



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE SITIO USANDO LOS
MODELOS: EQUIVALENTE LINEAL EN PRO-SHAKE 2.0 Y NO LINEAL EN DEEP
SOIL V 7.0, APLICADO EN EL SUBSUELO DEL EDIFICIO “BLOQUE G” DE LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, CAMPUS SUR, SEDE QUITO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Civiles

AUTORES: Henry Alexander Troya León
Ricardo Aníbal Viana Meneses

TUTOR: Juan Pablo Tarambís Rodríguez

Quito - Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Henry Alexander Troya León con documento de identificación N° 0603544149 y Ricardo Aníbal Viana Meneses con documento de identificación N° 0401867510; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 20 de febrero del 2024

Atentamente,



Henry Alexander Troya León

0603544149



Ricardo Aníbal Viana Meneses

0401867510

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Henry Alexander Troya León con documento de identificación N° 0603544149 y Ricardo Aníbal Viana Meneses con documento de identificación N° 0401867510; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Comparación de la respuesta dinámica de sitio usando los modelos: equivalente lineal en Pro-Shake 2.0 y no lineal en Deep Soil v 7.0, aplicado en el subsuelo del edificio “Bloque G” de la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur, Sede Quito”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de febrero del 2024

Atentamente,



Henry Alexander Troya León

0603544149



Ricardo Aníbal Viana Meneses

0401867510

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Pablo Tarambís Rodríguez con documento de identificación N° 1715336879, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE SITIO USANDO LOS MODELOS: EQUIVALENTE LINEAL EN PRO-SHAKE 2.0 Y NO LINEAL EN DEEP SOIL V 7.0, APLICADO EN EL SUBSUELO DEL EDIFICIO “BLOQUE G” DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, CAMPUS SUR, SEDE QUITO**, realizado por Henry Alexander Troya León con documento de identificación N° 0603544149 y por Ricardo Aníbal Viana Meneses con documento de identificación N° 0401867510, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de febrero del 2024

Atentamente,



Ing. Juan Pablo Tarambís Rodríguez, MSc

1715336879

COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE SITIO USANDO LOS MODELOS: EQUIVALENTE LINEAL EN PRO-SHAKE 2.0 Y NO LINEAL EN DEEP SOIL V 7.0, APLICADO EN EL SUBSUELO DEL EDIFICIO “BLOQUE G” DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, CAMPUS SUR, SEDE QUITO

COMPARISON OF THE DYNAMIC SITE RESPONSE USING THE MODELS: LINEAR EQUIVALENT IN PRO-SHAKE 2.0 AND NON-LINEAR IN DEEP SOIL V 7.0, APPLIED IN THE UNDERGROUND OF THE “BLOCK G” BUILDING OF THE SALESIAN POLYTECHNIC UNIVERSITY, SOUTH CAMPUS, QUITO HEADQUARTERS

Henry Troya-León¹, Ricardo Viana-Meneses²

Resumen

El estudio está centrado en el analizar la respuesta dinámica de sitio, específicamente del “Bloque G” de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), el cual está situada en el sector de Chillogallo de la ciudad de Quito-Ecuador. Mediante el modelamiento en los programas Pro-Shake 2.0 y Deep Soil 7.0, se aplica los métodos Equivalente Lineal y No Lineal respectivamente. Del cual se obtiene espectros de respuesta dinámicos para las cuatro categorías de amenaza sísmica, según la NEC-SE-DS 2015, acorde al capítulo de Peligro Sísmico. Esta investigación es sustancial para próximos análisis relacionados con suelo-estructura cercanos al lugar.

Como datos de entrada se tiene registros sísmicos (sismos semilla), con características sismo-tectónicas similares al sitio de estudio, obtenidos de la base de datos PEER Ground Motion Database, y son ajustados a registros instrumentales para cada condición de amenaza según la normativa.

Además, se tiene investigaciones del subsuelo del sitio de estudio como: las propiedades geotécnicas y geofísicas a diferentes profundidades las cuales son ingresadas a los programas.

Abstract

The study is focused on the analysis of the dynamic response of the site, specifically of “Block G” of the Salesian Polytechnic University (UPS), which is located in the Chillogallo sector of the city of Quito-Ecuador. Through modeling in the Pro-Shake 2.0 and Deep Soil 7.0 programs, the Linear Equivalent and Non-Linear methods are applied respectively. From which dynamic response spectra are obtained for the four categories of seismic hazard, according to the NEC-SE-DS 2015, according to the Seismic Hazard chapter. This research is substantial for future analyzes related to soil-structure near the site.

As input data, there are seismic records (seed earthquakes), with seismic-tectonic characteristics similar to the study site, obtained from the PEER Ground Motion Database, and are adjusted to instrumental records for each threat condition according to the regulations.

In addition, there are investigations of the subsoil of the study site such as: geotechnical and geophysical properties at different depths and which are entered into the programs.

To evaluate the dynamic response of the site, a

¹ Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

² Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: htroyal@est.ups.edu.ec; rviana@est.ups.edu.ec

Para evaluar la respuesta dinámica de sitio, se obtiene un espectro medio estándar y desviación estándar de cada análisis, se comparan entre ambos métodos: equivalente lineal y no lineal, también se compara con el espectro de respuesta según su categoría de la norma NEC-SE-DS 2015, los cuales son propios del subsuelo sobre el cual está cimentado el edificio.

standard mean septum and standard deviation of each analysis are obtained, they are compared between both methods: linear and non-linear equivalent, it is also compared with the response spectrum according to it's category of the NEC-SE standard. -DS 2015, which are typical of the subsoil on which the building is founded.

Palabras Clave: *DeepSoil, espectros de respuesta, estratificación de subsuelo, Pro-Shake, respuesta de sitio.*

Keywords: *DeepSoil, response spectra, subsoil stratification, Pro-Shake, site response.*

1. Introducción

En la columna unidimensional del subsuelo del “Bloque G”, se han realizado análisis de respuesta de sitio, a fin de obtener resultados como espectros de respuesta entre otros, en base a información del suelo con limitados datos geofísicos, geotécnicos y también un detallado aproximado a la estratigrafía que lo conforma, lo cual deja una incertidumbre con la precisión de los datos obtenidos.

El objetivo de esta investigación es obtener resultados lo más precisos posibles, ya que en la actualidad se tiene la información más detallada de los estratos de suelos de sus propiedades mecánicas y a diferentes profundidades, las cuales fueron realizadas por: López y Mestanza, Jaramillo y Naranjo, también se dispone datos proporcionados por la empresa Metro de Quito. Las investigaciones anteriormente mencionadas fueron realizadas en el subsuelo del sitio de estudio; con esto se puede modelar y observar el comportamiento del suelo ante la propagación de ondas sísmicas con la utilización de los programas Pro-Shake y Deep Soil.

El proyecto de investigación es factible gracias a medios digitales e investigaciones anteriores como: registros sísmicos que se puede encontrar en la plataforma PEER, de la cual se obtendrá registros reales de aceleraciones vs tiempo, con la finalidad de asociarlos a la sismicidad tectónica la estratigrafía del subsuelo sobre el cual esta cimentado el “Bloque G”.

La aplicación de los programas permite crear el perfil del subsuelo y obtener la respuesta dinámica de sitio. Pro-Shake y Deep Soil calculan la respuesta en un sistema de capas visco-elásticas homogéneo de extensiones infinitas, sometidas a ondas de corte que se desplazan verticalmente, para cada uno de los registros sísmicos instrumentales preseleccionados como frecuentes, ocasionales, raros y muy raros. [1]

El escalamiento de los sismos se realiza mediante el programa Seismo-Signal. Con esto se logra procesar datos de movimientos sísmicos que permite escalar, corregir por ruido y corregir por línea base, obteniendo datos de aceleración velocidad y desplazamiento, así como observar el

efecto Fourier y el espectro de respuesta. La aplicación de este programa permite escalar para las diferentes categorías de amenaza sísmica en cada acelerograma ingresado. [2]

El análisis equivalente lineal utilizado en Pro-Shake se enfoca en el dominio de la frecuencia para dar como solución espectros de respuesta sobre una capa de suelo. Los movimientos producidos por acelerogramas son mostrados como la suma de ondas sinusoidales de diferentes amplitudes, frecuencias y ángulos fase. Este concepto matemático permite resolver el proceso de sinusoidal por capa de suelo. [3]

Al análisis No Lineal que aplica el programa Deep Soil está basado en los parámetros del dominio del tiempo. La ecuación para su análisis puede ser empleando el método de Newmark o el método de Heum. Estos métodos permiten calcular las deformaciones de los materiales representadas geoméricamente en la no linealidad. [4]

Con todo lo anterior mencionado y desarrollado, se realiza la comparativa de la respuesta dinámica de sitio obtenida los dos programas, y los métodos que se realizan en cada uno de ellos como son el modelo equivalente lineal y el no lineal. Finalmente se presentan los espectros de respuesta más el espectro proporcionado por la NEC-SE-DS-2015, los cuales son representados en gráficas y analizados cuidadosamente.

2. Métodos

2.1 Datos de entrada.

2.1.1. Tipo de falla.

Se parte desde el tipo de falla más cercana que se tiene a la zona de estudio. Como se aprecia en la Figura 1, se tiene una falla inversa, ubicada en la Longitud 778000 y Latitud 9968000 (coordenadas UTM). Al occidente también se tiene la falla normal Guayacán-Río Cinto. Esto quiere decir que uno de los bloques en este caso el de Quito se levanta respecto del bloque de los valles en contra de la gravedad mediante fuerzas de compresión tectónica que empujan al continente. [5]

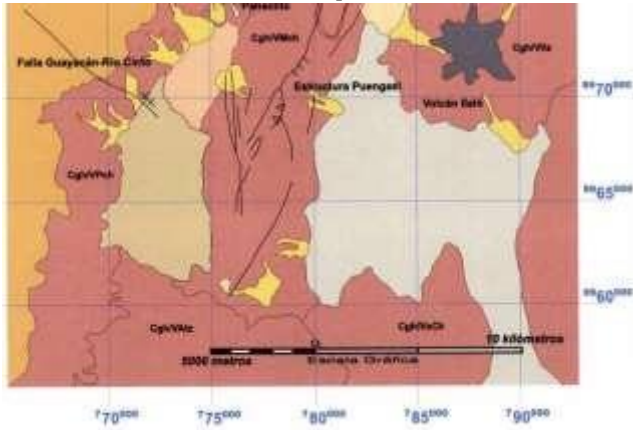


Figura 1. Microzonificación sísmica de los suelos del distrito metropolitano de Quito. [5]

Con este análisis, se ingresa el parámetro como tipo de falla inverso/oblicuo en la plataforma de PEER para obtener los registros sísmicos.

2.1.2. Registros Sísmicos.

Como datos iniciales tenemos los registros sísmicos establecidos por la página virtual PEER. Esta plataforma nos permite seleccionar y utilizar los datos de los sismos registrados en su base de datos, cabe recalcar que estos sismos no tienen un escalamiento.

Un estudio de este tipo tiene un mínimo de registros que debe ser aplicado al modelamiento. Según ASCE 7-16 se requiere el uso de mínimo 11 registros de historiales de aceleración del movimiento del suelo. [6]

2.1.3. Parámetros a considerar como base rocosa.

Se considera una base rocosa a una profundidad de 45 metros. La velocidad de onda de corte es de vital importancia en este estudio, ya que está relacionada con la rigidez, por lo tanto, influye directamente con las solicitaciones dinámicas a las que está expuesto el suelo. El programa Deep Soil considera una base elástica con los siguientes parámetros: [4]

Velocidad de onda de corte: 760 m/s

Peso unitario: 25 kN/m³

Razón de Amortiguamiento: 2 %

2.1.4. Magnitud de momento (M_w) y profundidad a la que se generan los sismos en la zona.

Para determinar la magnitud máxima en la ciudad de Quito, depende del siguiente criterio. La falla dominante que producen los sismos se encuentra al Sur de Quito, ver Figura 2, con un $M_w = 6.25$ y a una profundidad de ruptura 30 km. Estas fallas se ubican en la zona RI3 y son responsables de los sismos que afectan a la zona. [7]

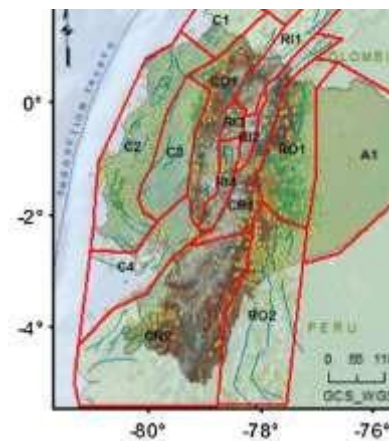


Figura 2. Zonificación de la corteza terrestre, de estructuras geológicas de Ecuador. [7]

Se conoce que $M_w = 6.25$, por lo tanto, mediante la Figura 3 se puede determinar que en la escala de Richter corresponde a $M_L = 6$.

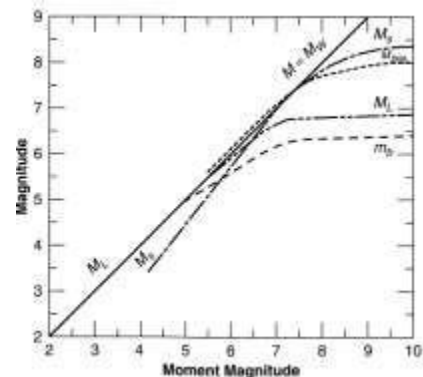


Figura 3. Esquema de medición de magnitudes de sismo. [8]

2.1.5. Datos ingresados al PEER.

Con los datos anteriormente mencionados, se procede a la búsqueda respectiva en la base de datos de registros sísmicos. Los acelerogramas semilla se puede visualizar en el Anexo 1.

Figura 4. Parámetros ingresados al programa PEER. [9]

2.1.6 Factor de escala

Mediante el programa Seismo-Signal se hace la corrección de los acelerogramas por ruido y línea base. [2]. El escalamiento de las amplitudes sísmicas permite ajustar los registros de los acelerogramas, según NEC-SE-DS 2015, ver Anexo 3. [10]

Tabla 1: Niveles de amenaza sísmica. [10]

Sismo	Probabilidad excedencia en 50 años	Periodo de retorno Tr (años)	Tasa anual de excedencia (1/Tr)
Frecuente	50%	72	0.01389
Ocasional	20%	225	0.00444
Raro	10%	475	0.00211
Muy Raro	2%	2500	0.00040

Se calcula un factor de escala para cada uno de los acelerogramas y para cada nivel de amenaza sísmica, expresado con la siguiente ecuación (1):

$$F.E = \frac{A. categoría}{a. registro} \quad (1)$$

Donde:

F.E: Factor de escala

A. categoría: aceleración máxima de categoría sísmica. (g)

a. registro: aceleración máxima de cada registro sísmico. (g)

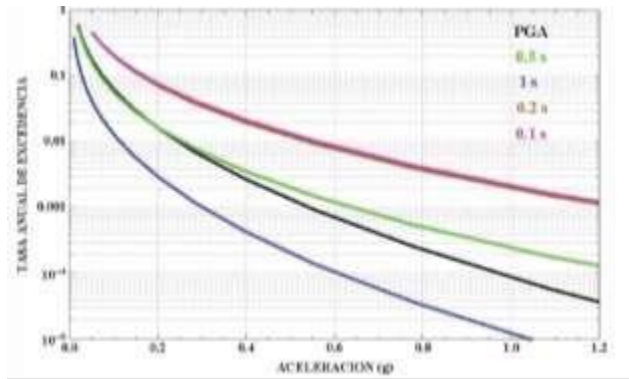


Figura 5. Curvas de Peligro Sísmico para Quito. [10]

Tabla 2: Aceleraciones máximas de las categorías de sismos.

Categoría	Aceleración Máxima
Frecuente	0,22
Ocasional	0,35
Raro	0,4
Muy Raro	0,72

Mediante la Figura 5 y la tasa anual de excedencia (1/Tr) de la zona de Quito se obtuvo las aceleraciones máximas para cada categoría de amenaza sísmica y se representa en la Tabla 2. Los factores de cada registro sísmico y para cada categoría se puede visualizar en el Anexo 2. En los Anexos 2 y 3 se puede visualizar los acelerogramas sin escalar y escalados respectivamente.

2.2. Método Equivalente Lineal.

Como punto de partida se puede mencionar que la no linealidad del comportamiento del suelo significa que este está en constante cambio. La aplicación del método equivalente lineal en el programa resulta ser versátil con relación a todos los métodos de aproximación de los análisis dinámicos, en este caso para una estratigrafía no lineal.

2.2.1. Pro Shake 2.0.

Su principal función es realizar análisis de respuesta de sitio en función del sistema equivalente lineal. El programa no puede permitir tensiones-deformaciones no lineales, ya que se usa la serie Fourier y funciones de transferencia para la

ecuación de onda mediante el principio de superposición siendo únicamente válido para sistemas lineales. Solamente permite hacer el análisis mencionado, por lo que tiene limitantes si lo comparamos con otros programas de similares características. [3]

El método equivalente lineal consiste en un análisis iterativo que ajusta las propiedades del suelo, como el módulo de corte que se aproxima a uno promedio en un ciclo completo de carga, provocando una curva de reducción del módulo cortante.

El algoritmo del programa asume una amortiguación viscosa, esto para generar un comportamiento en bucle de tensión-deformación. Es así que el análisis lineal equivalente realiza la primera iteración utilizando el módulo de corte y el amortiguamiento, luego de esta iteración la deformación de corte se define como (2):

$$\gamma_{eff} = R_{\gamma} * \gamma_{max} \quad (2)$$

R_{γ} = factor de reducción de la deformación (3).

$$R_{\gamma} = \frac{M - 1}{10} \quad (3)$$

Este proceso se evalúa hasta que el valor de la deformación efectiva no cambie, se ha demostrado que el método lineal equivalente genera estimaciones razonables de la respuesta del suelo bajo la mayoría de las sollicitaciones que conlleva la práctica. [3]

2.3. Método No Lineal.

El análisis no lineal consiste en resolver las ecuaciones en función del dominio y el tiempo. Existen casos en donde se producen altas intensidades sísmicas en la base rocosa, por consecuencia, se generan deformaciones en la columna de suelo que soporta toda la actividad sísmica, en donde no es recomendable representada por una sola rigidez y un amortiguamiento en toda la profundidad del suelo. En esta situación se hace el análisis no lineal y representar los módulos de corte y amortiguamiento durante el movimiento del suelo producido por terremotos, a continuación, se muestra la ecuación (4). [11]

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}'\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\{\ddot{u}_g\} \quad (4)$$

Donde:

[M]: es la matriz de masa.

[C]: es la matriz de amortiguamiento viscoso.

[K]: es la matriz de rigidez.

{ \ddot{u} }: es el vector de aceleración relativa nodal.

{ \dot{u}' }: es el vector de velocidades relativas nodales.

{u}: es el vector de desplazamientos relativos nodales.

{ \ddot{u}_g }: es la aceleración en la base de la columna de suelo

{I}: es el vector unitario.

El método numérico de Newmark resuelve en función del paso del tiempo, y las matrices: [M], [C] y [K] se forman según el incremento del número de capas. [11]

2.3.1. Deep Soil.

Deep Soil es una plataforma de análisis de respuesta de sitio, donde atribuye al método histerético no lineal en 1D, controlado por fuerzas, formulando un amortiguamiento independiente de la frecuencia, modelos de generación y disipación de presión intersticial y capacidad de procesamiento histerético.

En este caso se usará el Método de Análisis No lineal, con el Modelo de suelo General cuadrático/Modelo Hiperbólico (GQ/H). [4]

2.3.2. Modelo de suelo General cuadrático/Modelo Hiperbólico (GQ/H).

El modelo cuadrático/hiperbólico (GQ/H), elabora las curvas resistencia/deformación al corte, con datos experimentales, los valores se extrapolan a grandes niveles de deformación lo que causa que ésta se subestime o se sobreestime, por lo cual, es necesaria una corrección de la resistencia al corte en grandes deformaciones. [11]

Los parámetros τ_{max} y θ_1 a θ_5 son necesarios para construir las curvas, una forma fácil de obtener estos es utilizando Deep Soil, construyendo un dominio en capas, el ajuste de la curva GQ/H, la cual calcula la resistencia al corte corregida - curva de deformación al corte y proporciona los parámetros θ_1 a θ_5 . Estos valores se utilizan directamente en material histerético del suelo sin definir ninguna curva. El modelo de material utiliza τ_{max} , G_0 y θ_1 a θ_5 para construir

la curva de resistencia al corte – deformación al corte usando la ecuación (5):

$$\theta_r = \theta_1 + \theta_2 * \frac{\theta_4 * \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}}{\theta_3^{\theta_5} + \theta_4 * \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}} \quad (5)$$

Donde:

$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ = son los límites de ajuste de las propiedades básicas del suelo como: curva de reducción del módulo y curvas de esfuerzo.

γ_r = deformación de referencia que se calcula con la ecuación (6).

$$\gamma_r = \tau_{max}/G_0 \quad (6)$$

Una vez se determina el valor de θ_r la curva deformación por corte se genera de la siguiente forma (7):

$$\tau = \tau_{max} \left[\frac{1}{\theta_r} * \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) - \sqrt{\left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^2 - 4 * \theta_r * \frac{\gamma}{\gamma_r} \right\}} \right\} \right] \quad (7)$$

2.4. Propiedades Geotécnicas de los estratos en el sitio de estudio.

Las propiedades geotécnicas más importantes a considerar es la composición de los estratos bajo el sitio de estudio. Se ha logrado recolectar información de estudios previos y actualizados de sus características geotécnicas y geofísicas, llegando hasta una profundidad de 45 m, los cuales están conformados por 13 estratos, ver Anexo 5.

Para los primeros cinco estratos que van desde en nivel natural del terreno hasta diez metros de profundidad. De esta investigación se obtuvo datos de diferentes capas como: peso específico del suelo, módulo de corte o cizalla, tipo de suelo SUCS, índice de plasticidad y coeficiente de sobre consolidación. La información ha sido recolectada de la investigación realizada por López A. y Mestanza K. [12]

La información para los estratos seis a once (10 m a 27.7 m), se obtiene datos como: espesor de capa, índice de plasticidad y clasificación SUCS. Como propiedad geo mecánica primordial

en esta investigación se usa la velocidad de onda de corte (V_s), este dato es empleado para cada estrato del suelo hasta una profundidad de 27.2m. Esto se puede visualizar en el Anexo 4. Esta información fue brindada por el estudio de Jaramillo K, y Naranjo Y. [13]

La información para los últimos dos estratos correspondientes a la profundidad de 27.7 a 45 metros: tipo de suelo, peso específico, IP, V_s y G_{max} , se obtuvieron a partir de los estudios de suelo del Metro de Quito, realizados en el sitio de la estación Morán Valverde con los informes denominados SMQ6 Y SMQ7. [14]

Cabe recalcar que, con todos los datos proporcionados por las diferentes fuentes antes mencionadas, se consiguió una base de datos significativa para completar los parámetros de ingreso requeridos por los programas Deep Soil y Pro-Shake. En la figura 6 se observa el perfil del subsuelo modelado en Deep Soil y su derecha la línea de tendencia en función de la velocidad de onda de corte.

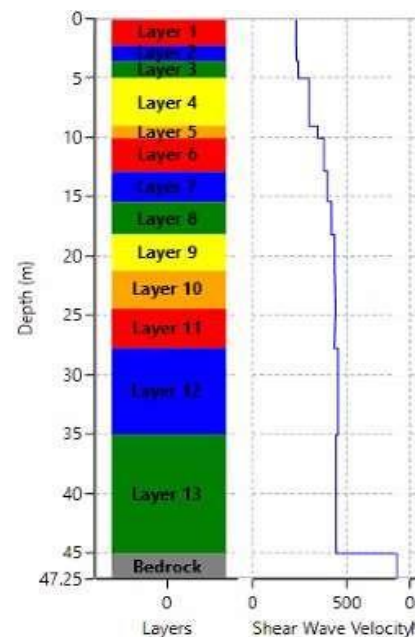


Figura 6. Perfil en Deep Soil, estratos del subsuelo y V_s (m/s) del Bloque G, UPS.

2.4.1. Representación de curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento en función de la deformación angular.

Las propiedades del suelo dependen del módulo de corte, amortiguamiento y registrados en el cambio de la deformación. Al generarse un terremoto en los estratos de suelo se someten a una carga y descarga cíclica y como consecuencia se tiene tensiones y deformaciones no lineales, de donde se obtiene un diagrama de histéresis en función de la deformación de corte y tensión de corte. El G_{max} es la relación de la tensión y deformación y es dependiente de la dureza del material.

El amortiguamiento se define como la capacidad del material para disipar la energía. A medida que aumenta la deformación también se incrementa la deformación de corte y se puede calcular con la ecuación (8). [15]

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_s} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{lazo}}{G_{sec} \gamma_c^2} \quad (8)$$

Donde:

W_D : energía disipada.

W_s : energía de deformación máxima.

A_{lazo} : área del ciclo de histéresis.

G_{sec} : Modulo cortante, secante.

γ_c^2 : tensión de corte, en secante.

Como datos de entrada se tiene las curvas para los 5 estratos de suelos, empleada en esta investigación y fueron obtenidas de López A. y Mestanza K. [12]

Para el resto de capas se empleó el método Darendeli 2001, el cual se encuentra integrado en ambos programas y para su procesamiento se necesita los coeficientes k_o y OCR. En las Figuras 7 y 8 se aprecian las curvas de G/G_{max} y amortiguamiento, correspondientes a cada tipo de suelo.

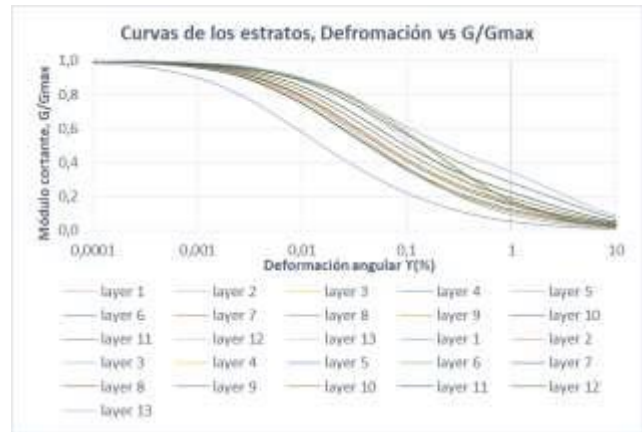


Figura 7. 13 curvas deformación angular vs G/G_{max} .

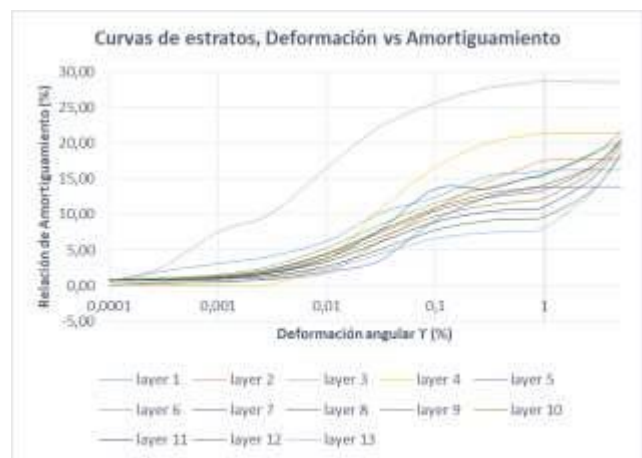


Figura 8. 13 curvas deformación angular vs Amortiguamiento.

2.4.2. Coeficientes k_o y OCR del subsuelo.

La columna de subsuelo a analizar está en total reposo o equilibrio estático y podemos emplear la ecuación (9), la cual está definida para los tipo de suelos granulares finos normalmente consolidados. [16]

$$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} \quad (9)$$

Donde:

k_o = coeficiente de presión de suelo en reposo

σ'_h = esfuerzo efectivo horizontal.

σ'_o = esfuerzo efectivo vertical.

El k_o también se puede calcular en función del índice de plasticidad, ecuación (10).

$$K_o = 0.44 + 0.42 \left[\frac{PI\%}{100} \right] \quad (10)$$

Se entiende que el OCR es la relación entre la presión de sobreconsolidación y la presión de sobrecarga efectiva. El radio de sobreconsolidación (OCR) está relacionado con la resistencia al corte de la paleta en el campo. A partir de la capa sexta hasta la trece de este ejemplo se sobreentiende que es una capa SM, y se asume que es una arena normalmente consolidada por ende el OCR=1. [16]

2.4.2. Espectro de respuesta NEC-SE-DS 2015.

Para formar un espectro a partir de la norma se considera los siguientes parámetros: un suelo tipo D, el factor Z depende para cada categoría de amenaza sísmica (Tabla 1), al estar en la sierra ecuatoriana (η es la razón de la aceleración espectral =2.48), con un incremento en el tiempo de 0.1 segundos hasta 6 segundos. [10]

2.4.3. Darendeli, reducción del módulo normalizado para las curvas de amortiguamiento.

Esta nomenclatura permite hacer el ajuste de las curvas relacionadas con G/G_{max} y el amortiguamiento que se genera. Las siguientes ecuaciones permiten hacer el cálculo de la dinámica no lineal del suelo, estas pueden ser empleadas en una amplia gama de suelos que va desde gravas bien graduadas (GW) hasta arcillas de alta plasticidad (CH). Las ecuaciones dependen de las curvas de tensión-deformación hiperbólica modificada, de donde se tiene las siguientes expresiones matemáticas, ecuaciones (11, 12, 13): [17]

$$D = F + D_{Masing} + D_{min} \quad (11)$$

$$F = b * \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^c \quad (12)$$

$$b = \theta_{11} + \theta_{12} * \ln(N) \quad (13)$$

Donde:

D: relación de amortiguamiento.

D_{Masing} : variación de la relación de amortiguamiento de Masing.

D_{min} : relación de amortiguamiento de pequeña deformación.

N: número de ciclos de carga.

ϕ_{11}, ϕ_{12} : constantes

c: constante con un valor de 0.1.

3. Resultados y Discusión.

Como resultado de la respuesta dinámica de sitio a continuación se presentan los espectros de respuesta para cada categoría de amenaza sísmica, obtenidos en Pro Shake, Deep Soil y además el espectro de respuesta correspondiente a la NEC 2015.

En los resultados se debe tener en cuenta que los espectros promedio encontrados por ambos métodos siempre están por debajo del espectro correspondiente a la NEC 2015.

3.1. Espectros PROSHAKE 2.0.

Categoría FRECUENTE.

Se aplicó 11 acelerogramas al subsuelo del sitio de estudio, obteniéndose como resultados los espectros de respuesta; en donde se puede evidenciar que las aceleraciones máximas son 1,28 g en el caso de RSN2423 y 1,17 g en el caso de RSN10703, las demás aceleraciones oscilan en el rango de 0,7 g hasta 1,1 g aproximadamente, como se muestra en la Figura 9, en este caso la aceleración máxima para la categoría frecuente de la NEC 2015 es 0.65 g.

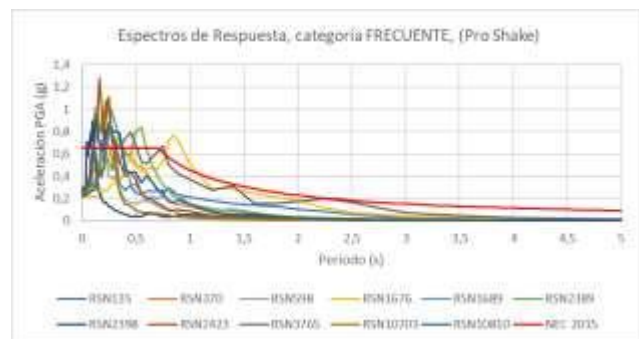


Figura 9. Espectros de respuesta categoría Frecuente.

Con estos 11 espectros de respuesta de categoría frecuente se considera un espectro medio estándar, así como su desviación estándar, obteniéndose un PGA de 0,68 g y 0,97 g respectivamente, como se muestra en la Figura 10. El espectro de la desviación estándar se encuentra aún más alejado del

espectro de la NEC 2015 en aproximadamente 0,35 g.

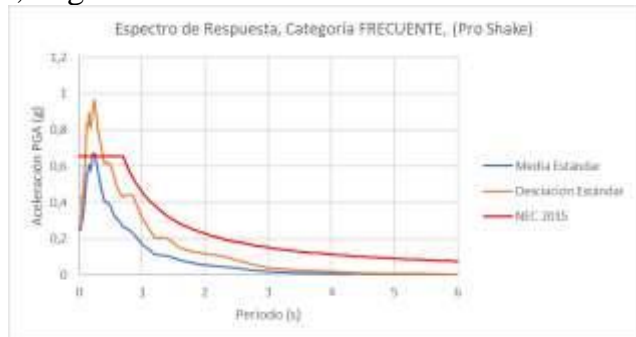


Figura 10. Espectros de respuesta, media y desviación estándar, Frecuentes.

Categoría OCASIONAL. Como resultados para esta categoría sísmica se obtuvo los Espectros de Respuesta mostrados en la Figura 11, en la cual se puede observar que las aceleraciones máximas oscilan entre 1,6 g a 1,7 g en el caso de RSN2423 y RSN10703 respectivamente y las demás están entre 0,8 g y 1,4 g aproximadamente, para este caso la aceleración máxima de la NEC 2015 es 1,04 g.



Figura 11. Espectros de respuesta categoría Ocasional.

Con los espectros de respuesta para esta categoría se obtiene un espectro medio estándar con PGA de 1,09 g, y una desviación estándar de 1,47 g, con esto se puede concluir que el espectro de la media estándar está muy cercano al espectro de la NEC 2015, por otro lado, la desviación estándar se encuentra por encima de ésta en un margen de 0,4 g aproximadamente, como se puede observar en la Figura 12.

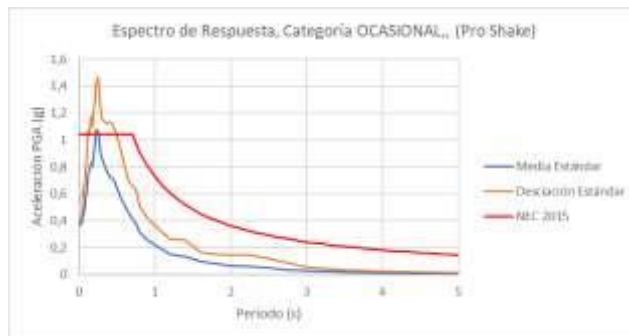


Figura 12. Espectros de respuesta, media y desviación estándar, Ocasional.

Categoría RARO. De igual manera, para esta categoría sísmica se ha utilizado los 11 espectros de respuesta correspondientes, de los cuales se obtiene las aceleraciones máximas expuestas en la Figura 13, en donde se observa que en el caso de RSN10703 y RSN2423, sus valores de aceleración PGA son 1,82 g y 1,83 g respectivamente. La aceleración máxima para la categoría raro en el espectro de la NEC 2015 es 1.19 g.



Figura 13. Espectros de respuesta categoría Raro.

En este caso la media estándar en PGA es de 1,172 g y la desviación estándar de 1,61 g teniendo una diferencia de 0,20 g comparada a la NEC 2015, esto se puede observar en la Figura 14.

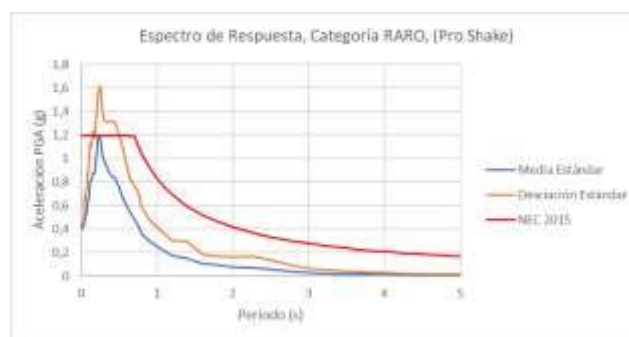


Figura 14. Espectros de respuesta, media y desviación estándar, Raro.

Categoría MUY RARO. Las aceleraciones máximas arrojadas por el programa para esta categoría sísmica se pueden observar en la Figura 15, en donde se puede analizar que existe una aceleración correspondiente a RSN2389 con un PGA de 3,5 g, seguida por una aceleración de 3 g correspondiente a RSN1676, los demás espectros correspondientes tienen aceleraciones cercanas a 2 g y 2,5 g. La aceleración máxima para el espectro de la categoría muy raro de la NEC 2015 es 2.14 g.



Figura 15. Espectros de respuesta categoría Muy Raro.

La media estándar para la categoría sísmica de muy raro es de 1,53 g y su desviación estándar es de 2,48 g como se puede observar en la Figura 16.

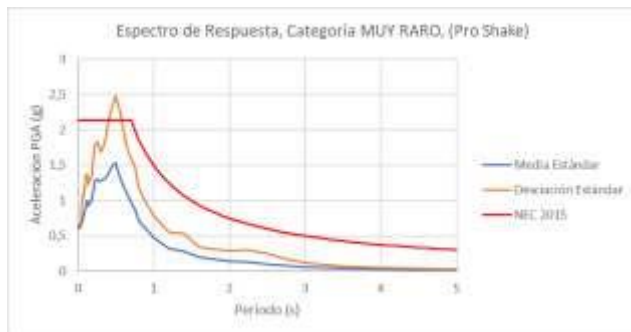


Figura 16. Espectros de respuesta, media y desviación estándar, Muy Raro.

3.2. Espectros de respuesta en DEEPSOIL V 7.0.

Categoría FRECUENTE. Los 11 acelerogramas aplicados a la columna de subsuelo del sitio de estudio, entregan como resultado los espectros de respuesta; en donde se evidencia que las aceleraciones máximas son iguales a 1 g para los

registros sísmicos de RSN10810 y RSN2423. Además, los espectros de RSN2389, RSN1676, RSN135 y RSN3765 poseen una aceleración de 0.8 g aproximadamente.

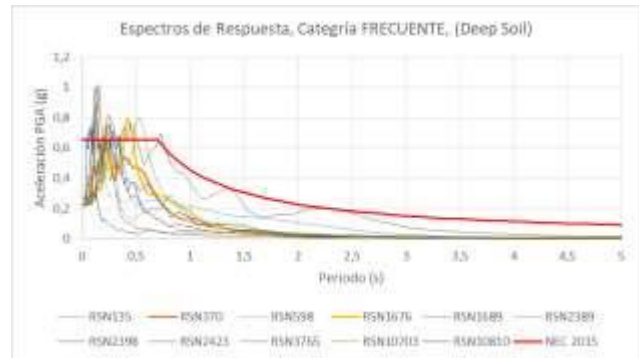


Figura 17. Espectros de respuesta categoría Frecuente.

De los 11 espectros de respuesta para la categoría frecuente se obtiene un espectro medio estándar y su respectiva desviación estándar, con PGA 0.57 g y 0.77 g respectivamente, como se muestra en la Figura 18. El espectro de respuesta de la desviación estándar tiene un mayor ajuste al espectro de la NEC 2015.



Figura 18. Espectros de respuesta, media y desviación estándar, Frecuentes.

Categoría OCASIONAL. Como resultado se tiene los espectros de respuesta; las aceleraciones máximas de los espectros igual a 1.57 g para el registro sísmico de RSN10810 y 1.62 g para RSN2423. Además, los espectros de RSN2389, RSN1676, RSN135 y RSN3765 poseen una aceleración cercana a 1.22 g.

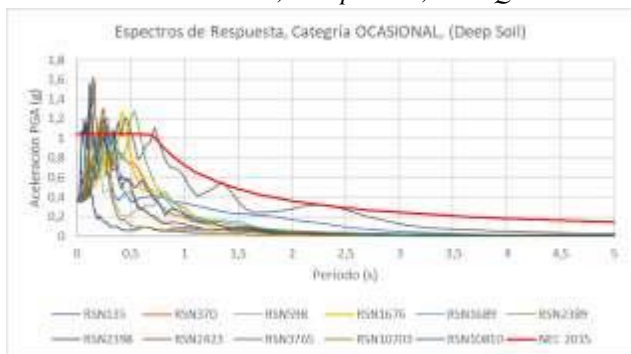


Figura 19. Espectros de respuesta categoría Ocasional.

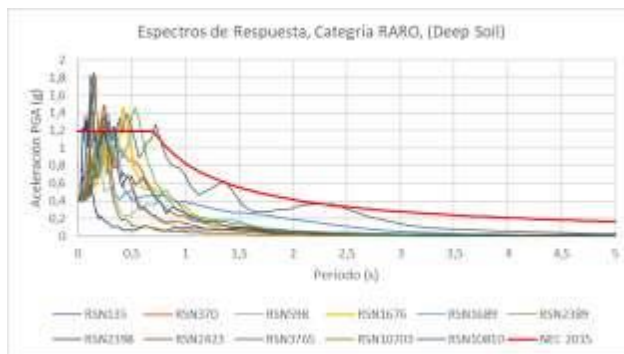


Figura 21. Espectros de respuesta categoría Raro.

De los espectros de respuesta de la categoría ocasional se obtiene un espectro medio estándar y su respectiva desviación estándar, con PGA 0.89 g y 1.2 g respectivamente, como se muestra en la siguiente Figura 20. El espectro de respuesta de la desviación estándar en la meseta es mayor que el de la norma; y en la pendiente de la curva (desde el periodo 0.76s hasta 5s), el espectro de la NEC, visualmente tiene mayor área bajo la curva y no presentan un ajuste cercano entre ambas curvas.



Figura 20. Espectros de respuesta, media y desviación estándar, Ocasional.

De los espectros de respuesta de la categoría raro se obtiene un espectro medio estándar y su respectiva desviación estándar, con PGA 1.02 g y 1.403 g respectivamente, como se muestra en la Figura 22. El espectro de respuesta de la desviación estándar en la meseta es mayor que el de la norma; y en la pendiente de la curva (desde el periodo 0.76s hasta 5s), el espectro de la NEC, visualmente tiene mayor área bajo la curva y no presentan un ajuste cercano entre ambas curvas.

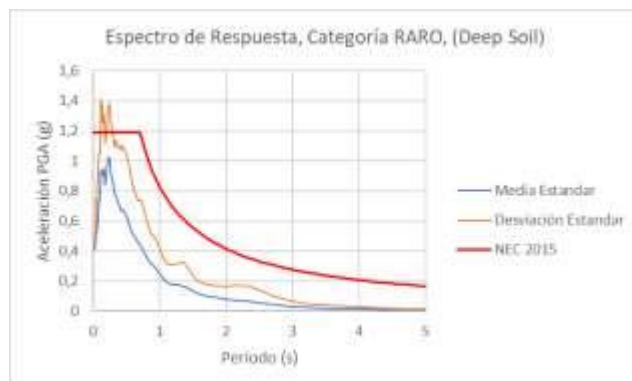


Figura 22. Espectros de respuesta, media y desviación estándar, Raros.

Categoría RARO. Como resultado se tiene los espectros de respuesta; las aceleraciones máximas de los espectros iguales a 1.8 g para los registros sísmicos de RSN10810 y RSN2423. Además, los espectros de RSN2389, RSN1676, RSN135 y RSN3765 poseen una aceleración cercana a 1.4 g.

Categoría Muy RARO. Como resultado se tiene los espectros de respuesta; las aceleraciones máximas de los espectros igual a 2.9 g para RSN 10810, y de 3.33 g para RSN2423. Además, los espectros de RSN2389, RSN1676, RSN135 y RSN3765 poseen una aceleración cercana a 2.5 g.

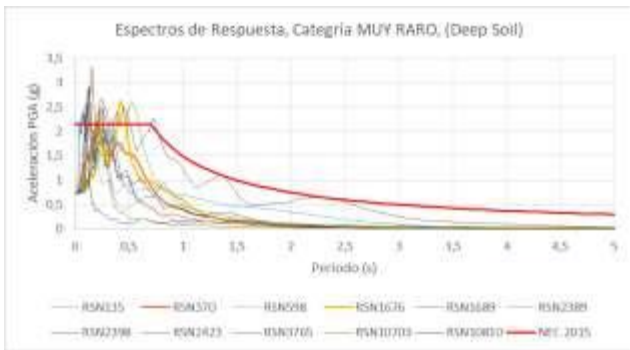


Figura 23. Espectros de respuesta categoría Ocasional.

De los espectros de respuesta de la categoría muy raro se obtiene un espectro medio estándar y su respectiva desviación estándar, con PGA 1.64 g y 2.42 g respectivamente, como se muestra en la Figura 24. El espectro de respuesta de la desviación estándar en la meseta es mayor que el de la norma; la pendiente de la curva (desde el periodo 0.76s hasta 5s), el espectro de la NEC, visualmente está por encima de ambas curvas.



Figura 24. Espectros de respuesta, media y desviación estándar, Muy Raros.

3.3 Resultados simplificados de cada método y categoría de amenaza sísmica.

De los datos obtenidos del análisis de respuesta dinámico de sitio con la aplicación de los dos programas, se elaboró el contenido de los PGA máximos correspondientes a la media y desviación estándar, con el propósito de comparar con el PGA de la norma ecuatoriana en función de su categoría y el método de análisis, como se puede visualizar en el Anexo 8.

Para comparar numéricamente se realizó la resta entre el método equivalente lineal y no lineal, también se hace la resta entre la desviación estándar de cada método con el PGA de la NEC 2015.

3.4 Determinación de Gmax en Pro Shake.

Se encontró el caso particular al momento de ingresar los datos del perfil geológico y geotécnico en el programa Pro Shake, observándose que este programa permite ingresar la velocidad de onda de corte (V_s) y automáticamente se genera el módulo cortante (G_{max}) o viceversa.

En los manuales no se encuentra descrita una fórmula exacta de su funcionamiento, por lo que se analizó para un suelo con las siguientes características: espesor de capa 1m, peso específico 18 kN/m^3 , $K_0=0.5$, $OCR=1$. Con estos datos se da valores a la velocidad y se obtiene G_{max} , con estos valores se construye la curva como se muestra en el Anexo 9, ingresando cada variable por separado se llega a la ecuación (14), descrita a continuación:

$$G_{max} = 0.0018V_s^2 + 9E^{-05}V_s - 0.0174 \quad (14)$$

4. Conclusiones.

A partir de los resultados obtenidos, ver Anexo 8, se concluye lo siguiente:

Para el análisis de respuesta dinámica de sitio, se asociaron las condiciones geológicas y geofísicas del lugar de estudio para obtener los 11 registros sísmicos de la base de datos del PEER, a partir de estos acelerogramas se realizó la corrección por línea base y ruido, así como también el respectivo escalamiento para las categorías de amenaza sísmica: frecuente, ocasional, raro y muy raro. Al no realizar este tipo de escalado, no se obtendrían los espectros de respuesta coherentes al estudio y difícilmente llegar a comparar con los espectros de respuesta registrados en la norma ecuatoriana.

Con los datos obtenidos de las propiedades geológicas y geotécnicas, se llegó a definir el perfil unidimensional del subsuelo sobre el cual esta cimentado el “Bloque G”, hasta una profundidad de 45 m, lo cual es aceptable para este tipo de análisis de respuesta dinámica de sitio.

En definitiva, el método equivalente lineal tiene un PGA mayor para los casos: frecuente, ocasional y raro; si se comparan con el método no lineal. Para el caso particular de la media estándar de la categoría muy raro se analizó que esta

afirmación cambia ya que el PGA para la categoría muy raro es de 1.53 g y del método no lineal es 1.64 g.

Sin duda alguna la NEC-SE-DS 2015, para este tipo de suelo y para las 4 categorías de amenaza sísmica, posee PGA menores que los dos métodos analizados, en función de los espectros de la desviación estándar.

Del análisis desarrollado en Pro Shake se puede decir que, los espectros de respuesta en base a la desviación estándar obtenidos son de mayor magnitud; como ejemplo podemos referirnos a la categoría raro, ya que éste es considerado para las diferentes evaluaciones y diseños en el tema de análisis de la interacción suelo-estructura. Este espectro tiene un PGA de 1.61 g y está por encima de la meseta de la NEC 2015 con un PGA de 0.43 g. En cambio, para este mismo caso mediante el método no lineal se tiene un PGA de 1.4 g y está por encima de la NEC 2015 solamente con 0.2 1g.

Resumiendo, el análisis no lineal desarrollado en Deep Soil, se acerca más a los espectros definidos por la norma. También se ha podido evidenciar que los espectros de la NEC 2015 se ajustan a la desviación estándar.

En conclusión, en base al análisis de respuesta dinámica de sitio por el método no lineal realizado en Deep Soil, se resume que los espectros de respuesta correspondientes a las desviaciones estándares están por encima del espectro de la norma, además, se ajusta más en la meseta y en la curva al compararlos con los espectros de la norma ecuatoriana NEC-SE-DS 2015.

Teniendo en cuenta el objetivo de la norma ecuatoriana, el cual es salvaguardar la vida de los ocupantes y evitar el colapso inmediato de las estructuras ante terremotos, se recomienda el uso de los espectros de respuesta del análisis NO LINEAL, determinados en esta investigación, ya que al tener PGA mayores que los de la norma, se estaría adoptando un criterio conservador al momento de realizar futuras investigaciones del análisis de la interacción suelo-estructura en la zona de estudio.

En función de los datos de entrada requeridos por los programas, se considera que la utilización

del programa Pro Shake es más intuitiva que la utilización del software Deep Soil, en razón de que no se necesita de los datos de Gmax del suelo, que en ocasiones no se encuentran disponibles.

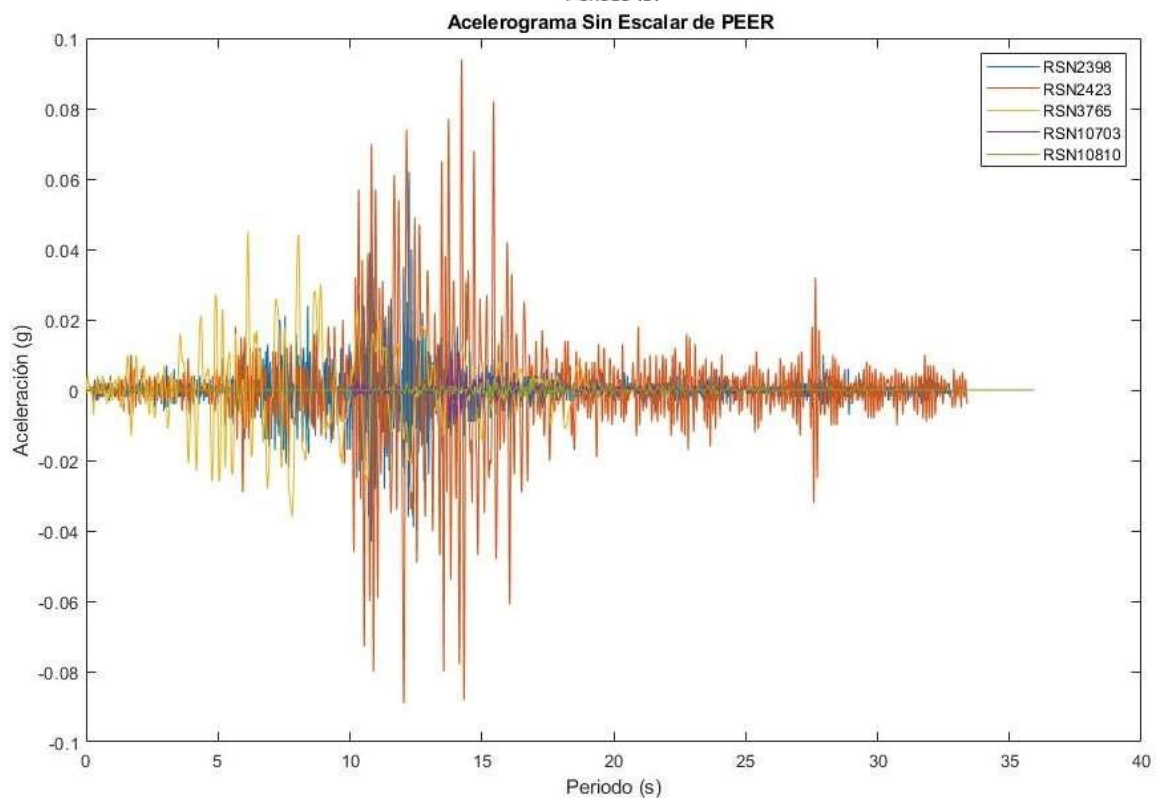
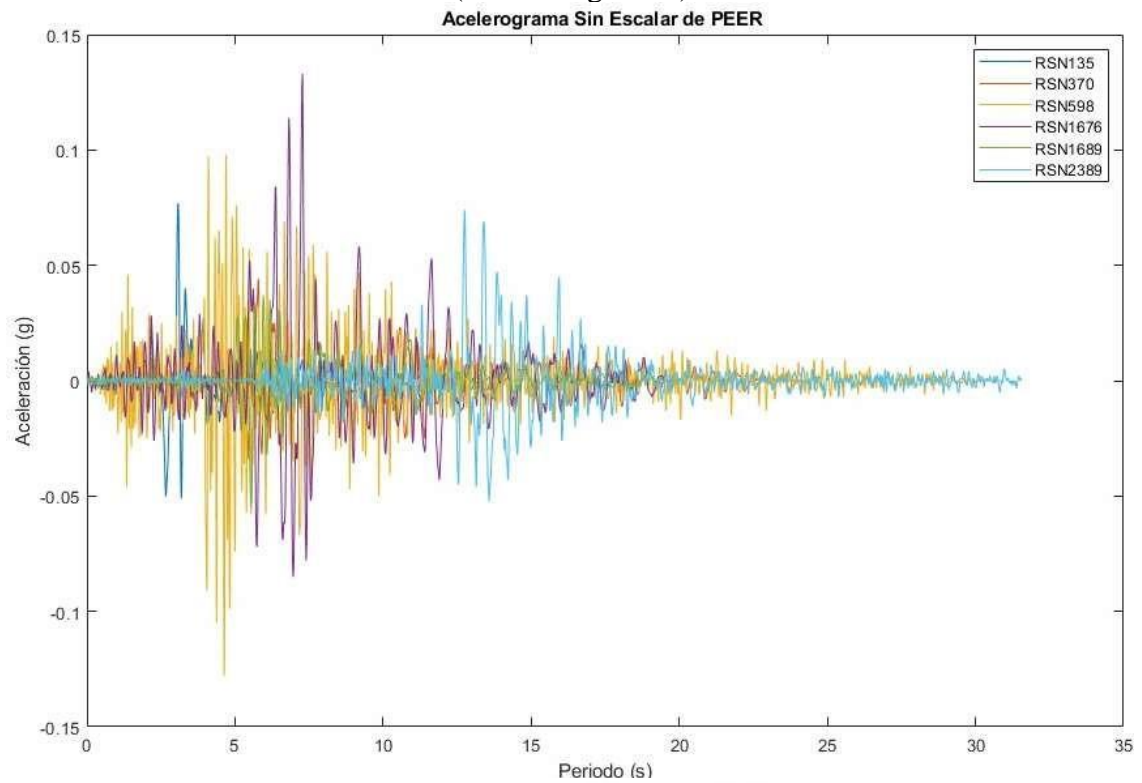
Referencias

- [1] GeoMotions, “Programas de análisis de respuesta de sitio lineal equivalente”, 2023 [En línea]. Disponible en: <http://www.proshake.com/PS2.0Demonstration.html>
- [2] SeismoSignal, “Earthquake software for signal processing of strong – motion data”, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://seismosoft.com/products/seismosignal/>
- [3] ProShake. “Ground Response Analysis Program”, (2017), [En Línea], Disponible en: http://www.proshake.com/proshake_2.0/User%20Manual
- [4] Deepsoil V.7.0, Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana- Champaign, 2020.
- [5] J. Valverde, J. Fernández, E. Jiménez, T. Vaca y F. Alarcón, «Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la ciudad de Quito,» Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, Quito, 2002, pp. 147.
- [6] ASCE/SEI 41-17. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, 2017, ISBN 9780784414859, pp 412.
- [7] H. Parra, M. B. Benito y J. M. Gaspar Escribano, «Seismic hazard assessment in continental Ecuador,» Springer Science+ Business, 2016, pp 09, pp 23. https://www.researchgate.net/publication/301609366_Seismic_hazard_assessment_in_continental_Ecuador#fullTextFileContent
- [8] Kramer, Steven Lawrence Geotechnical earthquake engineering, Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, ISBN 013-374943-6, 1996, pp 68.

- [9] PEER, Pacific earthquake engineering research center, 2023 [En línea]. Disponible en: <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- [10] NEC SE DS, Norma ecuatoriana de la construcción. Carga sísmica- diseño sismo resistente, 2015 [En línea]. Disponible en: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/04/MTOP_NEC-SE-DS.pdf
- [11] Phillips, C. and Hashash, Y. (2009) “Damping formulation for non-linear 1D site response analyses” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 29, pp. 1143–1158.
- [12] A. López and K. Mestanza, “Análisis y caracterización dinámica de suelos mediante el método combinado de columna resorte y corte torsional cíclico, para el estudio de la respuesta de sitio del Bloque G, ubicado en la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito- Campus Sur”, Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniero civil, Universidad politécnica Salesiana, Quito- Ecuador, 2022
- [13] K. Jaramillo and Y. Naranjo, “Correlaciones múltiples entre propiedades geo mecánicas, velocidades de onda de compresión (V_p), corte (V_s) y datos de clasificación SUCS en el suelo de cimentación del Bloque G de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito- Campus Sur”, Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniero civil, Universidad politécnica Salesiana, Quito- Ecuador, 2021.
- [14] Proyecto Metro Quito, Evaluación geotécnica de detalle Metro de Quito, marzo 2012.
- [15] A. Leoni, “Los suelos, grado de sobre consolidación”, (2021), [En Línea], Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3363/360676.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- [16] M. Braja and K. Sobhan, “Principles of geotechnical engineering”, Stanford USA, ISBN-13: 9788-1-133-108867-2, 2014, pp 494 - 495.
- [17] Darendeli, M. B. (2001). Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas.

Anexos

Anexo 1.- Registros sísmicos obtenidos de la PEER SIN ESCALAR, (11 acelerogramas).

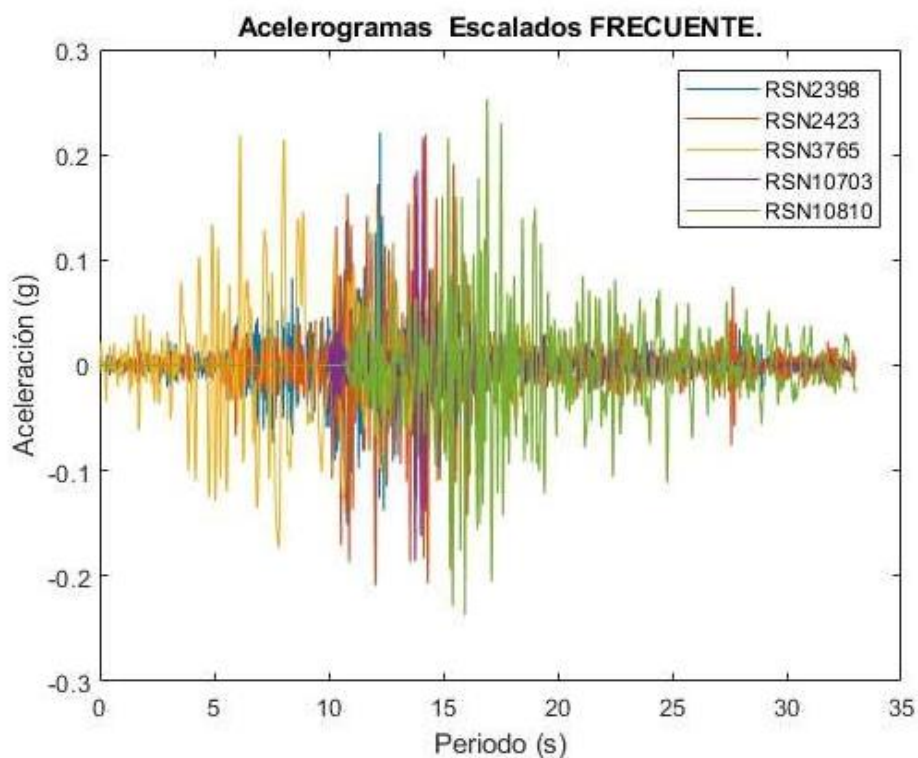
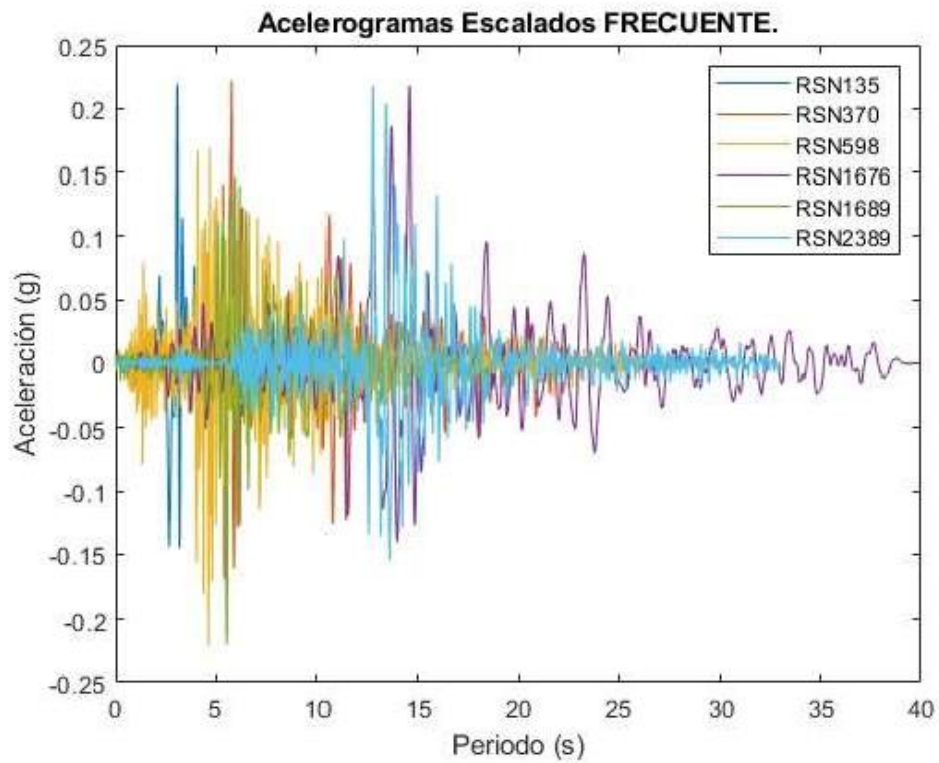


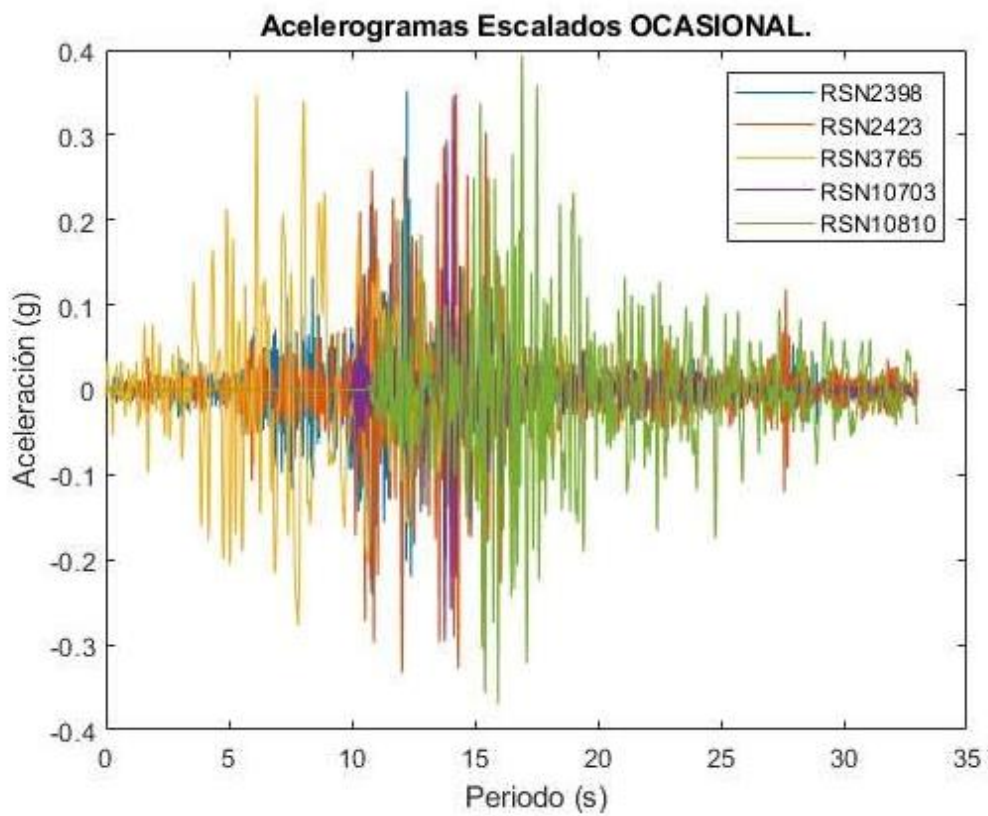
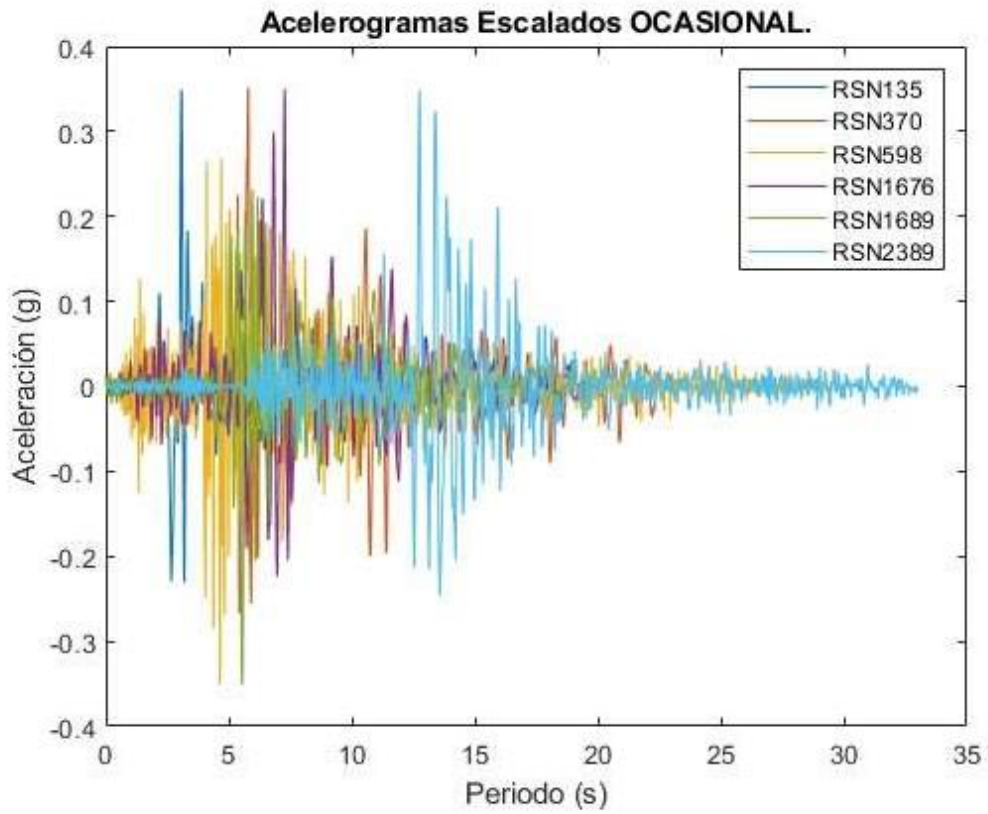
Anexo 2.- Factores de Escala; aceleraciones máximas de cada acelerograma obtenido de PEER y su respectivo factor de escala para cada categoría de amenaza sísmica.

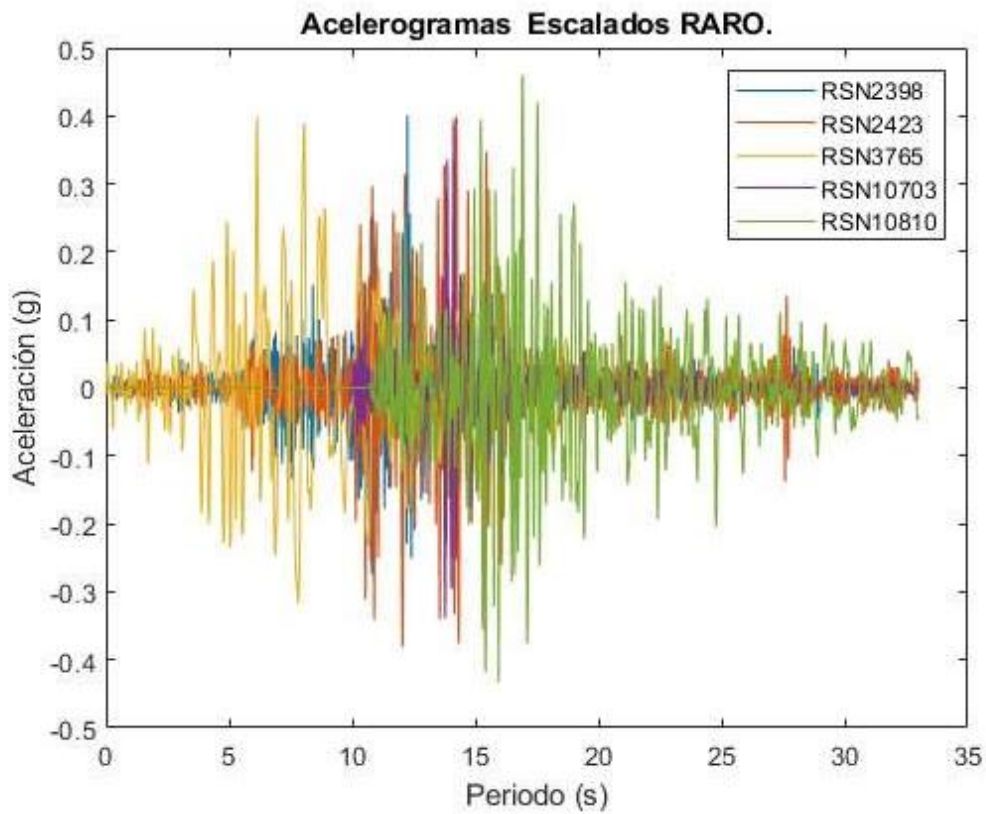
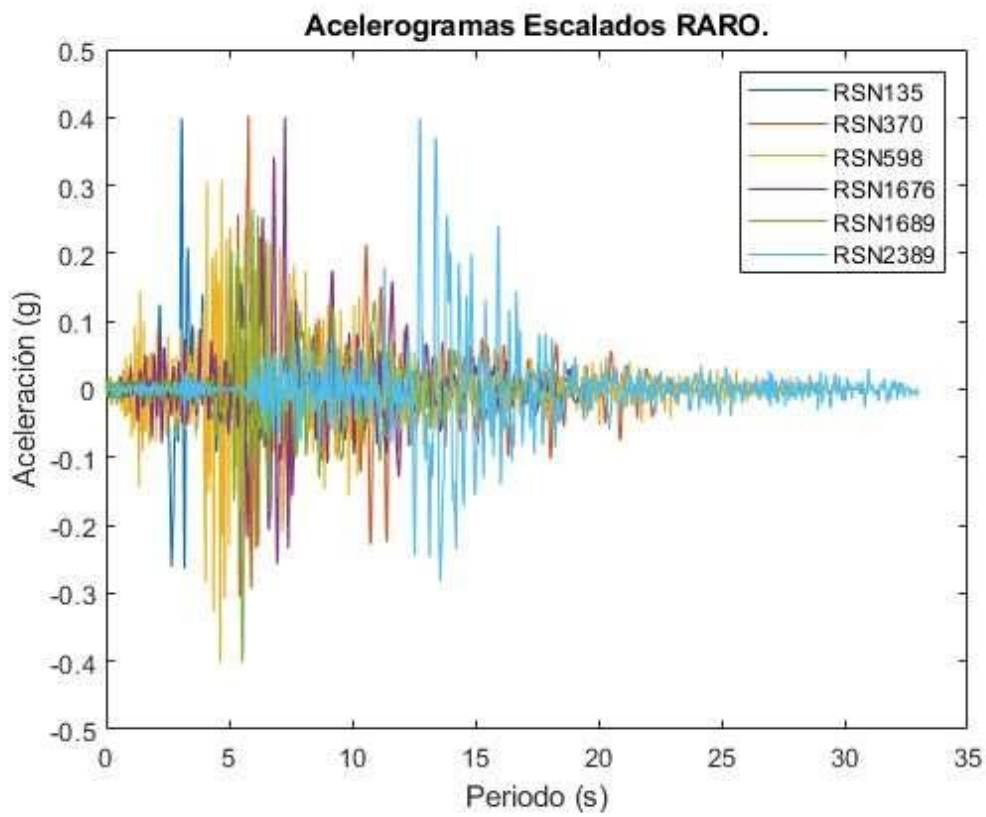
Estación	Aceleración max sismo (g)	Factor z por categoría (g)			
		0,22	0,35	0,4	0,72
		Frecuente	Ocasional	Raro	Muy Raro
RSN135	0,077	2,86	4,55	5,19	9,35
RSN370	0,044	5,00	7,95	9,09	16,36
RSN598	0,128	1,72	2,73	3,13	5,63
RSN1676	0,133	1,65	2,63	3,01	5,41
RSN1689	0,055	4,00	6,36	7,27	13,09
RSN2389	0,074	2,97	4,73	5,41	9,73
RSN2398	0,062	3,55	5,65	6,45	11,61
RSN2423	0,094	2,34	3,72	4,26	7,66
RSN3765	0,045	4,89	7,78	8,89	16,00
RSN10703	0,011	20,00	31,82	36,36	65,45
RSN10810	0,003	73,33	116,67	133,33	240,00

Anexo 3.- Registros sísmicos obtenidos de la PEER ESCALADOS para cada categoría de amenaza sísmica.

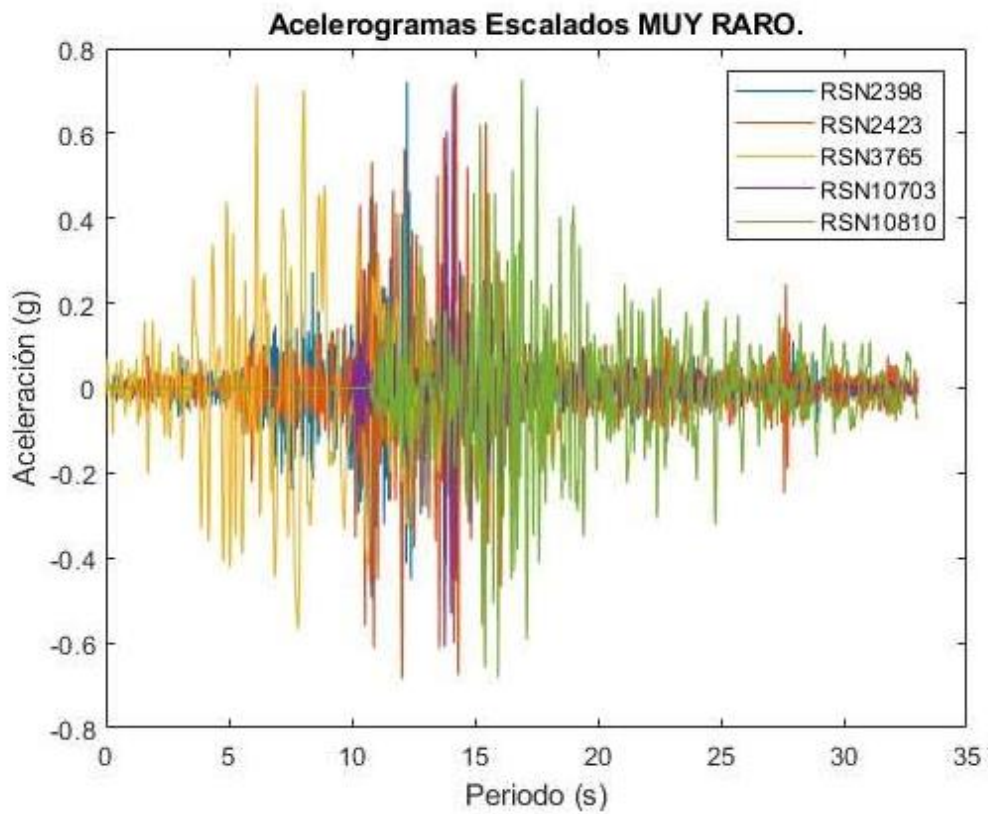
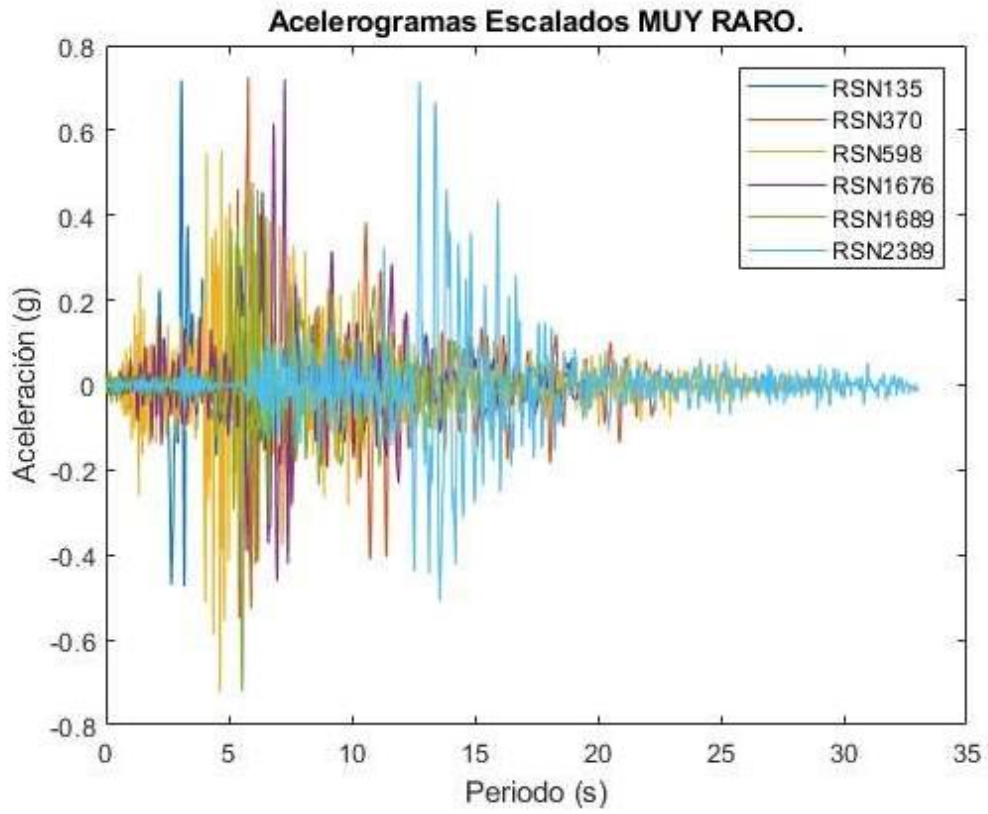
CATEGORÍA FRECUENTE.







CATEGORÍA MUY RARO



Anexo 4.- Velocidad de onda de corte (Vs), empleada hasta la capa 11



Figura 7. Velocidad de onda de corte UPS SUR, “Bloque G”. [13]

Anexo 5.- Perfil unidimensional de la columna de subsuelo sobre el cual está cimentado el “Bloque G”- UPS. Máxima profundidad 45 metros. Datos de entrada para los dos análisis.

Bibliografía	Nº	P.inicia l (m)	P.fin (m)	Nº SPT	SUC S	IP %	ko	γm (kN/m ³)	G max (MPa)	OCR	Vs (m/s)
López y Mestanza	I	0	2,2	9	OL	9,36	0,48	16,42	5,89	-	224
	II	2,2	3,5	12	CL	18	0,52	18,74	12,62	-	225,82
	III	3,5	5	24	ML-CL	6,89	0,47	18,12	21,84	-	234,9
	IV	5	9	66	CL	3,22	0,3	20,78	46,58	-	295,19
	V	9	10	71	SM	3,92	0,29	21,29	61,28	-	338,05
Jaramillo y Naranjo	VI	10	12,79	75	SM	5,91	0,46	18	49,68	1	372,5
	VII	12,79	15,38	67	SM	4,07	0,46	18	68,63		391,8
	VIII	15,38	18,17	R	SM	0	0,44	18	101,31		412,7
	IX	18,17	21,15	R	SM	0	0,44	18	117,95		428,3
	X	21,15	24,33	R	SM	0	0,44	18	145,32		432,78
	XI	24,33	27,7	R	SM	0	0,44	18	173,93		426,89
Metro Quito, E. Morán Valverde	XII (SMQ 7)	27,7	35	R	SM	0	0,44	18	261,58	445,4	
	XIII (SMQ 6)	35	45	R	SM	0	0,44	18	303,41	434,9	

Anexo 6.- Perfil unidimensional del subsuelo ingresado a PRO SHAKE, sobre el cual está cimentado el “Bloque G”- UPS.

Profile 1 - Layer Data												
Layer Number	Material Name	Thickness	Unit Weight	Vss	G Max	Soil Model	PI (%)	K ₀	OCR	N. of Cycles	Freq (Hz) or D50 (m m)	Cu
1	OL	2.20	16.42	224.00	25.61	Darendeli (2001)	9.16	0.48	1.00	1.00	1.00	-
2	CL	2.98	18.24	225.82	28.91	Darendeli (2001)	18.00	0.52	1.00	1.00	1.00	-
3	ML-CL	1.50	18.12	234.90	31.08	Darendeli (2001)	6.89	0.47	1.00	1.00	1.00	-
4	CL	4.00	20.78	295.19	56.28	Darendeli (2001)	3.22	0.30	1.00	1.00	1.00	-
5	SM	1.00	21.29	338.05	75.62	Darendeli (2001)	3.92	0.29	1.00	1.00	1.00	-
6	SM	2.79	18.00	372.50	77.63	Darendeli (2001)	5.91	0.46	1.00	1.00	1.00	-
7	SM	2.59	18.00	391.80	85.88	Darendeli (2001)	4.07	0.46	1.00	1.00	1.00	-
8	SM	2.79	18.00	412.70	95.29	Darendeli (2001)	0.00	0.44	1.00	1.00	1.00	-
9	SM	2.98	18.00	428.30	102.63	Darendeli (2001)	0.00	0.	1.00	1.00	1.00	-

								4 4				
10	SM	3.1 8	18. 00	432 .78	104 .79	Darende li (2001)	0.00	0 . 4 4	1.00	1. 00	1.00	-
11	SM	3.3 7	18. 00	426 .89	101 .95	Darende li (2001)	0.00	0 . 4 4	1.00	1. 00	1.00	-
12	SM	3.3 7	18. 00	445 .40	110 .99	Darende li (2001)	0.00	0 . 4 4	1.00	1. 00	1.00	-
13	Roca	10. 00	18. 00	434 .90	105 .81	Darende li (2001)	0.00	0 . 4 4	1.00	1. 00	1.00	-

Anexo 7.- Tabla para graficar los espectros de respuesta de cada categoría de amenaza sísmico, en donde se tiene la media y desviación estándar.

Periodo (sec)	FRECUENTE		OCASIONAL		RARO		MUY RARO	
	Media	Desviación E.	Media	Desviación E.	Media	Desviación E.	Media	Desviación E.
0,0100	0,2243	0,2342	0,3571	0,3705	0,4088	0,4268	0,7261	0,7354
0,0106	0,2246	0,2346	0,3572	0,3707	0,4090	0,4271	0,7264	0,7360
0,0113	0,2246	0,2346	0,3574	0,3711	0,4095	0,4276	0,7265	0,7369
0,0120	0,2252	0,2353	0,3576	0,3713	0,4099	0,4281	0,7276	0,7389
0,0128	0,2249	0,2348	0,3574	0,3706	0,4095	0,4273	0,7276	0,7370
0,0136	0,2251	0,2351	0,3576	0,3710	0,4096	0,4277	0,7280	0,7379
0,0145	0,2252	0,2353	0,3578	0,3715	0,4101	0,4283	0,7291	0,7399
0,0155	0,2254	0,2355	0,3579	0,3719	0,4104	0,4287	0,7293	0,7415
0,0164	0,2256	0,2359	0,3585	0,3729	0,4109	0,4296	0,7307	0,7447
0,0175	0,2261	0,2366	0,3595	0,3741	0,4119	0,4307	0,7316	0,7471
0,0186	0,2262	0,2371	0,3600	0,3751	0,4124	0,4320	0,7328	0,7510
0,0198	0,2269	0,2382	0,3609	0,3764	0,4137	0,4337	0,7346	0,7551
0,0211	0,2270	0,2391	0,3608	0,3780	0,4139	0,4353	0,7355	0,7594
0,0224	0,2280	0,2407	0,3632	0,3813	0,4164	0,4385	0,7387	0,7662
0,0239	0,2288	0,2424	0,3643	0,3838	0,4177	0,4416	0,7406	0,7726
0,0254	0,2299	0,2453	0,3653	0,3880	0,4186	0,4460	0,7437	0,7830
0,0270	0,2315	0,2493	0,3674	0,3938	0,4217	0,4537	0,7488	0,7975
0,0288	0,2338	0,2552	0,3714	0,4040	0,4259	0,4646	0,7563	0,8198
0,0306	0,2374	0,2663	0,3774	0,4226	0,4328	0,4854	0,7683	0,8571
0,0326	0,2414	0,2781	0,3839	0,4414	0,4400	0,5068	0,7813	0,8966
0,0347	0,2470	0,2969	0,3928	0,4707	0,4499	0,5398	0,7993	0,9574
0,0369	0,2506	0,3077	0,3987	0,4889	0,4567	0,5600	0,8114	0,9938

Artículo Académico / Academic Paper

0,0392	0,2505	0,3029	0,3988	0,4819	0,4569	0,5517	0,8117	0,9805
0,0418	0,2602	0,3378	0,4140	0,5370	0,4745	0,6148	0,8434	1,0979
0,0444	0,2769	0,3901	0,4415	0,6209	0,5058	0,7104	0,8992	1,2693
0,0473	0,2875	0,4136	0,4573	0,6575	0,5240	0,7525	0,9309	1,3410
0,0503	0,2882	0,4102	0,4586	0,6512	0,5256	0,7461	0,9323	1,3224
0,0535	0,2853	0,3885	0,4542	0,6173	0,5206	0,7075	0,9240	1,2542
0,0570	0,2870	0,3916	0,4570	0,6224	0,5242	0,7135	0,9299	1,2647
0,0606	0,3061	0,4387	0,4869	0,6971	0,5585	0,7989	0,9905	1,4184
0,0645	0,3152	0,4487	0,5008	0,7125	0,5742	0,8165	1,0187	1,4480
0,0687	0,3261	0,4755	0,5191	0,7560	0,5950	0,8657	1,0553	1,5365
0,0731	0,3319	0,4713	0,5281	0,7477	0,6057	0,8583	1,0710	1,5097
0,0777	0,3429	0,4945	0,5452	0,7836	0,6254	0,9004	1,1057	1,5821
0,0827	0,3679	0,5294	0,5842	0,8392	0,6697	0,9638	1,1852	1,6954
0,0880	0,3992	0,5813	0,6334	0,9199	0,7267	1,0582	1,2825	1,8446
0,0937	0,4042	0,5689	0,6412	0,8998	0,7355	1,0357	1,2989	1,8036
0,0997	0,4207	0,5888	0,6691	0,9334	0,7674	1,0724	1,3571	1,8819
0,1061	0,4465	0,6375	0,7077	1,0080	0,8121	1,1600	1,4328	2,0162
0,1129	0,4803	0,6817	0,7623	1,0778	0,8747	1,2416	1,5421	2,1492
0,1201	0,5136	0,7702	0,8150	1,2169	0,9359	1,4032	1,6467	2,4219
0,1278	0,5066	0,7608	0,8051	1,2027	0,9244	1,3866	1,6263	2,3917
0,1360	0,5061	0,7501	0,8024	1,1860	0,9215	1,3668	1,6221	2,3625
0,1447	0,4971	0,6872	0,7907	1,0900	0,9068	1,2521	1,6057	2,2035
0,1540	0,5213	0,7229	0,8284	1,1473	0,9498	1,3160	1,6868	2,3415
0,1639	0,5031	0,7046	0,7983	1,1174	0,9157	1,2829	1,6229	2,2697
0,1744	0,4763	0,6392	0,7564	1,0144	0,8672	1,1636	1,5402	2,0695
0,1856	0,4614	0,6128	0,7327	0,9728	0,8398	1,1150	1,4932	1,9895
0,1975	0,4796	0,6307	0,7625	1,0017	0,8743	1,1492	1,5523	2,0402
0,2101	0,5139	0,6621	0,8176	1,0529	0,9373	1,2075	1,6650	2,1465
0,2236	0,5505	0,7183	0,8758	1,1431	1,0037	1,3101	1,7837	2,3326
0,2379	0,5641	0,7580	0,8974	1,2054	1,0284	1,3815	1,8265	2,4570
0,2532	0,5403	0,7388	0,8585	1,1731	0,9838	1,3447	1,7465	2,3873
0,2694	0,5000	0,6869	0,7939	1,0904	0,9097	1,2492	1,6157	2,2211
0,2867	0,4901	0,6762	0,7776	1,0716	0,8916	1,2306	1,5780	2,1613
0,3051	0,4618	0,6303	0,7341	1,0012	0,8414	1,1482	1,4918	2,0298
0,3247	0,4308	0,6025	0,6844	0,9563	0,7847	1,0979	1,3892	1,9340
0,3455	0,4240	0,6234	0,6730	0,9881	0,7721	1,1356	1,3636	1,9879
0,3676	0,4014	0,5963	0,6379	0,9481	0,7312	1,0864	1,2985	1,9345
0,3912	0,3854	0,6038	0,6129	0,9616	0,7022	1,1008	1,2497	1,9693
0,4163	0,3664	0,5903	0,5825	0,9398	0,6674	1,0764	1,1859	1,9207
0,4430	0,3724	0,6056	0,5921	0,9645	0,6785	1,1044	1,2069	1,9741
0,4714	0,3628	0,5848	0,5766	0,9308	0,6608	1,0657	1,1751	1,9037
0,5016	0,3518	0,5769	0,5592	0,9178	0,6408	1,0509	1,1390	1,8768
0,5338	0,3248	0,5448	0,5163	0,8667	0,5915	0,9921	1,0525	1,7743
0,5680	0,2952	0,4889	0,4690	0,7775	0,5375	0,8906	0,9546	1,5881
0,6044	0,2795	0,4487	0,4439	0,7127	0,5088	0,8171	0,9019	1,4509
0,6431	0,2643	0,4204	0,4199	0,6679	0,4813	0,7654	0,8541	1,3620
0,6844	0,2465	0,4015	0,3917	0,6382	0,4489	0,7308	0,7973	1,3036

Troya y Viana / Comparación De La Respuesta Dinámica De Sitio Usando Los Modelos: Equivalente Lineal En Pro-Shake 2.0 Y No Lineal En Deep Soil V 7.0, Aplicado En El Subsuelo Del Edificio "Bloque G" De La Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur, Sede Quito

0,7283	0,2348	0,4067	0,3733	0,6471	0,4275	0,7403	0,7607	1,3242
0,7750	0,2142	0,3632	0,3406	0,5779	0,3901	0,6613	0,6944	1,1833
0,8246	0,1872	0,3159	0,2976	0,5023	0,3407	0,5745	0,6082	1,0313
0,8775	0,1725	0,2829	0,2741	0,4497	0,3141	0,5148	0,5586	0,9199
0,9338	0,1572	0,2656	0,2496	0,4221	0,2860	0,4831	0,5085	0,8634
0,9937	0,1412	0,2386	0,2244	0,3793	0,2570	0,4339	0,4571	0,7758
1,0574	0,1172	0,1954	0,1862	0,3106	0,2132	0,3553	0,3792	0,6351
1,1252	0,1030	0,1703	0,1636	0,2707	0,1875	0,3099	0,3335	0,5538
1,1973	0,0970	0,1698	0,1541	0,2698	0,1765	0,3087	0,3142	0,5525
1,2741	0,0963	0,1751	0,1529	0,2783	0,1752	0,3184	0,3118	0,5699
1,3558	0,0924	0,1803	0,1468	0,2866	0,1680	0,3278	0,3000	0,5884
1,4427	0,0817	0,1532	0,1298	0,2438	0,1486	0,2786	0,2654	0,5002
1,5352	0,0692	0,1202	0,1099	0,1911	0,1258	0,2185	0,2243	0,3918
1,6336	0,0593	0,1021	0,0942	0,1623	0,1079	0,1856	0,1920	0,3323
1,7384	0,0537	0,0969	0,0853	0,1542	0,0977	0,1763	0,1742	0,3162
1,8498	0,0495	0,0953	0,0787	0,1515	0,0902	0,1732	0,1610	0,3109
1,9685	0,0434	0,0904	0,0690	0,1438	0,0790	0,1644	0,1412	0,2954
2,0947	0,0418	0,0955	0,0664	0,1519	0,0761	0,1736	0,1360	0,3118
2,2290	0,0392	0,0940	0,0624	0,1494	0,0714	0,1708	0,1276	0,3068
2,3719	0,0367	0,0909	0,0583	0,1444	0,0667	0,1650	0,1194	0,2966
2,5240	0,0307	0,0752	0,0487	0,1195	0,0557	0,1365	0,0999	0,2455
2,6858	0,0247	0,0586	0,0392	0,0932	0,0448	0,1065	0,0804	0,1914
2,8580	0,0199	0,0463	0,0315	0,0735	0,0361	0,0840	0,0647	0,1512
3,0413	0,0158	0,0347	0,0251	0,0552	0,0287	0,0631	0,0516	0,1134
3,2363	0,0128	0,0273	0,0204	0,0435	0,0234	0,0497	0,0418	0,0893
3,4438	0,0108	0,0227	0,0172	0,0362	0,0197	0,0413	0,0352	0,0741
3,6646	0,0092	0,0193	0,0146	0,0307	0,0167	0,0351	0,0298	0,0629
3,8995	0,0077	0,0161	0,0123	0,0256	0,0141	0,0293	0,0251	0,0524
4,1496	0,0065	0,0132	0,0103	0,0211	0,0119	0,0241	0,0211	0,0432
4,4156	0,0055	0,0108	0,0086	0,0172	0,0100	0,0197	0,0177	0,0353
4,6987	0,0046	0,0088	0,0073	0,0141	0,0084	0,0161	0,0149	0,0289
5,0000	0,0039	0,0074	0,0062	0,0119	0,0071	0,0136	0,0127	0,0242
5,3206	0,0033	0,0062	0,0053	0,0099	0,0061	0,0113	0,0108	0,0202
5,6617	0,0028	0,0052	0,0045	0,0084	0,0052	0,0095	0,0093	0,0171
6,0248	0,0025	0,0046	0,0040	0,0074	0,0045	0,0084	0,0081	0,0152
6,4110	0,0022	0,0040	0,0034	0,0064	0,0039	0,0073	0,0070	0,0132
6,8221	0,0019	0,0035	0,0030	0,0056	0,0034	0,0063	0,0061	0,0113
7,2595	0,0016	0,0030	0,0026	0,0048	0,0029	0,0054	0,0052	0,0097
7,7250	0,0014	0,0026	0,0022	0,0041	0,0025	0,0047	0,0045	0,0084
8,2203	0,0012	0,0022	0,0019	0,0035	0,0022	0,0040	0,0039	0,0072
8,7474	0,0011	0,0019	0,0017	0,0030	0,0019	0,0035	0,0034	0,0062
9,3082	0,0009	0,0017	0,0015	0,0026	0,0017	0,0030	0,0030	0,0053
9,9051	0,0008	0,0014	0,0013	0,0023	0,0015	0,0026	0,0026	0,0046
10,0000	0,0008	0,0014	0,0012	0,0022	0,0014	0,0025	0,0025	0,0045

Anexo 8.- Tabla de resultados para poder comparar el método equivalente lineal y no lineal dependiendo de la categoría de amenaza sísmica.

Método	PRO-SHAKE		DEEP SOIL		NEC-SE-DS 2015 (PGA)	Diferencia entre métodos (PGA)		En función NEC 2015 (PGA)	
	Equi. lineal (PGA)		No Lineal (PGA)					PRO-SHAKE	DEEP SOIL
	Media E.	Desviación E.	Media E.	Desviación E.		Media E.	Desviación E.	Desviación E.	Desviación E.
	A	B	C	D		E	(A-C)	(B-D)	(B-E)
Frecuente	0,673	0,965	0,57	0,77	0,65	0,103	0,195	0,315	0,12
Ocasional	1,06	1,466	0,89	1,2	1,04	0,17	0,266	0,426	0,16
Raro	1,172	1,618	1,02	1,403	1,19	0,152	0,215	0,428	0,213
Muy raro	1,53	2,48	1,64	2,42	2,14	-0,11	0,06	0,34	0,28

Anexo 9.- Ecuación definida en función de la velocidad de onda de corte y Gmax, para el análisis en Pro Shake.

