estratigrafía de un suelo es cambiante en función de la edad geológica, y de las condiciones externas a las que ha sido sometida. La condición sísmica ha sido la causante de varias alteraciones del suelo y por tal razón se han identificado algunos parámetros que facilitan la identificación de problemas y discapacidades de los suelos; tal como la velocidad de onda de corte, periodo fundamental, factor de amplificación, resonancia, y resistencia al corte, que se obtienen de ensayos de laboratorio, dinámicos CPT, y geofísicos.

La velocidad de onda de corte es un parámetro de rigidez a bajas deformaciones que ayuda a identificar las propiedades elásticas de los suelos y por eso el parámetro  $V_{s30}$  es muy usado como requisito en las normas de construcción. Esta variable es indispensable en el análisis sísmico como input en el software Deepsoil y se definirá un perfil de velocidades basado en la siguiente:

- Correlaciones usando perforaciones SPT para arenas y arcillas rígidas y, ensayos de resistencia al corte  $S_u$  para arcillas blandas. Su uso depende de las similitudes que tenga con el sitio de interés. Algunas son:
  - Arenas: Imai & Tonuchi (1982), Seed et al. (1984)
  - Arcillas: Hardin (1978), Jamiolkowski et al. (1991), Imai & Tonuchi (1982)
- Correlaciones usando el ensayo CPT, muy útil a grandes profundidades. Algunas correlaciones son Mayne (2006), Robertson (2009) y Piratheepan (2002).
- Prospecciones geofísicas MASW y Downhole. MASW calcula las velocidades de onda de compresión y se realiza en la superficie con un arreglo de geófonos, mientras que el ensayo Downhole se realiza en una excavación y mide ondas de compresión y corte.
- Método HVSR es un método de refracción sísmica pasiva que mide las componentes horizontales y verticales de las ondas superficiales y permite hallar el periodo predominante del suelo.

#### **1.4.5. Curvas de amortiguamiento y módulo de degradación**

Para producir de forma aproximada el comportamiento dinámico del suelo, se requiere de datos experimentales en base a un ciclo de histéresis (Seed et al, 1989), donde se obtiene una curva esfuerzo-deformación  $\tau = f(\gamma)$  para ciclos completos de carga y descarga. Algunos de los ensayos usados son, ensayo de columna resonante, pulso ultrasónico, triaxial cíclico y corte directo cíclico (Kramer, 1996).

Los parámetros dinámicos que se obtienen de los ensayos realizados a las muestras; son el módulo de corte ( $G$ ) y amortiguamiento ( $\xi$ ), correspondientes a la pendiente y el área de la curva de histéresis, que varían en función de la

deformación ( $\gamma$ ). El módulo de corte generalmente se normaliza con el módulo de corte a baja deformación  $G_{max}$ , dándonos un máximo valor de 1 a baja deformación y a medida que éstas incrementan, la curva de degradación del módulo disminuye. La curva de amortiguamiento toma los valores absolutos y mientras aumentan las deformaciones también lo hacen los valores de amortiguamiento.

En base a estas propiedades dinámicas, se han generado modelos empíricos para arcillas, limos, arenas y gravas, que se usan para representar su estructura (backbone) y parten del modelo hiperbólico creado por Konder and Zelasko en 1963. Algunos modelos comúnmente usados en la práctica son Vucetic and Dobry (1991), Seed and Idriss (1970), Darendeli (2001), Kishida et al. (2009), entre otros.

#### 1.4.5.1. Modelo de Darendeli (2001)

Darendeli encontró que, en los suelos cohesivos la curva de degradación de rigidez aumenta, cuando el OCR aumenta. Y que el amortiguamiento disminuye a grandes deformaciones debido al índice de plasticidad; esto es, mientras mayor sea el índice de plasticidad disminuye la no linealidad del suelo. Los parámetros usados en Darendeli son:

- Relación de sobreconsolidación (OCR)
- Índice de plasticidad (IP)
- Coeficiente de presión lateral ( $k_0$ )
- Numero de ciclos (N)
- Frecuencia de carga (f)
- Parámetros del modelo (a, b,  $\phi_i$ )

Las ecuaciones 1 a 4 proporcionan las bases del modelo.

$$G/G_{max} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (1.4)$$

$$D_{min} = (\phi_6 + \phi_7 * IP * (OCR)^{\phi_6} * (G' o)^{\phi_9} * [1 + \phi_{10} * \ln(frq)]) \quad (1.5)$$

$$D_{masing} = \frac{100}{\pi} * \left( 4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right) \quad (1.6)$$

$$D_{adj} = b * \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{0.1} * D_{masing} * D_{min} \quad (1.7)$$

#### 1.4.5.2. Modelo de Menq (2003)

Este modelo se desarrolló para suelos arenosos y gravosos. Los parámetros del modelo son:

- Coeficiente de uniformidad (Cu)
- Granulometría del suelo (D50)
- Esfuerzo efectivo (G'o)
- Constantes del modelo ( $\varphi_i$ )

Menq descubrió que las curvas son influenciadas por los valores de D50 y Cu. Mientras D50 aumenta, los valores de G/Gmax tienden a incrementar; es decir para suelos que son gravosos. Y para valores de Cu mayores, la curva de degradación disminuye para un valor de deformación.

Las ecuaciones 5 y 6 proporcionan las bases del modelo.

$$D_{min} = (\varphi_3 * Cu^{\varphi_4} * D50^{\varphi_5} * \left(\frac{G'o}{pa}\right)^{\varphi_6}) \quad (1.8)$$

$$\gamma_r(\%) = 0,12 * Cu^{\varphi_1} * \left(\frac{G'o}{pa}\right)^{\varphi_2} \quad (1.9)$$

#### 1.4.5.3. Modelo Matasovic y Vucetic (1993),

Este modelo se usa en el análisis no lineal, se basa en tres modelos:

- Una función hiperbólica de esfuerzo-deformación que modifica las curvas de amortiguamiento y degradación
- Un modelo que genera la presión de agua intersticial y,
- Un conjunto de reglas que rigen la respuesta de descarga y recarga del suelo.

La función hiperbólica modificada se describe en las siguientes ecuaciones:

$$\tau = \frac{G_{max} * \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \quad (1.10)$$

$$\gamma_r = \gamma_{ref} * \left(\frac{G'_{rv}}{G_{ref}}\right)^b \quad (1.11)$$

$$\xi = D_{min} * \left(\frac{1}{G'_{rv}}\right)^d \quad (1.12)$$

Donde  $\tau$  = esfuerzo de corte,  $G_{max}$  = módulo de corte inicial,  $\gamma$  = deformación,  $\beta$ ,  $s$ ,  $\gamma_r$  son parámetros del modelo hiperbólico modificado.

Se usó el modelo de reducción del módulo (MRFD) que incluye un factor de reducción  $F(\gamma_m)$  para que se corrijan los valores de amortiguamiento a grandes deformaciones del modelo MKZ.

$$\tau = F(\gamma_m) \left[ \frac{2 G_{max} * \left(\frac{\gamma - \gamma_{ref}}{2}\right)}{1 + \beta \left(\frac{\gamma - \gamma_{rev}}{2 \gamma_r}\right)^s} - \frac{G_{max} * (\gamma - \gamma_{ref})}{1 + \beta \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r}\right)^s} \right] + \frac{G_{max} * (\gamma - \gamma_{ref})}{1 + \beta \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r}\right)^s} + \tau_{rev} \quad (1.13)$$

$$F(\gamma_m) = P1 - P2 \left(1 - \left(\frac{G(\gamma_m)}{G_{max}}\right)^{P3}\right) \quad (1.14)$$

Donde,  $\tau_{rev}$  y  $\gamma_{rev}$  son el esfuerzo y la deformación cuando ocurre la reversión de la curva,  $\gamma_m$  es la máxima deformación que ha experimentado el suelo y,  $D_{min}$ ,  $\gamma_{ref}$ ,  $\beta$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $d$ ,  $P1$ ,  $P2$ ,  $P3$  son parámetros de ajuste del modelo.

Matasovic y Vucetic (1995) encontraron que en las arcillas sobreconsolidadas se desarrollan presiones negativas de los poros al comienzo de la carga cíclica y que la rigidez y el esfuerzo del suelo disminuyen. Esto es contradictorio con el principio de esfuerzo efectivo porque la rigidez y el esfuerzo disminuyen a medida que aumenta el esfuerzo efectivo aparente. Matasovic y Vucetic (1995) plantean la hipótesis de que la degradación cíclica y la generación de presión de agua porosa cíclica en las arcillas se debe a la "distorsión y el consiguiente deterioro de la microestructura de la arcilla causado por la rotura de enlaces de sus partículas".

Una de las ventajas de los modelos de respuesta de sitio de esfuerzo efectivos sobre los modelos de esfuerzo total es su capacidad de predecir el cambio en la presión del agua intersticial y la degradación del suelo debido a la carga cíclica. El corte cíclico de suelos completamente saturados causa deformaciones plásticas debido al colapso progresivo del esqueleto del suelo. A medida que el esqueleto del suelo colapsa, se generan presiones residuales de exceso de agua intersticial, que disminuyen el esfuerzo efectivo.

Debido a que la rigidez y la resistencia de los suelos dependen de la presión de confinamiento efectiva, a medida que disminuye el esfuerzo efectivo, la rigidez y la resistencia también disminuyen. Como resultado, la generación y redistribución de la presión de exceso de agua intersticial dentro de un depósito de suelo puede afectar significativamente la respuesta sísmica de un sitio (Matasovic 1993). Las ecuaciones que describen la consideración de presión de poros en las arcillas son:

$$ru = A\delta^3 + B\delta^2 + C\delta + D \quad (1.15)$$

$$\delta = N^{-s(\gamma - \gamma_{tvp})^r} \quad (1.16)$$

Donde  $ru$  es el exceso de presión de poros normalizada,  $N$  es el número de ciclos,  $\gamma$  son las deformaciones,  $\gamma_{tvp}$  es el umbral de deformaciones,  $r$ ,  $s$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , and  $D$  son parámetros de ajuste del modelo.

El modelo de arena tiene seis parámetros; la deformación de umbral volumétrica cíclica  $\gamma_{tv}$  y los parámetros de ajuste de la curva  $v$ ,  $p$ ,  $f$ ,  $F$  y  $k$ . La ecuación que describe el modelo en arenas es:

$$ru = \frac{p * f * F * N^k (\gamma - \gamma_{tvp})^s}{1 + f * F * N^k (\gamma - \gamma_{tvp})} \quad (1.17)$$

Los parámetros del modelo de presión de agua para arenas o arcillas deben ser idealmente seleccionados en función de los resultados de las pruebas cíclicas no drenadas y específicas del sitio.

## 1.4.6. Análisis de respuesta dinámica.

### 1.4.6.1. Efecto de sitio

Los análisis de respuesta del sitio predicen el efecto de un sismo que se propaga a través de un suelo hasta la superficie. La alteración de la onda sísmica durante o después de un terremoto producto de condiciones geológicas, geográficas y topográficas es conocida y estudiada como efecto local de sitio. Esta alteración consiste en la amplificación de la señal y la prolongación de su duración en conjunto de la variación de su frecuencia. Las diversas capas de suelo tienen un rol fundamental ya que actúan como filtros de frecuencias, que modifica la energía que se trasmite a la estructura. (Trigo, 2007)

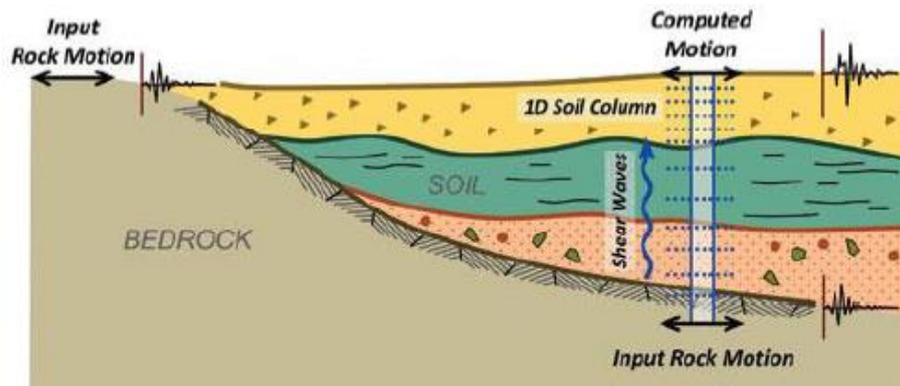


Figura 1. 3 Representación del efecto de sitio por Nikolaou et al. [Carlton, 2014]

El sismo de entrada (input motion) en la base del estrato de suelo debe ser un registro de sismo interno en la roca, los sismos internos y de afloramiento rocoso no son los mismos debido a los efectos del sitio y las condiciones de contorno. Esto es porque los movimientos de superficie libres son el doble de la amplitud de la onda sísmica incidente consecuencia de la reflexión total, mientras que los sismos internos son la suma de las ondas de propagación ascendentes y descendentes de las capas superpuestas (Kramer 1996). Existen muchos registros de sismos en afloramientos rocosos, más que en la roca interna; por tal razón, se usa el proceso de deconvolución. (Figura 1.3) Durante el proceso de deconvolución el sismo en afloramiento rocoso se especifica en la roca interna (halfspace), y este usa como sismo en la base del estrato de suelo para el análisis de respuesta de sitio.

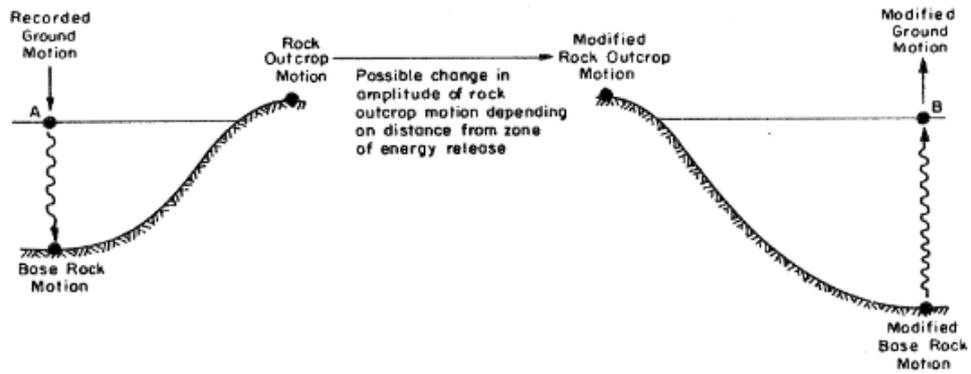


Figura 1. 4 Representación de la deconvolución en el suelo. [Schnabel et al., 1972]

#### 1.4.6.2. Función de transferencia

Las soluciones en el dominio de la frecuencia son modificadas por una función de transferencia que ayuda a determinar si el movimiento de entrada es amplificado o deamplificado. La transformada de Fourier ( $FFT$ ) de la señal input se multiplica por esta función de transferencia y se calcula su inversa ( $FFT^{-1}$ ) para obtener la respuesta en la superficie del suelo. En otras palabras, es un filtro que actúa sobre la señal de entrada que reduce la energía de alta frecuencia. La ecuación del factor de amplificación es:

$$|H(w)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\left(\frac{wH}{v_s}\right) + \left(\frac{\xi wH}{v_s}\right)^2}} \quad (1.18)$$

La función de transferencia desde la superficie a la roca basal  $H(w)_{AB}$  se define como:

$$H(w)_{AB} = \frac{1}{\cos\left(\frac{wH}{v_s}\right)} \quad (1.19)$$

Para que ocurra el máximo valor de la función de transferencia,  $\frac{wH}{v_s}$  debe ser igual a  $\frac{\pi}{2}$  por lo tanto,

$$\frac{2\pi}{T} = \frac{\pi v_s}{2H} \quad (1.20)$$

$$T_0 = \frac{4H}{v_s} \quad (1.21)$$

Donde  $T_0$  es el periodo fundamental del sitio.

En la práctica se usan métodos de análisis en 1D dividida en dos categorías, en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo. (Hashash et al., 2010). Deepsoil es un software libre que permite ejecutar los tres métodos, el método lineal, lineal equivalente en el dominio de la frecuencia incluyendo convolución y deconvolución, y el no lineal en el dominio del tiempo. Los resultados de un análisis de respuesta dinámica se presentan en términos de un espectro de respuesta en superficie al 5% de amortiguamiento, así como perfiles de PGA, deformaciones ( $\gamma$ ), la razón del esfuerzo de corte con el esfuerzo efectivo (CSRmax) y la presión de poros ( $ru$ ). Este espectro se compara con el espectro ingresado de roca que se obtiene de la selección registros y es útil para evaluar la intensidad esperada y el periodo predominante del sitio.

#### 1.4.6.3. Análisis lineal equivalente

El análisis lineal equivalente es esencialmente un análisis lineal de las propiedades del suelo seleccionadas que dependen del nivel de deformaciones (Seed and Idriss, 1969). Es resuelto en el dominio de la frecuencia, ya que permite reducir los requisitos de tiempo computacional del análisis de respuesta del sitio. SHAKE (Schnabel et al., 1972) y SHAKE 91 (Idriss & Sun, 1992) son las implementaciones de software más utilizadas del método lineal equivalente unidimensional.

El método consiste en realizar el análisis de propagación de ondas de corte y seleccionar las propiedades de rigidez y amortiguamiento para los niveles de deformación inducidos en cada capa. Al terminar el análisis, las propiedades de rigidez y amortiguamiento se actualizan en función de la deformación efectiva; se recomienda que las propiedades deban ser calculadas para una deformación de 0,65 la deformación máxima en cada capa (Seed and Idriss, 1969).

$$\gamma_{eff} = R_{\gamma} \gamma_{max} \quad (1.22)$$

$$R_{\gamma} = \frac{M-1}{10} \quad (1.23)$$

Donde  $R_\gamma$  es la depende de la magnitud del sismo  $M$ . (Idriss y Sun, 1992)

Finalmente vuelve a estimar las propiedades dinámicas realizando un mínimo de dos y máximo ocho iteraciones.

#### **1.4.6.4. Análisis No lineal**

Existen sismos de alta intensidad en roca que pueden generar altos niveles de esfuerzo en las capas del suelo, lo que amerita un estudio de análisis no lineal porque las curvas dinámicas de un estudio lineal equivalente no pueden representar con precisión el comportamiento del suelo durante un evento sísmico. Es necesario considerar la no linealidad de los suelos en los análisis de respuesta de sitio, debido a que los suelos tienen un comportamiento no lineal a baja deformaciones.

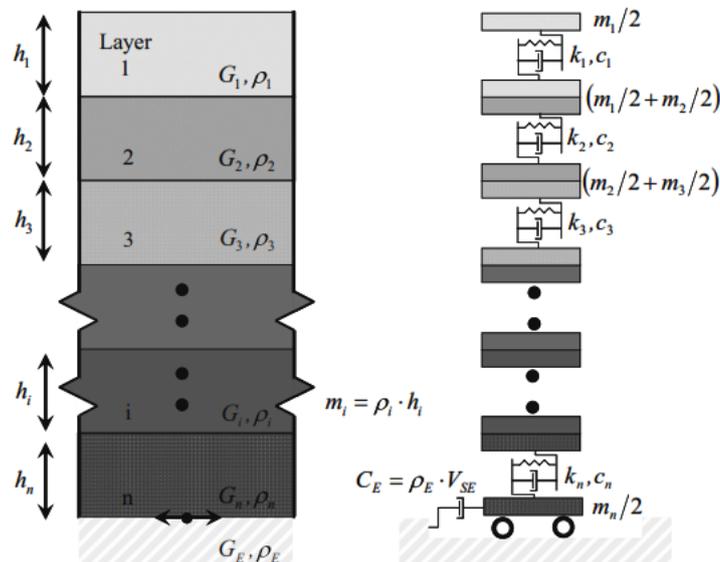
Este tipo de análisis obtiene las soluciones en el dominio del tiempo, se usa para representar la variación del módulo de corte y el amortiguamiento en cada incremento de tiempo durante un sismo. Algunos de los softwares utilizados son CHARSOIL desarrollado por Ramberg and Osgood (1943), DESRA-2C desarrollado por Lee and Finn (1978) y MASH creado por Martin and Seed (1978). El proceso de cálculo para un modelo no lineal es el siguiente (Kramer 1996):

1. La serie de tiempo de aceleración de entrada se usa para determinar el movimiento en la base del perfil del suelo.
2. Luego, el movimiento en cada límite de capa se calcula moviéndose desde la parte inferior del perfil del suelo hasta la parte superior.
3. Usando los desplazamientos en cada límite de capa, se calcula la deformación de corte en cada capa.
4. El esfuerzo cortante para cada capa se estima a partir de la deformación de corte utilizando un modelo constitutivo específico. Este proceso se repite para el próximo paso de tiempo hasta el final de la sacudida.

La columna de suelo es discretizada en capas individuales que se representan por su correspondiente masa, amortiguamiento y rigidez, utilizando el concepto MDOF (Figura 1.4). El modelo no lineal resuelve la ecuación de movimiento:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g \quad (1.21)$$

Donde M es la matriz de masa, C es la matriz de amortiguamiento, K es la matriz de rigidez. Esta ecuación se resuelve usando el método de integración Newmark (1959).



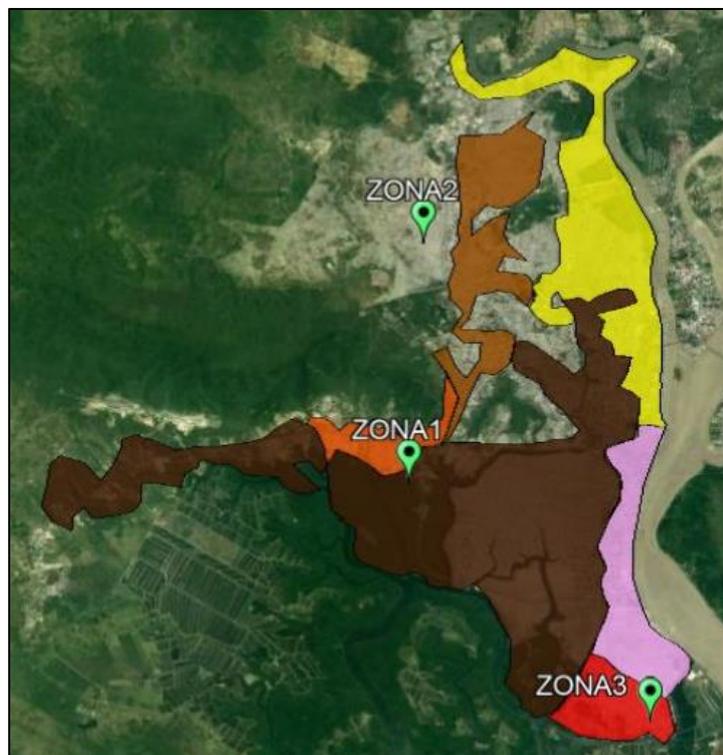
**Figura 1. 5 Representación unidimensional del modelo de suelo discretizado para la propagación de onda. [Hashash, Phillips, & Groholski, 2010]**

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Selección de registros en roca

Inicialmente se seleccionará el espectro en roca que permitirá identificar los posibles sismos que pueden ocurrir en esta zona. Se obtuvieron tres puntos de la ciudad de Guayaquil, en donde se realizó un estudio PSHA y se graficaron en el mapa geológico. (Figura 2.1)

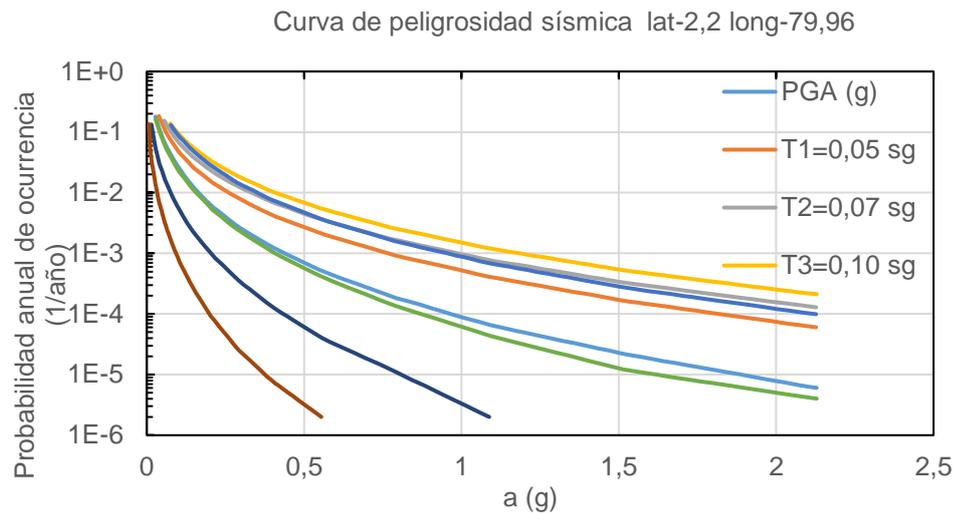


**Figura 2. 1 Ubicación de las tres zonas del PSHA en el mapa geológico. [Google earth]**

En base a la ubicación de los tres puntos obtenidos (Tabla 2.1), se eligió la Zona 1, por encontrarse en la zona de la perforación ERU donde se hará el análisis de respuesta dinámica. Los datos de la curva de peligro uniforme en roca pertenecen a un estudio de microzonificación sísmica realizado por Beauval et al. 2018 (Comunicación personal Roberto Luque, Julio 2018), que se muestra en la Figura 2.1. Esta curva de peligrosidad sísmica proporciona las aceleraciones espectrales para diferentes periodos.

**Tabla 2. 1 Ubicación de las tres zonas del estudio PSHA. [Beauval et al, 2018]**

Nombre	Latitud	Longitud
Zona 1	-2,2	-79,96
Zona 2	-2,12	-79,96
Zona 3	-2,28	-79,88



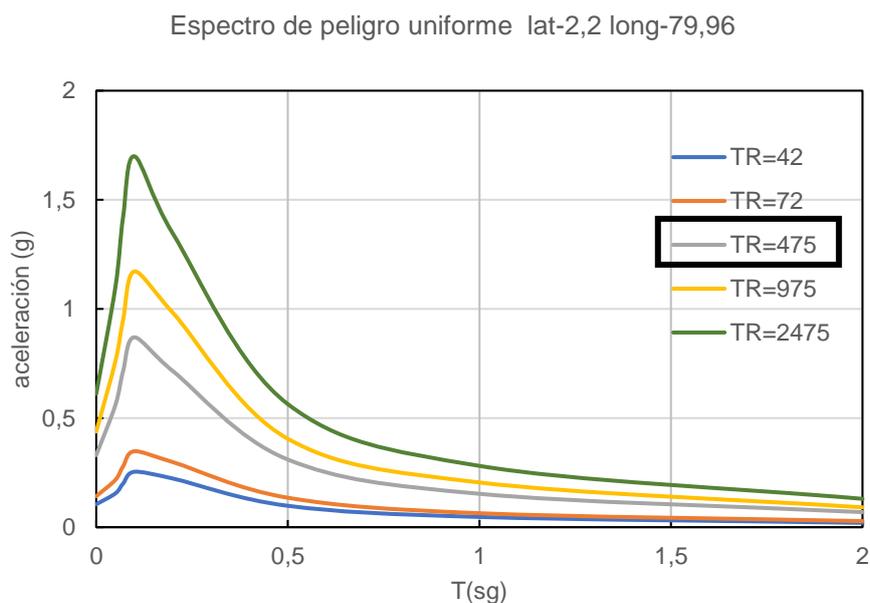
**Figura 2. 2 Curva de peligrosidad sísmica de la zona 1 [Beauval et al., 2018]**

Según la filosofía de diseño sísmico; descrito en la norma NEC-15 y en las normas internacionales como el EUROCÓDIGO 8, el cálculo y diseño estructural se hace para un sismo de diseño que tiene la probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años, equivalente a un periodo de retorno de 475 años (Tabla 2.2). Esta filosofía permite el cálculo y diseño de estructuras en el estado límite último.

**Tabla 2. 2 Filosofía de diseño sísmico. [Newmark- Hall]**

Probabilidad de excedencia (%) Durante 50 años	Numero de eventos Durante 50 años	Probabilidad anual de ocurrencia $v(M)$ (1/años)	Periodo de retorno $Tr$ (años)	Características de la frecuencia del sismo
2	0,0202027	0,0004040	2475	Muy raro
10	0,105360	0,002107	475	Raro
39	0.500050	0,010001	100	Ocasional
63	0.002393	0,020047	50	Ocasional
87	0.002480	0,040049	25	Frecuente

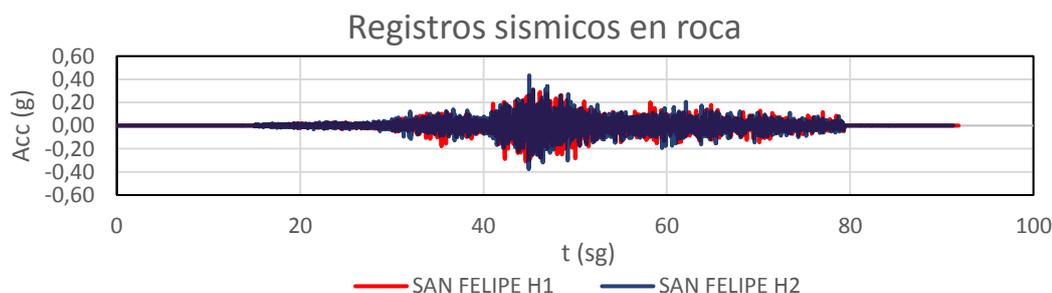
A partir de la curva de peligrosidad de sísmica se obtuvieron los espectros de peligro uniforme para cada periodo de retorno definido en la filosofía de diseño. Inicialmente se selecciona la probabilidad anual de excedencia de interés y se obtienen las aceleraciones espectrales para los diferentes periodos (Figura 2.3). Sin embargo, el espectro usado para la selección de registros será en el periodo de retorno de 475 años y su valor de PGA es de 0,33 g.



**Figura 2. 3 Espectros de peligro uniforme del PSHA. [Beauval et al., 2018]**

## 2.2. Selección de registros de aceleración

Uno de los objetivos para determinar la respuesta dinámica de los suelos es seleccionar los registros sísmicos (Figura 2.4) que sean característicos del mismo tipo de falla geológica, y que sean compatibles con el espectro de respuesta uniforme en roca denominado Target.



**Figura 2. 4 Ejemplo de registro sísmico en roca. [Base de datos]**

Debido a que Ecuador no tiene una base de datos amplia de registros sísmicos en afloramiento rocoso, se tomará sismos representativos de nuestra zona de subducción, como los sismos ocurridos en Perú, México, Chile y Japón.

Se consideraron 110 registros sísmicos; escalados con un factor dependiente del PGA de cada registro, en la Figura (2.5) se muestran las curvas en escala logarítmica para los ejes X-Y, y la curva Target con línea continua de color negro. El procedimiento para el escalado se explica a continuación.

### Procedimiento

1. Sacar el pga promedio de las dos direcciones, NS y EW de cada sismo de la base de datos
2. Usar el factor  $\frac{PGA_{roca}}{pga_{prom}}$  en cada registro sísmico
3. Sacar el espectro promedio (Geomean) de las dos direcciones del registro NS y EW. Se usó el método de integración Newmark.
4. Calcular una desviación estándar para cada espectro en función del target para conocer cuáles son los registros que tienen menos diferencia con el registro objetivo. La desviación estándar elegida debe ser los valores cercanos a 0.

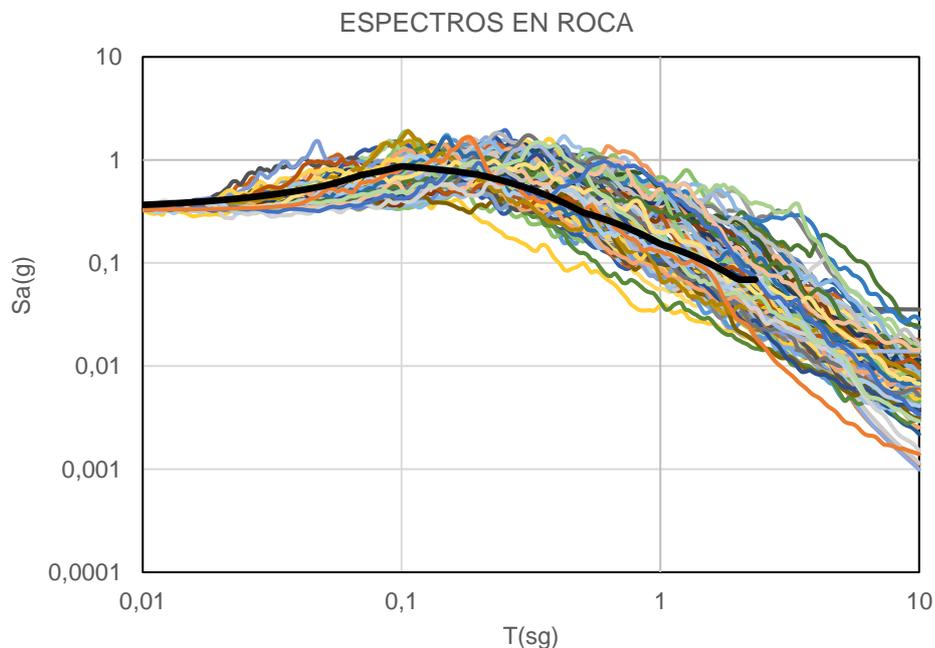


Figura 2. 5 Espectros en roca escalados y curva UHS. [Elaboración propia]

Según la norma NEC-15, se debe escoger un mínimo de 7 registros sísmicos. Para este caso se escogieron los siguientes:

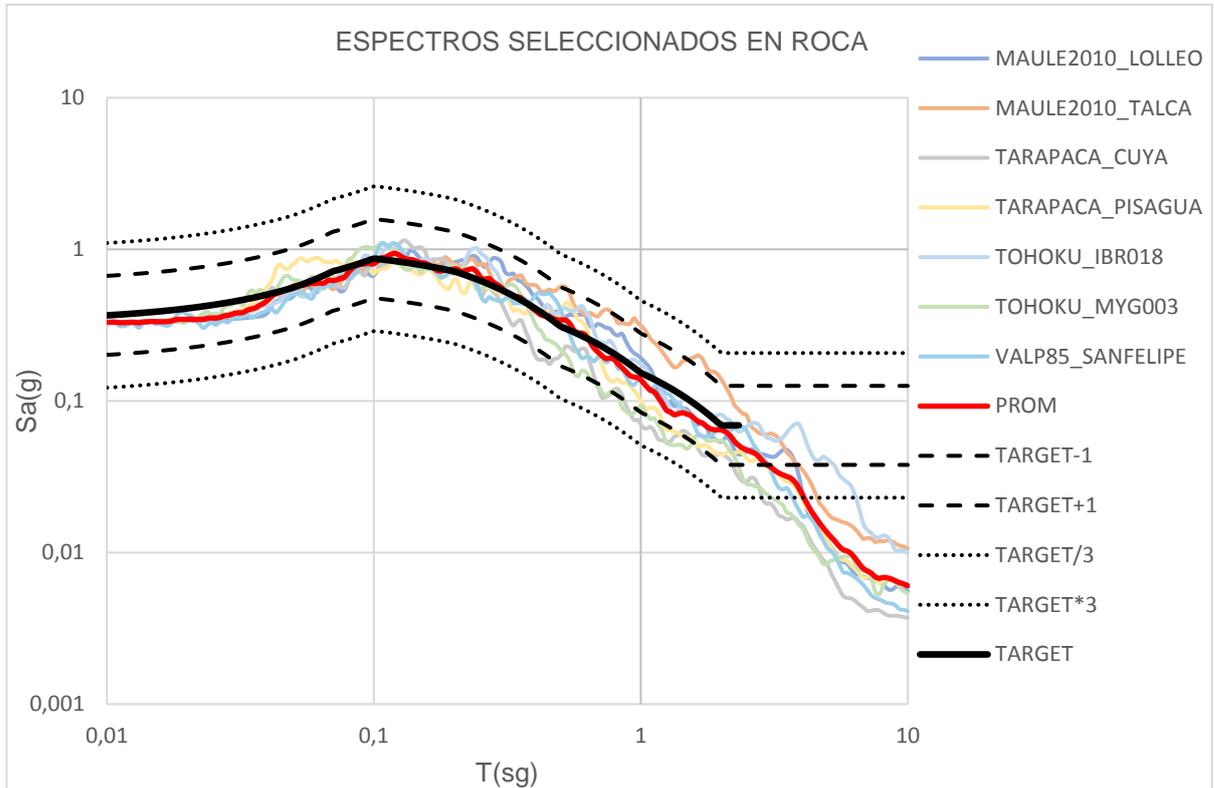
- Maule 2010\_Lolleo
- Maule 2010\_Talca
- Tarapacá\_Cuya
- Tarapacá\_Pisagua
- Tohoku\_IBR018
- Tohoku\_MYG003
- Valp85\_San Felipe

A continuación, se muestran las características de los registros, tanto su distancia y magnitud. Estas características deben aproximarse a los que se obtienen a partir de la disgregación de la curva de peligrosidad sísmica (Figura A4).

**Tabla 2. 3 Propiedades de los sismos de subducción. [Base de datos]**

Estación	Mw	Lat.	Long	Dist Epi (km)	Dist Hypo (km)	Vs30 (m/s)	Tipo de suelo
Lolleo	8.8	-3.620	-71.600	275	276	N/A	N/A
Talca	8.8	-35.430	-71.630	113	117	648	Intercalación de grava, arena y arcilla rígida
Cuya	7.7	-19.156	-70.175	137	169	N/A	N/A
Pisagua SMA-1	7.7	-19.590	-70.206	118	153	N/A	N/A
IBRH18	9	36.363	140.62	277	278	559	N/A
MYG003	9	38.735	141.311	152	155	904	N/A
San Felipe	8	-33.135	-71.871	115	122	N/A	Aluvial

La siguiente gráfica muestra los 7 registros seleccionados de colores y el promedio de color rojo. Los datos del UHS se muestran en la línea negra continua, con un aproximado a la curva promedio. Los 7 registros oscilan dentro del rango de aceptación Target  $\pm 1$  de la curva de peligro uniforme.



**Figura 2. 6 Comparación del promedio de los espectros seleccionados (línea roja) con la curva target. [Elaboración propia]**

De manera simultánea, se realiza un escalado para 21 registros sísmicos de Ecuador, pertenecientes al sismo de Mw 7.8 ocurrido el 16 de abril en Pedernales (Figura 2.7). Esta información se la obtuvo del Instituto Geofísico EPN. La selección de estos registros fueron 2 (Figura 2.8) y sus propiedades se describen en la siguiente tabla.

**Tabla 2. 4Propiedades de los sismos de subducción pertenecientes al sismo Pedernales [IG EPN].**

Estación	Mw	Lat.	Long	Dist Epi (km)
AGYE	7.8	-2,054	-79,952	270
AMNT	7.8	-0.941	-80.735	171

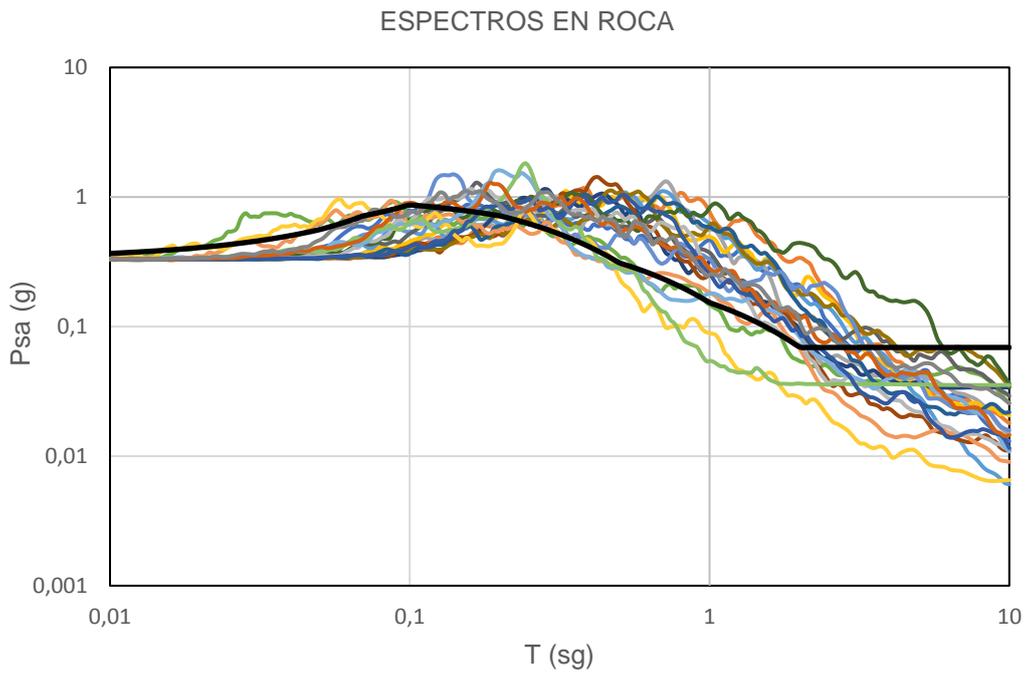


Figura 2. 7 Espectros en roca del sismo de Pedernales y curva UHS. [Elaboración propia]

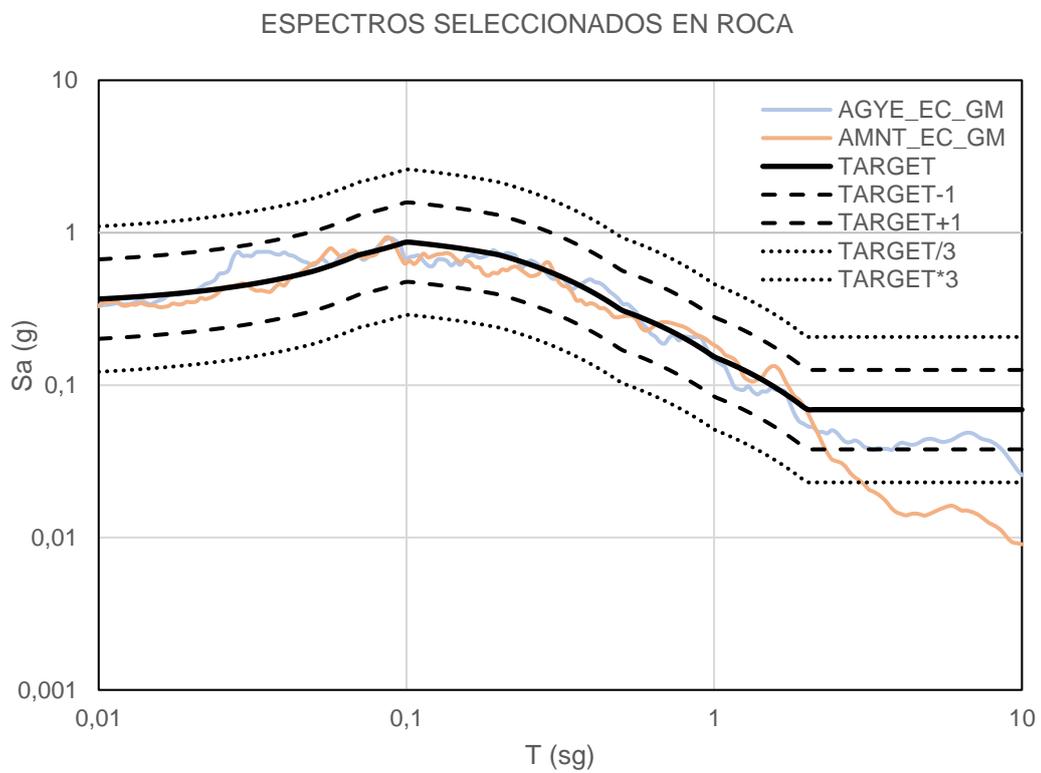


Figura 2. 8 Espectros seleccionados con la curva target. [Elaboración propia]

### 2.3. Identificación de perfil de suelo

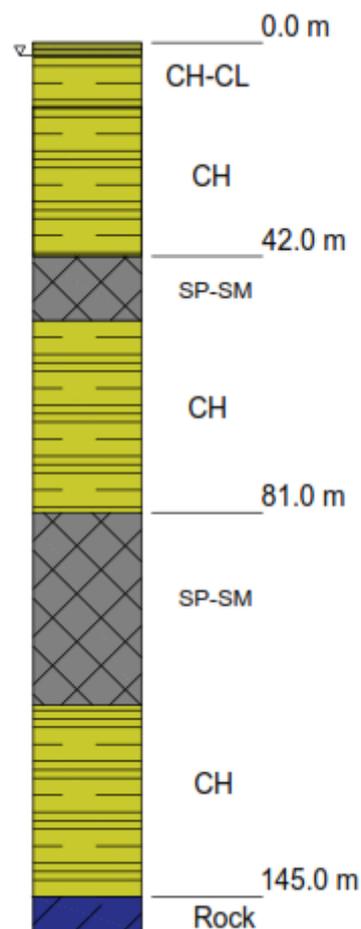
Para caracterizar este suelo se tomó como referencia una perforación realizada por Vera Grunauer et al., como representación de las zonas D1 a D3 por los grandes depósitos de arcilla, denominado ERU. La principal característica de los suelos deltaicos estuarinos es la composición de material arcilloso con intercalaciones de capas limosas y detritos de concha (Figura 2.9).

A continuación, se describe la secuencia estratigráfica en base a dos perforaciones realizadas en el 2004 y 2013 respectivamente.

- Primer estrato es una capa de suelo arcilloso (CH-MH) de 4.80 metros de espesor; que precede de una capa de relleno de 1,50 metros de espesor. El estrato de arcilla, en todo su espesor, tiene las siguientes propiedades:
  - Los resultados de tasa de consolidación (OCR) para toda la capa de arcilla son variables, se encuentran entre 2 y 6.
  - El nivel freático se ubica a los 2,50 m de profundidad.
  - Densidad  $\approx 15$  kN/m<sup>3</sup>
  - Contenido de finos (CF) del orden 97%
  - Índice plástico (IP) del orden de 54%
  - Humedad natural ( $\omega$ ) del orden de 63%
  - Número de golpes promedio (N60) es menor a 2
  
- Una capa de arcilla (CH-CL) de 6,00 m de espesor, empieza con una consistencia firme y termina en consistencia blanda.
  - Densidad  $\approx 16$  kN/m<sup>3</sup>
  - Contenido de finos (CF) del orden 78 a 90%
  - Índice plástico (IP) del orden de 20 a 33%
  - Humedad natural ( $\omega$ ) del orden de 70%
  - Número de golpes promedio (N60) entre 2 y 8.

- Seguido de una capa limo arcillosa (MH) de 3,75 metros de espesor de color gris verdosa. Ésta posee intercalaciones de arcilla. Su consistencia varía de muy blanda a firme.
  - Densidad  $\approx 15 \text{ kN/m}^3$
  - Contenido de finos (CF) del orden 87 a 97%
  - Índice plástico (IP) del orden de 38%
  - Humedad natural ( $\omega$ ) del orden de 86%
  - Número de golpes promedio (N60) menor a 18.
  
- A partir de esta capa, se encuentran espesores grandes de suelo, debido a que poseen las mismas características. Esta capa es de arcilla CH con intercalaciones de arena a mayores profundidades. Su consistencia varía de firme a densa desde los 17 a 42 metros de profundidad.
  - Densidad  $\approx 16 \text{ kN/m}^3$
  - Contenido de finos (CF) del orden 64 a 98%
  - Índice plástico (IP) del orden de 34%
  - Humedad natural ( $\omega$ ) del orden de 72%
  - Número de golpes promedio (N60) menor a 23.
  
- Luego, se encuentra una capa arenosa (SM) muy densa, desde los 42 a los 50 m de profundidad.
  - Densidad  $\approx 18 \text{ kN/m}^3$
  - Contenido de finos (CF) del orden 6 a 10%
  - Humedad natural ( $\omega$ ) del orden de 40%
  - Número de golpes promedio (N60) de 62.
  
- Continúa una capa de arcilla (CH) de 27 m de espesor.
  - Densidad  $\approx 16 \text{ kN/m}^3$
  - Contenido de finos (CF) del orden 99%
  - Índice plástico (IP) del orden de 35 y 43%
  - Humedad natural ( $\omega$ ) del orden de 72%

- Capa de arena (SW-SM) hasta los 105 m de profundidad.
  - Densidad  $\approx 20 \text{ kN/m}^3$
  - Contenido de finos (CF) del orden 5 y 8%
  - Humedad natural ( $\omega$ ) del orden de 21%
- Y finalmente, una capa de arcilla (CH) de 40 m de espesor con intercalaciones de limo (MH) al final de la capa.
  - Densidad  $\approx 16 \text{ kN/m}^3$
  - Contenido de finos (CF) del orden 88 al 97%
  - Índice plástico (IP) del orden de 37 y 44%
  - Humedad natural ( $\omega$ ) del orden de 72%



**Figura 2. 9 Perfil de suelo de la perforación ERU. [Elaboración propia]**

## 2.4. Perfil de velocidad de onda de corte

El siguiente perfil de velocidad de onda pertenece a la estación ERU, se obtuvo a partir de ensayos geofísicos SASW y MASW+REMI en el año 2005 y 2014 respectivamente (Figura 2.10). Así mismo, se calcularon correlaciones y ensayos geofísicos de otras perforaciones con la misma condición de suelo para calibrar el perfil. (Vera Grunauer et al., 2014)

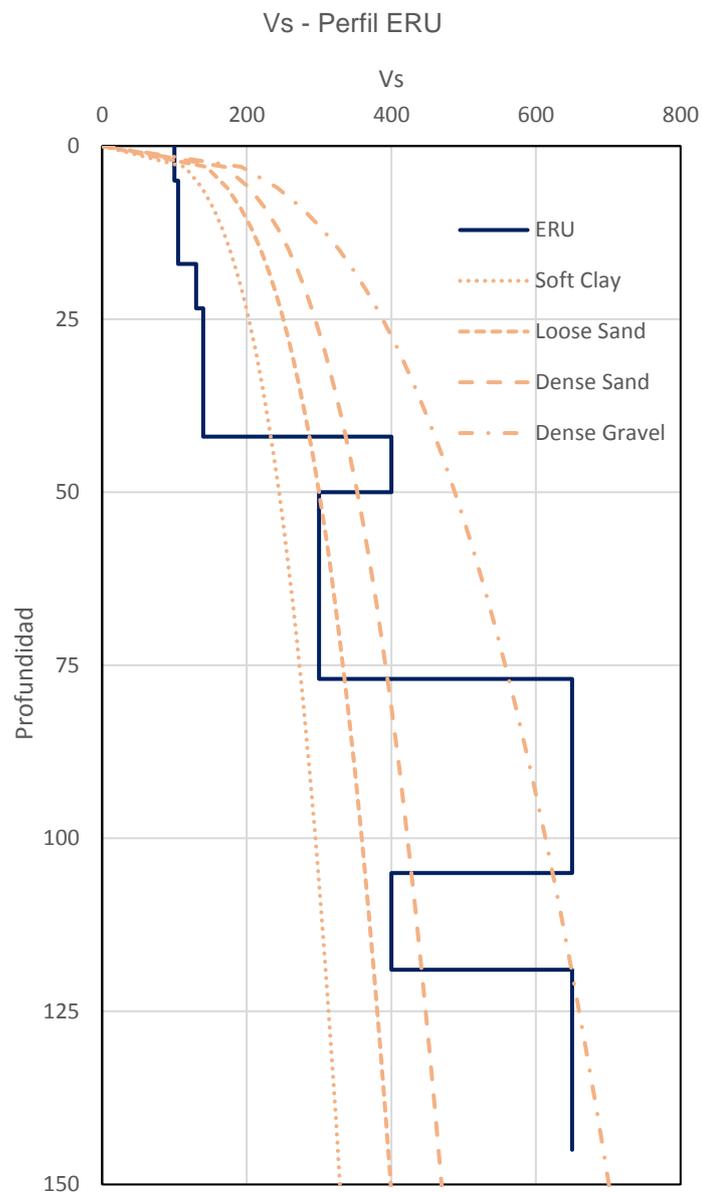


Figura 2. 10 Perfil de velocidad para la perforación ERU. [Vera, 2014]

## 2.5. Selección de las curvas dinámicas

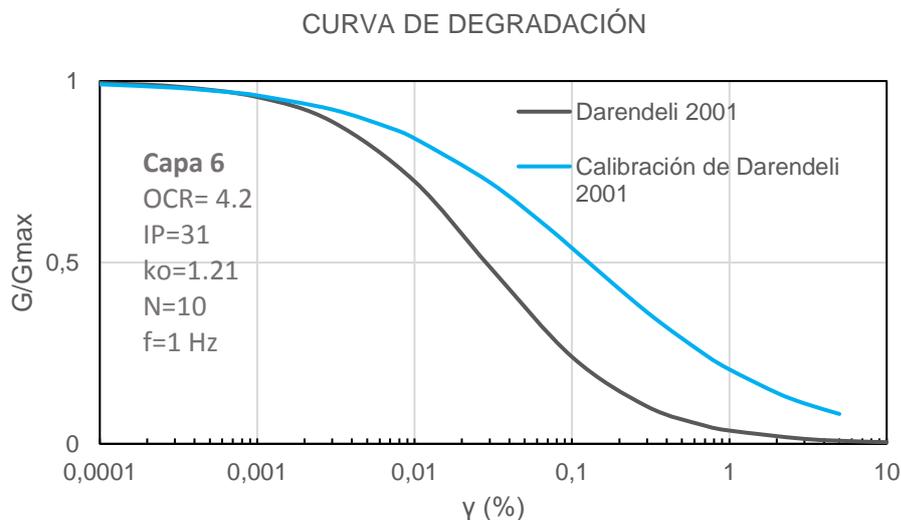
La selección de las curvas de rigidez y amortiguamiento se hicieron en base a los resultados de datos experimentales del sitio GYE-BSF (Tabla 2.5) realizado por Vera. Los ensayos que se realizaron fueron, el triaxial cíclico y el ensayo de corte directo cíclico.

**Tabla 2. 5 Ubicación de la perforación BSF. [Vera, 2005]**

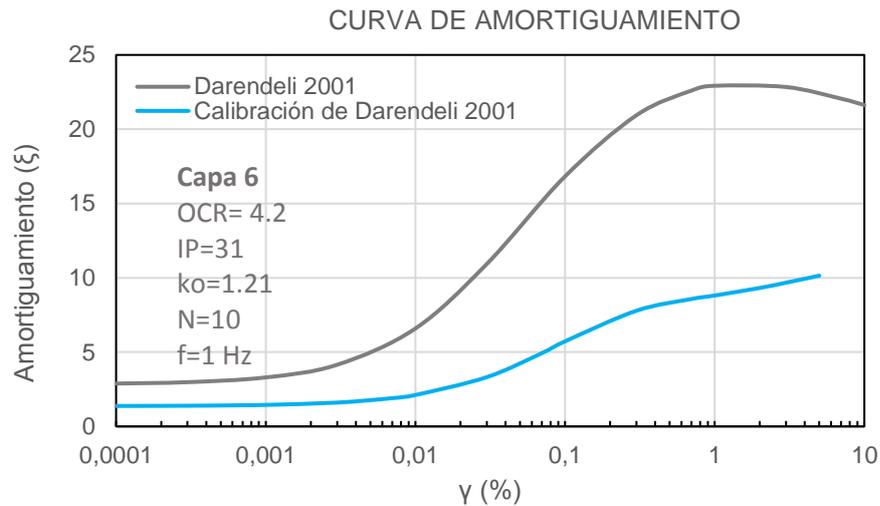
Perforación	Coordenadas	
Cancha de béisbol de la Kennedy	9759427.03	6222226.38

Para todas las capas de suelo arcillosas CH hasta los 140 m de profundidad se usó el criterio de las curvas de Darendeli (2001), y para las capas arenosas SP-SM se usó el criterio de Menq (2003).

Los suelos de BSF tienen la característica de cementación por pirita (Vera Grunauer et al.), típico de los suelos deltaicos estuarinos; por lo tanto, los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio se usaron para calibrar el modelo original de Darendeli (2001), para tomar en consideración la propiedad de cementación. Las Figuras 2.11 y 2.12 muestran el efecto de la cementación sobre las curvas dinámicas de Darendeli en la capa 6 del estrato de suelo. Los valores de  $G/G_{max}$  tienden a incrementar y el amortiguamiento a disminuir por efectos de la cementación y el índice de plasticidad. Dobry and Vucetic (1987).



**Figura 2. 11 Efecto de la cementación sobre la curva de Darendeli 2001. [Elaboración propia]**



**Figura 2. 12 Efecto de la cementación sobre la curva de amortiguamiento de Darendeli 2001. [Elaboración propia]**

Los parámetros que se usaron en Darendeli son:

- Relación de sobreconsolidación (OCR): La relación de sobreconsolidación se obtuvo a partir de CPT y perforaciones.
- Índice de plasticidad (IP): Se obtuvo a partir de los ensayos de laboratorio definido en la sección anterior. Para las arenas no se considera índice de plasticidad y para las arcillas los valores varían de 30 a 60%.
- Coeficiente de presión lateral ( $k_0$ ): Aunque  $k_0$  no es un parámetro real en las curvas de Darendeli, es necesario para estimar la presión de confinamiento media, que es el promedio de los esfuerzos principales (tensiones verticales y horizontales). Se calculó con una correlación en función del OCR y  $k_0$  NC.
- Numero de ciclos (N): Para todas las curvas el valor es de 10, que es determinado por el modelo.
- Frecuencia de carga (frq): Para todas las curvas el valor es de 1Hz, que es el valor determinado por el modelo.

En los suelos arenosos se usó el modelo de Menq 2003, a continuación, se muestran las curvas de dos capas de suelo del perfil ERU.

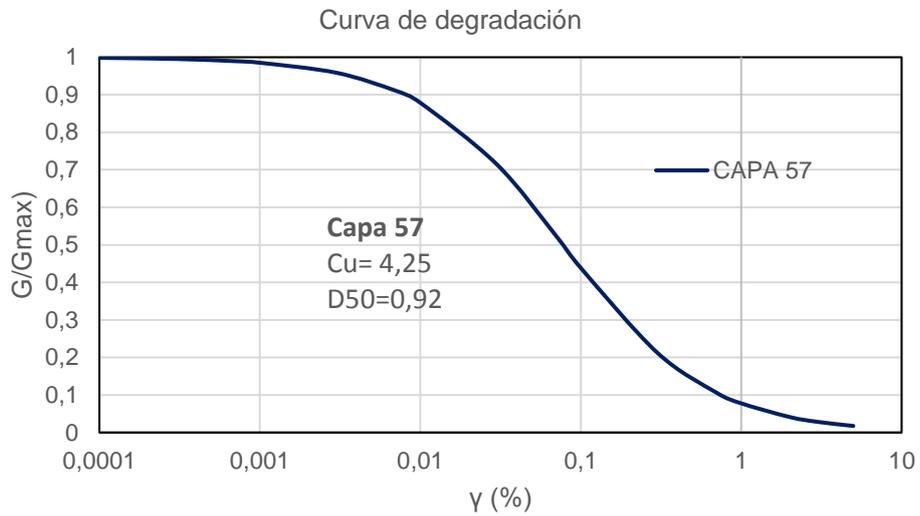


Figura 2. 13 Curvas de degradación del modelo Menq 2003 [Elaboración Propia]

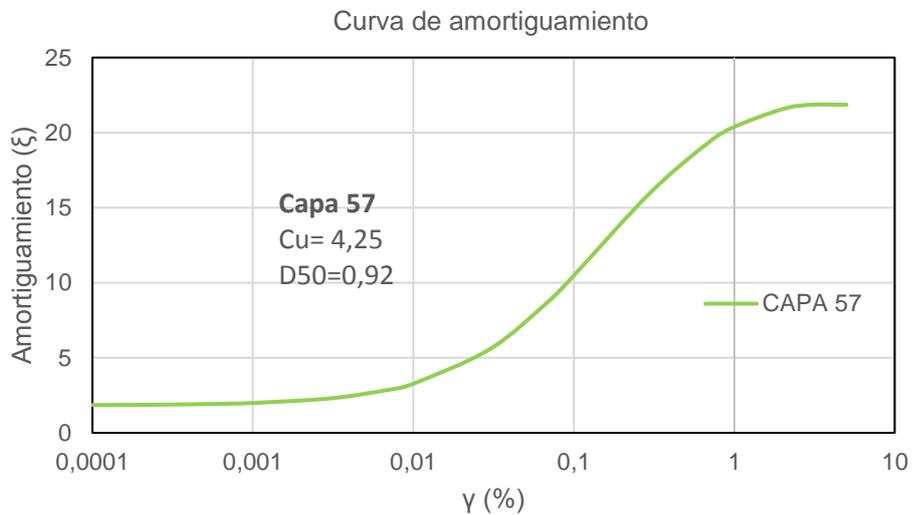


Figura 2. 14 Curvas de amortiguamiento del Modelo Menq 2003 [Elaboración Propia]

El criterio usado en el método no lineal se explica en el capítulo 1, sección 4.2. El modelo se denomina MKZ con el análisis de disipación de presión de poros. Las curvas de degradación y amortiguamiento son las mismas que se especifican en el análisis lineal equivalente, pero modificadas con los parámetros definidos. Carlson (2014) provee ecuaciones para estimar los parámetros dependientes del OCR y el índice de plasticidad IP que se usan en esta tesis (Figura A3).

## 2.6. Análisis de respuesta de sitio

Esta sección comprende dos métodos de análisis, el análisis lineal equivalente y el no lineal, usando el programa Deepsoil v7. Antes de evaluar el suelo e ingresar los sismos de entrada, se deben hacer dos tipos de ajustes; la discretización de los estratos de suelo y la corrección de los registros sísmicos.

Inicialmente, se toma el perfil ERU y se discretiza cada estrato de suelo en función de la longitud de onda  $\lambda$ , con la ecuación:

$$f_{max} = \frac{V_s}{4H} \quad (2.1)$$

Donde  $f_{max}$  es la máxima frecuencia que la capa de suelo puede propagar,  $H$  es el espesor de la capa y  $V_s$  es la velocidad de onda.

Para cada capa, la máxima frecuencia es generalmente un mínimo de 30Hz, y mientras mayor sea la frecuencia, el espesor disminuye siendo capaz de captar la longitud de onda que pasa por el estrato. La frecuencia elegida es de 50 Hz con el concepto de que mientras mayor sea, las capas de suelo serán capaces de captar la oscilación de los periodos de los sismos. Por tal razón esta discretización es importante sobre todo para el análisis no lineal (Figura 2.15).

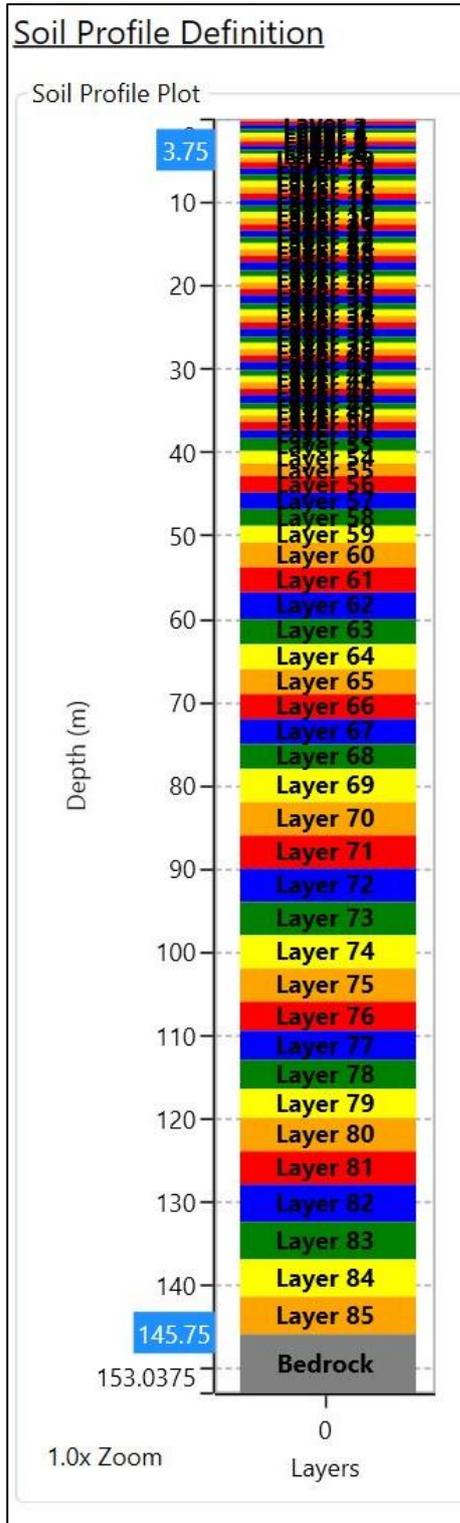
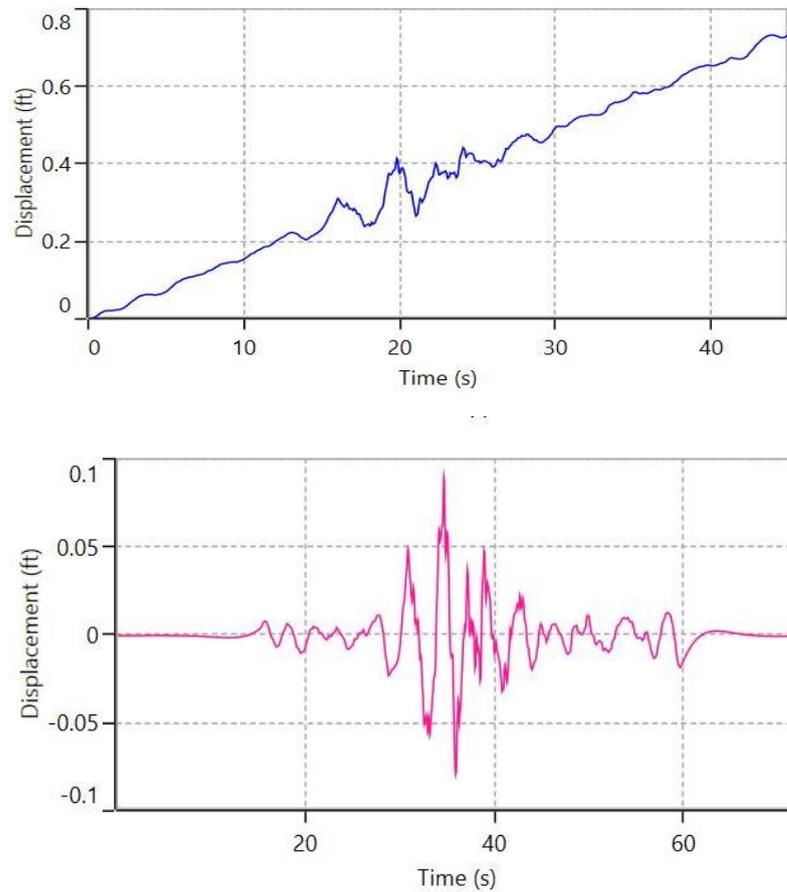


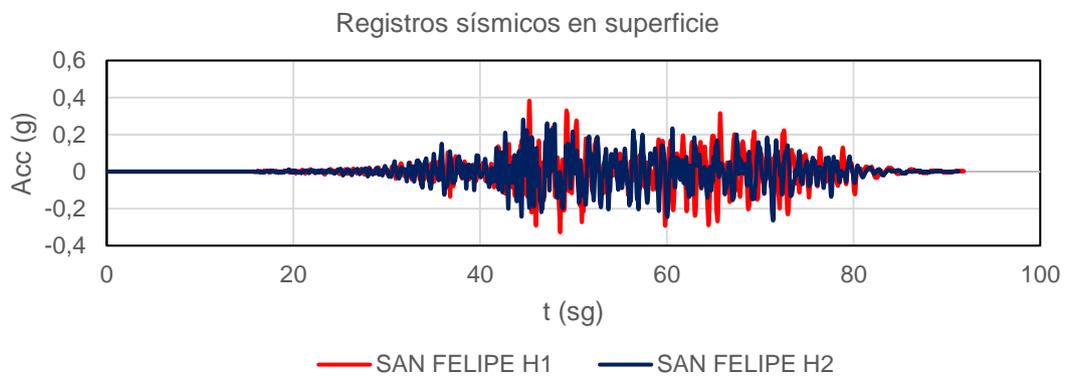
Figura 2. 15 Discretización del perfil de suelo ERU. [Deepsoil v7]

El segundo ajuste se debe realizar a los registros sísmicos en roca. Esta corrección se hace por efecto de los sensores de los acelerogramas debido al desplazamiento de la línea base. Este efecto se ve significativamente en el registro de desplazamiento (Figura 2.16). Se corrigieron los 7 registros elegidos (input motions) por la línea base; tanto en la dirección NS como EW del registro.



**Figura 2. 16 Ejemplo de corrección por línea base del registro sísmico Tarapacá-Pisagua H1. [Deepsoil v7]**

Los resultados del análisis de respuesta dinámica se muestran a partir de un registro en la superficie. (Figura 2.17) Una vez que se obtuvo el registro, se calculó el espectro de diseño en superficie con el método de integración Newmark, luego se promedió los espectros en las dos direcciones de cada registro y se calculó la media geométrica, que representa a todos los sismos en superficie. El mismo procedimiento se realizó para los parámetros PGA, deformación, CSR y ru que se describe en capítulo 3.



**Figura 2. 17 Ejemplo de registros sísmicos en superficie obtenidos del análisis de respuesta dinámica. [Deepsoil v7]**

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS OBTENIDOS

Los siete registros seleccionados y las curvas dinámicas se usaron como input en el programa Deepsoil v7. Los registros sísmicos seleccionados de Pedernales no se usaron a pesar de que muestren valores cercanos al espectro de peligrosidad uniforme (UHS). Para que estos tengan influencia debe existir una base de datos robusta de sismos de subducción y de gran confiabilidad.

Una vez que Deepsoil mostró los resultados, se procesó la información en un código Matlab. La Figura 3.1 muestra el espectro de los 7 registros de entrada (input motions), la media geométrica de los registros (Geomean) y el espectro de peligro uniforme en roca que parte del estudio probabilístico con un periodo de retorno de 475 años.

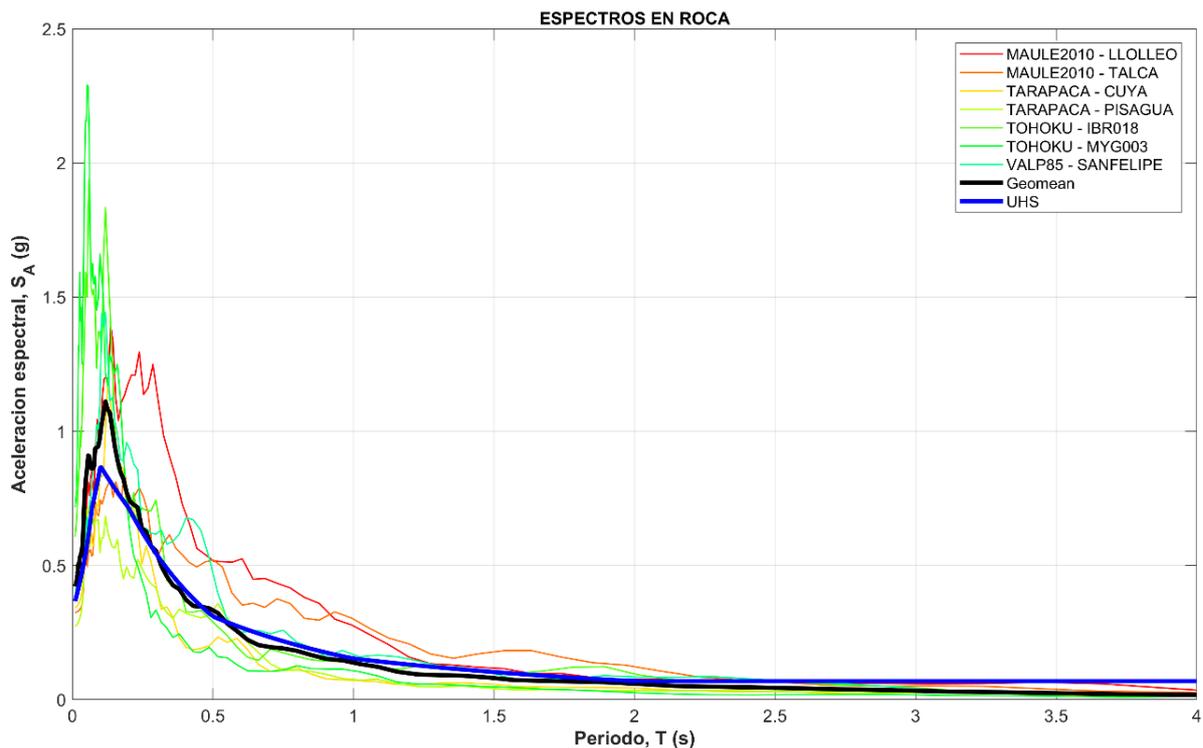
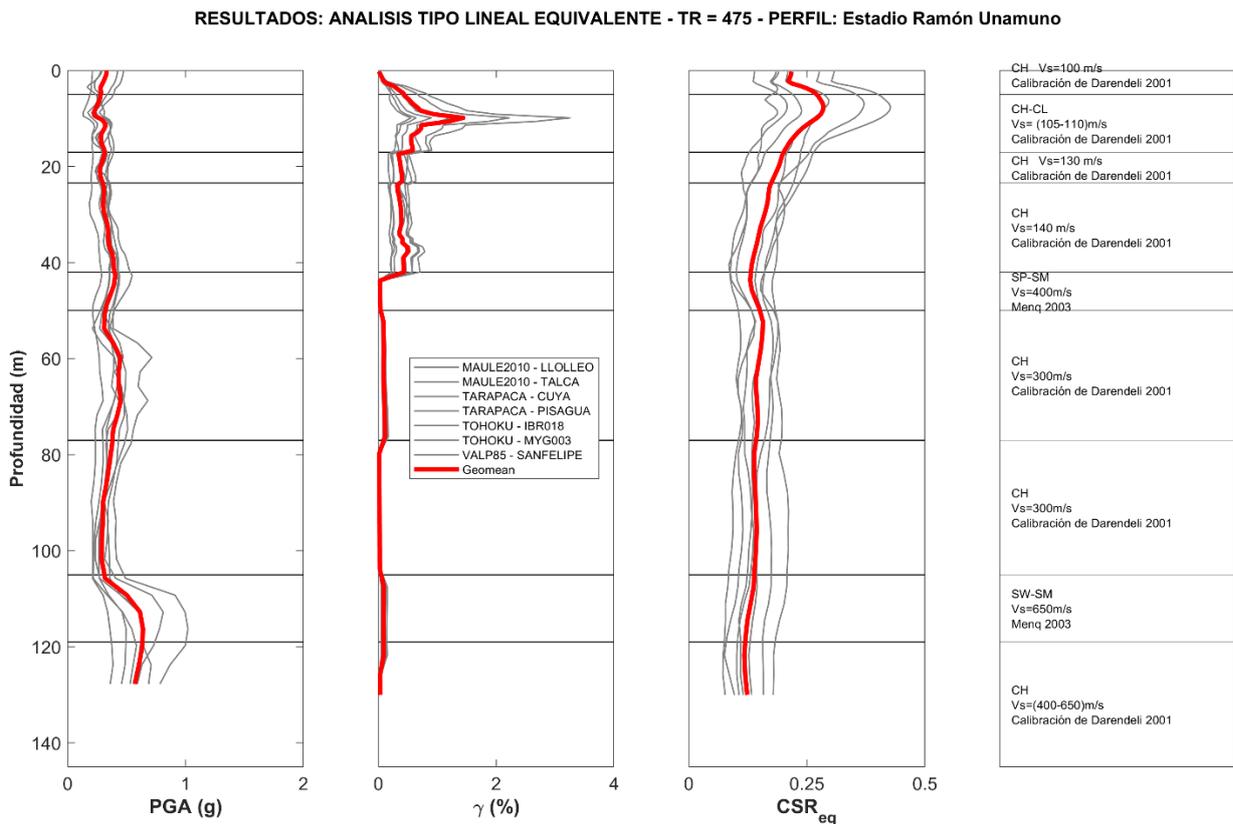


Figura 3. 1 Espectros en roca (línea de colores), espectro medio de todos los registros seleccionados (geomean) y, espectro de roca UHS (línea azul). [Elaboración propia]

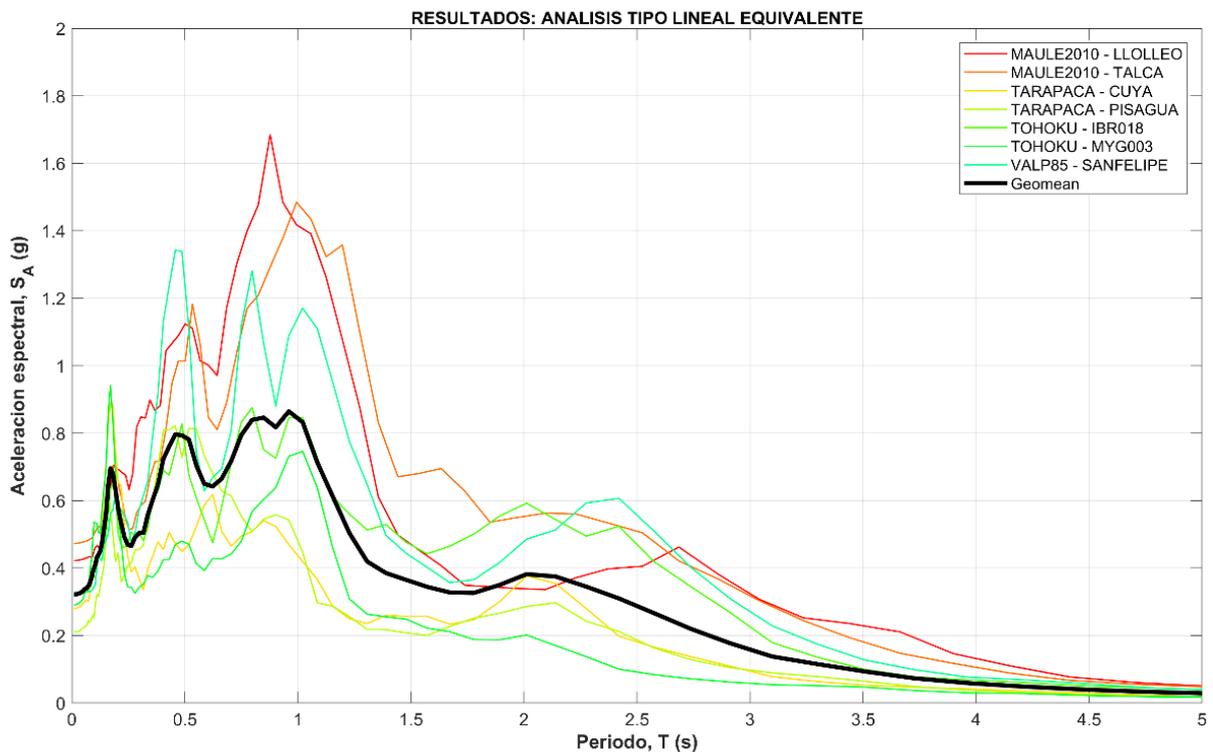
### 3.1 Análisis Lineal Equivalente (EQL)

Los parámetros obtenidos del análisis lineal equivalente del perfil ERU se encuentra en la Figura 3.2. El parámetro PGA nos indica como varía la aceleración máxima en cada estrato de suelo para cada registro sísmico, los valores se pronunciaron en el estrato de arcilla CH de los 45 a 80 m de profundidad con 0.5g y en la arena a los 100 m con un máximo de 0.8g. El parámetro de deformación indica que el estrato de arcilla aproximadamente a los 15 m de profundidad sufre las mayores deformaciones con un promedio de 1.8%. El coeficiente de esfuerzo máximo cíclico (CSReq) es un parámetro de análisis dado en Deepsoil v7 que se usa para evaluar una posible falla súbita de un suelo cohesivo y la licuefacción en las arenas debido a su pérdida de resistencia al corte, el valor promedio es mayor al 25% en los primeros metros de profundidad y empieza a disminuir a mayores profundidades.



**Figura 3. 2 Resultados del análisis EQL para el perfil ERU. [Elaboración Propia]**

Los espectros de respuesta en la superficie en comparación con los espectros de respuesta de entrada son útiles para evaluar la intensidad esperada en el sitio y el período predominante del sitio. El periodo predominante del perfil ERU es de 2.34 sg, y según el espectro en roca la pseudo aceleración es de casi 0.05 g mientras que en el espectro de superficie es amplificado a un valor de aproximadamente de 0.40 g. El máximo valor de  $S_a$  es de 0,8g en un periodo de aproximadamente de 1sg. Figura 3.3



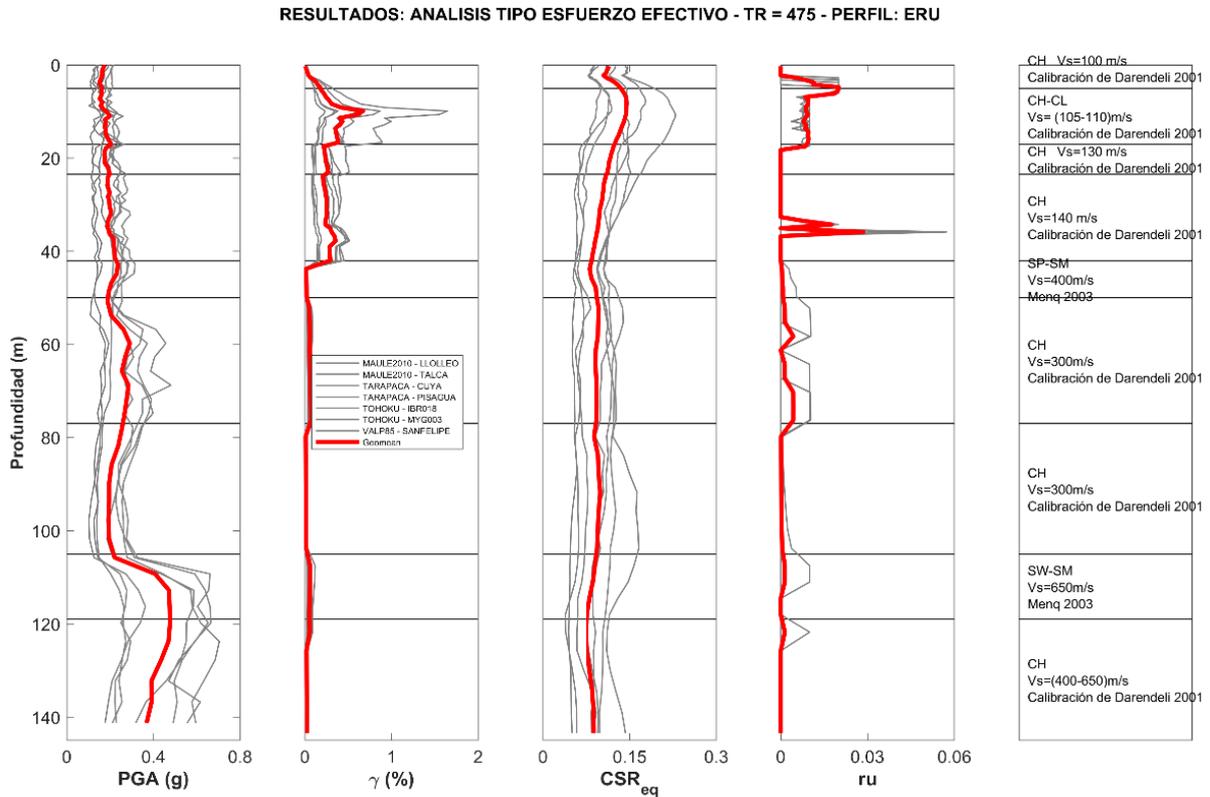
**Figura 3. 3 Espectro en superficie (líneas de colores) y Espectro elástico medio (Geomean) del perfil ERU con el método EQL. [Elaboración propia]**

### 3.2 Análisis No lineal (NL)

El parámetro PGA se pronunció en las mismas capas de suelo que en análisis lineal equivalente, sus valores dieron aproximadamente 0.35g en la capa CH desde los 45 a 80 m de profundidad y, 0.45g en la arena a los 100 m.

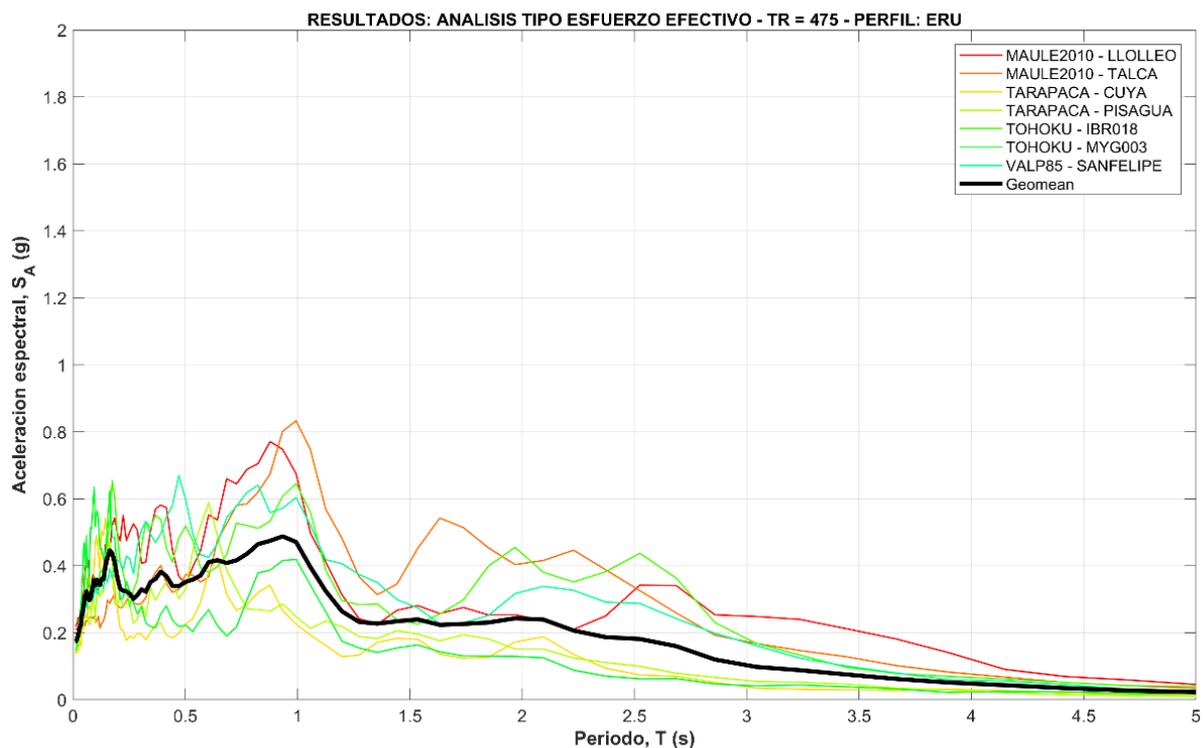
El parámetro de deformación indicó que el estrato de arcilla a los 15 m de profundidad aproximadamente sufre las mayores deformaciones con un promedio de 0.8%. El coeficiente de esfuerzo máximo cíclico (CSReq) tuvo un valor promedio de 15% en los primeros metros de profundidad y empezó a disminuir a mayores profundidades. El parámetro  $ru$  es la generación de presión de poros que

permite el análisis no lineal en deepsoil y son bastante bajos, la presión de poros máxima considerada es del 95% y se generó un valor máximo del 3% en la capa de arcilla a los 30m de profundidad. Figura 3.4



**Figura 3. 4 Resultados del análisis NL del perfil ERU. [Elaboración propia]**

En el espectro de respuesta del análisis no lineal se obtuvo la pseudo aceleración en el periodo predominante del perfil ERU que es de 2.34 (sg), a un valor aproximado de 0.2 g, dándonos una diferencia mínima con respecto al espectro en roca donde la pseudo aceleración es de casi 0.05 (g) Figura 3.5. El máximo valor de Sa fue de 0.5g en el periodo de 1sg aproximadamente.

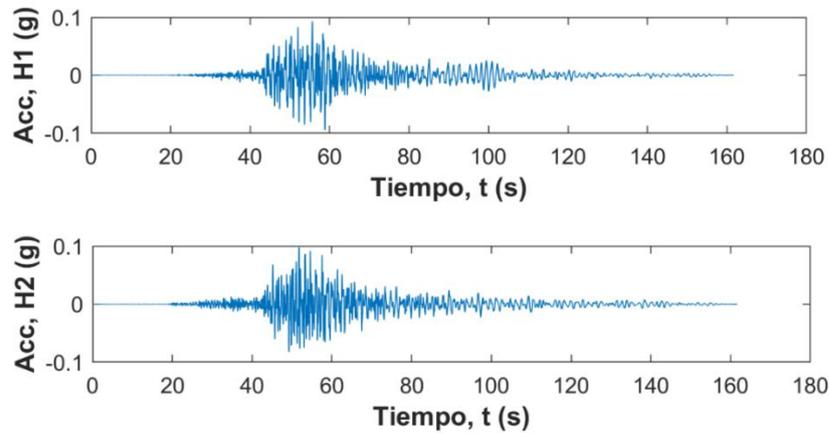


**Figura 3. 5 Espectro en superficie (líneas de colores) y Espectro elástico medio (Geomean) del perfil ERU con el método NL. [Elaboración propia]**

### 3.3 Análisis de resultados

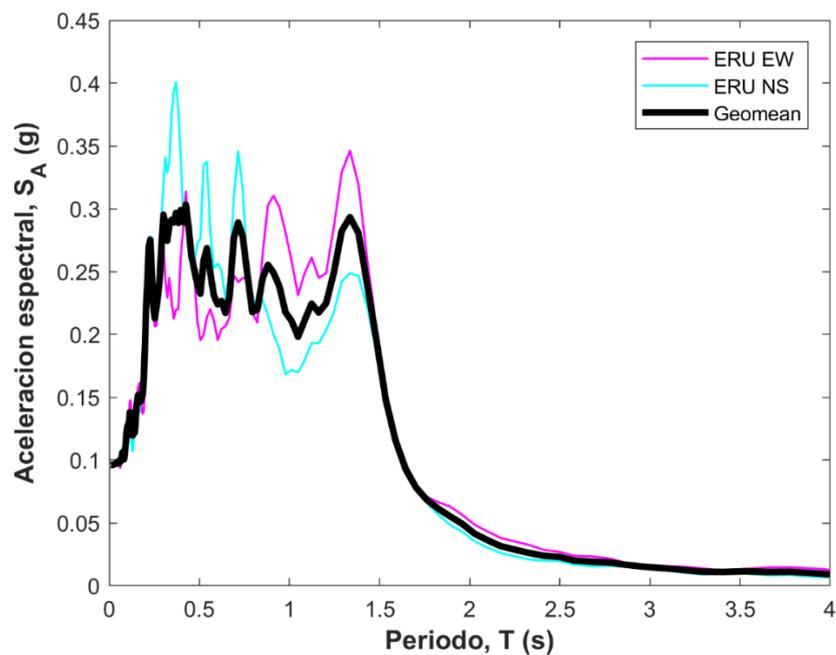
Las mesetas generadas en los periodos cortos representan la pseudo aceleración en los diferentes periodos que toman las capas de suelo del estrato. El espectro de diseño en superficie muestra la demanda máxima que tendrá una estructura en su respectivo periodo. Si se toma la ecuación  $T=0.1N$ ; donde N es el número de pisos, como una aproximación para determinar el periodo de una estructura, una estructura de periodo  $T=1$ sg, sufrirá la mayor amplificación según las Figuras 3.3 y 3.5. Por lo tanto, los edificios de aproximadamente 5 a 10 pisos son los que estarán expuestos a grandes aceleraciones. En cambio, las estructuras con periodos de 2 a 2.5sg sufrirán el efecto de resonancia que sucede cuando el periodo del suelo llega a ser la misma que el periodo natural de vibración de la estructura. Estos periodos también sufrirán amplificación no significativa, con valores de pseudo aceleración entre 0.2 a 0.4 g, según el método. El peak no se ubica en el periodo 2,33sg debido a que éste el periodo que mueve mayor masa, mientras que el modo que produce las mayores aceleraciones y desplazamientos será el  $T=1$ sg.

Una vez que se obtuvieron los resultados, se realizó una comparación con un registro sísmico medido en el mismo lugar ERU para el sismo de pedernales que se dio en el 2016. Las siguientes figuras muestran el registro en ambas direcciones.



**Figura 3. 6 Registros sísmicos en la dirección NS y WE del sismo de Pedernales en el 2016. [Elaboración propia]**

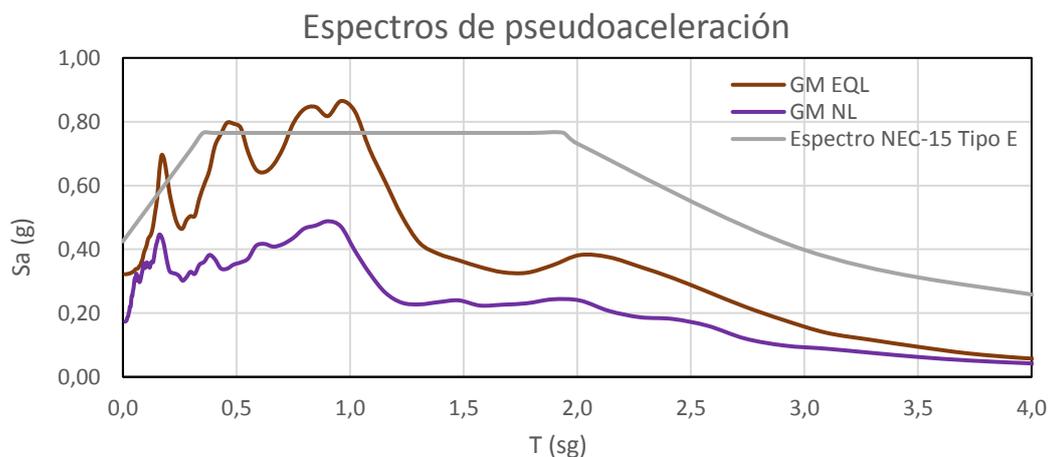
Se calculó los espectros con el método de integración Newmark para cada dirección del registro, luego se promedió y se obtuvo la curva (línea negra) de la Figura 3.8. Para el periodo predominante del suelo; de 2.34sg, su valor de pseudo aceleración es menor de 0.05 g y el valor máximo que toma la pseudo aceleración es de 0.3 g para un periodo de 0.45 sg.



**Figura 3. 7 Espectro en superficie del registro medido en ERU para el sismo de Pedernales. [Elaboración propia]**

La Figura 3.8 muestra claramente que tiene la misma tendencia que ambos métodos en periodos cortos, aproximadamente 1.5sg. Mas sin embargo los valores de pseudo aceleración son menores, el valor máximo es 0.3g.

El espectro de diseño para suelos tipo E, según la Norma NEC-15 se muestra en la Figura 3.8. Aunque este espectro no es comparable con los espectros de respuesta dinámica debido a que el suelo de estudio es blando, se lo hará porque comúnmente se usa este espectro para diseños sismo resistentes en las zonas de suelos blandos de Guayaquil. Al compararlo con los resultados de los análisis se diferencian en la forma en como varían los valores de Sa en los periodos cortos, además que la norma considera valores constantes hasta el periodo de 2sg. El valor de aceleración para los periodos de 1.5 a 2sg es de 0.77 g en la norma, mientras que en los análisis de respuesta van de 0.25g a 0.30g.

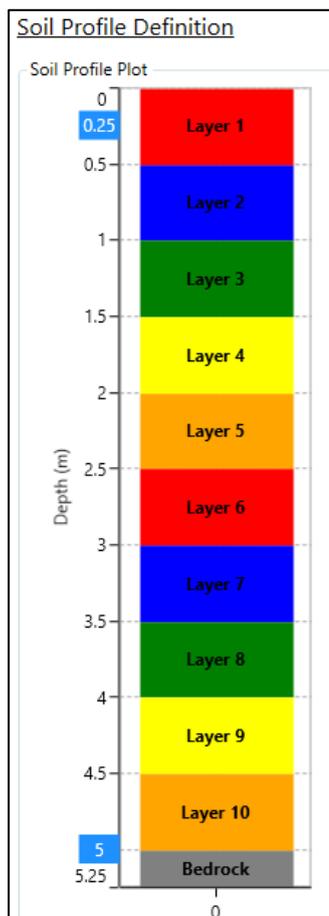


**Figura 3. 8 Análisis de resultados [Elaboración propia]**

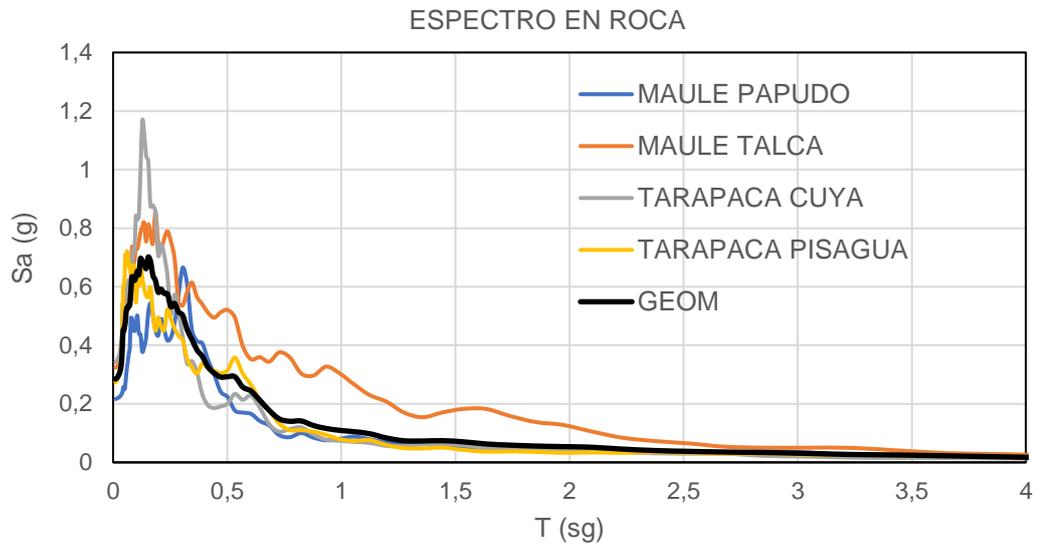
### 3.1 Análisis de sensibilidad

Las normas internacionales y la Norma Nec-15 indican que debe realizarse un análisis de sensibilidad de los datos. Este análisis ayudó a evaluar las curvas dinámicas del suelo y ver qué cambio se generó en el espectro de diseño al modificarlas por un factor. El proceso que se realizó fue el siguiente:

1. Se generó un perfil de suelo arbitrario con 10 capas de suelo sobre la roca. Figura 3.9
2. Se ingresaron las curvas dinámicas seleccionadas para el análisis del perfil ERU y se las multiplicó por un factor de 0.9.
3. Se utilizó cuatro registros en roca seleccionados de la base de datos y se calculó su espectro. Figura 3.10.
4. Se evaluó en perfil arbitrario en el software Deepsoil v7 y se calculó su espectro en superficie. Figuras 3.11 y 3.12

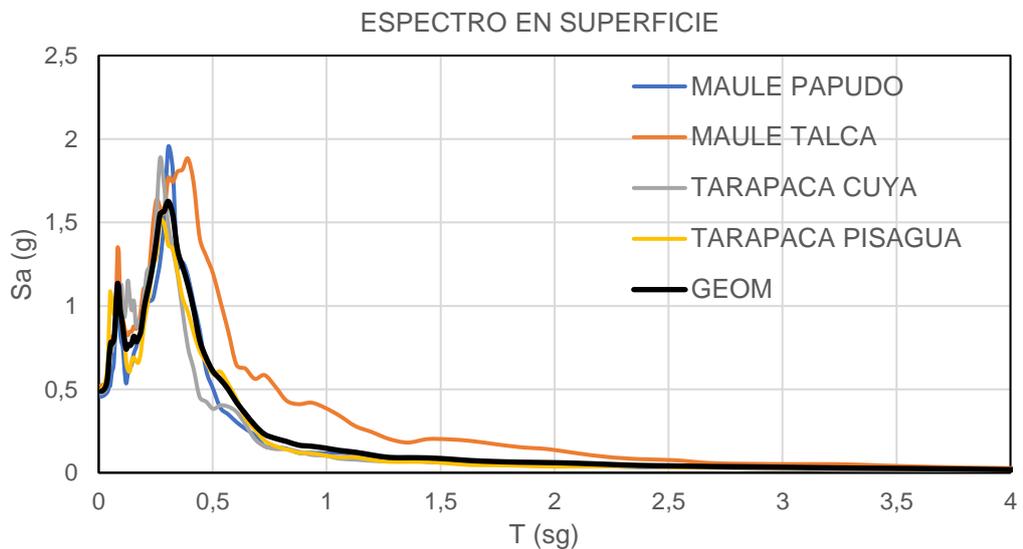


**Figura 3. 9 Perfil de suelo arbitrario con las mismas propiedades elegidas para el análisis de respuesta dinámica. [Elaboración propia]**



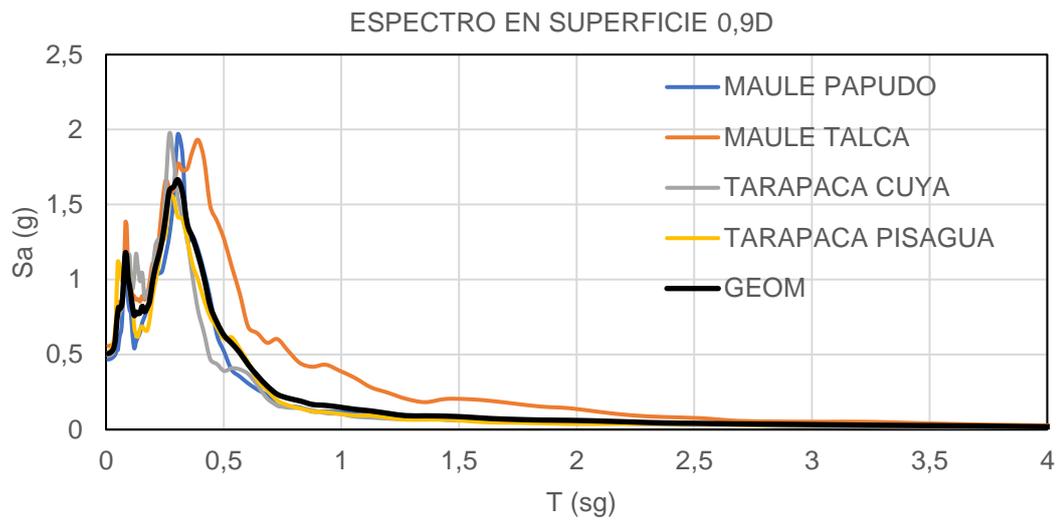
**Figura 3. 10 Espectro en roca del análisis de sensibilidad. [Elaboración propia]**

Los espectros en roca muestran una media con  $p_s$  máxima de 0,7g en el periodo de 0.2sg. Cuando se evaluó en la superficie con los valores de las curvas de amortiguamiento y rigidez multiplicadas con un factor de 0.9, se obtuvo un espectro medio donde el  $p_g$  se mueve a 0.5g y el máximo  $S_a$  es de 1.5g.



**Figura 3. 11 Espectro en superficie del análisis de sensibilidad para curvas modificadas con un factor de 0.9. [Elaboración propia]**

Cuando se modificó únicamente el amortiguamiento con un factor de 0.9; manteniendo los valores originales de la rigidez, la pseudo aceleración no se modificó significativamente, los valores cambiaron en el segundo decimal y el pga se mantuvo en 0.5g. En ambos espectros el comportamiento de la curva en los periodos cortos se mantiene.



**Figura 3. 12 Espectro en superficie del análisis de sensibilidad para curva de amortiguamiento modificada con un factor de 0.9. [Elaboración propia]**

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- El espectro elástico propuesto en el presente trabajo permite realizar la evaluación dinámica de cualquier edificación que se construya en los suelos blandos cercanos a la perforación ERU de la ciudad de Guayaquil.
- Se puede demostrar que los resultados de los espectros elásticos obtenidos en ambos análisis tienen el mismo comportamiento en períodos cortos.
- Al comparar el espectro en superficie generado del método lineal equivalente, se diferencia del método no lineal en un 50% porque la no linealidad permite disipar más energía.
- El registro sísmico medido en la superficie de la perforación ERU, ayuda a definir el espectro del método No Lineal como el aproximado para la respuesta dinámica del suelo. Figura A 5.
- El análisis de sensibilidad de la respuesta dinámica constata la confiabilidad de las curvas de amortiguamiento y degradación.
- El valor de peak en la roca dado a periodo  $T= 0.1$  s, es aproximadamente, mayor que en superficie. Esto es porque la rigidez está elevada para ese periodo de la capa de suelo.
- Las estructuras con periodo de 2 a 2,5sg construidos en la zona de análisis, sufrirán el efecto de resonancia.
- Se evidencia el efecto de sitio al demostrar que las aceleraciones espectrales no son comparables con el espectro de norma NEC-15 para suelo tipo E.

## 4.2. Recomendaciones

- Realizar estudios de amplificación sísmica a varios perfiles de suelos blandos, que predominan en la ciudad de Guayaquil, para comprobar la veracidad de los resultados del análisis.
- Realizar un análisis de sensibilidad a la discretización de las capas, velocidad de onda de corte y el periodo predominante como factores que modifican la respuesta dinámica del suelo.
- Revisar y comprobar la corrección de la línea base porque ésta puede alterar los periodos muy bajos y muy altos.
- Alejar el periodo de la estructura del periodo de suelo con algún método de disipación de energía como el péndulo de fricción.
- Modificar el periodo del suelo mejorando sus propiedades de resistencia. Es conveniente realizar jetgrouting, columnas de grava o mechas drenantes con precarga.
- Seleccionar registros sísmicos escalados a otros periodos y escoger los que tienen menos desviación estándar.
- Se recomienda suavizar el espectro elástico de respuesta de sitio, que permita definir mejor los valores máximos, teniendo en cuenta la forma en como varían las pseudo aceleraciones.
- La necesidad de realizar un análisis de respuesta dinámica de los suelos nos lleva a implementar y abrir campo a las siguientes áreas:
  - Estudios de laboratorio dinámicos a las muestras de suelo, creando una base de datos robusta para la caracterización de los suelos blandos en especial los deltaicos estuarinos. Esto permite perfeccionar las curvas dinámicas de los suelos.
  - Ensayos de refracción sísmica in situ que permite obtener la velocidad de ondas de corte.
  - Base de datos de espectros en superficie que nos permita definir criterios mínimos para una norma local.

# BIBLIOGRAFÍA

- Baker, J. W. (2013). *Introduction to probabilistic seismic hazard analysis*. White Paper Version 2.0.1.
- Carlton, B. (2014). *An Improved Description of the Seismic Response of Sites with High Plasticity Soils, Organic Clays, and Deep Soft Soil Deposits*. Ann Arbor: ProQuest LLC.
- Hashash, Y. M., Phillips, C., & Groholski, D. R. (2010). *RECENT ADVANCES IN NON-LINEAR SITE RESPONSE ANALYSIS*. San Diego.
- Hashash, Y., Musgrove, M., Harmon, J., Ilhan, O., Groholski, D., Phillips, C., & and Park, D. (2017). *DEEPSOIL 7.0, User Manual*.
- Menq, F.-Y., B.S., & M.S. (2003). *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*. Austin: The University of Texas at Austin.
- NEC-15, N. E. (2015). *Peligro Sísmico- Diseño sismo resistente*.
- Pinedo, F. K., Bañez, E. E., & Alarco, R. V. (2014). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESPUESTA SÍSMICA CON LA APLICACIÓN*. Arequipa: COLEIC.
- SALAS, T. A. (2005). *INFLUENCIA DE LA AMPLIFICACIÓN LOCAL DE LAS ONDAS SÍSMICAS Y LA INTERACCIÓN SUELO-FUNDACIÓN EN EL PUENTE MARGA-MARGA*. Santiago de Chile: UC.
- SATO, M., MINOWA, C., & KAGAWA, T. (n.d.). *SEISMIC RESPONSE OF LEVEL GROUND SUBJECTED TO EXTREME SHAKING*. Tennoudai Tsukuba Ibaraki: National Research Institute for Earth Science and Disaster.
- Vera, X., Kayen, R., Tandazo, E., Ramirez, J., & Vera, J. (2005). *“Investigación y estudio del comportamiento dinámico del subsuelo y microzonificación sísmica de la ciudad de Guayaquil*. Guayaquil.
- Vera, X., Quinde, P., Leonardo, M., & Mera., W. (2016). *Propuesta de actualización de la NEC-15 para el peligro sísmico probabilista en roca en el Ecuador*. Guayaquil: IIFIUC.

# APÉNDICE

Tabla A 1 Espectro de peligro uniforme de la Zona 1. [Beauval et al, 2018]

	Periodo de retorno de 475 años
T (sg)	Sa (g)
0	0.33
0.05	0.56
0.07	0.715
0.1	0.87
0.2	0.715
0.5	0.31
1	0.153
2	0.069

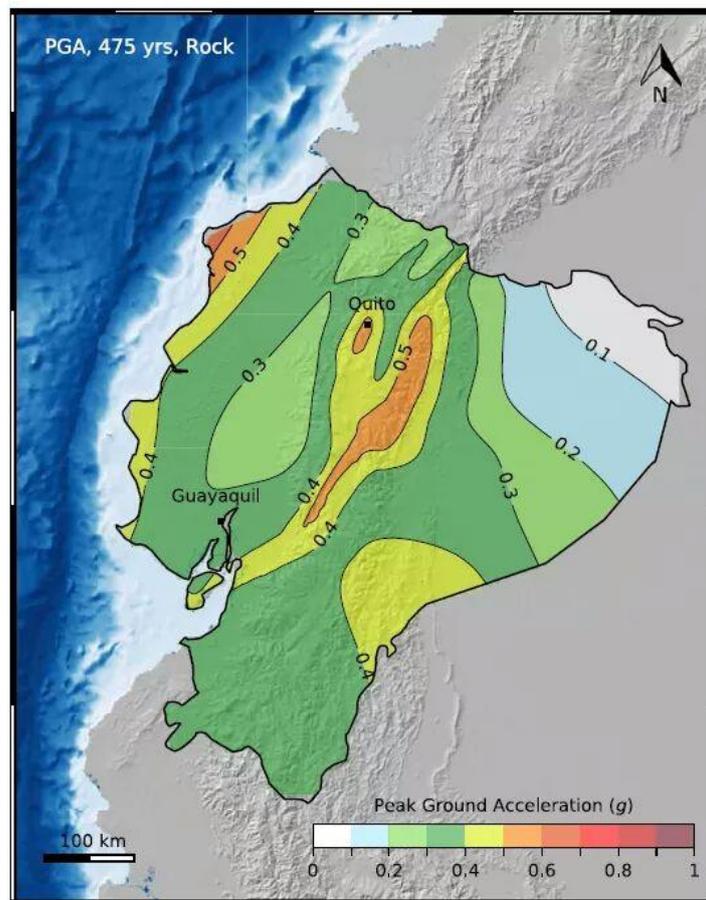


Figura A 1 Mapa de microzonificación sísmica. [Beauval et al., 2018]

Numero de capa	Nombre de capa	Espesor (m)	Unidad de peso (kN/m3)	Velocidad de onda de corte	Modelo	D min
1	CH	0.5	16.06	100	Discrete Points	1.8011933
2	CH	0.5	16.06	100	Discrete Points	1.8000161
3	CH	0.5	16.06	100	Discrete Points	1.7994481
4	CH	0.5	16.06	105	Discrete Points	1.7999476
5	CH	0.5	16.06	105	Discrete Points	1.7997824
6	CH	0.5	15.31	105	Discrete Points	1.3759737
7	CH	0.5	15.31	100	Discrete Points	1.3784268
8	CH	0.5	15.31	100	Discrete Points	1.3782147
9	CH	0.5	15.31	100	Discrete Points	1.3780184
10	CH	0.5	15.31	100	Discrete Points	1.3780347
11	MH	0.75	15.24	105	Discrete Points	1.3139731
12	MH	0.75	15.24	105	Discrete Points	1.3137125
13	CH	0.75	16.22	105	Discrete Points	1.2863925
14	CH	0.75	16.22	105	Discrete Points	1.2861183
15	CH	0.75	16.22	105	Discrete Points	1.2858678
16	CH	0.75	16.22	100	Discrete Points	1.2856377
17	CL	0.75	15.68	100	Discrete Points	1.17703
18	CL	0.75	15.68	105	Discrete Points	1.1770817
19	CH	0.75	15.15	105	Discrete Points	1.4224452
20	CH	0.75	15.15	105	Discrete Points	1.4223295
21	MH	0.75	14.86	105	Discrete Points	1.5049683
22	MH	0.75	14.86	110	Discrete Points	1.5048816
23	MH	0.75	14.86	110	Discrete Points	1.504799
24	MH	0.75	14.86	110	Discrete Points	1.5047201
25	MH	0.75	14.86	110	Discrete Points	1.5047992
26	CH	0.8	15.54	110	Discrete Points	1.4403053
27	CH	0.8	15.54	130	Discrete Points	1.4402119
28	CH	0.8	15.54	130	Discrete Points	1.4402998
29	CH	0.8	15.54	130	Discrete Points	1.4402128
30	CH	0.8	15.54	130	Discrete Points	1.4401298
31	CH	0.8	15.54	130	Discrete Points	1.4400503
32	CH	0.8	15.54	130	Discrete Points	1.440158
33	CH	0.8	15.54	130	Discrete Points	1.440083
34	CH	0.8	15.54	130	Discrete Points	1.4400109
35	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4399416
36	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.439875
37	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4398107
38	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4400401
39	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4399777
40	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4400225

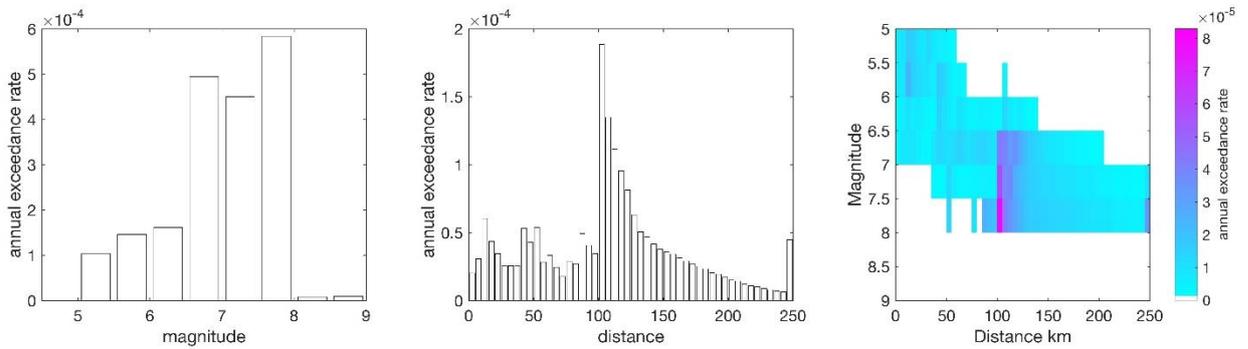
41	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.440073
42	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4400147
43	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4399582
44	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4399034
45	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4398503
46	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.43932
47	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4387005
48	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4385422
49	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4397615
50	CH	0.8	15.54	140	Discrete Points	1.4395039
51	CH	1	15.54	140	Discrete Points	1.292632
52	CH	1	15.54	140	Discrete Points	1.2926916
53	CH	1.5	15.54	140	Discrete Points	1.4395627
54	CH	1.5	15.54	140	Discrete Points	1.4394852
55	CH	1.5	15.54	140	Discrete Points	1.4394111
56	SP-SM	2	17.5	400	Discrete Points	1.7477877
57	SP-SM	2	17.5	400	Discrete Points	1.8493372
58	SP-SM	2	17.5	400	Discrete Points	1.9523028
59	SP-SM	2	17.5	400	Discrete Points	2.056674
60	CH	3	15.51	300	Discrete Points	1.457362
61	CH	3	15.51	300	Discrete Points	1.457362
62	CH	3	15.51	300	Discrete Points	1.457362
63	CH	3	15.51	300	Discrete Points	1.605136
64	CH	3	15.51	300	Discrete Points	1.605136
65	CH	3	15.51	300	Discrete Points	1.605136
66	CH	3	15.51	300	Discrete Points	1.605136
67	CH	3	15.51	300	Discrete Points	1.605136
68	CH	3	15.51	300	Discrete Points	1.605136
69	SW-SM	4	19.96	650	Discrete Points	3.2549226
70	SW-SM	4	19.96	650	Discrete Points	3.5084619
71	SW-SM	4	19.96	650	Discrete Points	3.7637934
72	SW-SM	4	19.96	650	Discrete Points	4.0208999
73	SW-SM	4	19.96	650	Discrete Points	4.2797619
74	SW-SM	4	19.96	650	Discrete Points	4.5403591
75	SW-SM	4	19.96	650	Discrete Points	4.8026702
76	CH	3.5	15.51	400	Discrete Points	1.6228785
77	CH	3.5	15.51	400	Discrete Points	1.6228785
78	CH	3.5	15.51	400	Discrete Points	1.6228785
79	CH	3.5	15.51	400	Discrete Points	1.6228785
80	CH-MH	4	15.51	400	Discrete Points	1.493376
81	CH-MH	4	15.51	650	Discrete Points	1.493376
82	CH-MH	4.5	15.51	650	Discrete Points	1.493376
83	CH-MH	4.5	15.51	650	Discrete Points	1.493376
84	CH-MH	4.5	15.51	650	Discrete Points	1.493376
85	CH-MH	4.5	15.51	650	Discrete Points	1.493376

**Figura A 2 Variables de ingreso del Método Equivalente Lineal. [Elaboración Propia]**

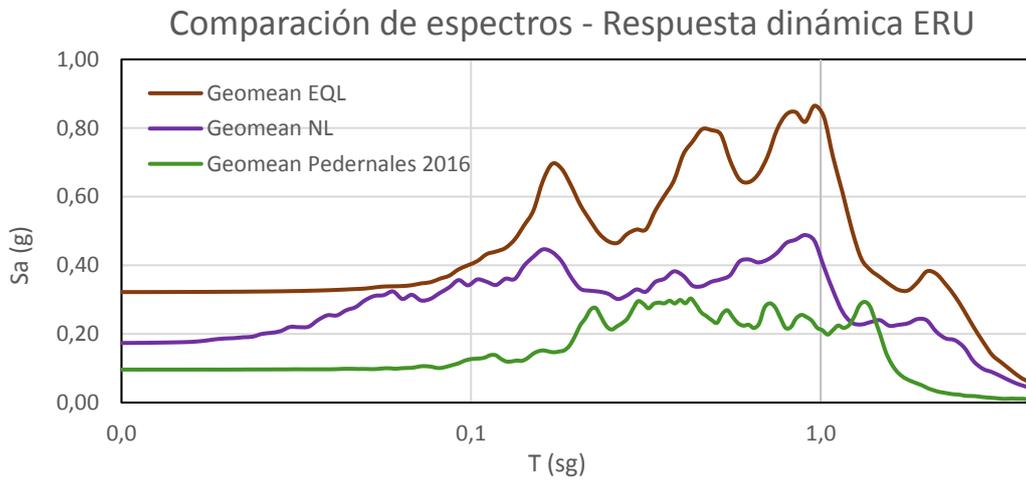
Numero de capa	Nombre de capa	Espesor (m)	Unidad de peso (kN/m3)	Velocidad de onda de corte	Modelo	D min	Ref strain (%)	Beta	P1	P2	P3	f	p	F	s	gamma	v	-
												s	r	A	B	C	D	gamma
1	CH	0.5	16.06	100	Points	1.74063603	0.3102	1.395	0.58	0.26	1.2	0.017	0.360	8.96	-15.76	7.30	-0.48	0.0732
2	CH	0.5	16.06	100	Points	1.74843612	0.3262	1.23	0.58	0.24	1	0.017	0.360	8.96	-15.76	7.30	-0.48	0.0932
3	CH	0.5	16.06	100	Points	1.75256003	0.302	1.065	0.58	0.24	1	0.016	0.360	8.96	-15.76	7.30	-0.48	0.1073
4	CH	0.5	16.06	105	Points	1.74889975	0.3314	1.23	0.58	0.24	1	0.020	0.388	10.14	-18.65	9.27	-0.75	0.0947
5	CH	0.5	16.06	105	Points	1.75004439	0.3448	1.23	0.58	0.24	1	0.021	0.393	10.35	-19.20	9.66	-0.81	0.0985
6	CH	0.5	15.31	105	Points	1.29827406	0.2536	1.575	0.58	0.26	1.2	0.024	0.435	11.05	-20.98	10.96	-1.01	0.0498
7	CH	0.5	15.31	100	Points	1.28595364	0.1916	1.56	0.58	0.26	1.2	0.031	0.482	13.07	-26.37	15.16	-1.84	0.0382
8	CH	0.5	15.31	100	Points	1.2869833	0.1956	1.56	0.58	0.26	1.2	0.043	0.482	13.07	-26.37	15.16	-1.84	0.0390
9	CH	0.5	15.31	100	Points	1.2879285	0.1994	1.56	0.58	0.26	1.2	0.034	0.482	13.07	-26.37	15.16	-1.84	0.0397
10	CH	0.5	15.31	100	Points	1.28782634	0.199	1.56	0.58	0.26	1.2	0.033	0.486	13.23	-26.80	15.51	-1.92	0.0397
11	MH	0.75	15.24	105	Points	1.2178404	0.1832	1.575	0.58	0.26	1.2	0.038	0.492	13.23	-26.80	15.51	-1.92	0.0360
12	MH	0.75	15.24	105	Points	1.21906061	0.1876	1.575	0.58	0.26	1.2	0.033	0.492	13.23	-26.80	15.51	-1.92	0.0368
13	CH	0.75	16.22	105	Points	1.18815329	0.1756	1.56	0.58	0.26	1.2	0.036	0.499	13.39	-27.26	15.88	-2.00	0.0350
14	CH	0.75	16.22	105	Points	1.18994285	0.185	1.59	0.58	0.24	1	0.038	0.499	13.39	-27.26	15.88	-2.00	0.0358
15	CH	0.75	16.22	105	Points	1.19091347	0.184	1.56	0.58	0.26	1.2	0.036	0.499	13.39	-27.26	15.88	-2.00	0.0367
16	CH	0.75	16.22	100	Points	1.19194464	0.1878	1.56	0.58	0.26	1.2	0.034	0.499	13.39	-27.26	15.88	-2.00	0.0374
17	CL	0.75	15.68	100	Points	1.06694621	0.149	1.575	0.58	0.26	1.3	0.035	0.515	13.39	-27.26	15.88	-2.00	0.0293
18	CL	0.75	15.68	105	Points	1.0667073	0.1484	1.575	0.58	0.26	1.3	0.037	0.519	13.57	-27.75	16.29	-2.10	0.0291
19	CH	0.75	15.15	105	Points	1.3449183	0.2508	1.56	0.58	0.26	1.2	0.036	0.489	13.57	-27.75	16.29	-2.10	0.0500
20	CH	0.75	15.15	105	Points	1.34552323	0.2544	1.56	0.58	0.26	1.2	0.054	0.489	13.57	-27.75	16.29	-2.10	0.0507
21	MH	0.75	14.86	105	Points	1.435066	0.298	1.575	0.58	0.26	1.2	0.036	0.482	13.57	-27.75	16.29	-2.10	0.0585
22	MH	0.75	14.86	110	Points	1.43558782	0.302	1.575	0.58	0.26	1.2	0.036	0.482	13.57	-27.75	16.29	-2.10	0.0593
23	MH	0.75	14.86	110	Points	1.43604162	0.3056	1.575	0.58	0.26	1.2	0.038	0.482	13.57	-27.75	16.29	-2.10	0.0600
24	MH	0.75	14.86	110	Points	1.43649624	0.3048	1.56	0.58	0.26	1.2	0.034	0.482	13.57	-27.75	16.29	-2.10	0.0607
25	MH	0.75	14.86	110	Points	1.43604182	0.3056	1.575	0.58	0.26	1.2	0.033	0.486	13.76	-28.28	16.73	-2.20	0.0600
26	CH	0.8	15.54	110	Points	1.36752831	0.2762	1.56	0.58	0.26	1.2	0.034	0.491	13.76	-28.28	16.73	-2.20	0.0550
27	CH	0.8	15.54	130	Points	1.36803572	0.2838	1.575	0.58	0.26	1.2	0.034	0.491	13.76	-28.28	16.73	-2.20	0.0557
28	CH	0.8	15.54	130	Points	1.36755734	0.2764	1.56	0.58	0.26	1.2	0.035	0.496	13.96	-28.85	17.21	-2.32	0.0551
29	CH	0.8	15.54	130	Points	1.36803662	0.2838	1.575	0.58	0.26	1.2	0.034	0.496	13.96	-28.85	17.21	-2.32	0.0557
30	CH	0.8	15.54	130	Points	1.36850402	0.283	1.56	0.58	0.26	1.2	0.034	0.496	13.96	-28.85	17.21	-2.32	0.0564
31	CH	0.8	15.54	130	Points	1.3689506	0.2862	1.56	0.58	0.26	1.2	0.034	0.496	13.96	-28.85	17.21	-2.32	0.0570
32	CH	0.8	15.54	130	Points	1.36834629	0.286	1.575	0.58	0.26	1.2	0.036	0.500	14.18	-29.47	17.74	-2.45	0.0562
33	CH	0.8	15.54	130	Points	1.36875434	0.2848	1.56	0.58	0.26	1.2	0.036	0.500	14.18	-29.47	17.74	-2.45	0.0568
34	CH	0.8	15.54	130	Points	1.36917009	0.292	1.575	0.58	0.26	1.2	0.036	0.500	14.18	-29.47	17.74	-2.45	0.0574
35	CH	0.8	15.54	140	Points	1.3695496	0.2906	1.56	0.58	0.26	1.2	0.035	0.500	14.18	-29.47	17.74	-2.45	0.0579
36	CH	0.8	15.54	140	Points	1.36994192	0.2978	1.575	0.58	0.26	1.2	0.036	0.500	14.18	-29.47	17.74	-2.45	0.0585
37	CH	0.8	15.54	140	Points	1.37029423	0.2962	1.56	0.58	0.26	1.2	0.035	0.500	14.18	-29.47	17.74	-2.45	0.0590
38	CH	0.8	15.54	140	Points	1.36900548	0.2866	1.56	0.58	0.26	1.2	0.037	0.508	14.55	-30.51	18.64	-2.68	0.0571
39	CH	0.8	15.54	140	Points	1.36936245	0.2892	1.56	0.58	0.26	1.2	0.037	0.508	14.55	-30.51	18.64	-2.68	0.0576
40	CH	0.8	15.54	140	Points	1.36911799	0.2916	1.575	0.58	0.26	1.2	0.040	0.511	14.68	-30.90	18.97	-2.77	0.0573

40	CH	0.8	15.54	140	Points	1.36911799	0.2916	1.575	0.58	0.26	1.2	0.040	0.511	14.68	-30.90	18.97	-2.77	0.0573
41	CH	0.8	15.54	140	Points	1.36880995	0.2852	1.56	0.58	0.26	1.2	0.041	0.514	14.82	-31.30	19.32	-2.87	0.0568
42	CH	0.8	15.54	140	Points	1.36914206	0.2918	1.575	0.58	0.26	1.2	0.038	0.514	14.82	-31.30	19.32	-2.87	0.0573
43	CH	0.8	15.54	140	Points	1.36947074	0.29	1.56	0.58	0.26	1.2	0.041	0.514	14.82	-31.30	19.32	-2.87	0.0578
44	CH	0.8	15.54	140	Points	1.36979584	0.2924	1.56	0.58	0.26	1.2	0.039	0.514	14.82	-31.30	19.32	-2.87	0.0583
45	CH	0.8	15.54	140	Points	1.37008648	0.2946	1.56	0.58	0.26	1.2	0.038	0.514	14.82	-31.30	19.32	-2.87	0.0587
46	CH	0.8	15.54	140	Points	1.37314936	0.324	1.575	0.58	0.26	1.2	0.039	0.500	14.18	-29.47	17.74	-2.45	0.0636
47	CH	0.8	15.54	140	Points	1.37685023	0.2988	1.395	0.58	0.26	1.2	0.082	0.483	13.39	-27.26	15.88	-2.00	0.0705
48	CH	0.8	15.54	140	Points	1.37783305	0.3074	1.395	0.58	0.26	1.2	0.157	0.480	13.23	-26.80	15.51	-1.92	0.0726
49	CH	0.8	15.54	140	Points	1.37058155	0.2984	1.56	0.58	0.26	1.2	0.048	0.517	14.97	-31.72	19.70	-2.97	0.0595
50	CH	0.8	15.54	140	Points	1.37206132	0.3102	1.56	0.58	0.26	1.2	0.159	0.511	14.68	-30.90	18.97	-2.77	0.0618
51	CH	1	15.54	140	Points	1.21266208	0.2392	1.56	0.58	0.26	1.2	0.052	0.527	14.68	-30.90	18.97	-2.77	0.0477
52	CH	1	15.54	140	Points	1.21236932	0.2376	1.56	0.58	0.26	1.2	0.121	0.530	14.819	-31.299	19.323	-2.867	0.0474
53	CH	1.5	15.54	140	Points	1.3717336	0.312	1.575	0.58	0.26	1.2	0.054	0.517	14.966	-31.724	19.696	-2.969	0.0613
54	CH	1.5	15.54	140	Points	1.37219253	0.3158	1.575	0.58	0.26	1.2	0.132	0.517	14.966	-31.724	19.696	-2.969	0.0620
55	CH	1.5	15.54	140	Points	1.37261655	0.3148	1.56	0.58	0.26	1.2	0.080	0.517	14.966	-31.724	19.696	-2.969	0.0627
56	SP-SM	2	17.5	400	Points	1.72789261	0.118	1.53	0.58	0.2	3	2.000	1.040	0.350	1.350	0.040	1.000	
57	SP-SM	2	17.5	400	Points	1.82952007	0.1206	1.53	0.59	0.2	2.3	2.000	1.040	0.350	1.300	0.041	1.000	
58	SP-SM	2	17.5	400	Points	1.93484126	0.1174	1.47	0.58	0.2	2.8	2.000	1.040	0.350	1.200	0.042	1.000	
59	SP-SM	2	17.5	400	Points	2.03953274	0.1184	1.455	0.58	0.2	3.1	2.000	1.040	0.350	1.280	0.043	1.000	
60	CH	3	15.51	300	Points	1.39507316	0.2956	1.395	0.58	0.26	1.2	0.058	0.529	7.645	-14.714	6.380	0.692	0.070
61	CH	3	15.51	300	Points	1.39507316	0.2956	1.395	0.58	0.26	1.2	0.041	0.529	7.645	-14.714	6.380	0.692	0.070
62	CH	3	15.51	300	Points	1.39507316	0.2956	1.395	0.58	0.26	1.2	0.041	0.529	7.645	-14.714	6.380	0.692	0.070
63	CH	3	15.51	300	Points	1.55049879	0.2972	1.23	0.58	0.24	1	0.041	0.517	7.645	-14.714	6.380	0.692	0.085
64	CH	3	15.51	300	Points	1.55049879	0.2972	1.23	0.58	0.24	1	0.041	0.517	7.645	-14.714	6.380	0.692	0.085
65	CH	3	15.51	300	Points	1.55049879	0.2972	1.23	0.58	0.24	1	0.041	0.517	7.645	-14.714	6.380	0.692	0.085
66	CH	3	15.51	300	Points	1.55049879	0.2972	1.23	0.58	0.24	1	0.041	0.517	7.645	-14.714	6.380	0.692	0.085
67	CH	3	15.51	300	Points	1.55049879	0.2972	1.23	0.58	0.24	1	0.042	0.517	7.645	-14.714	6.380	0.692	0.085
68	CH	3	15.51	300	Points	1.55049879	0.2972	1.23	0.58	0.24	1	0.042	0.517	7.645	-14.714	6.380	0.692	0.085
69	SW-SM	4	19.96	650	Points	3.23097236	0.1186	1.53	0.58	0.2	2.9	2.000	1.040	0.170	1.320	0.039	1.000	
70	SW-SM	4	19.96	650	Points	3.48514772	0.1208	1.515	0.58	0.2	3.1	2.000	1.040	0.170	1.320	0.040	1.000	
71	SW-SM	4	19.96	650	Points	3.74072698	0.124	1.515	0.59	0.19	2.4	2.000	1.040	0.170	1.320	0.041	1.000	
72	SW-SM	4	19.96	650	Points	4.00056751	0.1302	1.56	0.58	0.2	2.7	2.000	1.040	0.170	1.320	0.042	1.000	
73	SW-SM	4	19.96	650	Points	4.25987784	0.1306	1.53	0.58	0.2	2.8	2.000	1.040	0.170	1.260	0.043	1.000	
74	SW-SM	4	19.96	650	Points	4.52087146	0.1348	1.545	0.58	0.2	3	2.000	1.040	0.170	1.260	0.044	1.000	
75	SW-SM	4	19.96	650	Points	4.78323171	0.1362	1.53	0.59	0.2	2.2	2.000	1.040	0.170	1.260	0.045	1.000	
76	CH	3.5	15.51	400	Points	1.57492103	0.2918	1.065	0.58	0.24	1	0.042	0.516	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.1037
77	CH	3.5	15.51	400	Points	1.57492103	0.2918	1.065	0.58	0.24	1	0.041	0.516	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.1037
78	CH	3.5	15.51	400	Points	1.57492103	0.2918	1.065	0.58	0.24	1	0.043	0.516	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.1037
79	CH	3.5	15.51	400	Points	1.57492103	0.2918	1.065	0.58	0.24	1	0.043	0.516	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.1037
80	CH-MH	4	15.51	400	Points	1.43995678	0.3076	1.23	0.58	0.24	1	0.043	0.526	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.0879
81	CH-MH	4	15.51	650	Points	1.43995678	0.3076	1.23	0.58	0.24	1	0.043	0.526	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.0879
82	CH-MH	4.5	15.51	650	Points	1.43995678	0.3076	1.23	0.58	0.24	1	0.359	0.526	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.0879
83	CH-MH	4.5	15.51	650	Points	1.43995678	0.3076	1.23	0.58	0.24	1	0.045	0.526	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.0879
84	CH-MH	4.5	15.51	650	Points	1.43995678	0.3076	1.23	0.58	0.24	1	0.045	0.526	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.0879
85	CH-MH	4.5	15.51	650	Points	1.43995678	0.3076	1.23	0.58	0.24	1	0.045	0.526	7.65	-14.71	6.38	0.69	0.0879

Figura A 3 Variables de ingreso del Método No Lineal de esfuerzos efectivos. [Elaboración Propia]

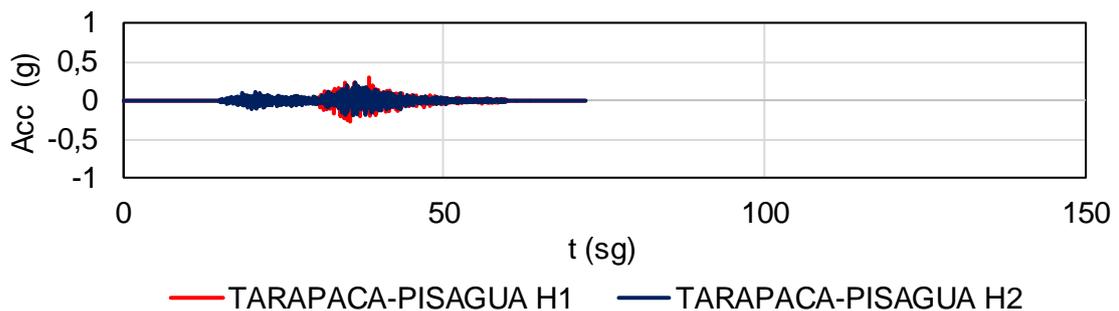
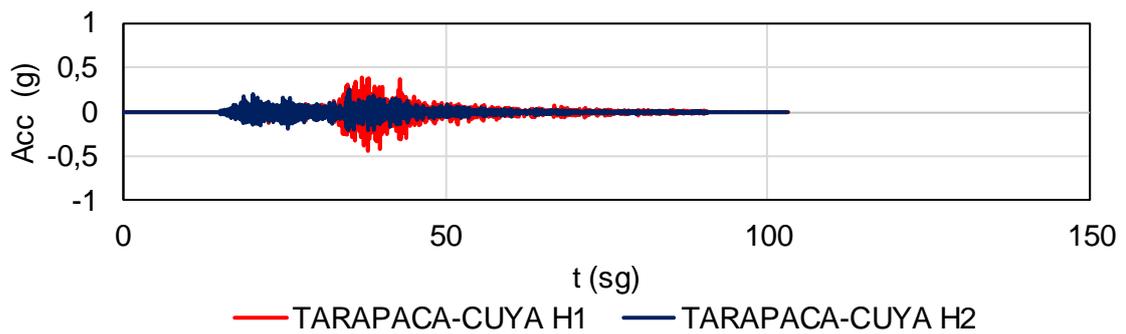
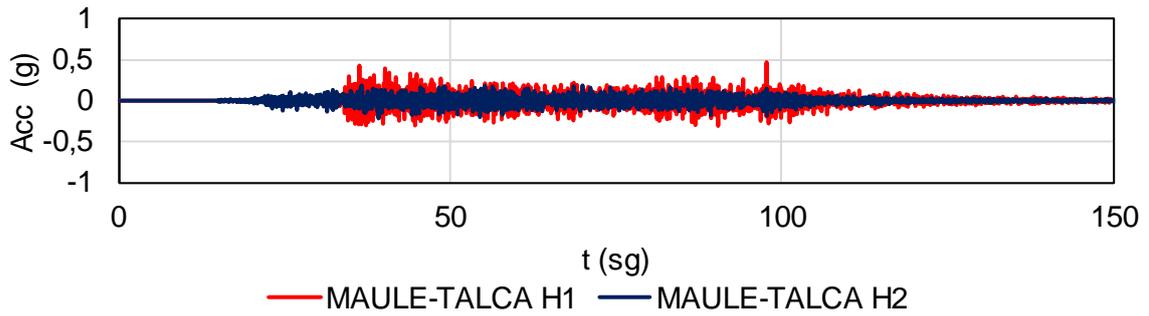
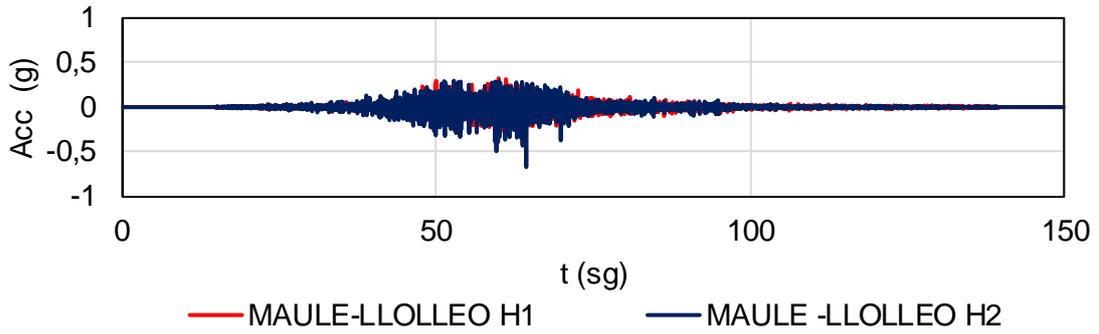
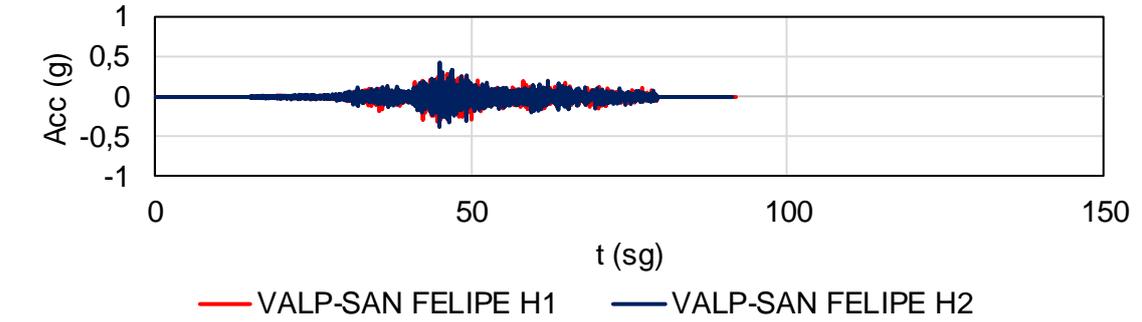


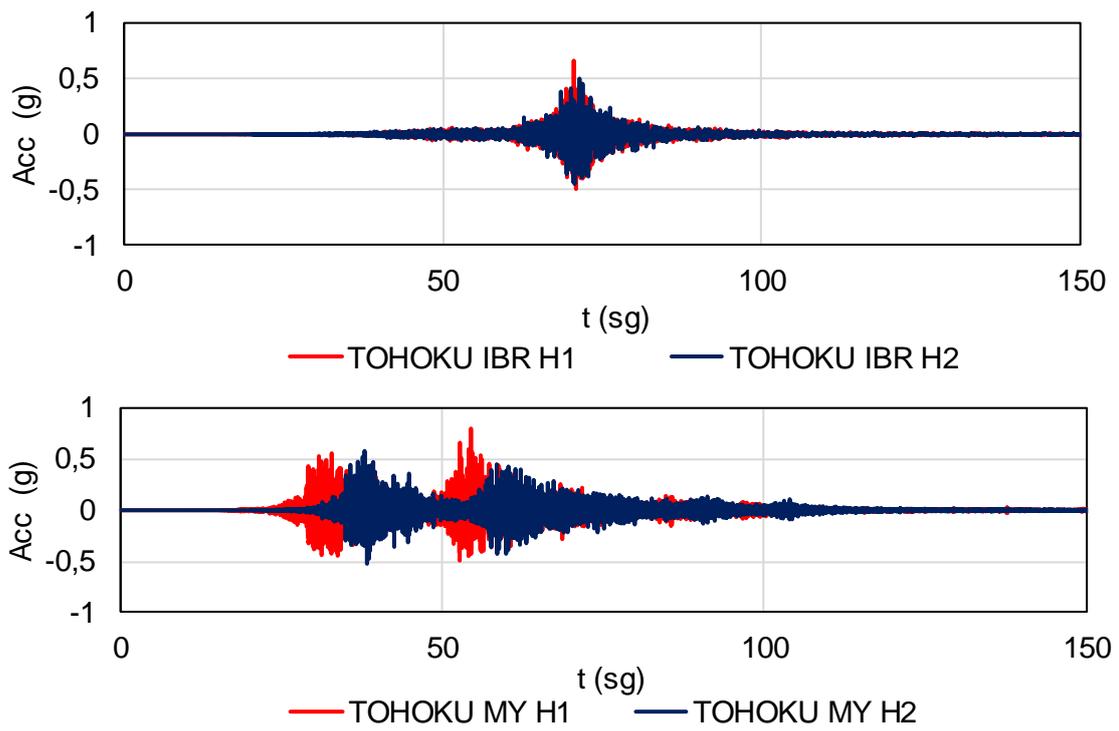
**Figura A 4 Disgregación de la curva de peligrosidad sísmica. PGA 475 yrs (0.261g) [Beauval, 2018]**



**Figura A 5 Comparación de espectros de repuesta en sitio con espectro medido en superficie. [Elaboración Propia]**

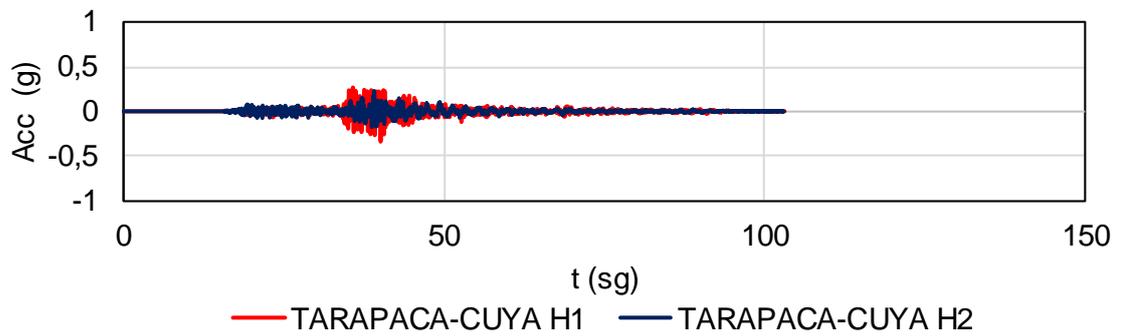
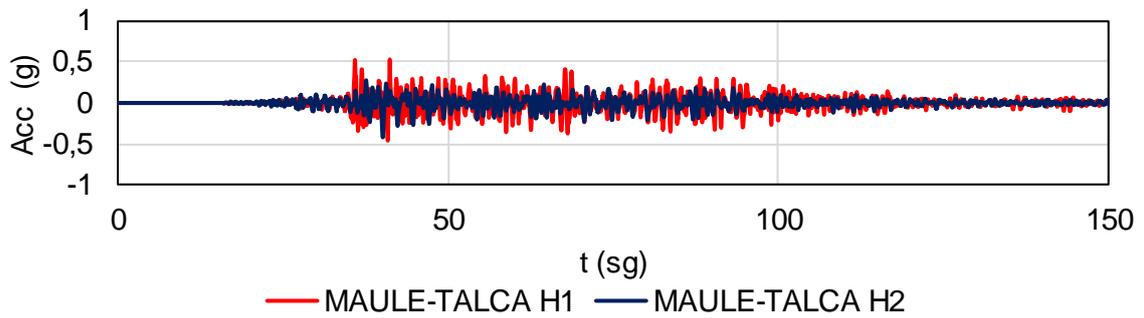
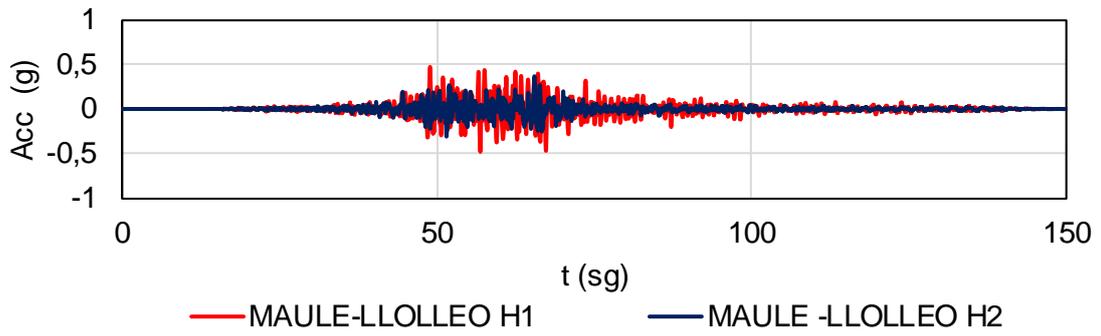
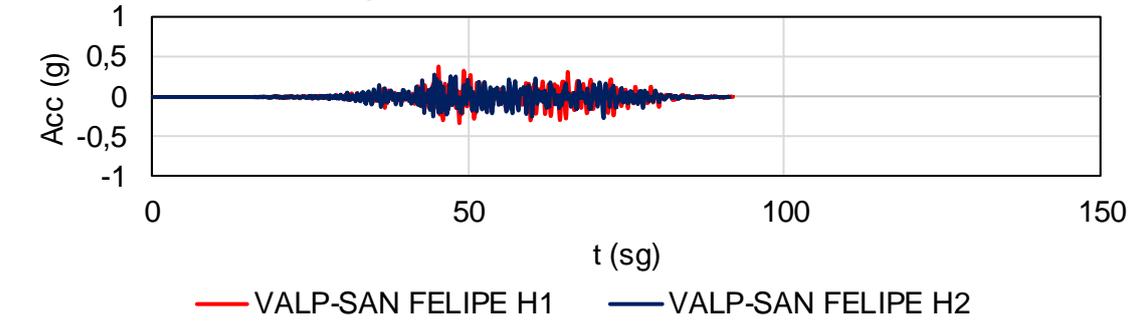
Registros sísmicos en roca

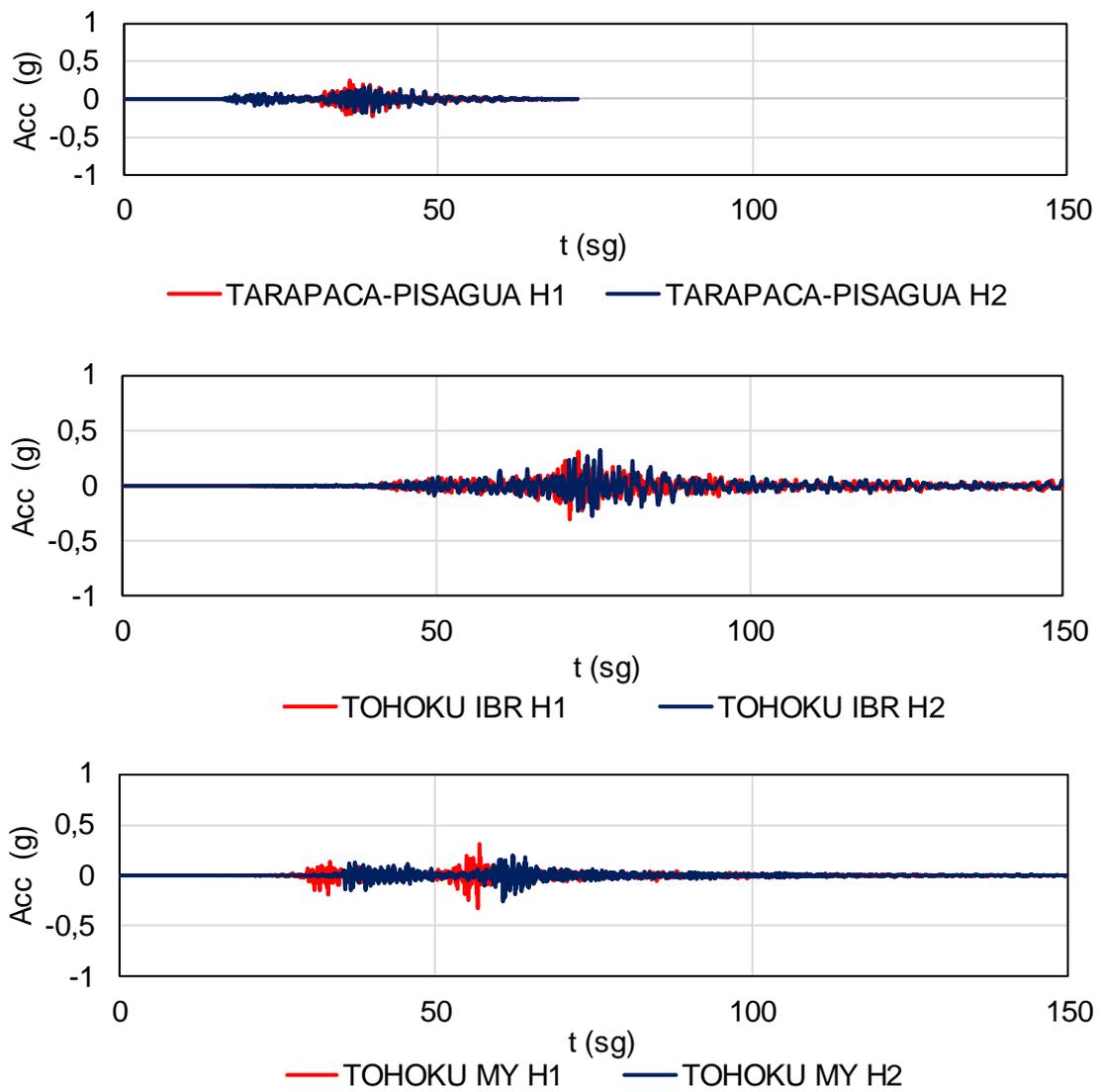




**Figura A 6 Registros sísmicos elegidos para el análisis de respuesta dinámica  
[Elaboración propia]**

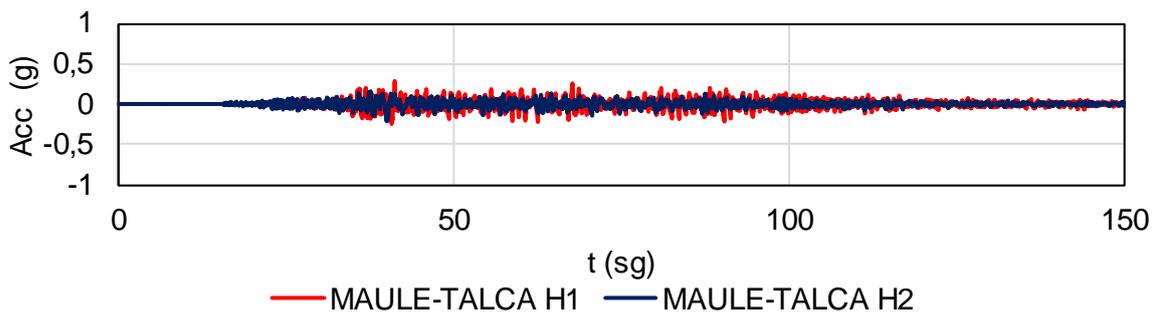
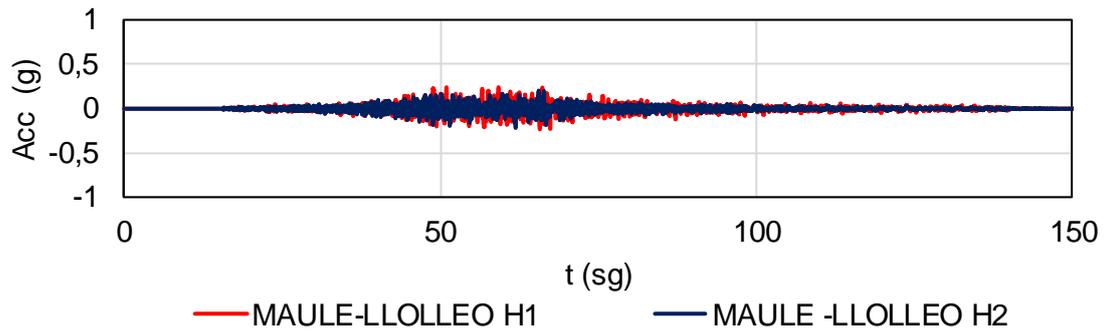
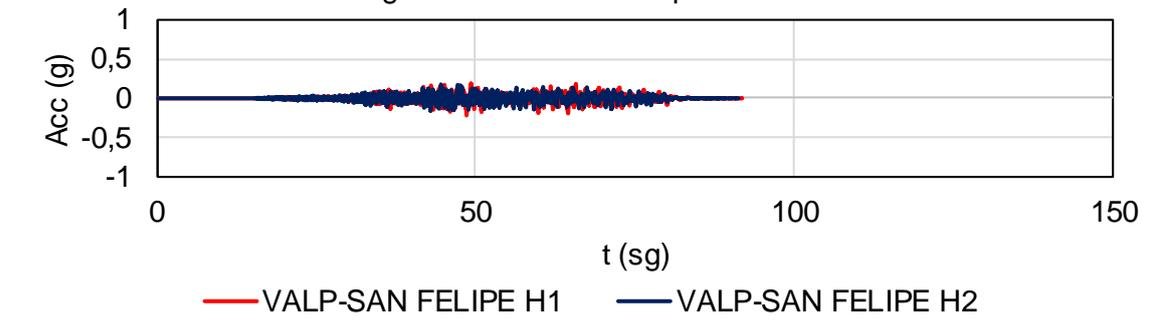
Registros sísmicos en superficie - EQL





**Figura A 7 Registros sísmicos en superficie del método equivalente lineal. [Elaboración propia]**

Registros sísmicos en superficie - NL



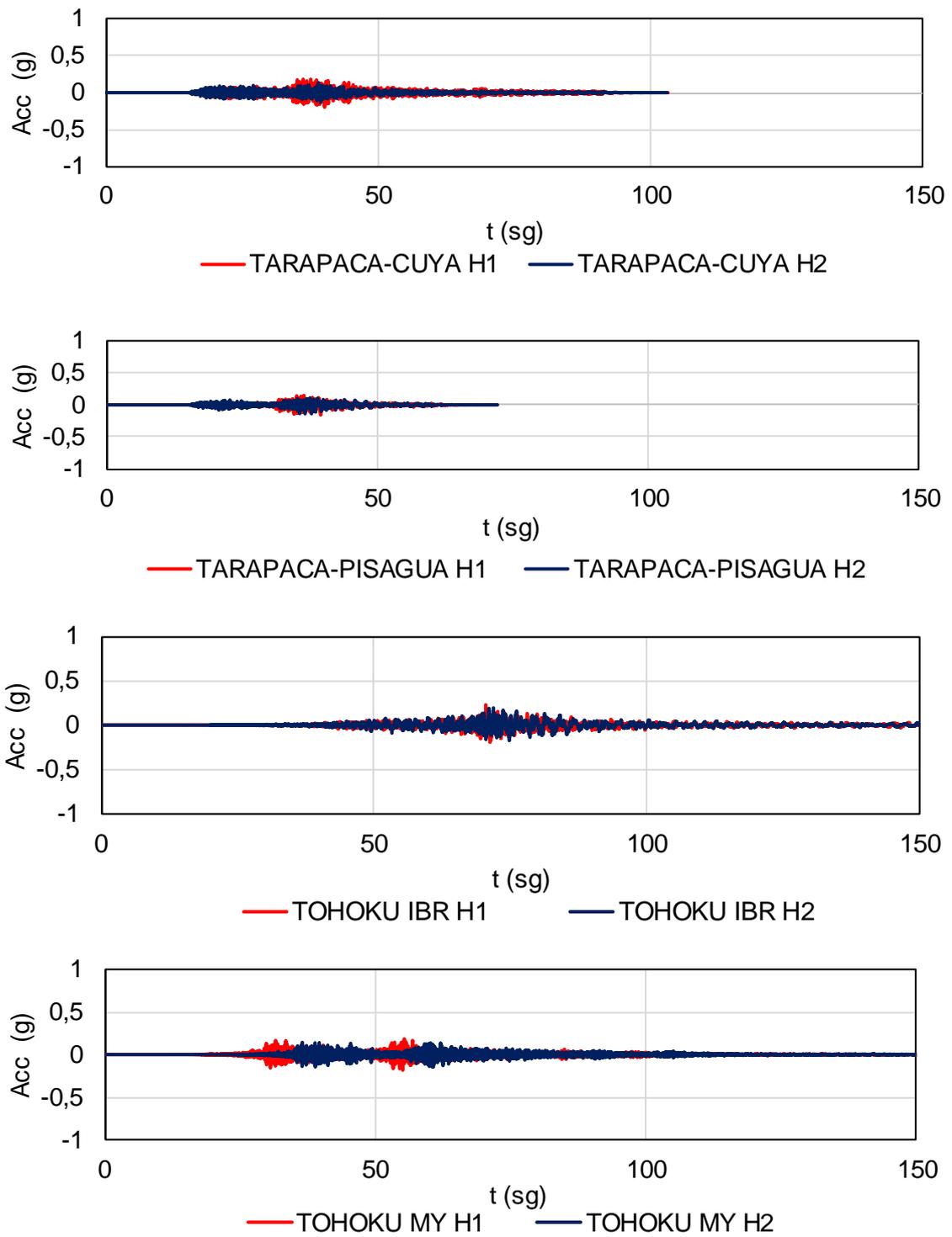


Figura A 8 Registros sísmicos en superficie con el método no lineal. [Elaboración propia]