



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Comparación de dos programas en el análisis de respuesta
de sitio en depósitos con suelos blandos.**

AUTOR:

Caisapanta Moncayo, Jose Luis

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Luque Nuques, Roberto Xavier, PhD

Guayaquil, Ecuador

10 de septiembre del 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Caisapanta Moncayo, Jose Luis** como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

f. _____

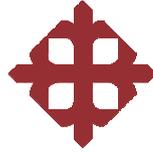
Ing. Luque Nuques, Roberto Xavier, PhD

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, MSc

Guayaquil, a los 10 días del mes de septiembre del año 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Caisapanta Moncayo, Jose Luis**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Comparación de dos programas en el análisis de respuesta de sitio en depósitos con suelos blandos**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 10 días del mes de septiembre del año 2019

EL AUTOR

f. _____
Caisapanta Moncayo, Jose Luis



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

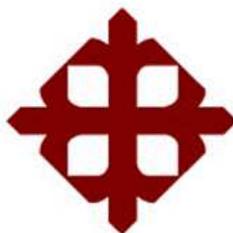
Yo, **Caisapanta Moncayo, Jose Luis**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Comparación de dos programas en el análisis de respuesta de sitio en depósitos con suelos blandos**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 10 días del mes de septiembre del año 2019

EL AUTOR:

f. _____
Caisapanta Moncayo, Jose Luis



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

f. _____

Ing. Roberto Xavier Luque Nuques, PhD
TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Stefany Esther Alcívar Bastidas, MSc
DIRECTORA DE CARRERA

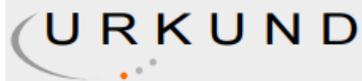
f. _____

Ing. Claudio Olavide Luque Rivas, MSc
COORDINADOR DEL ÁREA

f. _____

Ing. Guillermo Alfonso Ponce Vásquez, MSc
OPONENTE

REPORTE DE URKUND



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Caisapanta_Jose_Final.doc (D55248914)
Submitted: 9/3/2019 11:42:00 PM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 1 %

Sources included in the report:

Zhigue Zhigue Luis Oswaldo.pdf (D21529041)
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/32391/1/>
AVILES_BALON_MARIA_JOSE_TRABAJO_TITULACION_ESTRUCTURA_ENERO_2018.pdf

Instances where selected sources appear:

2

AGRADECIMIENTOS

Profundamente agradecido con mis padres; a Marlene Moncayo por serlo todo en mi vida y a José Luis Caisapanta por siempre creer en mí.

A mi tutor el Ing. Roberto Luque por ser guía durante este trabajo y por todas las oportunidades brindadas.

Al Ing. Guillermo Ponce por todos los consejos y propuestas dadas durante el proceso de investigación.

Al Ing. Jaime Hernández cuyas enseñanzas sacaron lo mejor de mí durante el resto de la carrera.

A la Ing. Génesis Figueroa por todo su apoyo y enseñanzas brindadas durante estos últimos años.

Muy agradecido con las personas que conforman el departamento de diseño de GeoSísmica especialmente a los ingenieros de la sala de descanso.

Agradezco ínfimamente a mis mejores amigos del colegio que a pesar de no verlos con la misma frecuencia jamás dejaron de brindarme su apoyo.

Y finalmente a cada una de las personas que de alguna manera me brindaron su apoyo para culminar este trabajo, en especial a María Daniela Aroca por siempre escucharme e impulsarme a seguir.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi mamá, Marlene Moncayo, nada de esto pudo haber sido posible sin ti.

ÍNDICE

CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN	2
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
CAPÍTULO 2 - REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1 Análisis de Respuesta de Sitio.	6
2.2 Función de transferencia.	6
2.3 Amplificación de Ondas sísmicas	7
2.3.1 Amplificación Geométrica.....	8
2.3.2 Amplificación Dinámica	8
2.4 Propiedades Dinámicas.....	9
2.4.1 Velocidad de Onda de Corte	9
2.4.2 Curvas de degradación del Módulo de Corte y Amortiguamiento 10	
2.5 Tipos de Análisis.....	14
2.5.1 Análisis Lineal Equivalente.....	14
2.5.2 Análisis No Lineal.....	15
2.5.3 Análisis de elementos finitos	17
CAPÍTULO 3 – DESCRIPCIÓN DEL SITIO	18
3.1 Área de estudio.....	18

3.2	Marco Geológico de Guayaquil.....	18
3.3	Ubicación del Estadio Ramón Unamuno (ERU).	19
3.4	Características Geológicas de Depósitos Deltaicos-Estuarinos.	20
3.5	Perfil Geotécnico del sitio.	21
3.6	Perfil de Velocidad de Onda de Corte	23
3.7	Selección de Curvas Dinámicas	24
3.7.1	Proceso de calibración	24
CAPÍTULO 4 – CONSIDERACIONES GENERALES DE ANÁLISIS		29
4.1	Proceso de Investigación.....	29
4.2	Selección de registros.....	30
4.3	DeepsoilV7	32
4.4	PLAXIS 2D.....	34
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS.....		40
5.1	DeepsoilV7	40
5.1.1	Análisis Lineal Equivalente (EQL)	40
5.1.2	Análisis No lineal	45
5.2	PLAXIS 2D.....	50
5.2.1	Análisis de elementos finitos	50
5.3	Comparación de Resultados.....	56
5.4	Limitaciones del Análisis.....	61
CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		62
6.1	Conclusiones	62
6.2	Recomendaciones	64

BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de iteración en las curvas dinámicas.	14
Figura 2. Representación unidimensional del modelo de suelo discretizado para la propagación de onda.	16
Figura 3. Mapa de zonificación geológica de la ciudad de Guayaquil.....	19
Figura 4. Mapa de localización del Estadio Ramón Unamuno.....	20
Figura 5. Perfil de parámetros generales del Estadio Ramón Unamuno.	22
Figura 6. Perfil de Velocidades de Onda ERU.....	23
Figura 7. Curva de Degradación de módulo de corte calibrada.....	26
Figura 8. Curva de amortiguamiento calibrada.	27
Figura 9. Curva de degradación del módulo de corte (Menq, 2003).....	27
Figura 10. Curva de amortiguamiento (Menq, 2003)	28
Figura 11. Vista satelital de la distancia que separa los sitios del estudio... ..	29
Figura 12. Representación del proceso de investigación del trabajo.....	30
Figura 13. Posición de los sismos elegidos con respecto al área de análisis.	30
Figura 14. Registro de aceleraciones (E-O) en roca del sismo de Pedernales en la estación UCSG	31
Figura 15. Registro de aceleraciones (E-O) en roca del sismo en Guayas de la estación UCSG.	31
Figura 16. Registro de aceleraciones (E-O) en roca del sismo en Chimborazo de la estación UCSG.	32
Figura 17. Perfiles discretizados. Lineal Equivalente (Izquierda) y No Lineal (Derecha).....	33
Figura 18. Corrección de línea base de un registro sísmico.	34

Figura 19. Soil Test (DSS) realizado a altas deformaciones (10%)	35
Figura 20. Comparación de curvas de resistencia al corte.	35
Figura 21. Curvas de degradación del módulo de corte ya calibradas.	36
Figura 22. Registro ingresado (Azul) y registro usado (Rojo) para distintos casos en los que el paso del tiempo es igual o difiere del paso del registro ingresado.	38
Figura 23. Perfiles de velocidades de onda.	39
Figura 24. Resultados del Análisis Lineal Equivalente para el registro de Pedernales.	40
Figura 25. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU.	41
Figura 26. Resultados del Análisis Lineal Equivalente para el registro de la provincia del Guayas.	42
Figura 27. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia del Guayas.	43
Figura 28. Resultados del Análisis Lineal Equivalente para el registro para el sismo de Chimborazo.	44
Figura 29. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia de Chimborazo.	45
Figura 30. Resultados del Análisis No Lineal para el sismo de Pedernales.	46
Figura 31. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de Pedernales.	47
Figura 32. Resultados del Análisis No Lineal para el sismo de la provincia del Guayas.	48
Figura 33. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia del Guayas.	48

Figura 34. Resultados del Análisis No Lineal para el sismo de la provincia de Chimborazo.....	49
Figura 35. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia de Chimborazo.	50
Figura 36. Resultados del Análisis de Elementos Finitos para el sismo de Pedernales.....	51
Figura 37. Registro de aceleraciones en roca (UCSG) y el registro del resultado de análisis de elementos finitos.	51
Figura 38. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de Pedernales.....	52
Figura 39. Resultados del Análisis de Elementos Finitos para el sismo de la provincia del Guayas.	53
Figura 40. Registro de aceleraciones en roca (UCSG) y el registro del resultado de análisis de elementos finitos del sismo en Guayas.	53
Figura 41. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia del Guayas.....	54
Figura 42. Resultados del Análisis de Elementos Finitos para el sismo de Chimborazo.....	55
Figura 43. Registro de aceleraciones en roca (UCSG) y el registro del resultado de análisis de elementos finitos del sismo en Chimborazo.	55
Figura 44. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia de Chimborazo.	56
Figura 45. Comparación de cada uno de los espectros de salida en los programas versus el espectro medido en sitio (ERU) para el sismo de Pedernales.....	57
Figura 46. Comparación de cada uno de los espectros de salida en los programas versus el espectro medido en sitio (ERU) para el sismo de la provincia del Guayas.	59

Figura 47. Comparación de cada uno de los espectros de salida en los programas versus el espectro medido en sitio (ERU) para el sismo de la provincia de Chimborazo. 60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de reducción (Φ) utilizados comparados con los del modelo Darandele (2001)	26
Tabla 2. Características fundamentales del sismo de Pedernales.....	31
Tabla 3. Características fundamentales del sismo de la provincia del Guayas.	31
Tabla 4. Características fundamentales del sismo de la provincia de Chimborazo.....	32
Tabla 5. Resultados de un mismo elemento evaluado en un Soil Test DSS de distintas deformaciones.	36
Tabla 6. Comparación de resultados del sismo de Pedernales	57
Tabla 7. Comparación de resultados del sismo de Guayas.....	58
Tabla 8. Comparación de resultados del sismo de Chimborazo.....	60
Tabla 9. Variables de ingreso para el método de análisis Lineal Equivalente	67
Tabla 10. Variables de ingreso para el método de análisis No Lineal.....	69
Tabla 11. Variables de ingreso para el método de análisis en PLAXIS.	72

RESUMEN

Ecuador está ubicado dentro de los países que se asientan sobre el cinturón de fuego, llamado de esta manera debido al ser la zona donde ocurre la mayor parte de la actividad sísmica en el mundo. Datos históricos han demostrado que existen cambios en las señales sísmicas producto de las variadas características de los depósitos de suelo. Para evaluar este efecto es necesario realizar un análisis de respuesta de sitio con el fin de poder captar la verdadera magnitud de aceleraciones que incidirán en la superficie. Guayaquil es una ciudad donde abundan grandes depósitos de suelos blandos cuya influencia amplifica las aceleraciones de manera considerable. Existen distintos métodos para analizar la respuesta dinámica del suelo durante un movimiento sísmico. En el presente trabajo de investigación se realizará un análisis de respuesta dinámica en dos distintos programas (DeepsoilV7 – PLAXIS 2D) para un sitio en específico. Para la resolución de los modelos realizados en cada programa se utilizaron distintas metodologías; lineal equivalente y no lineal para el software DeepsoilV7 y de elementos finitos para PLAXIS 2D. Con los resultados obtenidos se realizaron comparaciones de cada una de las metodologías y los distintos parámetros que consideran ambos programas para ejecutar un mismo análisis y obtener cada uno de sus resultados.

Palabras Claves: Respuesta dinámica, Efecto de Sitio, Amortiguamiento, Modulo de corte, Resistencia al corte, Calibración, Espectros.

ABSTRACT

Ecuador is located within the countries that are settle on the belt of fire, named in this way because this area where most of the seismic activity in the world occurs. Historical data have shown that there are changes in seismic signals due to the varied characteristics of soil deposits. To evaluate this effect it is necessary to perform a site response analysis in order to capture the true magnitude of accelerations that will affect the surface. Guayaquil is a city where large deposits of soft soils abound whose influence amplifies the accelerations considerably. There are different methods to analyze the dynamic response of the soil during a seismic movement. In this research a dynamic response analysis will be carried out in two different programs (DeepsoilV7 - PLAXIS 2D) for a specific site. For the resolution of the models made in each program, different methodologies were used. Linear equivalent and non-linear for DeepsoilV7 and finite element software for 2D PLAXIS. With the results obtained, comparisons were made of each of the methodologies and the different parameters that both programs consider to execute the same analysis and obtain each of their results.

Key words: Dynamic Response, Site Effect, Damping, Shear Modulus, Shear Resistance, Calibration, Spectrum.

CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN

Desde siempre los sismos han sido considerados como una amenaza latente para la humanidad produciendo daños irreversibles en ciudades, ocasionando pérdidas económicas y humanas. La importancia del estudio de este tipo de fenómenos hoy en día en la ingeniería civil es muy alta, con el objetivo de poder comprender los posibles daños que podría ocasionar en un sitio y tomar medidas al respecto con el fin de minimizar daños, brindar seguridad y salvar vidas.

A medida de que el ámbito civil ha desarrollado más conocimientos acerca de los sismo se ha evidenciado que en daños estructurales post-sismo existieron diferencias considerables entre estructuras apoyadas en zonas de depósitos de suelo y estructuras apoyadas sobre roca sabiendo que ambos se situaban en una misma área en el que la distancia a la ruptura de ambas no difería de manera considerable, de esta manera se afirmó la teoría de que existen modificaciones de las señales sísmicas al paso de depósitos suelos con propiedades variables o deficientes, generando un impacto distinto al esperado en estructuras ya diseñadas aumentando el riesgo de que su respuesta al movimiento no sea la considerada y se pueda producir daños no esperados.

Este fenómeno es conocido como efecto de sitio, aspecto importante en la ingeniería geotécnica sísmica de la que se ha estudiado durante años pero apenas a inicios de los años 70 fue considerada en los códigos de construcción (Krammer, 1996). A medida de que la tecnología ha avanzado se han idealizado software para los distintos tipos de análisis para los efectos de sitio, dando opción a que exista más de un medio de comparación de modelos de 1D y modelos de 2D facilitando los procesos pero de la misma manera encontrando resultados correctos.

1.1 Antecedentes

El país en el que vivimos está situado sobre el famoso cinturón del Pacífico, conjunto de fronteras de placas tectónicas donde se encuentra la actividad volcánica y sísmica más grande del mundo, dando lugar al 90% de los terremotos que han ocurrido en el mundo. Datos históricos han demostrado que Sudamérica es cuna de algunos de los sismos más devastadores de la historia, siendo Ecuador un país donde la actividad sísmica es muy frecuente.

Dicha afirmación no era tomada en cuenta con la debida responsabilidad por parte de la ciudadanía ecuatoriana hasta que ocurrió el sismo de Pedernales $M_w = 7.8$ el 16 de abril del 2016 que dejó daños considerables en casi toda la costa ecuatoriana, hasta en ciudades muy alejadas de la zona de ruptura como la ciudad de Guayaquil dando como cavidad a las posibles amplificaciones de señales sísmicas a causa de los efectos de sitio.

En la última publicación de la Norma ecuatoriana de la Construcción (NEC-15) define una clasificación de suelos (A-F) en función de las propiedades y características del perfil a 30 m de profundidad de un sitio, recalcando que todo sitio que sea clasificado como suelo tipo F tendrá que ser estudiado por un ingeniero geotécnico para su respectivo análisis de respuesta dinámica del sitio. Se debe realizar las respectivas investigaciones geotécnicas para poder conocer y modelar el comportamiento dinámico del suelo, con el apoyo de ensayos in-situ normalmente utilizados en el medio como lo son los ensayos de penetración estándar (SPT) y el ensayo de penetración estática (CPT), también como otras técnicas de investigación como los ensayos geofísicos que permitan establecer las características y propiedades para poder reducir la incertidumbre y así realizar un correcto estudio del perfil de suelos.

1.2 Justificación

La ciudad de Guayaquil conformada por cerros que atraviesan la ciudad uniéndose a un sistema montañoso (Chongon-Colonche) al oeste de la ciudad, al noroeste existe la llanura aluvial conformada por las cuencas hidrográficas de los ríos Duales y Babahoyo, mientras que al sureste posee una extensa área de ambientes deltaicos, siendo fuente de grandes depósitos aluviales donde existen gran volumen de suelos blando en la mayor parte de la ciudad (Geostudios, 2011).

Ubicada en la costa de Ecuador donde el riesgo sísmico es mayor a causa de estar cerca de la zona de subducción donde se une la placa continental de Sudamérica con la placa Nazca y además de la existencia de fallas corticales en la zona montañoso al oeste de la ciudad, son un conjunto de causas en las que en análisis de respuesta dinámica en gran parte de los proyectos de la ciudad son realmente necesarios, por ello en este proyecto se comparará tres de varias alternativas que hacen posible el análisis de efecto de sitio con la ayuda de dos software utilizados a nivel mundial como son PLAXIS 2D y DEEPSOIL v7 modelando un mismo sitio bajo la excitación de un sismo.

Se estima que a la larga este tipo de análisis sea más común en el zonas de la ciudad donde realmente son necesarias ya que al ser una de las principales redes de comercio del país no habrá duda que existirán obras de gran importancia donde el resultara obligatorio intervenir con el análisis de respuesta dinámica y poder incluir la influencia del suelo a las señales sísmicas resultantes sobre el depósito donde estará apoyada cualquier tipo de edificación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Estudiar un sitio de la ciudad de Guayaquil en la que existen depósitos de suelos blandos, realizar análisis de respuesta dinámica de sitio en los software DEEPSOIL v7.0 y PLAXIS 2D y comparar sus resultados.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estimar las propiedades dinámicas del perfil de suelo del sitio escogido a partir de resultados de ensayos y previas investigaciones.
- Realizar un análisis en 1D de la respuesta dinámica del sitio escogido usando el software DEEPSOIL v7 con los métodos Lineal Equivalente y No Lineal.
- Estudiar la respuesta dinámica del mismo sitio con un análisis de elementos finitos usando el programa PLAXIS 2D.
- Comparar espectros de salida de todos los modelos versus el espectro medido en el sitio escogido.

CAPÍTULO 2 - REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Análisis de Respuesta de Sitio.

El estudio de los cambios en la intensidad y el contenido de frecuencias en el movimiento sísmico debido a la propagación de ondas a lo largo de un depósito de suelo y a características topográficas, se denomina como un análisis de respuesta de sitio. Comúnmente este tipo de análisis es calculado a partir de funciones de transferencia. Este enfoque es limitado a análisis de sistemas lineales; sin embargo, puede aproximarse el comportamiento no-lineal usando un procedimiento iterativo con propiedades lineales equivalentes (Kramer, 1996). Varios autores han desarrollado diferentes modelos constitutivos no lineales para análisis de respuesta de sitio unidimensionales que pueden ser implementados en modelos 2D y 3D. Por otra parte, el amortiguamiento viscoso empleado en las soluciones de la ecuación de movimiento es el amortiguamiento tipo Rayleigh que es dependiente de la frecuencia y puede resultar en un bajo o sobre amortiguamiento. A su vez, el amortiguamiento histerético puede resultar en una sobre estimación del amortiguamiento a grandes deformaciones, éste controla la disipación de energía en problemas que involucran grandes deformaciones (Hashash & Philips, 2009). En los últimos años los análisis de respuesta de sitio han sido más exigidos debido a los daños que pueden causar los cambios de movimientos en la superficie.

2.2 Función de transferencia.

Los depósitos de suelos son el principal problema en la respuesta real de los suelos, los mismos presentan características de rigidez y amortiguamiento con fronteras en las que las ondas serán reflejadas o transmitidas. Para este tipo de condiciones se requiere el desarrollo de funciones de transferencia para depósitos con estratos múltiples. Denominadas como el rango de amplificación o deamplificación que tendrá el movimiento de entrada, necesarias para obtener la respuesta en la superficie del suelo. La ecuación del factor de amplificación es:

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

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

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

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

$$\frac{2\pi}{T} = \frac{V_s * \pi}{2H}$$

$$T_o = \frac{4H}{V_s}$$

Donde T_o es el periodo fundamental del sitio.

2.3 Amplificación de Ondas sísmicas

Se define como la modificación de señal sísmica a causa de la transición del viaje de la onda en la roca hacia el depósito de suelo. Esto causa variaciones en el contenido de frecuencias y en la amplitud de la señal en la superficie. Este efecto tiende a causar cambios de intensidad subiendo el riesgo de posibles daños a las infraestructuras. La amplitud de la onda sísmica depende del mecanismo focal y de la cantidad de energía liberada, además de la trayectoria y las condiciones que posee el sitio.

2.3.1 Amplificación Geométrica

Corresponde a las amplificaciones ocasionadas por el contraste de impedancia que se define como la relación de la influencia de impedancia entre dos estratos en contacto. Para sedimentos, el contraste de impedancias se expresa como:

$$I_c = \frac{\rho_r * V_r}{\rho_s * V_s}$$

Dónde:

Ic: Contraste de Impedancia.

ρ : Densidad, estrato rocoso(r) y nivel sedimentario(s).

V: Velocidad de onda, estrato rocoso(r) y nivel sedimentario(s).

Si la impedancia baja la resistencia del suelo al movimiento de la onda sísmica disminuye. De acuerdo a la ley de preservación de energía la amplitud de la onda se amplifica, sin embargo buena parte del incremento es absorbido por el amortiguamiento del suelo. Mientras mayor es el contraste de impedancia mayor son las amplificaciones de las sísmicas esto ocurre en suelos normalmente consolidados debido a que las magnitudes de velocidad de onda para suelos poco consolidados es baja.

2.3.2 Amplificación Dinámica

Conocido como efecto de resonancia, relaciona la frecuencia de las ondas sísmicas y la frecuencia del suelo. Para esto se utiliza la siguiente expresión, conocida como la ecuación del cuarto de onda.

$$f_n = \frac{V_s}{4H}$$

Dónde:

f_n = Frecuencia natural del depósito sedimentario (Hertz).

V_s = Velocidad de onda de corte (m/s).

H = Espesor del estrato (m).

Sí la relación entre la frecuencia de la onda sísmica y la frecuencia natural del depósito de suelo es aproximadamente una unidad se produce amplificación por resonancia, incrementando la amplitud del movimiento del suelo de forma significativa. Los fenómenos que contribuyen a la amplificación de la señal sísmica están directamente relacionadas con la velocidad de las ondas de corte en el depósito. En suelos con materiales de baja velocidad de propagación de ondas sísmicas las amplitudes del movimiento son mayores, dado que la velocidad de la partícula y la velocidad de las ondas sísmicas son inversamente proporcionales.

2.4 Propiedades Dinámicas

2.4.1 Velocidad de Onda de Corte

La velocidad de la onda de corte (V_s) es una propiedad mecánica del suelo que puede medirse ventajosamente tanto en el campo como en el laboratorio en condiciones reales y controladas. Se considera que la velocidad de onda de corte es uno de los parámetros más importantes para la clasificación de suelos y rocas, ya que describe confiablemente las características estáticas y dinámicas de los materiales. Debido a su importancia en la norma de la construcción (NEC 2015) hace énfasis en obtener el parámetro V_{s30} para realizar su respectiva clasificación. Es una de las principales provisiones sísmicas en la construcción, ya que las propiedades elásticas de los suelos en la superficie tienen un rol fundamental en la respuesta sísmica de sitio (Castillo & Zepeda, 2013). Para realizar un perfil de velocidades se pueden tomar los siguientes métodos:

Ensayos en campo:

- La técnica de Nakamura (HVSr) es un método de refracción sísmica pasiva que mide las componentes verticales y horizontales de las ondas superficiales y permite hallar el periodo predominante del suelo.

- Ensayo geofísico MASW que utiliza la propagación de ondas de superficie para realizar un perfil del subsuelo. El resultado de un estudio MASW es un perfil de 20 a 60 m de profundidad de la velocidad de las ondas de corte del subsuelo (rigidez de corte), sin la necesidad de una perforación.
- Prospección geofísica Downhole es un ensayo que consiste en generar ondas sísmicas en la superficie, mediante golpes verticales y horizontales en una placa, registrándose los tiempos de llegada de las ondas de compresión y corte al equipo bajo la superficie.

Correlaciones Empíricas:

- Para resultados de ensayos de penetración estándar (SPT) existen correlaciones en las que se puede calcular el V_s , como por ejemplo: Seed et al. (1984) e Imai & Tonuchi (1982).
- Para resultados de ensayos de penetración de cono (CPT) también existen correlaciones, su ventaja es que existen resultados cada centímetro a pesar de solo servir para suelos no muy densos. Algunas correlaciones utilizadas son Robertson (2009), Mayne (2006) y Piratheepan (2002).

2.4.2 Curvas de degradación del Módulo de Corte y Amortiguamiento

Para el análisis unidimensional de un depósito de suelo, los parámetros dinámicos de los estratos son muy importantes en el cálculo de la respuesta del perfil de suelo que se desea analizar; dentro de estos parámetros dinámicos existen las curvas de degradación del módulo de corte y de amortiguamiento, los cuales se generan por esfuerzos de corte inducidos por el paso de las ondas sísmicas al propagarse en el suelo. Existen ensayos cíclicos que ayudan a obtener datos experimentales en base a un ciclo de histéresis para poder producir de manera aproximada un comportamiento dinámico del suelo.

Algunos de estos ensayos son el triaxial cíclico, pulso ultra sónico, ensayo de columna resonante y corte directo cíclico. Dan como resultado el módulo de corte (G) y amortiguamiento (ξ) de la muestra, correspondientes a la pendiente y al área bajo de la curva de histéresis que va variando en función de la deformación unitaria (γ) que sufre la muestra por cada ciclo. Una vez realizado el ensayo se toma el máximo valor de módulo de corte (G_{max}) a bajas deformaciones. Debido a que el suelo no se comporta de manera lineal una vez las deformaciones aumenten su módulo de corte tendera a degradarse. La curva de amortiguamiento toma todos los valores absolutos de esta manera al incrementar las deformaciones también lo harán los valores de amortiguamiento.

En base a una gran data de ensayos realizados, se han generado modelos empíricos con el comportamiento de distintos tipos de suelos granulares o cohesivos utilizados para representar su estructura y comportamiento en base a un modelo empírico creado por Konder and Zelasko en 1963. A medida de que la base de datos creció se realizaron más modelos como por ejemplo Vucetic and Dobry (1991), Seed and Idriss (1970), Darendeli (2001), Kishida et al. (2009), en función de distintas propiedades del suelo para el uso de la práctica profesional. Para la siguiente investigación se utilizaran los siguientes modelos.

2.4.2.1 Modelo de Darendeli (2001)

Darendeli realizó un estudio tomando muchas muestras en zonas estratégicas de Estados Unidos y tomando la base de datos de los resultados encontró que, en dichos suelos cohesivos el amortiguamiento disminuye a grandes deformaciones debido al índice de plasticidad, es decir que a mayor índice de plasticidad la no linealidad del suelo disminuye. Además que para arcillas rígidas con OCR altos, su curva de degradación tendera a aumentar desplazándose más a la derecha. Los parámetros usados en el modelo de Darendeli son:

- Relación de sobre-consolidación (OCR)
- Índice de plasticidad (IP)
- Coeficiente de presión lateral (ko)
- Número de ciclos (N)
- Frecuencia de carga (f)
- Parámetros del modelo (a, b, φ_i)

Las siguientes ecuaciones proporcionan la estructura de las curvas dinámicas:

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

$$D_{min} = (\varphi_6 + \varphi_7 * IP * (OCR)^{\varphi_8} * (G' \sigma)^{\varphi_9}) * [1 + \varphi_{10} * \ln(frq)]$$

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

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

2.4.2.2 Modelo de Menq (2003)

Menq realizó un estudio similar basándose solo en el comportamiento de suelos granulares (arenas y gravas) y encontró que las curvas se ven influenciadas por parámetros como el coeficiente de uniformidad (Cu) y el tamaño de partícula correspondiente al 50% que pasa (D50). Descubrió que para valores de Cu altos, la curva de degradación disminuye para un valor de deformación fijo, además de que si el D50 sube, los valores de G/Gmax tienden a aumentar. Los parámetros usados en el modelo de Menq son:

- Coeficiente de uniformidad (Cu)
- Granulometría del suelo (D50)
- Constantes del modelo (φ_i)

Las siguientes ecuaciones proporcionan la estructura de las curvas dinámicas:

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

$$\gamma_r (\%) = 0.12 * Cu^{\varphi_1} * \left(\frac{G' \sigma}{pa} \right)^{\varphi_2}$$

2.4.2.3 Modelo Hardening Soil

Es un modelo constitutivo avanzado utilizado en el software PLAXIS 2D-3D que representa el comportamiento de diferentes tipos de suelos desde suelos blando como de suelos duros. Al ser sometido a una carga desviadora primaria, el suelo muestra una disminución de su rigidez y simultáneamente desarrolla deformaciones plásticas irreversibles, por ello la ventaja de este modelo que a diferencia de otros, este utiliza parámetros de rigidez simulando de manera más precisa el comportamiento del suelo sometido a cargas ciclicas y al degradamiento de sus propiedades físicas (PLAXIS, 2016). Los parámetros utilizados para el modelo son los siguientes:

- Rigidez de carga triaxial al 50% del esfuerzo (E50)
- Rigidez de descarga triaxial (Eur)
- Rigidez de carga del edómetro (Eoed)
- Resistencia al corte no drenada (Su)
- Gammas saturado y no saturado (γ)

2.5 Tipos de Análisis

2.5.1 Análisis Lineal Equivalente

El análisis lineal equivalente es un método que simplifica el proceso del análisis de respuesta de sitio ya que estima la respuesta cíclica no lineal del suelo en dominio de la frecuencia sin ser un análisis no lineal da resultados lo suficientemente óptimos para su frecuente uso. El método lineal equivalente requiere de módulo de corte (G) y la relación de amortiguamiento (ξ); para poder representar el comportamiento no lineal de los suelos producto de las cargas cíclicas. En el proceso de análisis se toman valores estimados de módulo de corte y amortiguamiento para un sismo de entrada y se calcula la deformación efectiva de corte para un tipo de suelo con sus diferentes estratos (Hashash & Park, 2001). El método consiste en realizar un proceso iterativo en el que se realiza una propagación de ondas de corte y se selecciona las propiedades dinámicas que le competen para los niveles de deformación inducidos en cada capa.

1. Estimar G, ξ .
2. Calcular respuesta.
3. Calcular la deformación efectiva:

$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max} \quad \text{donde } \alpha = \frac{M - 1}{10}$$

Donde M es la magnitud del sismo.

4. Estimar los nuevos valores de G, ξ .
5. Repetir el proceso desde el paso 2 hasta que converja el análisis.

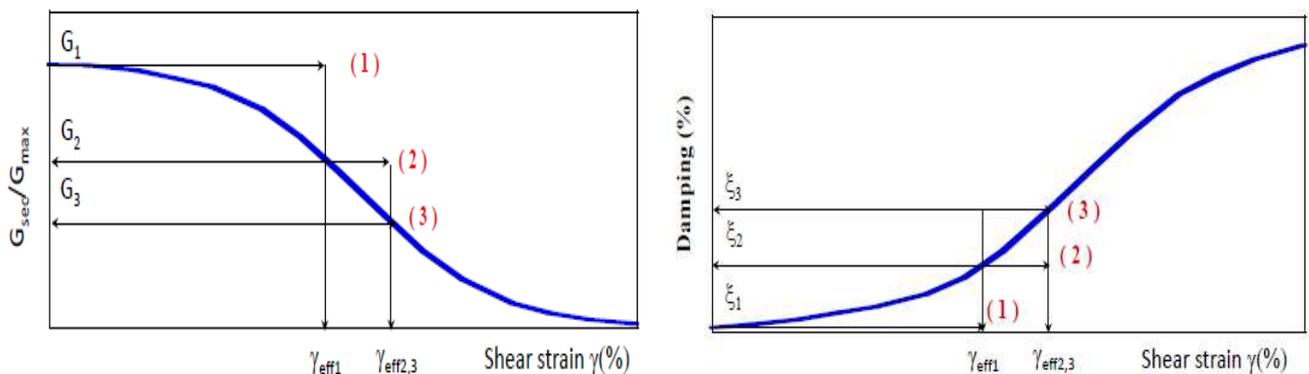


Figura 1. Proceso de iteración en las curvas dinámicas.

Fuente: (Hashash, 2019)

Al terminar el análisis, las propiedades de módulo de corte y amortiguamiento se varían en función de la deformación efectiva. Se recomienda que las propiedades deban ser calculadas para una deformación de 0,65 en cada capa (Seed & Idriss, 1969).

En el ámbito laboral para realizar análisis lineal equivalente en un estudio de respuesta de sitio existen varios software para hacerlo. En esta investigación se usara DeepsoilV7, desarrollado por el profesor Youssef MA Hashash, es un programa de libre uso con el que se realizan análisis de respuesta de sitio unidimensional. Este software proporciona todas las herramientas necesarias para poder realizar los procedimientos para el análisis de respuesta de sitios sísmicos en la ingeniería geotécnica sísmica.

2.5.2 Análisis No Lineal

Un estudio lineal equivalente no puede representar con precisión el comportamiento no lineal del suelo inducido a altas deformaciones debido a que toma una deformación referencial para encontrar sus resultados a diferencia del no lineal que analiza cada una de las deformaciones permanentes que realmente ocurren durante el periodo del evento. Esto amerita a realizar un análisis no lineal para representar con precisión el comportamiento del suelo durante un movimiento sísmico. 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. El proceso de cálculo para un modelo no lineal es el siguiente (Krammer, 1996)

1. Se toma el registro tiempo aceleración de entrada para poder determinar el movimiento en la base del perfil del suelo.
2. Una vez definido el movimiento en la base, se toma cada uno de los movimientos en cada límite de capa que se calculan moviéndose desde la parte inferior del perfil del suelo hasta la parte superior.
3. Luego, teniendo los desplazamientos en cada límite de capa, se calcula la deformación de corte correspondiente a cada una de las capas.

4. Para cada una de las capas se estima el esfuerzo de corte a partir de las deformaciones utilizando modelos constitutivos específicos. Este proceso se repite para cada uno de los pasos de tiempo hasta el final del movimiento sísmico.

La columna de suelo es discretizada en capas individuales que se representan por su correspondiente masa, amortiguamiento y rigidez). Las soluciones en el dominio del tiempo resuelven la ecuación de movimiento:

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

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).

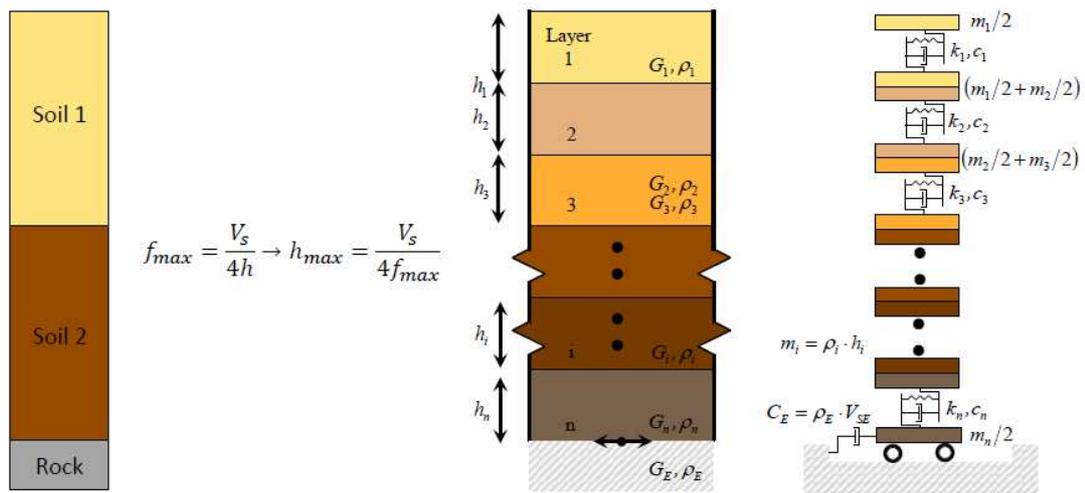


Figura 2. Representación unidimensional del modelo de suelo discretizado para la propagación de onda.

Fuente: (Hashash & Park, 2001)

2.5.3 Análisis de elementos finitos

La teoría en la cual se basa el análisis de elementos finitos, ya sea que aplique para el estudio de estructura de edificios o del comportamiento geotécnico de masas de suelos; es la que utiliza métodos numéricos para integrar cada una de las ecuaciones diferenciales que componen la aplicación de modelos que representan un comportamiento físico, también conocidos como modelos constitutivos de cada problema en particular, los cuales son integrados por parámetros representativos que poseen las características físico mecánicas de cada uno de los elementos de tamaño finito en los que se divide una superficie, o de un volumen, ya sea que se trate de casos de deformación plana (Representaciones de 2D), o casos en los que se debe considerar un comportamiento tridimensional (3D). El resultado de tal integración parcial de cada elemento, es luego aplicada al ensamble de todos ellos para obtener las ecuaciones globales que van a servir para obtener los desplazamientos de los nodos, y a partir de estos obtener las cantidades secundarias que representan los esfuerzos y las deformaciones unitarias del sistema estudiado (PLAXIS, Scientific Manual, 2016).

En la ingeniería geotécnica el principal software para análisis de elementos finitos es PLAXIS, programa que utiliza métodos numéricos para realizar análisis de elementos finitos para encontrar soluciones a problemas geotécnicos. Es un software de mucha confianza hoy en día en la ingeniería de suelos, por ello para este trabajo se lo utilizara para realizar análisis de respuesta de sitio.

CAPÍTULO 3 – DESCRIPCIÓN DEL SITIO

3 Área de estudio

La ciudad de Guayaquil categorizada como la segunda ciudad más importante de Ecuador, se encuentra en la provincia del Guayas en latitud y longitud 02°11'S y 79°53'O, su extensión es de aproximadamente 344,5 km² y posee una población de más de 2'500.000 de habitantes. Guayaquil descansa sobre un golfo llamado con el mismo su mismo nombre dando la ventaja de ser uno de los puertos principales del país.

3.2 Marco Geológico de Guayaquil.

Guayaquil se divide en tres macros- dominios geológicos con características geomorfológicas propias según la investigación realizada por Benítez et al. (2005). Dicho trabajo contribuyó a la actualización del mapa geológico de la ciudad. Se ha demostrado que Guayaquil está conformada por una variedad de tipos de depósitos de suelos donde destacan los depósitos aluviales, coluviales, deltaicos estuarinos y formaciones rocosas. La ciudad es dividida en 7 Zonas Geotécnicas de importantes características como se muestra en la Figura 3, desde la D1 a la D7. Las primeras tres zonas (D1 a D3) están conformadas por los depósitos deltaicos estuarinos. Las áreas conformadas por suelos aluviales proveniente de los ríos Daule y Babahoyo corresponden a las zonas (D4 y D5), 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 Cayo y la formación Guayaquil (Benítez, Vera Grauner, & Álvarez, 2005).

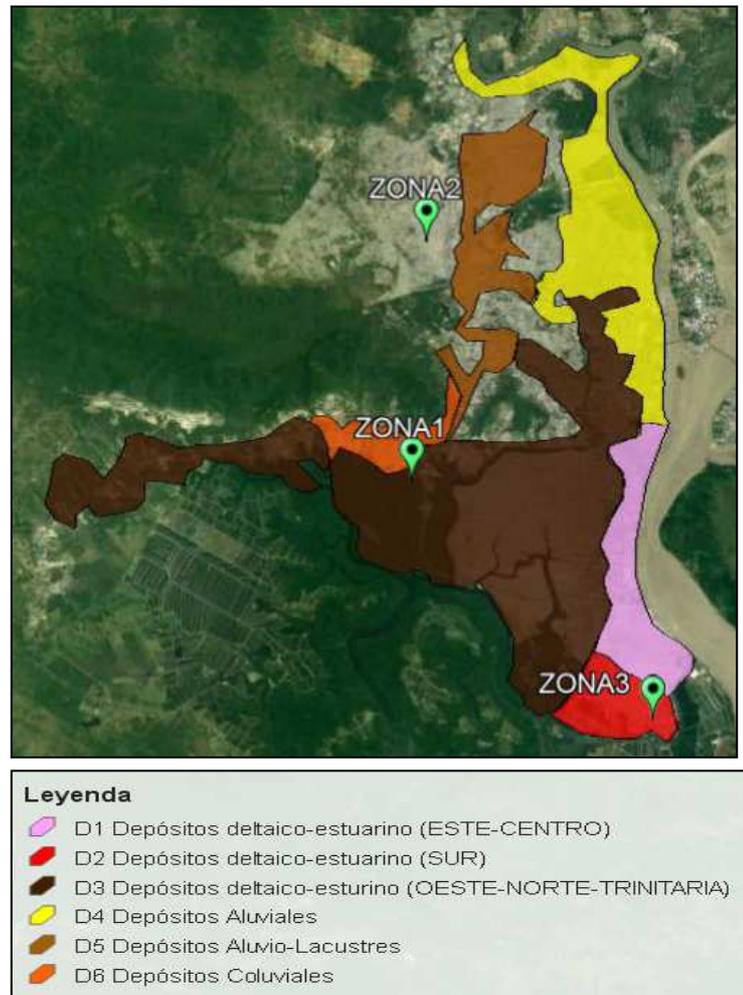


Figura 3. Mapa de zonificación geológica de la ciudad de Guayaquil.

Fuente: (Benítez, Vera Grauner, & Álvarez, 2005)

3.3 Ubicación del Estadio Ramón Unamuno (ERU).

El Estadio Ramón Unamuno será el lugar de estudio de la presente investigación. Se encuentra ubicado en el centro-sur de la ciudad de Guayaquil, exactamente en la zona de depósitos deltaicos-estuarinos como se puede observar en la Figura 4.



Figura 4. Mapa de localización del Estadio Ramón Unamuno.

Fuente: (Autor, 2019)

3.4 Características Geológicas de Depósitos Deltaicos-Estuarinos.

Debido a la posición geográfica de la ciudad existen un conjunto de canales que se conectan del río Guayas con el Golfo de Guayaquil, debido a su acción de transporte de sedimentos a lo largo del centro y al sur de la ciudad han formado depósitos de suelos deltaicos estuarinos. 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 alterado. Se diferencian de los suelos aluviales por la cementación de pirita; un elemento químico proveniente del limo, que se forma comúnmente en sedimentos marinos (Benítez, Vera Grauner, & Álvarez, 2005).

El agente cementante de los suelos es producido por la composición de azufre de la pirita al dar la propiedad de salinidad. Sin embargo, la extracción

solido-líquida de las arcillas causa el incremento del porcentaje de cementación y como resultado forman arcillas sensitivas. La principal característica de los suelos cementantes es su mecanismo de colapso; al poseer niveles freáticos altos poseen una composición de suelo blando debido a que 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.

3.5 Perfil Geotécnico del sitio.

La idealización del perfil de suelos fue realizado a partir de perforación ejecutada por Vera Grunauer et al., para la representación de la zona deltaica estuarina en la publicación de la Microzonificación Sísmica y Geotécnica de la ciudad de Guayaquil. Esta zona se caracteriza por tener grandes depósitos de arcillas con intercalaciones de capas limosas y fragmentos de detritos de concha a causa de la sedimentación marina. A continuación se realizara una descripción de la secuencia estratigráfica:

Como primer estrato se encuentra una capa de material arcilloso con plasticidad media (IP=54%) de buena consistencia, un nivel de sobre consolidación muy alto (OCR>5). Con aproximadamente 3 metros de espesor posee un porcentaje de humedad que varía del 60% al 80% y un número de golpes corregidos (N60) que no sobrepasan los 15 golpes.

Luego existe un estrato limo arcilloso (CH-MH) de plasticidad media baja que oscila entre valores de 25% a 38%, con una consistencia variable y un grado de consolidación medio alto (OCR= 1.8 - 2). Los valores de humedad fluctúan entre 72% a 83%, posee valores bajos número golpes corregidos (N60= 5 - 9) y su espesor es de alrededor de 13.5 metros.

Subyaciendo al material anterior se encuentra una capa extensa de arcilla con intercalaciones de arena que culmina a 41 metros de profundidad. De características muy similares a lo largo del estrato, posee porcentajes de plasticidad medios bajos (IP=34%) además de grados de consolidación medios (OCR=1.3) y números de golpes corregidos (N60) menores a 19 golpes.

A continuación se logra encontrar la primera capa de material granular, un estrato arenoso de alta densidad. Con un espesor de aproximadamente 10 metros posee valores de humedad natural del orden de 40% y números del golpes corregidos altos ($N_{60} > 50$).

Por debajo del estrato de arena se encuentra una capa extensa de material arcilloso con plasticidad media ($IP = 43\%$), buena consistencia y valores de grado de sobre consolidación altos ($OCR = 3$). Sus valores de humedad natural fluctúan en el orden de 70% y tiene un espesor de capa alrededor de 28 metros.

Luego existe un estrato de gran tamaño compuesto por material arenoso de aproximadamente 25 metros de espesor, sus valores de humedad natural oscilan en el orden de 21% y posee densidad media alta. A partir de los 105 metros de profundidad se encuentra una capa extensa de arcilla sobre-consolidada ($OCR = 3$), valores de plasticidad medios ($IP = 44\%$) y un porcentaje de humedad natural del 72%. Finalmente subyace una capa limo arcillosa de plasticidad media baja ($IP = 37\%$) valores de sobre consolidación muy altos que culmina a 145 metros de profundidad

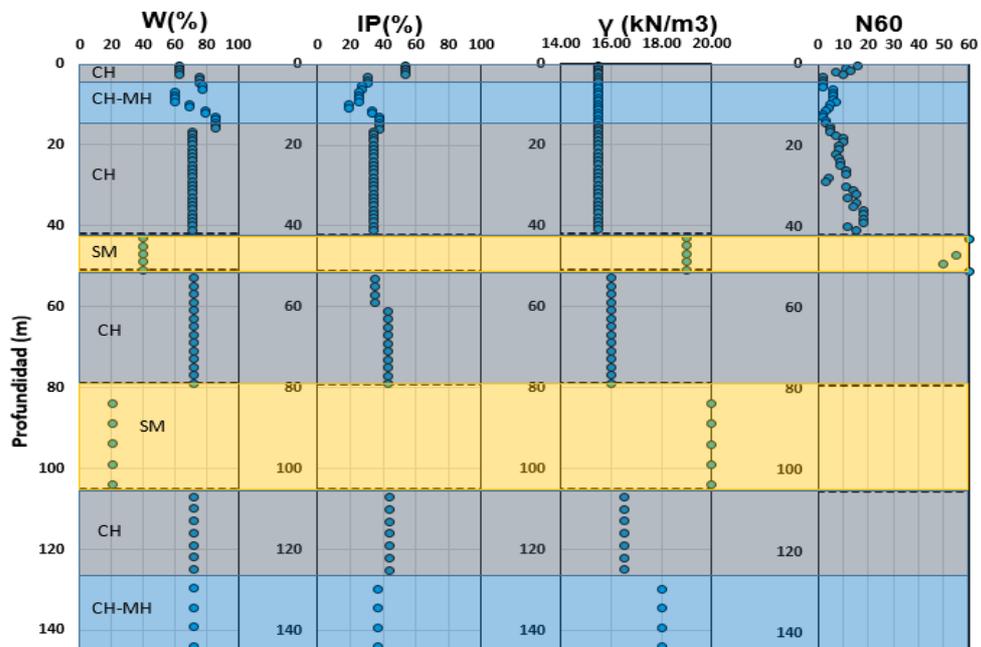


Figura 5. Perfil de parámetros generales del Estadio Ramón Unamuno.

Fuente: (Autor, 2019)

3.6 Perfil de Velocidad de Onda de Corte

El perfil de velocidad de onda fue tomado de los resultados de los ensayos geofísicos SASW y MASW+REMI realizados para la estación ERU en la Microzonificación de la ciudad de Guayaquil realizada por GeoEstudios S.A. En la Figura 6 se presenta la estimación del perfil de velocidades de onda en base al proceso de calibración entre los resultados de ensayos in situ y correlaciones calculadas en base a las propiedades tomadas de las perforaciones. (Vera, 2014)

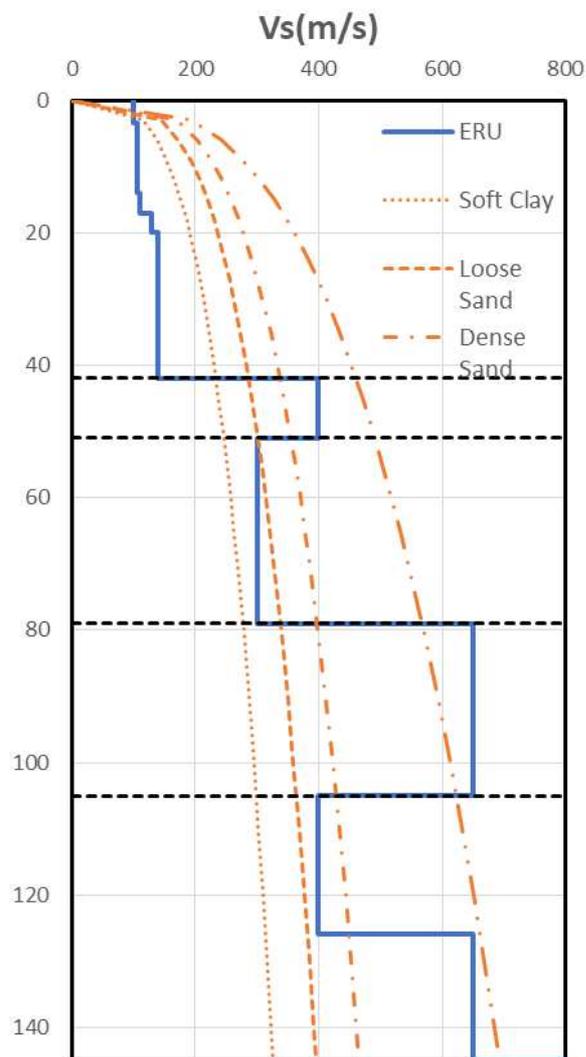


Figura 6. Perfil de Velocidades de Onda ERU.

Fuente: (Vera, 2014)

3.7 Selección de Curvas Dinámicas

Los suelos característicos del sitio en que se realiza la investigación son los que poseen cementación por pirita (Vera, 2014), típico de los suelos deltaicos estuarinos. Debido a que los datos obtenidos de los ensayos de Darendeli (2001) son de muestras que no presentan cementación, es necesario realizar una calibración a las curvas para adaptar el comportamiento que poseen los suelos cementados. Los suelos cementados tenderán a necesitar mayores deformaciones para que puedan degradarse, es decir la curva de degradación G/G_{max} se desplazara más hacia la derecha, mientras que el amortiguamiento disminuirá bajando la capacidad de poder disipar la energía.

La calibración de las curvas de rigidez y amortiguamiento se hicieron en base a los resultados de datos experimentales del sitio GYE-BSF realizado por Vera Grunauer para la culminación de su trabajo de doctorado. Tomó varias muestras del sitio para poder realizar el ensayo triaxial cíclico y el ensayo de corte directo cíclico, de esta manera pudo representar el comportamiento de los suelos cementados de la zona deltaica estuarina de la ciudad de Guayaquil.

3.7.1 Proceso de calibración

El modelo de Darendeli (2001) se compone de ecuaciones que dependen de factores de reducción (Φ) como se muestra a continuación:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^\alpha}$$

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

$$\gamma_r = (\varphi_1 + \varphi_2 * IP * (OCR)^{\varphi_3}) * (G' o)^{\varphi_4}$$

$$a = \varphi 5$$

$$D_{min} = (\varphi 6 + \varphi 7 * IP * (OCR)^{\varphi 8} * (G'_{\sigma})^{\varphi 9}) * [1 + \varphi 10 * \ln(frq)]$$

$$b = \varphi 11 + \varphi 12 * \ln(N)$$

Donde:

G'o = Esfuerzo promedio efectivo de confinamiento (atm)

PI = Índice de Plasticidad (%)

OCR = Grado de sobre-consolidación.

Frq = Frecuencia de la carga.

N = Número de ciclos de carga.

Como se puede observar en el modelo de Darendeli (2001) existen doce factores (Φ) de los cuales no todos afectan a propiedades importantes como el índice de plasticidad (IP) y el grado de sobre-consolidación (OCR). Para el proceso de calibración se hicieron cambios en los factores que no dependían de los parámetros importantes de las arcillas, ajustándolos hasta que las curvas dinámicas del modelo de Darendeli (2001) se asemejaran al comportamiento de las curvas construidas por Vera Grunauer et al para el comportamiento de arcillas cementadas. La Tabla 1 presenta los cambios que se realizaron en los factores para poder llegar a la calibración deseada. Los valores resaltados son aquellos que no tuvieron cambio alguno en el proceso de calibración de curvas de degradación.

Tabla 1. Factores de reducción (Φ) utilizados comparados con los del modelo Darandele (2001)

		RLN	Darandeli Original
Control G/Gmax	Φ_1	0.0800	0.0352
	Φ_2	0.0050	0.001
	Φ_3	0.3246	0.3246
	Φ_4	0.3481	0.3483
	Φ_5	0.7000	0.919
Control Damping	Φ_6	1.8000	0.8005
	Φ_7	0.0129	0.0129
	Φ_8	-0.1069	-0.1069
	Φ_9	-0.2889	-0.2889
	Φ_{10}	0.0500	0.2919
	Φ_{11}	0.5635	0.6329
	Φ_{12}	0.0000	-0.0057

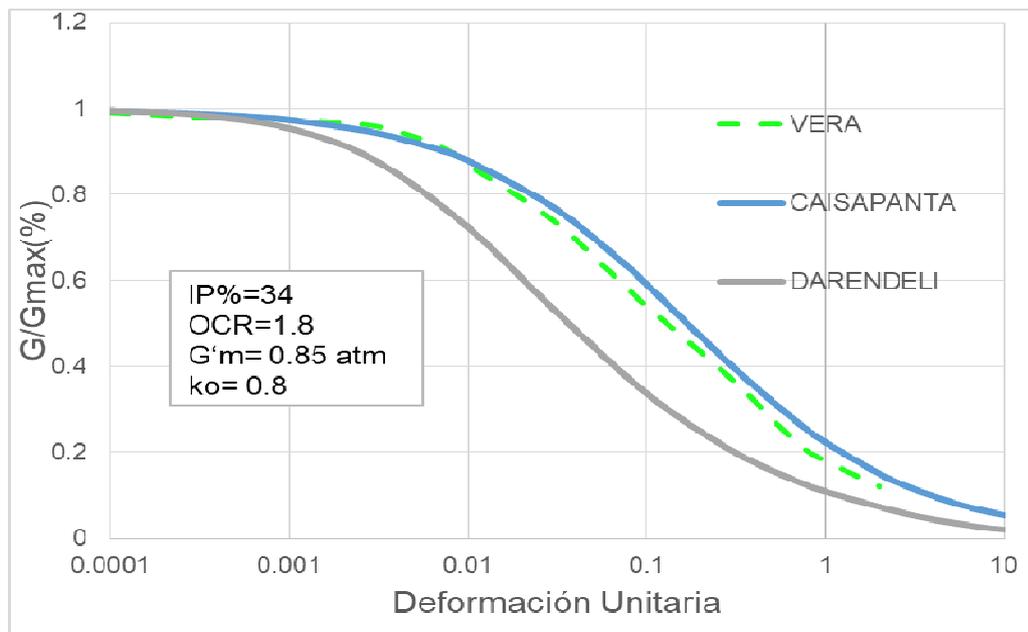


Figura 7. Curva de Degradación de módulo de corte calibrada.

Fuente: (Autor, 2019)

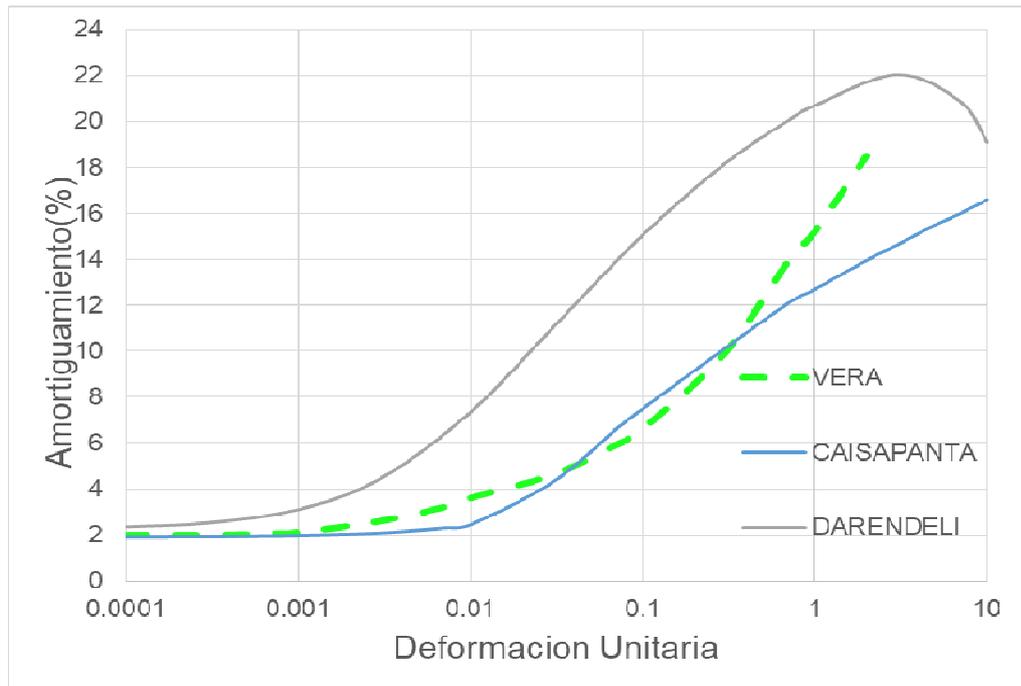


Figura 8. Curva de amortiguamiento calibrada.

Fuente: (Autor, 2019)

En suelos con material arenoso se utilizó el modelo Menq 2003 que representa el comportamiento de suelos granulares. A continuación se mostrarán las respectivas curvas dinámicas de la primera capa de arena.

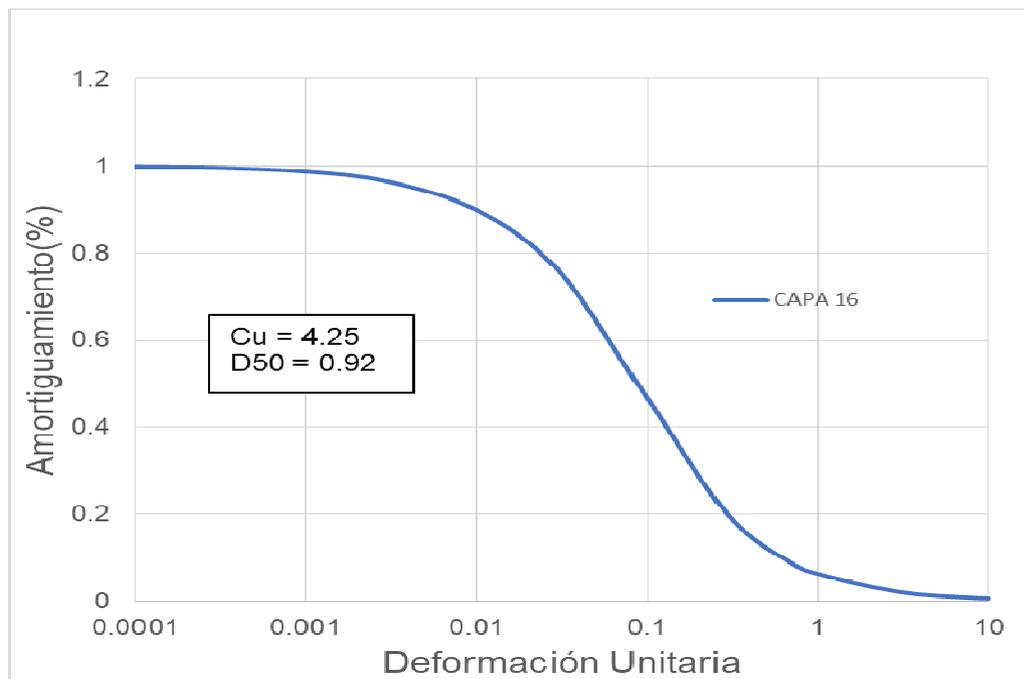


Figura 9. Curva de degradación del módulo de corte (Menq, 2003)

Fuente: (Autor, 2019)

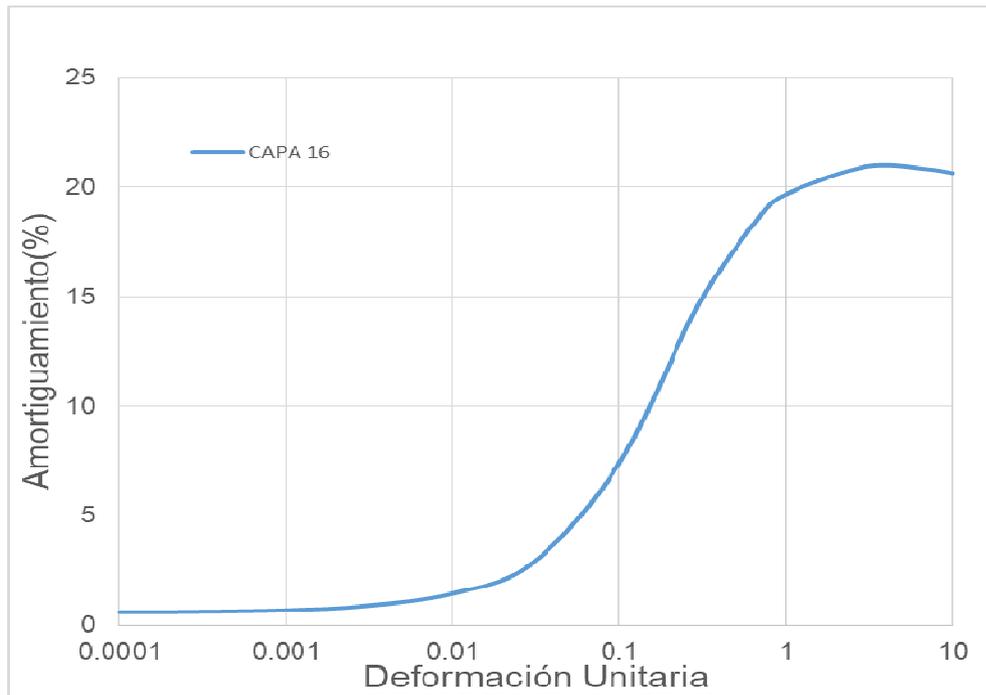


Figura 10. Curva de amortiguamiento (Menq, 2003)

Fuente: (Autor, 2019)

El proceso de calibración se lo realizó para toda las capas de arcillas que corresponden al perfil. Una vez terminado el cálculo de las curvas dinámicas para el análisis lineal equivalente se utilizó el modelo (GQ/H) que posee un esquema de ajuste de curvas que corrige de manera automática las curvas de referencia en función de la resistencia al corte especificado, a diferencia del análisis no lineal que se utiliza el modelo que se denomina MKZ con el análisis de disipación de presión de poros (Hashash Y. M., 2017).

CAPÍTULO 4 – CONSIDERACIONES GENERALES DE ANÁLISIS

4.1 Proceso de Investigación

Para el análisis de respuesta de sitio se tomaron dos tipos de registros de aceleración, el primero es un registro medido en superficie del sitio escogido (ERU) y el segundo es un registro apoyado en un afloramiento rocoso. En este segundo caso se escogió una estación que no esté muy alejada del sitio de investigación, por ende el sitio escogido para tomar el registro en roca fue la estación ubicada en la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (Punto azul) que está a 1.9 km de distancia del Estadio Ramón Unamuno (Punto rojo) .

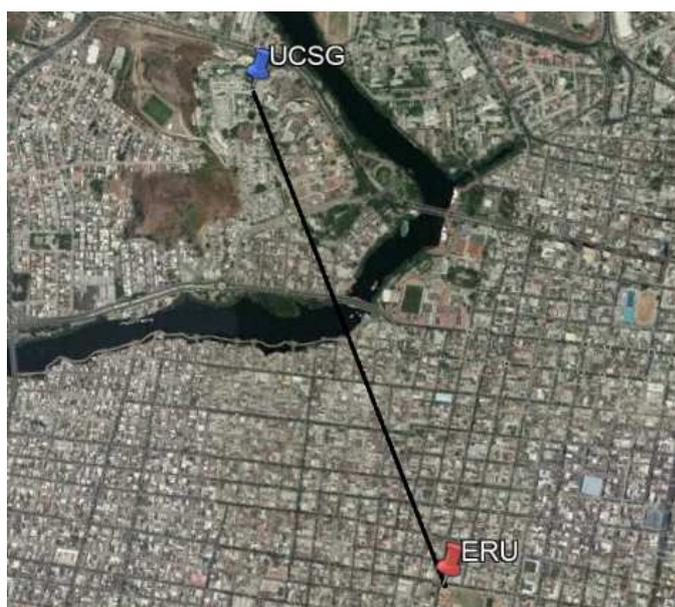


Figura 11. Vista satelital de la distancia que separa los sitios del estudio.

Fuente: (Autor, 2019)

Una vez escogido los registros en cada uno de los dos puntos antes mencionados, se procede a realizar los modelos característicos del sitio en los software DeepsoilV7 y Plaxis 2D. Los registros en rocas serán tomados como inputs de los modelos y los resultados en superficie serán comparados con los registros tomados en sitio (ERU).

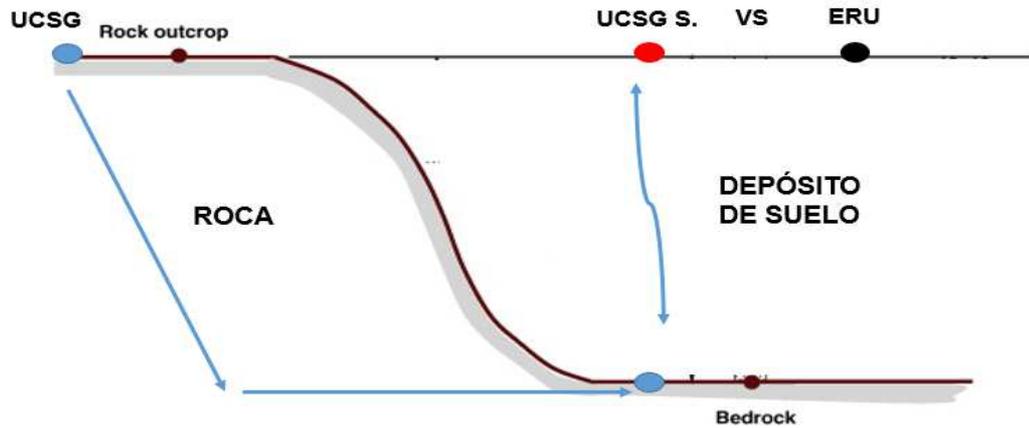


Figura 12. Representación del proceso de investigación del trabajo

Fuente: (Autor, 2019)

4.2 Selección de registros

Para realizar el trabajo de investigación se seleccionaron tres diferentes registros en roca de eventos sísmicos que ocurrieron en el país. De esta manera se puede evaluar tres distintos escenarios y ampliar la comparación de los resultados. En base a la alta sismicidad de la costa ecuatoriana se escogieron dos registros, el terremoto de Pedernales y un sismo más reciente ocurrido en la provincia del Guayas en febrero de este año. El tercer evento sísmico ocurrió en la provincia de Chimborazo y tuvo alta incidencia en la ciudad de Guayaquil. En la Figura 13 se observa la posición exacta del lugar de los sismos con respecto al sitio a analizar.



Figura 13. Posición de los sismos elegidos con respecto al área de análisis.

Fuente: (Autor, 2019)

De la Tabla 2 a la Tabla 4 se muestran las características fundamentales de los registros escogidos para realizar los análisis de respuesta dinámica del suelo de ERU. En las Figuras 14, 15 y 16 muestran los registros de aceleraciones tomados en la estación de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil para cada uno de los eventos señalados.

Pedernales

Tabla 2. Características fundamentales del sismo de Pedernales.

Mw	Distancia Hip.(km)	Profundidad Hip.(km)	R(km) a UCSG	R(km) a ERU
7.8	169	17	169.00	170.00

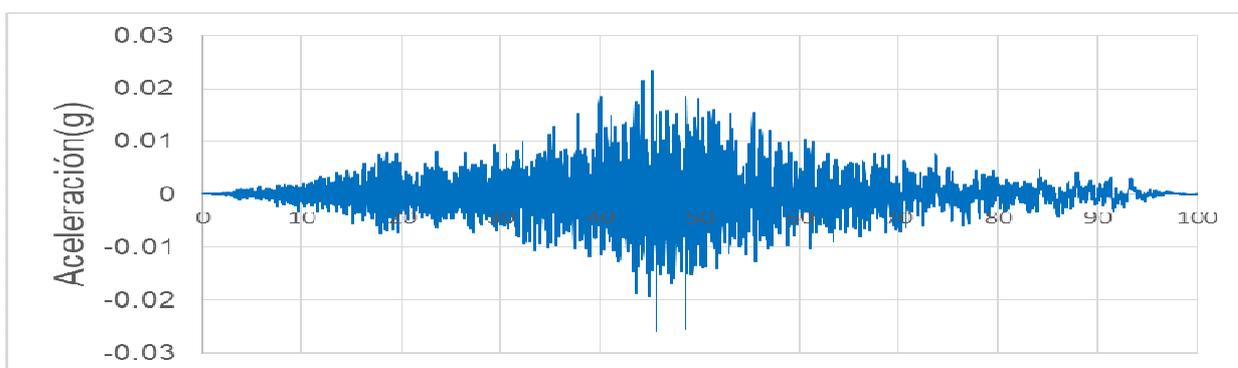


Figura 14. Registro de aceleraciones (E-O) en roca del sismo de Pedernales en la estación UCSG
Fuente: (Autor, 2019)

Guayas

Tabla 3. Características fundamentales del sismo de la provincia del Guayas.

Mw	Distancia Hip.(km)	Profundidad Hip.(km)	R(km) a UCSG	R(km) a ERU
6	39.5	60	72.45	71.83

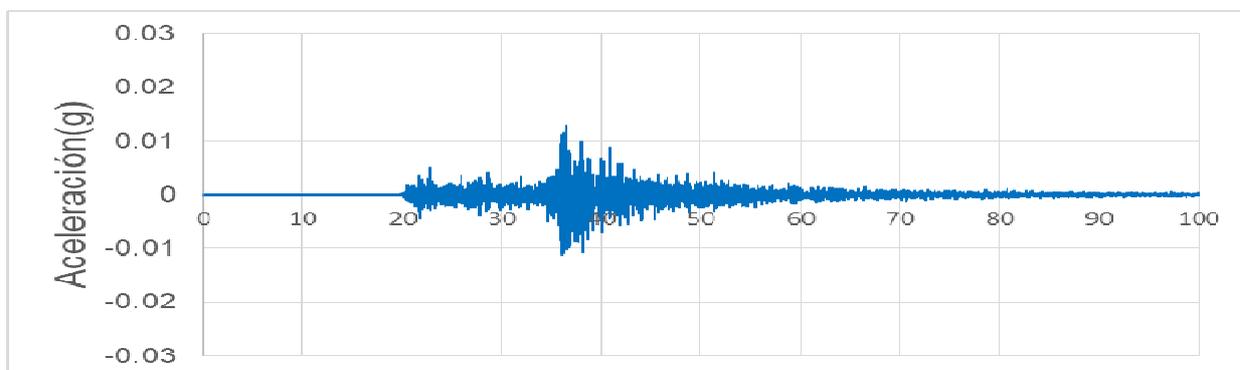


Figura 15. Registro de aceleraciones (E-O) en roca del sismo en Guayas de la estación UCSG.
Fuente: (Autor, 2019)

Chimborazo

Tabla 4. Características fundamentales del sismo de la provincia de Chimborazo.

Mw	Distancia Hip.(km)	Profundidad Hip.(km)	R(km) a UCSG	R(km) a ERU
6.5	90	86	127.99	124.48

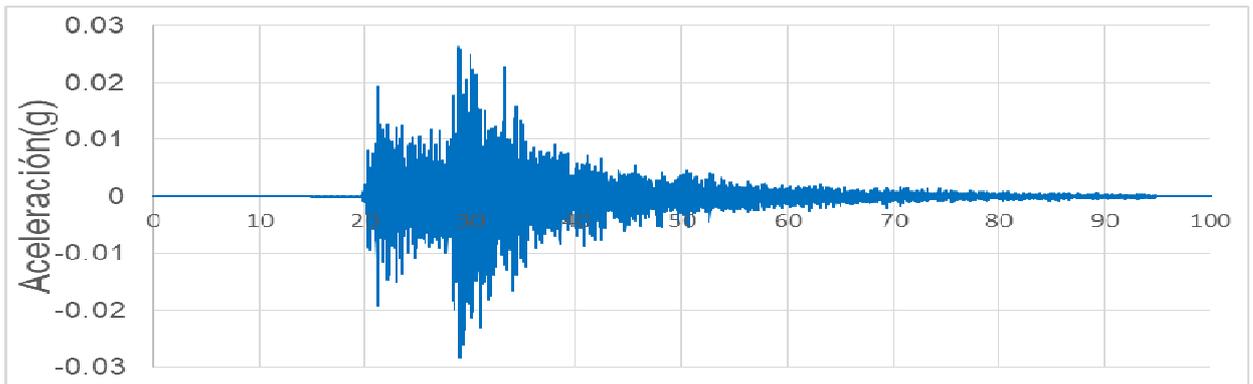


Figura 16. Registro de aceleraciones (E-O) en roca del sismo en Chimborazo de la estación UCSG.

Fuente: (Autor, 2019)

4.3 DeepsoilV7

Deepsoil es un software exclusivamente para realizar análisis de respuesta de sitio. Posee la ventaja de poder realizar varios métodos de análisis como análisis lineal, análisis lineal equivalente y análisis no lineal. En esta investigación solo se realizarán los dos últimos métodos mencionados. Para realizar de manera correcta la modelación del sitio característico se debe considerar los siguientes ajustes:

Discretización del Perfil:

Para cada una de las capas existe una máxima frecuencia que debería oscilar entre 30-50 Hz. El espesor de la capa disminuirá mientras mayor sea la frecuencia, de tal manera se podrá captar la longitud de onda que viaja por el estrato (Hashash Y. M., 2017). La frecuencia elegida para el análisis fue de 40 Hz bajo el concepto de a mayor valor de frecuencia, las capas tendrán mayor capacidad (Menq, 2003) de captar la oscilación de los periodos de los sismos. Cabe recalcar que dicho proceso es importante para

el análisis no lineal a diferencia del lineal equivalente cuyo proceso se enfoca más en la construcción de las curvas dinámicas, por esta razón no se tomaron los mismos perfiles para cada uno de los análisis.

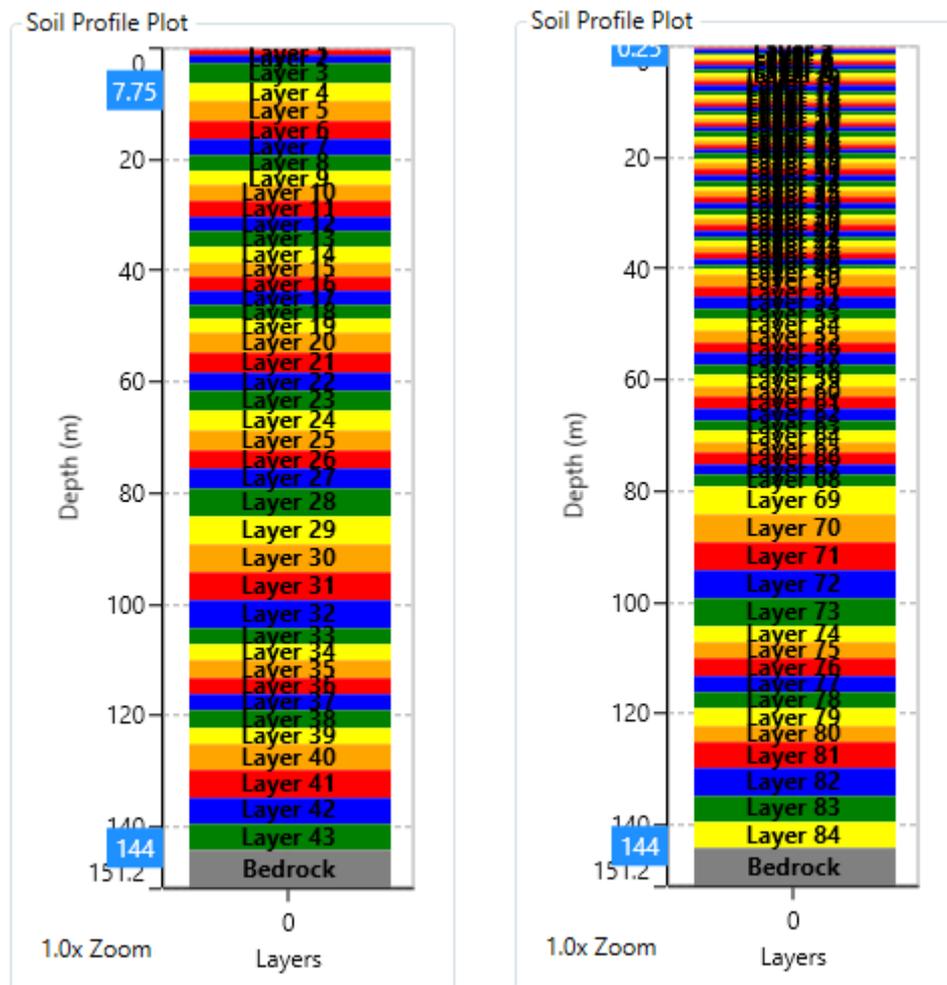


Figura 17. Perfiles discretizados. Lineal Equivalente (Izquierda) y No Lineal (Derecha)

Fuente: (Autor, 2019)

Corrección de la Línea Base:

Los registros en roca por efecto de los sensores de los acelerogramas tendrán desplazamientos en la línea base que jamás existieron, a causa de esto se podrán observar desplazamientos fuera de la abscisa que deberán ser corregidos. El software utilizado da la facilidad de poder realizar la corrección de línea base con cada uno de los registros ingresados. La Figura

18 muestra, a manera de ejemplo, el resultado de la corrección de la línea base para el sismo de Chimborazo.

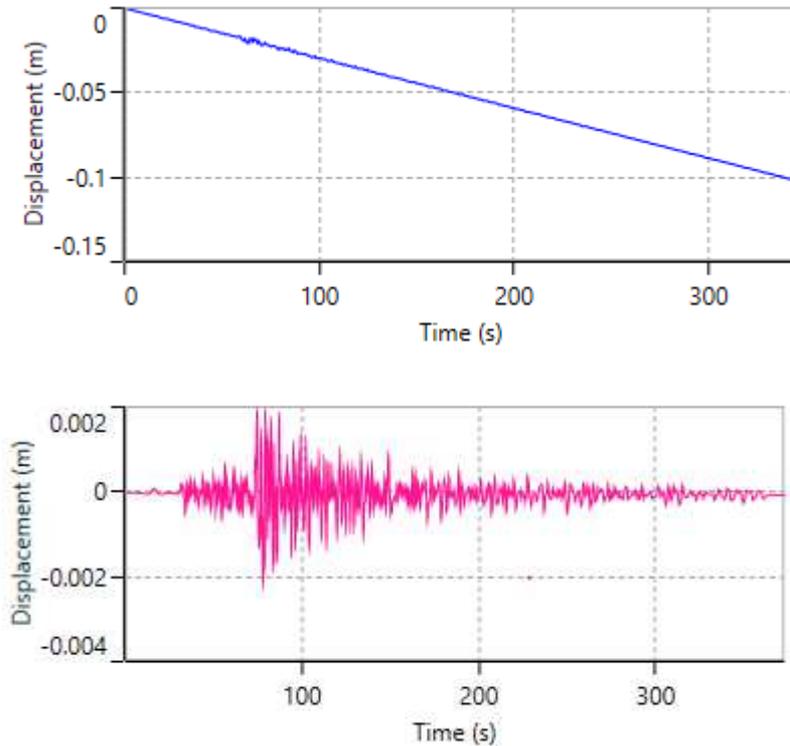


Figura 18. Corrección de línea base de un registro sísmico.

Fuente: (Autor, 2019)

4.4 PLAXIS 2D

Plaxis al ser un software muy potente para el estudio de la ingeniería geotécnica, ha sido utilizado para distintos tipos de análisis, desde estabilidad de taludes hasta un análisis de respuesta dinámica del suelo. Para el estudio de respuesta de sitio es muy preciso al ser un software que utiliza métodos de elementos finitos debido a como se había mencionado anteriormente, este proceso divide e integra cada parámetro del sistema en una finita cantidad de elementos necesaria para obtener resultados más óptimos. El correcto proceso de construcción del modelo en Plaxis debe realizarse con las siguientes consideraciones:

Calibración de curvas degradación:

Se define un elemento que represente el material de uno de los estratos del perfil con el modelo Hardening Soil. Una vez ingresado los parámetros de rigidez y resistencia del suelo se realiza un Soil Test (DSS) variando el porcentaje de deformaciones. Para obtener la curva de la resistencia al corte, se corre el ensayo a altas de deformaciones (10%) aplicándole el esfuerzo vertical (σ_{yy}) de una capa modelada en DeepsoilV7 y así poder calibrar ambas curvas. Las Figuras 19 y 20 muestran el ensayo ejecutado en Plaxis y la comparación de resultados entre las curvas de resistencia al corte respectivamente.

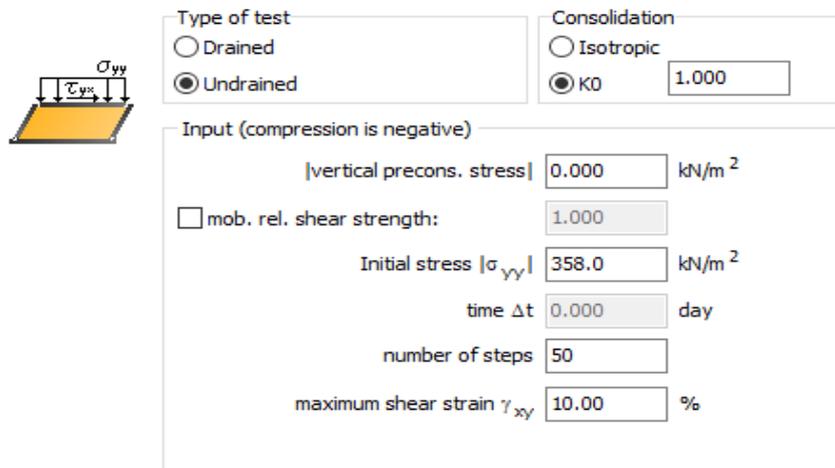


Figura 19. Soil Test (DSS) realizado a altas deformaciones (10%)

Fuente:(Autor, 2019)

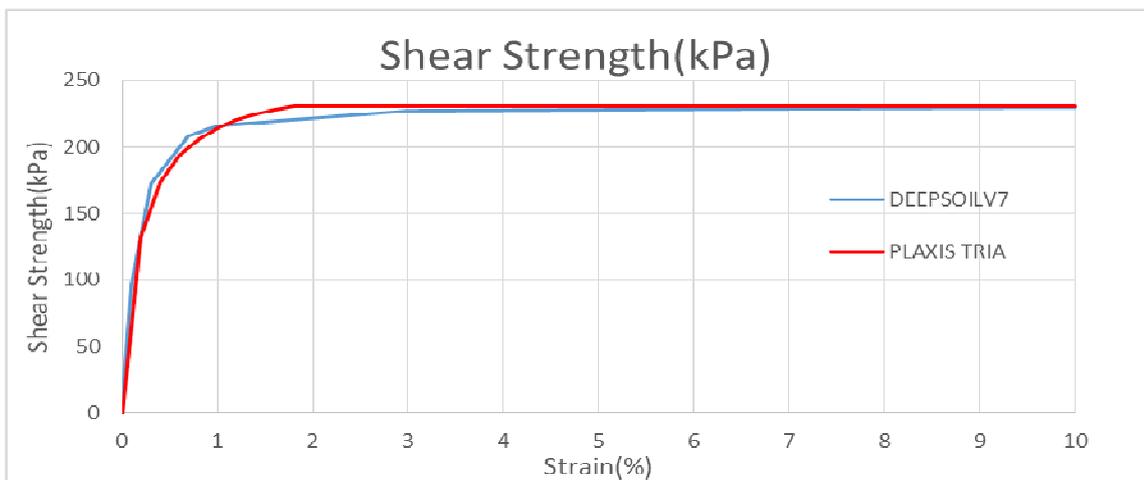


Figura 20. Comparación de curvas de resistencia al corte.

Fuente: (Autor, 2019)

La integral de la curva de la resistencia al corte equivale a la curva de la degradación del módulo de corte (G/G_{max}). A continuación, se realiza el ensayo a bajas deformaciones (0.0001%) y se toma la secante del punto inicial de la curva para encontrar el máximo módulo de corte (G_{max}). Una vez obtenido el máximo módulo de corte, se repite el proceso con deformaciones superiores y de esta manera poder construir la curva de degradación del módulo de corte. Finalmente, con los suficientes puntos se calibra la curva al punto de que coincida con la curva utilizada en el análisis lineal equivalente del software DeepsoilV7. La Tabla 5 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos del ensayo Soil Test DSS a distintas deformaciones.

Tabla 5. Resultados de un mismo elemento evaluado en un Soil Test DSS de distintas deformaciones.

Puntos		
Strain (%)	G(kPa)	G/Gmax
0.0001	146700	0.9959
0.001	145800	0.9898
0.01	137800	0.9355
0.1	90330	0.6132
0.5	36910	0.2506
1	21400	0.1453

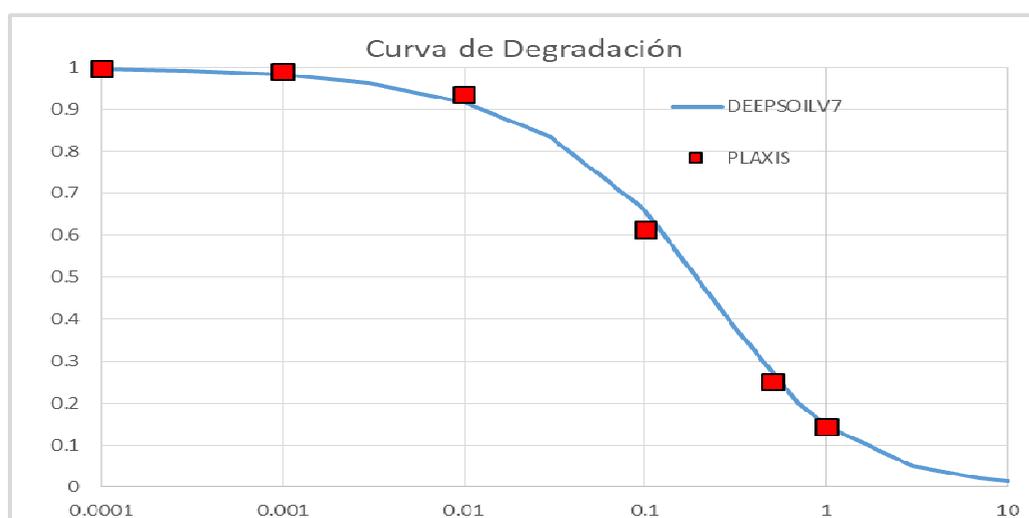


Figura 21. Curvas de degradación del módulo de corte ya calibradas.

Fuente: (Autor. 2019)

Condiciones de borde del modelo:

Para representar un movimiento sísmico en una columna de suelo en Plaxis 2D se deben cambiar las siguientes condiciones del modelo en la fase donde ocurre el desplazamiento inducido por el registro ingresado.

- Deformaciones:

Las condiciones de borde que se le aplican a la capacidad de deformación de la columna de suelo son las siguientes:

- Boundary XMin y XMax deben ser libres.
- Boundary YMin debe ser totalmente fijo.
- Boundary YMax debe ser libre.

- Dinámico

Para simular un análisis de propagación de onda en 1D se debe tomar los límites verticales de izquierda y derecha con grados de libertad vinculado. Las condiciones en la base deben ser tomadas como una base conforme (Compliant Base) para obtener el comportamiento del bedrock.

Time Step

Uno de los parámetros requeridos en la fase dinámica del modelo es el número máximo de pasos (Max Steps), este valor debe ser ingresado para representar el intervalo de tiempo del registro ingresado. Se relaciona el tiempo dinámico (duración del registro) con el valor de Max Steps y este tiene que ser similar al incremento de tiempo que posee el registro. Esto se realiza para que el software pueda captar el comportamiento del movimiento sísmico en su totalidad. Cuando el incremento del tiempo tomado por el software difiere del paso que posee el registro ingresado, PLAXIS interpolará los valores del registro de entrada. La Figura 22 muestra ejemplos en donde el paso usado por el programa es similar al del registro ingresado y en los que no lo son.

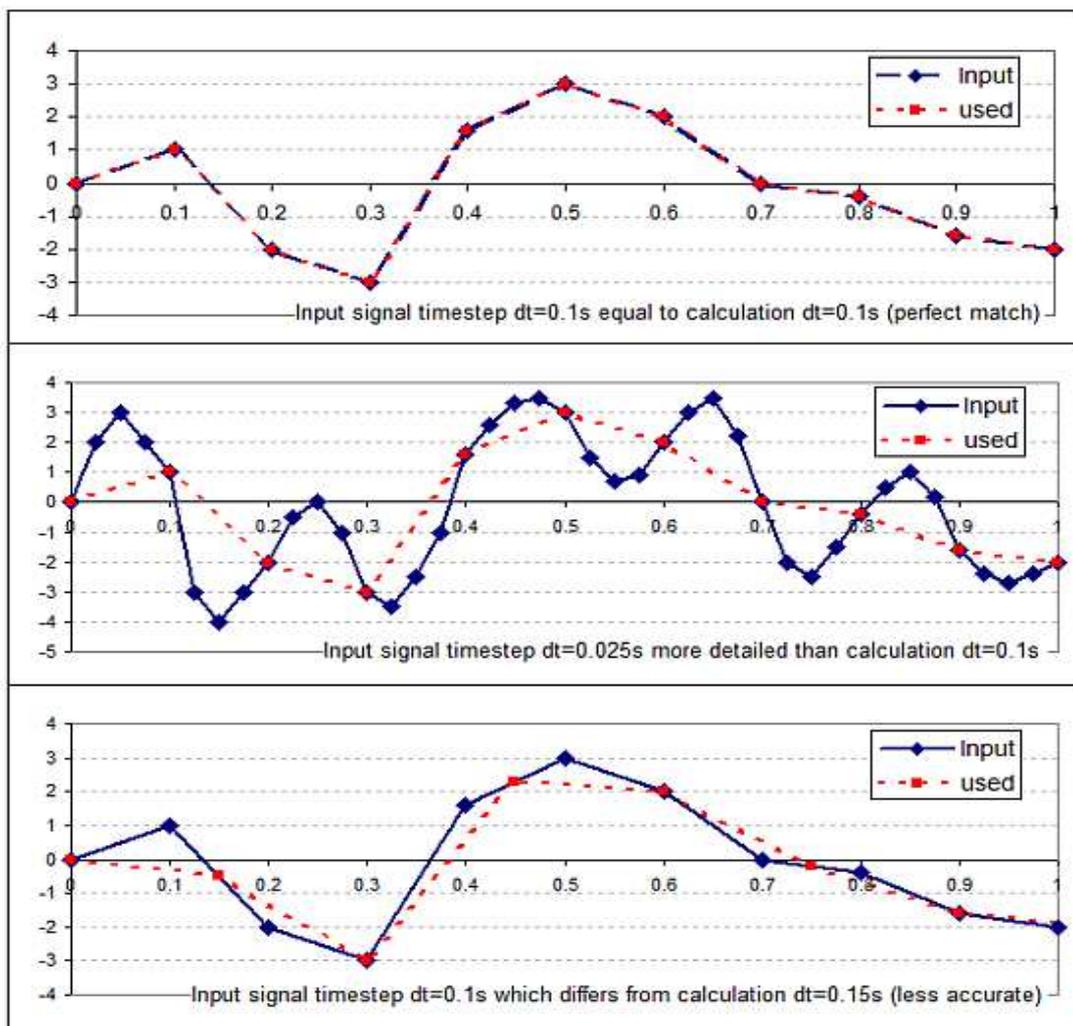


Figura 22. Registro ingresado (Azul) y registro usado (Rojo) para distintos casos en los que el paso del tiempo es igual o difiere del paso del registro ingresado.

Fuente: (PLAXIS, Scientific Manual, 2016)

Se puede observar la importancia de este parámetro debido a que si ambos pasos de tiempo son similares el software utilizará el registro en su totalidad sin diferencia alguna. Si el paso del tiempo difiere de manera considerable PLAXIS no podrá lograr captar el registro ingresado como se observa en la segunda gráfica de la Figura 22. La versión que se utiliza para el proyecto tiene un límite de número máximo (10000 pasos), es por esto que existirán resultados de menor efectividad para registros con pasos de tiempo muy bajos.

Comparación de Perfil de Velocidades de Onda:

Una vez calibrada las curvas de cada uno de los estratos modelados en PLAXIS, es recomendable encontrar la velocidad de onda de corte en función del módulo cortante máximo en cada una de las capas y compararla con el perfil Vs descrito en el literal 3.6. Dicha comparación se demuestra en la Figura 23.

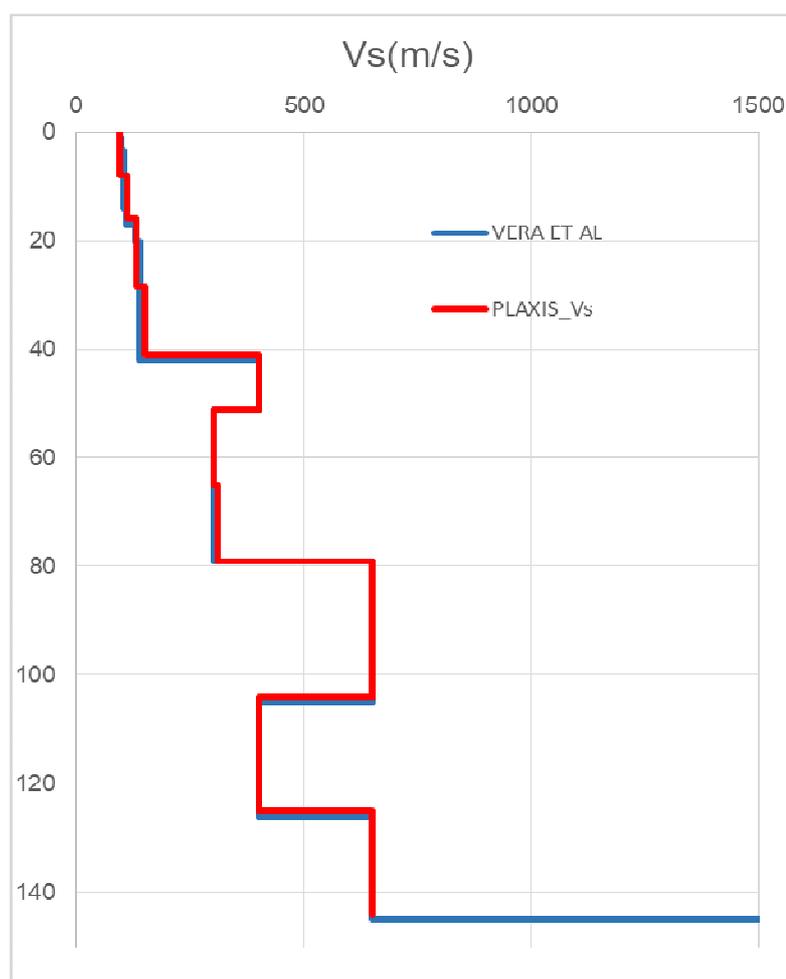


Figura 23. Perfiles de velocidades de onda.

Fuente: (Autor, 2019)

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS

5.1 DeepsoilV7

5.1.1 Análisis Lineal Equivalente (EQL)

5.1.1.1 Pedernales

Los resultados obtenidos del análisis lineal equivalente se pueden observar en la Figura 24. La primera grafica muestra cómo se modifica el pico máximo de aceleración (PGA) a lo largo de perfil, los valores tienden a pronunciarse en las arcillas a diferencia de las arenas donde la máxima aceleración obtenida fue de 0.04g. En el primer estrato de arcilla existió la mayor amplificación dando como resultado en la superficie un valor de PGA de aproximadamente 0.09g. El parámetro de deformación indica que el estrato de arcilla a los 40 m de profundidad sufre las mayores deformaciones alrededor de 0.15%. La ultima gráfica presentan los desplazamientos ocurridos durante el movimiento sísmico justificando las máximas aceleraciones en los primeros metros, existe un incremento pronunciado al final de la primera capa de arcilla producto de las altas deformaciones ocurridas.

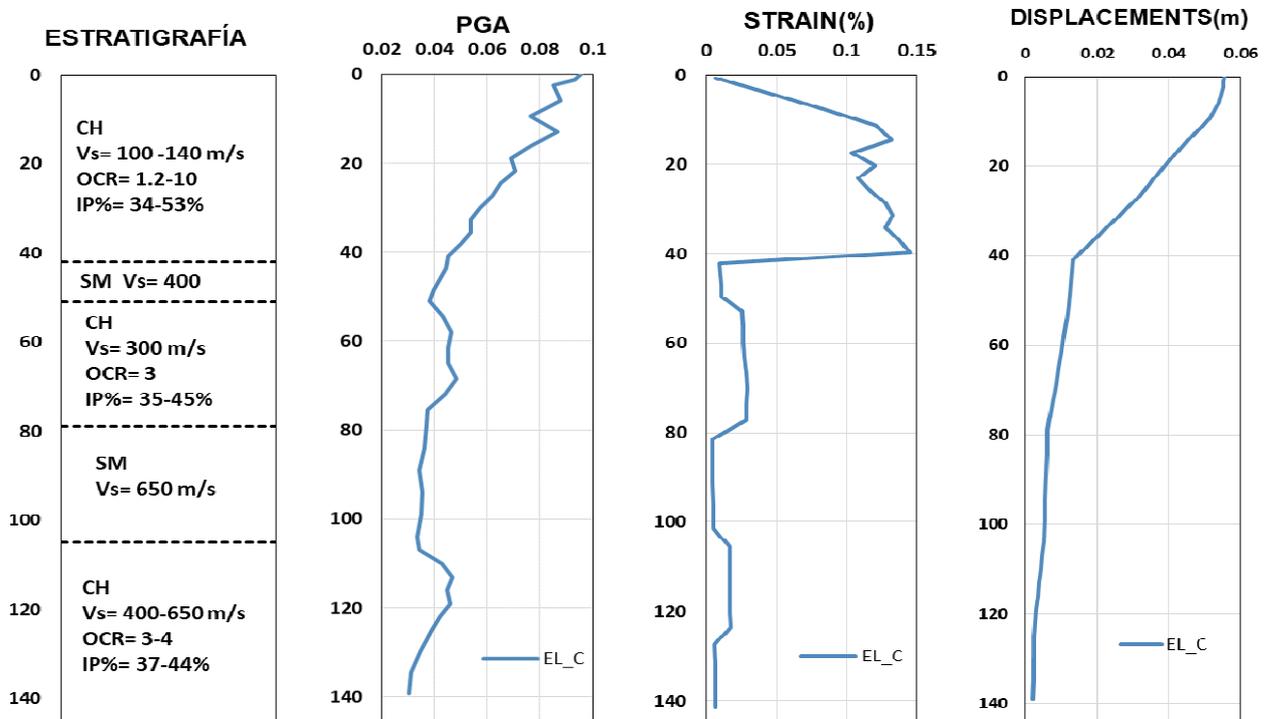


Figura 24. Resultados del Análisis Lineal Equivalente para el registro de Pedernales.

Fuente: (Autor, 2019)

Los espectros de respuesta en la superficie, a diferencia de los espectros en roca utilizados como inputs en los análisis, son útiles para evaluar la verdadera incidencia que recibirá el sitio. En la Figura 255 se puede observar la línea de color negro que corresponde al espectro en roca. El espectro color verde es el resultado de los datos medidos en superficie de la estación ubicada en el ERU y de tono azul se muestran los resultados obtenidos en el análisis EQL. El periodo predominante del perfil ERU es de aproximadamente 1.6 segundos, valor en donde existieron las máximas amplificaciones de aceleración 0.35g-0.44g. Cabe recalcar la considerable amplificación que tuvo el PGA, al aumentar hasta casi tres veces su valor inicial registrado en roca (de 0.033g a 0.09g).

Fuente: (Autor, 2019)

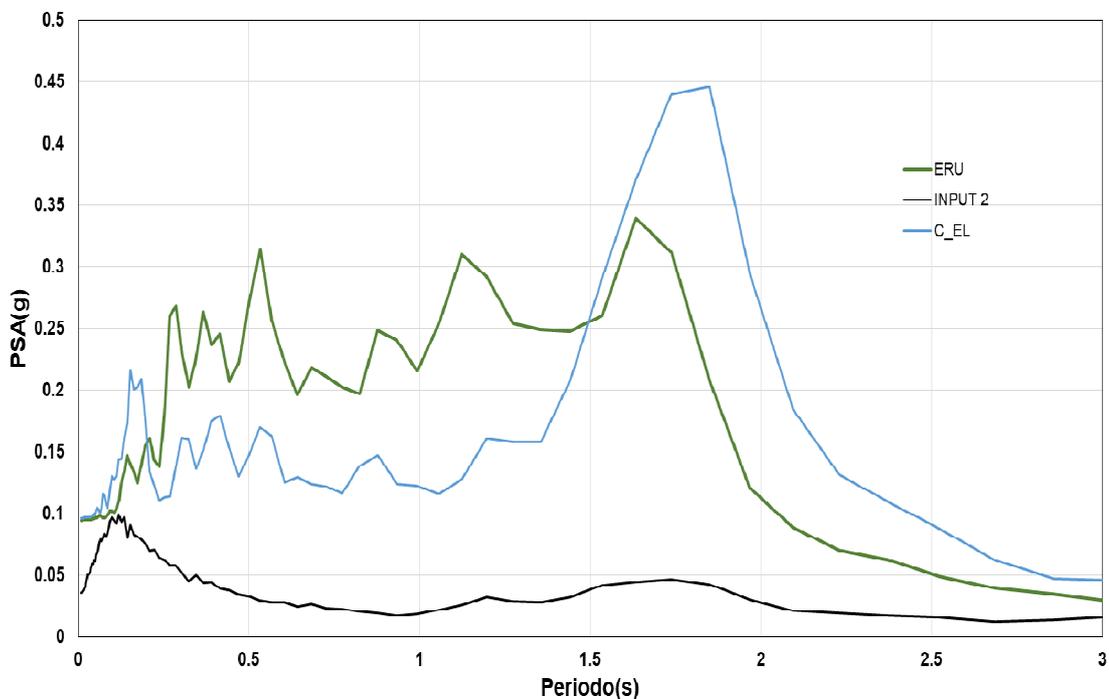


Figura 25. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU.

5.1.1.2 Guayas

El sismo ocurrido en la provincia del Guayas fue de menor magnitud a diferencia del sismo de Pedernales, por ende el nivel de deformaciones es mucho menor y el comportamiento del suelo no sobrepasará el rango lineal. En la primera grafica de la Figura 26 se muestra cómo varia el pico máximo de aceleración (PGA) a lo largo de perfil, los valores tienden a pronunciarse en las arcillas en un rango de 0.035g a 0.04g mientras que en las arenas baja de manera considerable. En la superficie del ERU culmina con un valor de PGA de aproximadamente 0.044g. Como era de esperarse, las deformaciones no exceden de 0.008% a causa de la menor magnitud del evento. La cuarta gráfica presentan los desplazamientos ocurridos durante el movimiento dando como un resultado en el tope de la columna de suelo un valor máximo de 0.0004 m en la capa de material arcilloso.

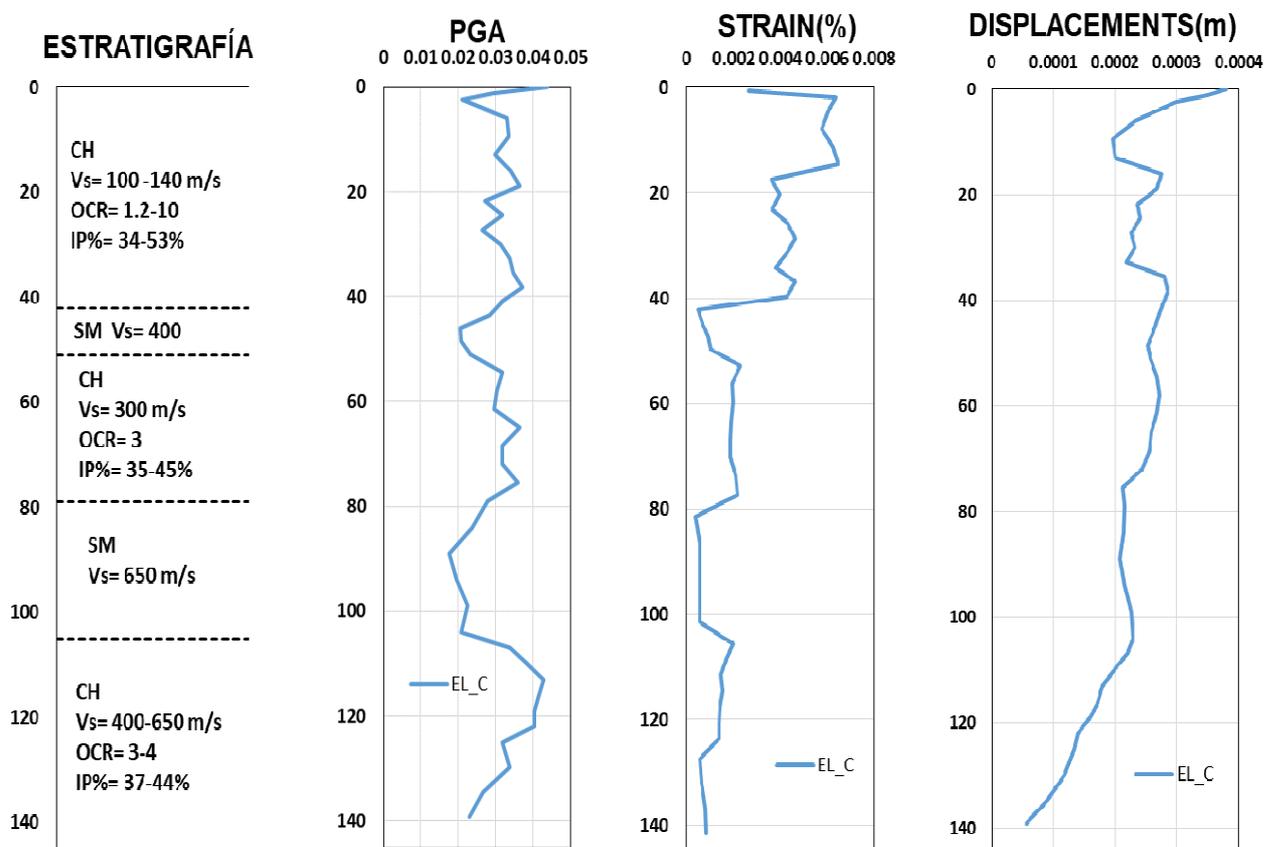


Figura 26. Resultados del Análisis Lineal Equivalente para el registro de la provincia del Guayas.
Fuente: (Autor, 2019)

Las máximas respuestas de aceleraciones a varios periodos son representados en un espectro. En la Figura 27 se observa de color verde el espectro de sitio medido en la estación del ERU, de línea negra el espectro en roca y el espectro azul es el resultado del análisis EQL. El porcentaje de amplificación del pico máximo de aceleraciones en la superficie es de aproximadamente un 50% (de 0.029g a 0.045g).

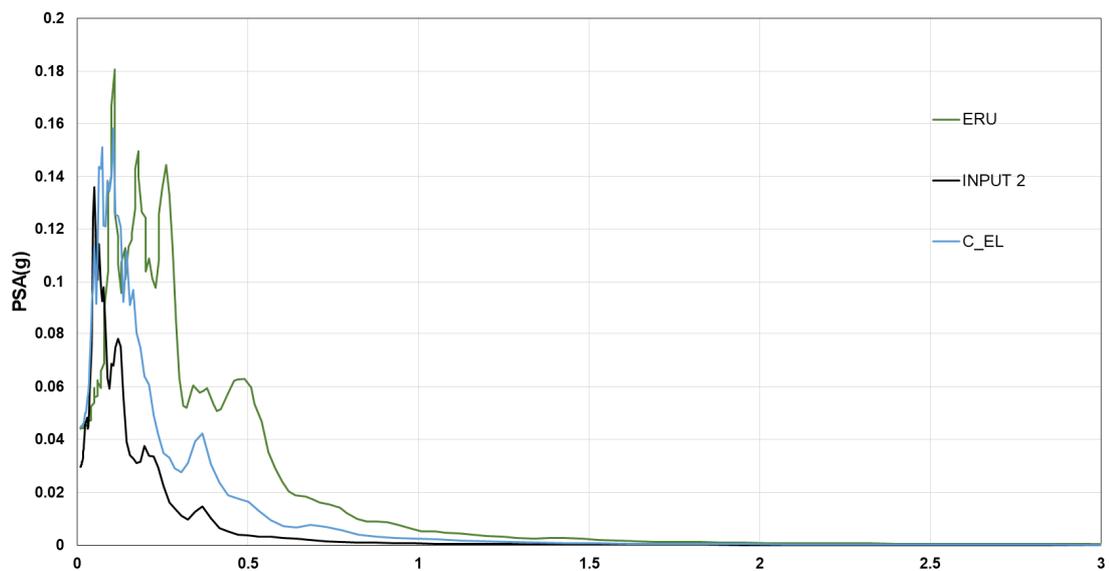


Figura 27. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia del Guayas.
Fuente: (Autor, 2019)

5.1.1.3 Chimborazo

El sismo de Chimborazo a pesar de ser de mayor magnitud que el sismo de la provincia del Guayas, posee una distancia de ruptura mayor de la fuente al sitio a analizar. De esta manera la diferencia de los resultados en magnitudes de deformación no difiere de manera considerable en comparación a los valores del sismo descrito en el literal 5.1.1.2. Los resultados obtenidos del análisis son presentados en la Figura 28. En la primera gráfica se muestran los cambios que producidos en el PGA a lo largo de la columna de suelo, las magnitudes no bajan de 0.018g en las arcillas mientras que en las arenas se reduce la aceleración hasta aproximadamente 0.01g. En la superficie de la columna de suelo hay una magnitud de PGA no mayor a 0.035g. Se puede observar que las

deformaciones de mayor magnitud ocurren en el primer estrato de arcilla llegando a tener valores que no sobrepasan 0.01%.

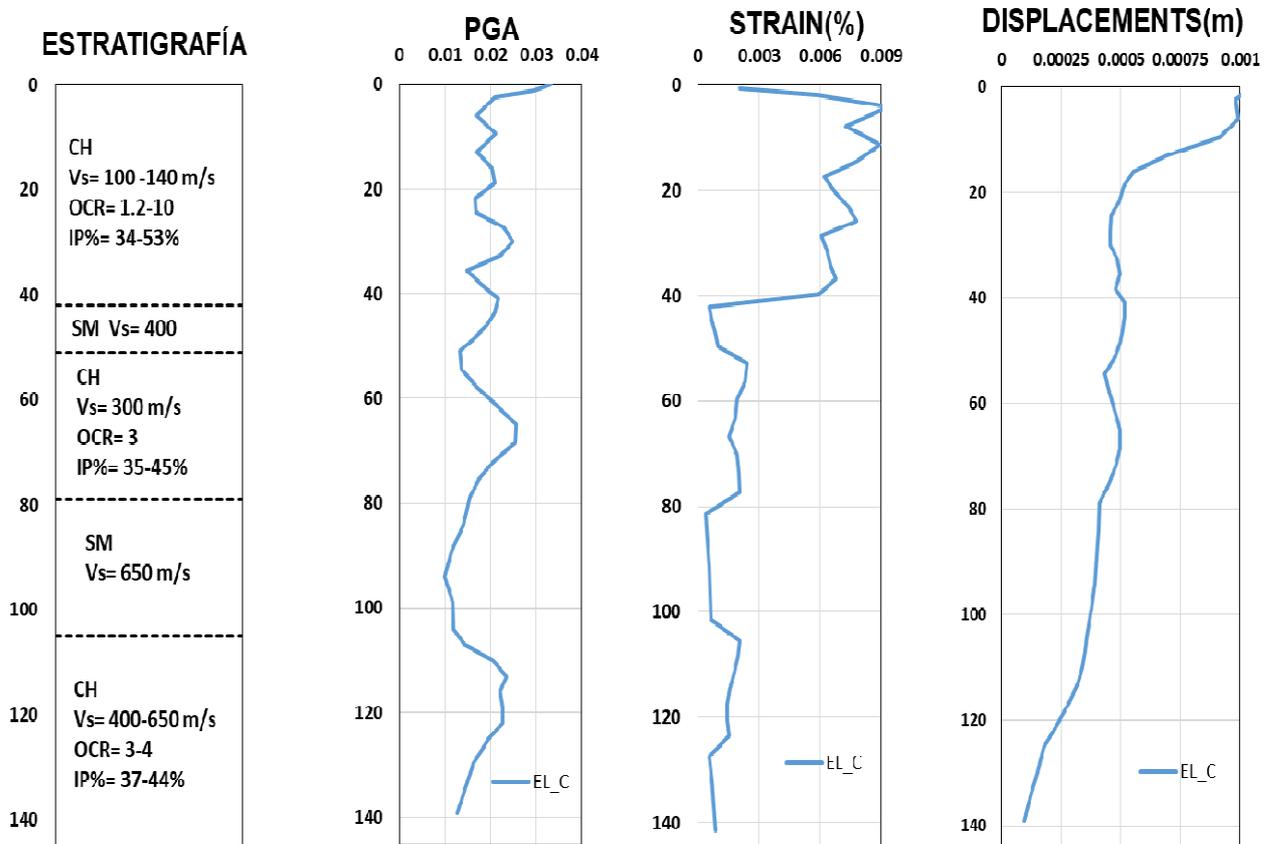


Figura 28. Resultados del Análisis Lineal Equivalente para el registro para el sismo de Chimborazo. . Fuente: (Autor, 2019)

La Figura 299 muestra la considerable amplificación que tuvo el PGA en la superficie a diferencia del espectro en roca, a pesar de que no se logró captar la degradación de la forma espectral en el análisis se encontraron diferencias considerables en periodos altos.

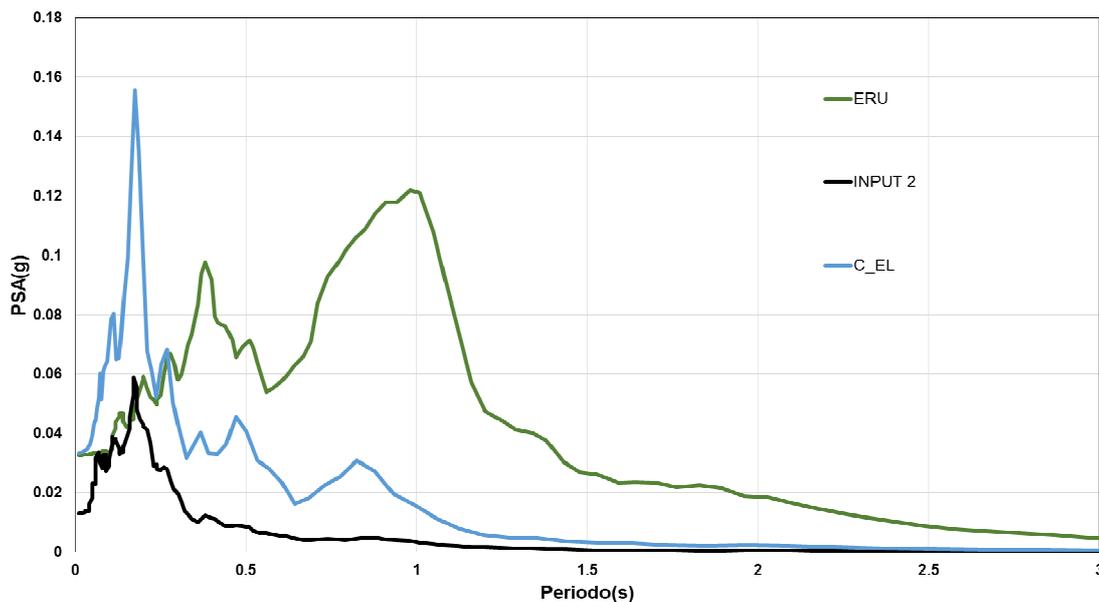


Figura 29. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia de Chimborazo.
Fuente: (Autor, 2019)

5.1.2 Análisis No lineal

5.1.2.1 Pedernales

Se tuvo la misma tendencia que en el análisis lineal equivalente donde los picos de máxima aceleración (PGA) se pronunciaron en capas de material arcilloso y se deamplifican en los estratos de arena obteniendo valores que no sobrepasaban 0.04g. El PGA en la superficie dio como resultado aproximadamente 0.065g como máxima aceleración a lo largo del perfil. A causa de que las aceleraciones fueron menores a las del análisis EQL, los valores de deformaciones y desplazamientos se redujeron. Una vez más, los máximos valores de deformaciones ocurrieron en la primera capa de arcilla al tener como máximo valor 0.1% y el mayor desplazamiento a lo largo de la columna de suelo fue de aproximadamente 0.03 m.

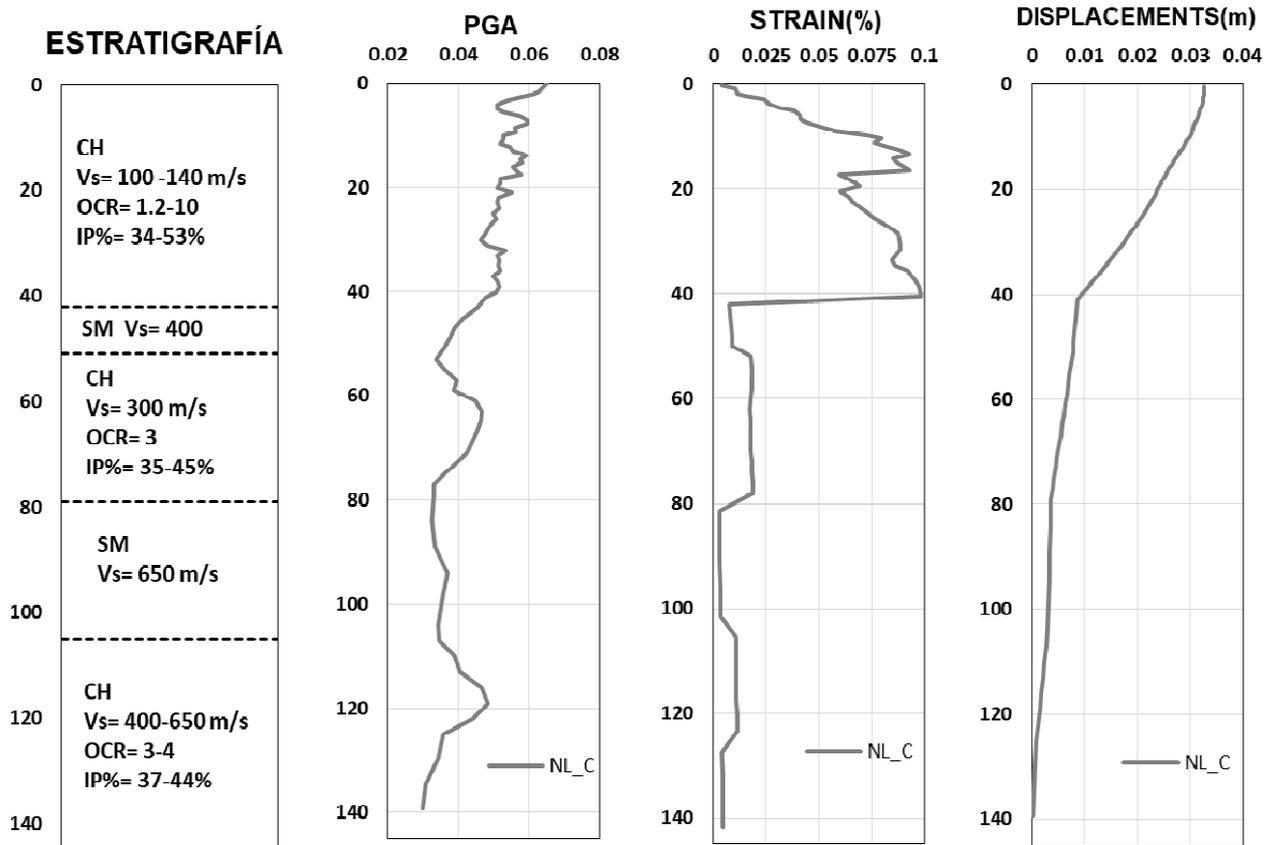


Figura 30. Resultados del Análisis No Lineal para el sismo de Pedernales.

Fuente: (Autor, 2019)

En el espectro de respuesta del análisis no lineal se obtuvo valores de menor magnitud, manteniéndose la misma forma espectral que tiende a degradarse y llega a amplificarse en el periodo de 1.6 s aproximadamente. Se pueden observar diferencias en amplificaciones no obtenidas con respecto al espectro medido en sitio (línea verde) a periodos menores a 1.5 s.

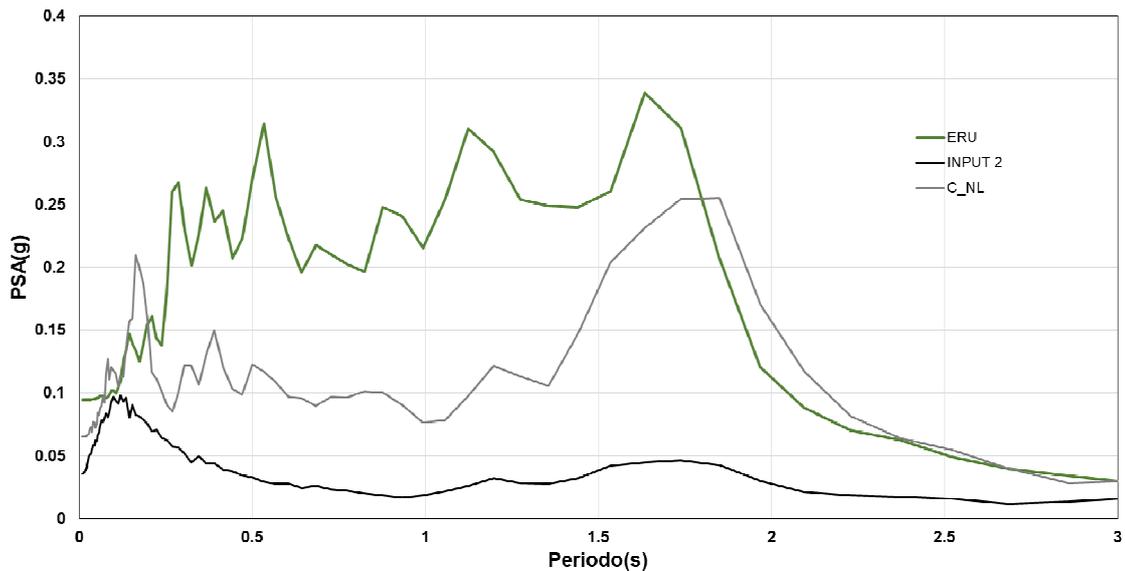


Figura 31. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de Pedernales.

Fuente: (Autor, 2019)

5.1.2.2 Guayas

A bajas deformaciones los resultados de un análisis no lineal no diferirán a pesar de realizar las respectivas discretizaciones. El sismo en Guayas, al no ser gran magnitud ni de gran duración, se puede apreciar en la Figura 32 como sus parámetros son muy similares al del análisis EQL. Una vez más, en la primera gráfica obtenemos la variación del pico máximo de aceleración (PGA) a lo largo de perfil, los valores tienden degradarse en las arenas mientras que las amplificaciones ocurren en los estratos arcillosos. En la superficie del ERU la magnitud de PGA no posee mayor amplificación. A causa de los bajos valores de las aceleraciones, las deformaciones bajaron teniendo un valor máximo de 0.006%. El último gráfico presenta el máximo desplazamiento que ocurre en la superficie de apenas 0.0034 m aproximadamente.

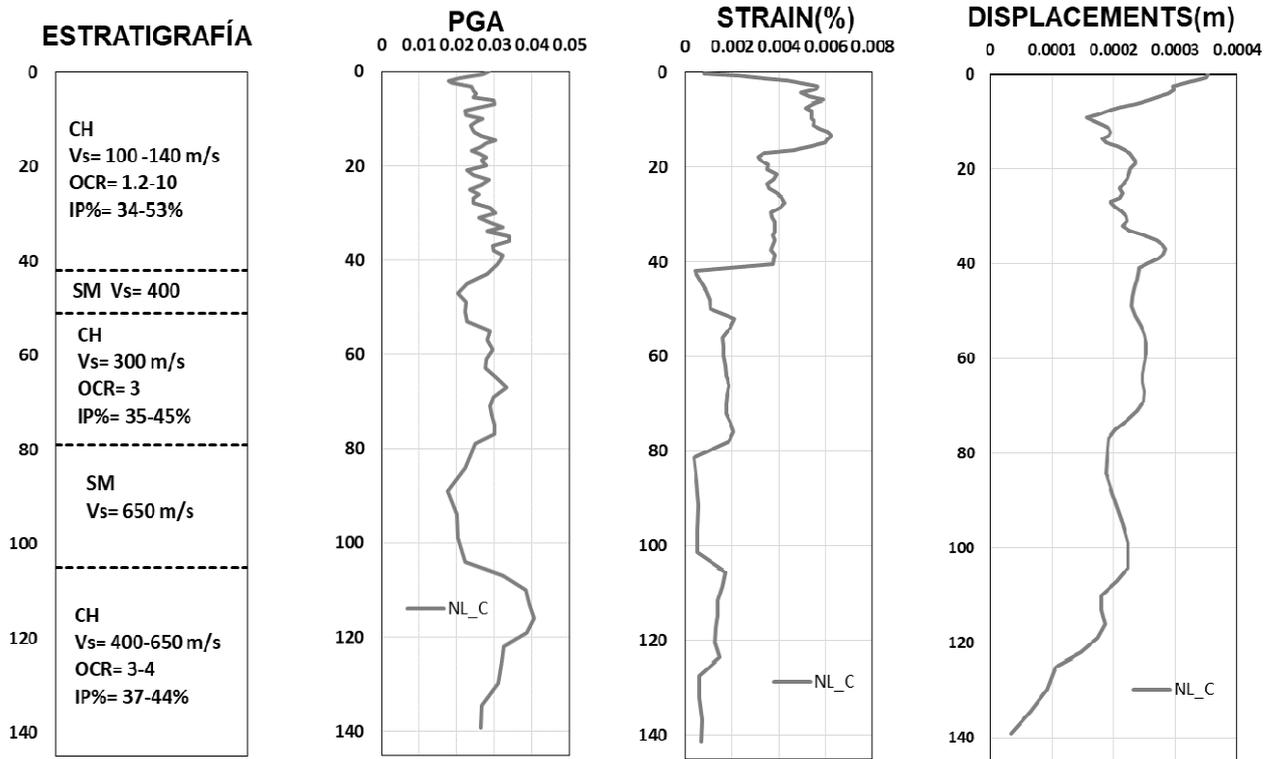


Figura 32. Resultados del Análisis No Lineal para el sismo de la provincia del Guayas.

Fuente: (Autor, 2019)

Como se puede observar en la Figura 33 la forma espectral del espectro de análisis no lineal se mantiene, apenas difiere en amplificaciones al incrementar el periodo en el espectro medido en la estación del ERU y de línea negra se observa el espectro en roca utilizado como input.

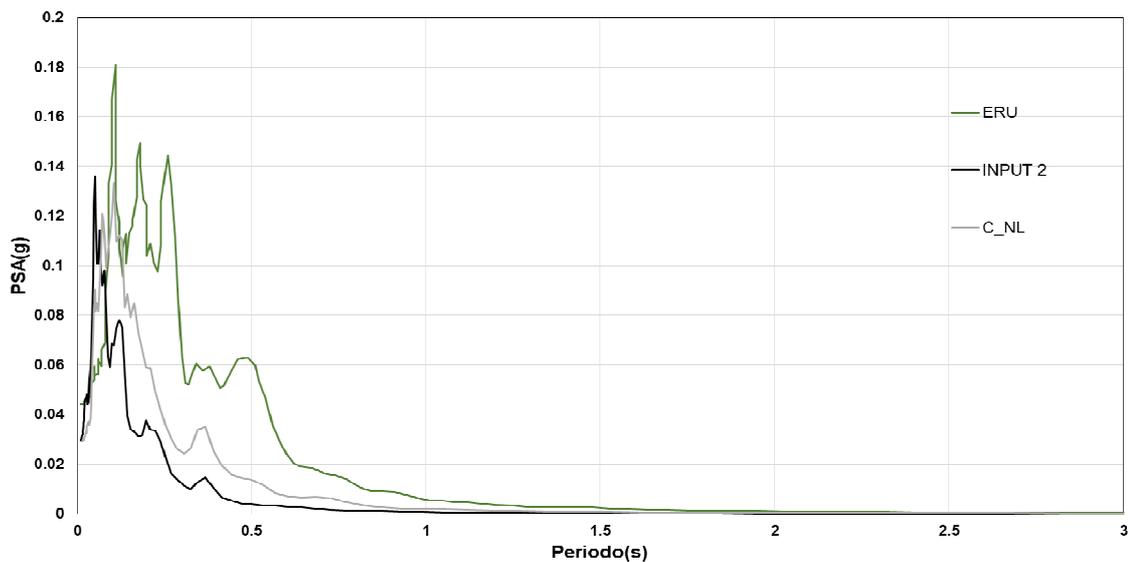


Figura 33. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia del Guayas.

5.1.2.3 Chimborazo

Los resultados que se obtuvieron del análisis no lineal para el sismo de la provincia de Chimborazo se presentan en la siguiente figura. Los valores de PGA poseen la misma tendencia de los casos ya antes mencionados como resultado en la superficie de la columna del sitio ERU se obtuvo una magnitud de PGA no mayor a 0.025g. De la misma manera se observa que las máximas deformaciones ocurren en el primer estrato de material arcilloso y finalmente en la cuarta grafica los desplazamientos ocurridos a lo largo de la columna de suelo.

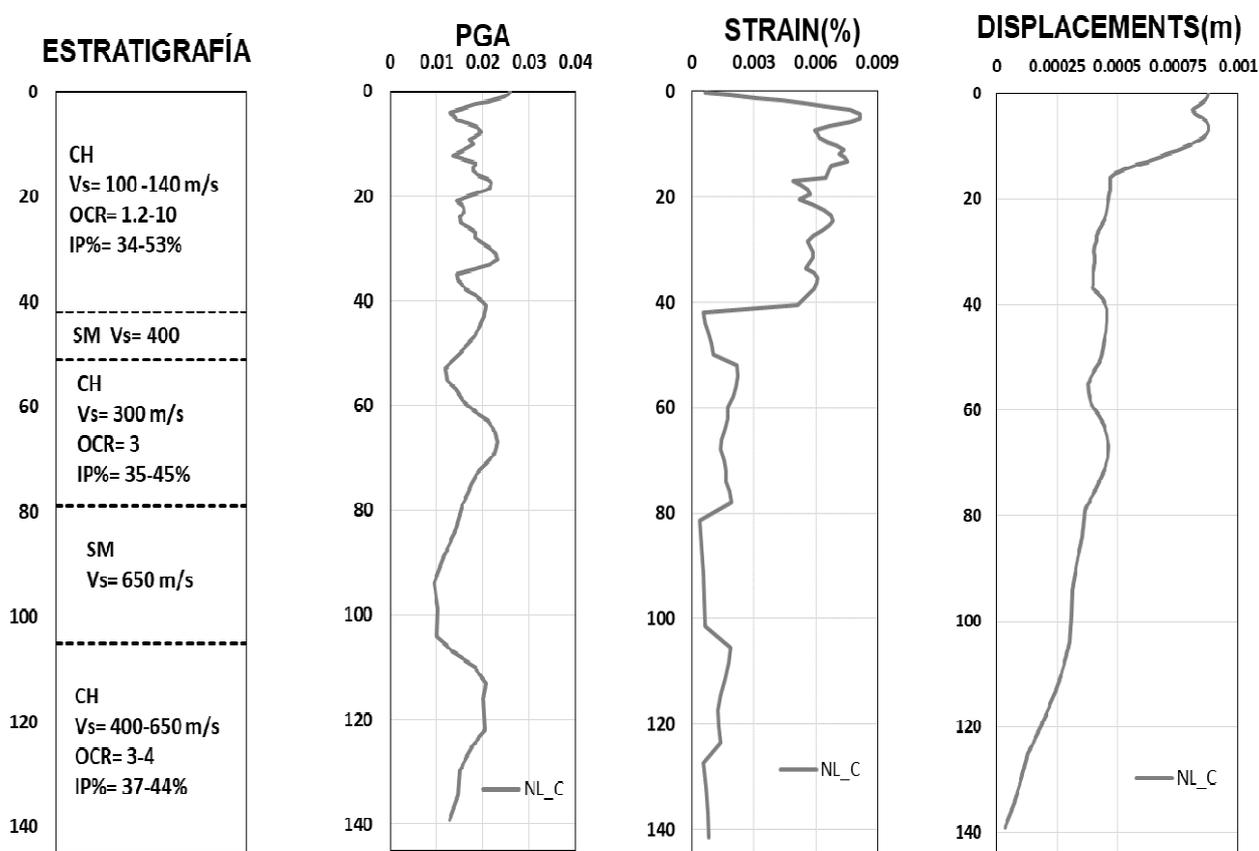


Figura 34. Resultados del Análisis No Lineal para el sismo de la provincia de Chimborazo.

Fuente: (Autor, 2019)

Se logra captar de manera aceptable la amplificación que tuvo el PGA en la superficie a diferencia del espectro en roca. Una vez más no se obtuvieron los resultados deseados al no capturar la degradación y amplificación que existe a largos periodos como se muestra en la Figura 35.

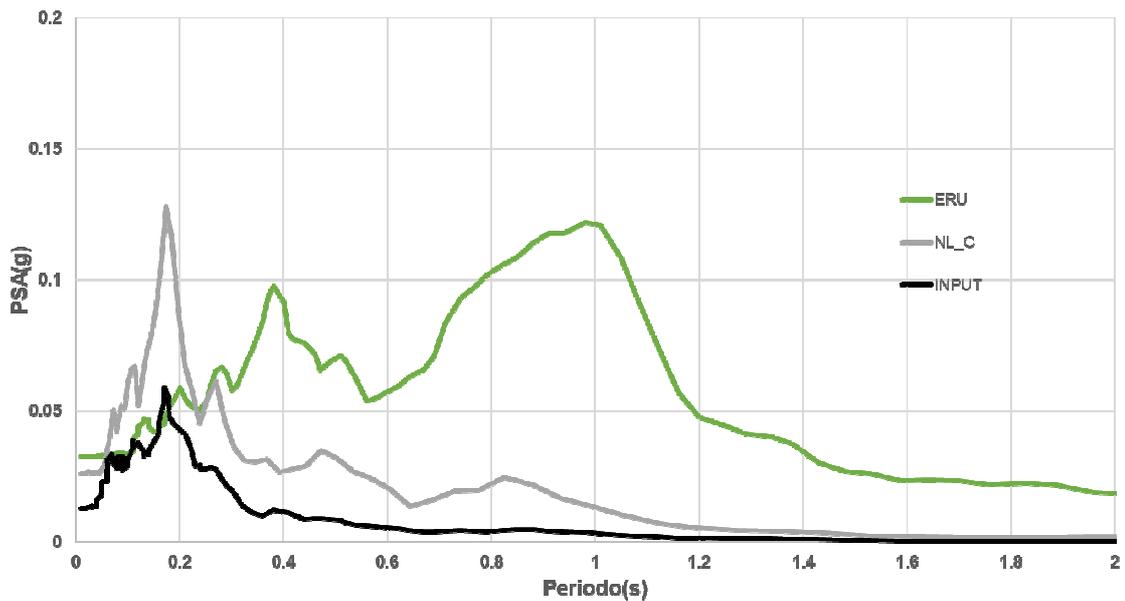


Figura 35. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia de Chimborazo.

Fuente: (Autor, 2019)

5.2 PLAXIS 2D

5.2.1 Análisis de elementos finitos

5.2.1.1 Pedernales

Dados los resultados del análisis de elementos finitos se presentan los parámetros disponibles en el software. Durante el movimiento sísmico se puede observar que ocurrieron deformaciones de gran magnitud en el primer estrato, llegando a valores de 0.1%, magnitud suficiente para que el suelo pasa al rango inelástico y tenga una degradación de propiedades. Se puede observar en la última gráfica que en la superficie hubo desplazamientos de hasta 6 cm.

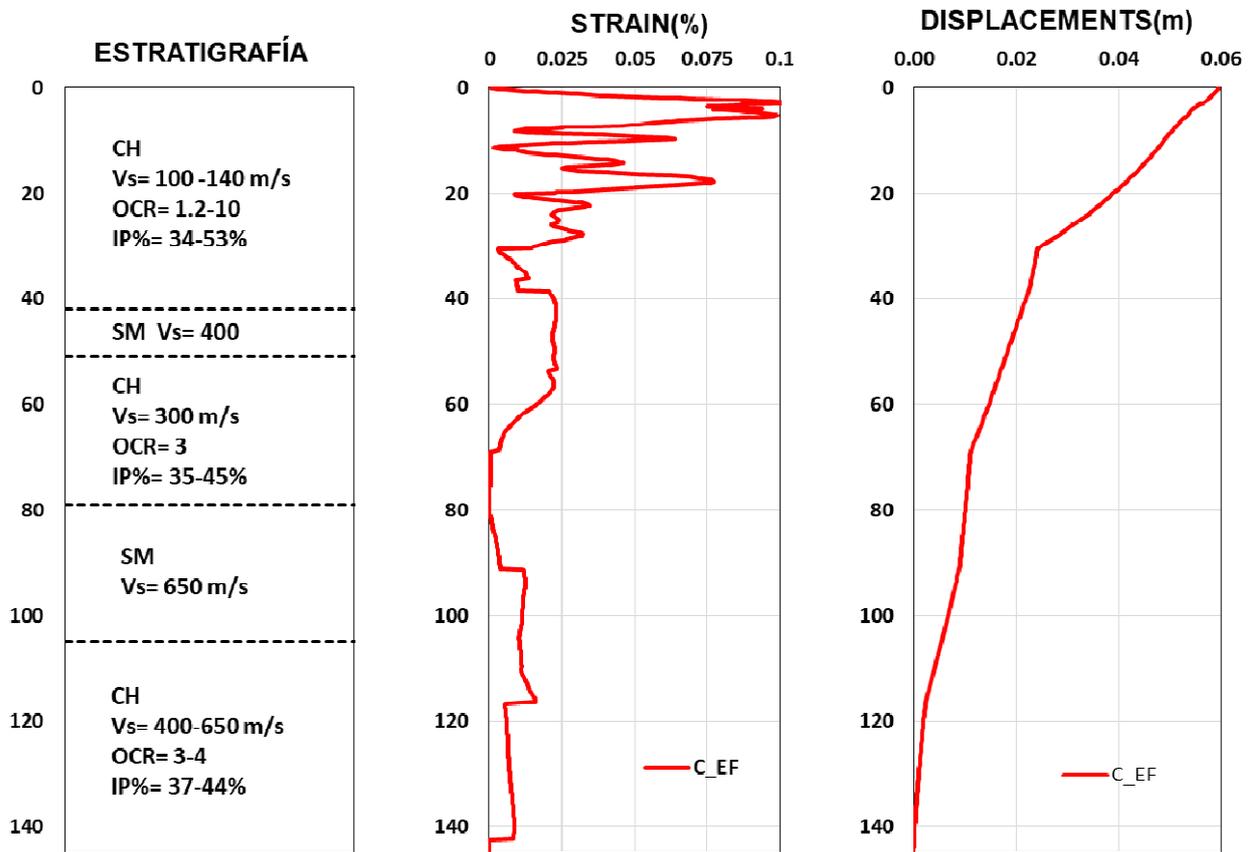


Figura 36. Resultados del Análisis de Elementos Finitos para el sismo de Pedernales.

Fuente: (Autor, 2019)

Existieron amplificaciones considerables durante el sismo de Pedernales, como se puede observar en la Figura 37, el pico máximo de aceleraciones aumento de 0.02g a 0.08g alrededor de cuatro veces su PGA inicial, además de que aumento la duración del movimiento notablemente.

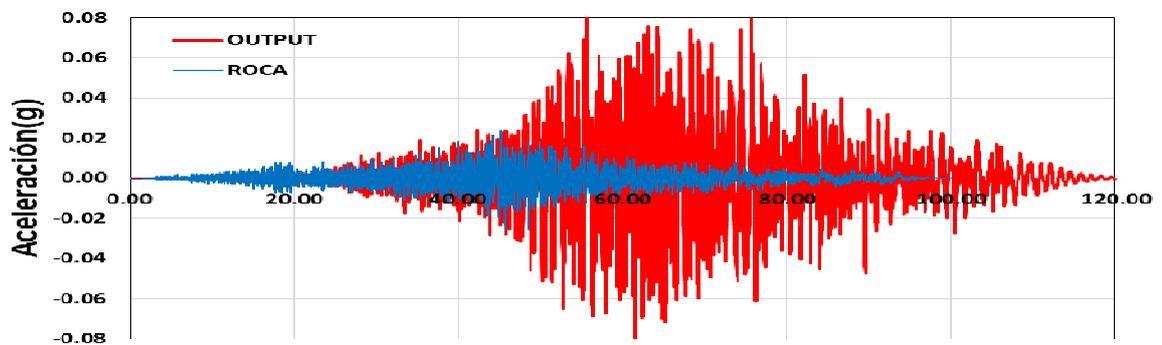


Figura 37. Registro de aceleraciones en roca (UCSG) y el registro del resultado de análisis de elementos finitos.

Fuente: (Autor, 2019)

El espectro de salida del análisis en PLAXIS 2D tuvo un PGA muy similar al espectro medido en sitio en ERU. Se lograron captar las amplificaciones en el periodo predominante del sitio a pesar de que no se obtuvo la misma forma espectral. Las máximas aceleraciones entre ambos espectros fue de aproximadamente 0.33g.

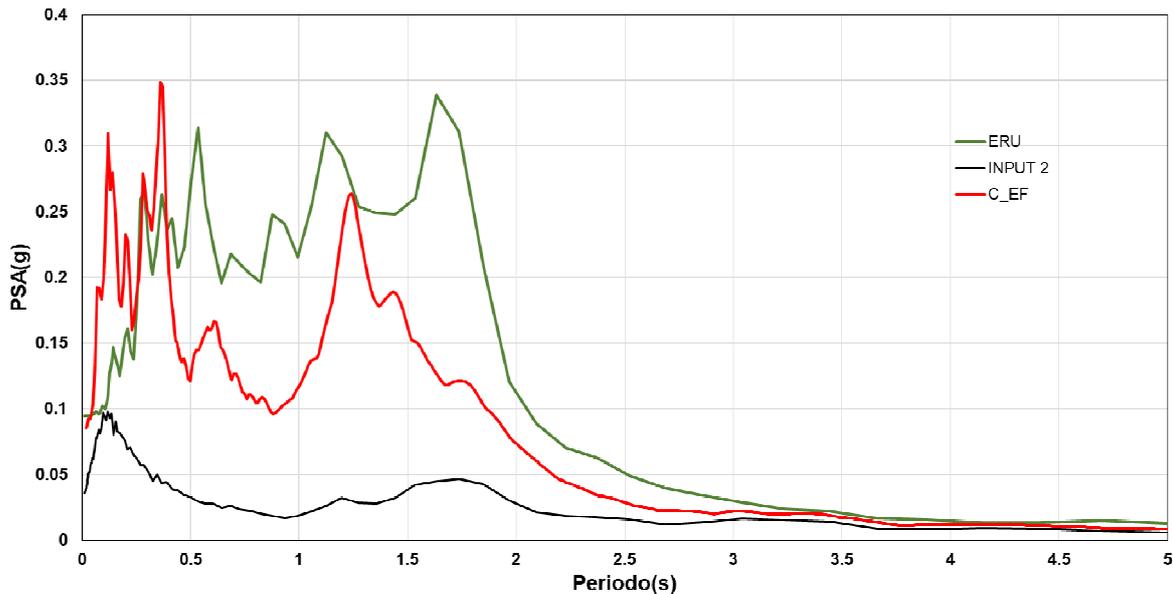


Figura 38. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de Pedernales.
Fuente: (Autor, 2019)

5.2.1.2 Guayas

El sismo ocurrido en la provincia del Guayas tuvo una magnitud de 6.5 Mw y presenta un contenido de frecuencia muy altos pero debido al poco tiempo de duración del evento no existieron deformaciones considerables como se muestra en la Figura 39. Los máximos desplazamientos y deformaciones ocurrieron en el primer estrato de arcilla sobre-consolidado (OCR= 1.2-10) parámetro importante para conocer el comportamiento del suelo para evaluar su respuesta en la superficie.

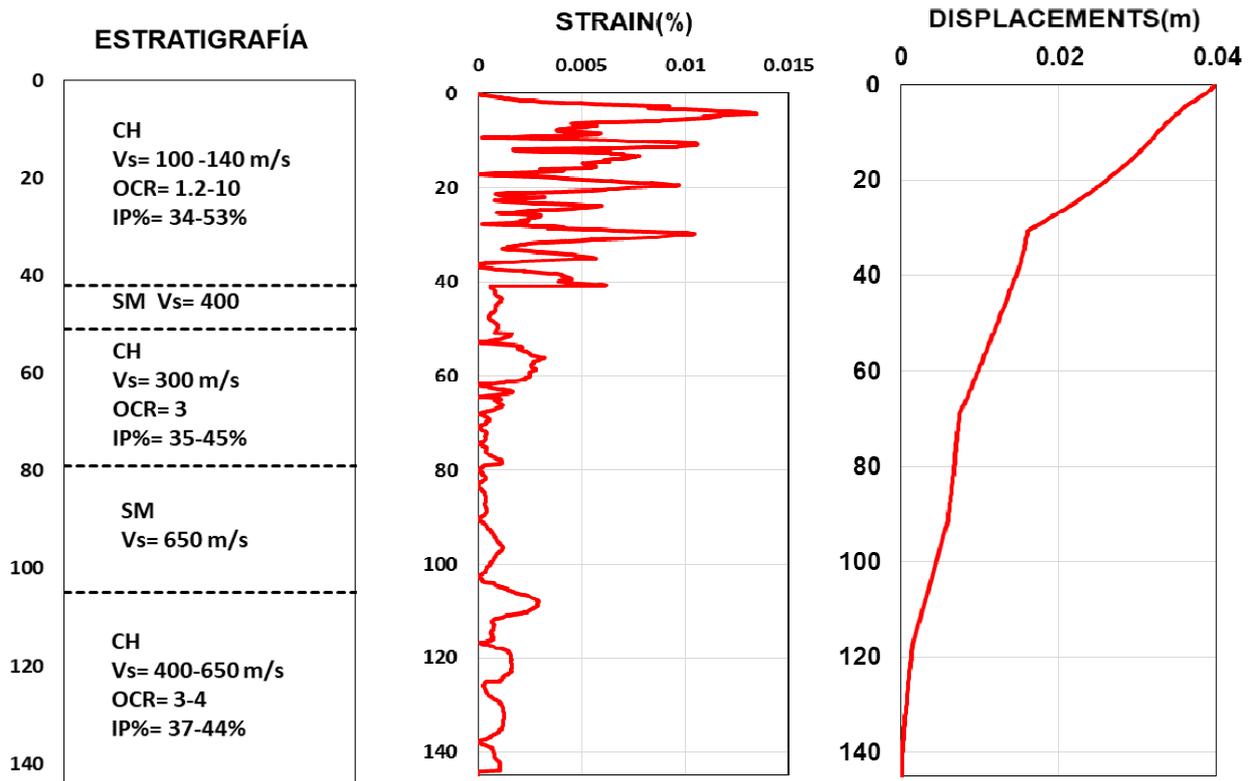


Figura 39. Resultados del Análisis de Elementos Finitos para el sismo de la provincia del Guayas.

Fuente: (Autor, 2019)

Se puede apreciar un muy leve alargamiento del periodo del evento sísmico. Una vez más gobierna la amplificación de las aceleraciones en la superficie, en los resultados de PLAXIS 2D dio como PGA un valor de aproximadamente 0.055g. Diferencia considerable a la magnitud inicial de poco más de 0.02g.

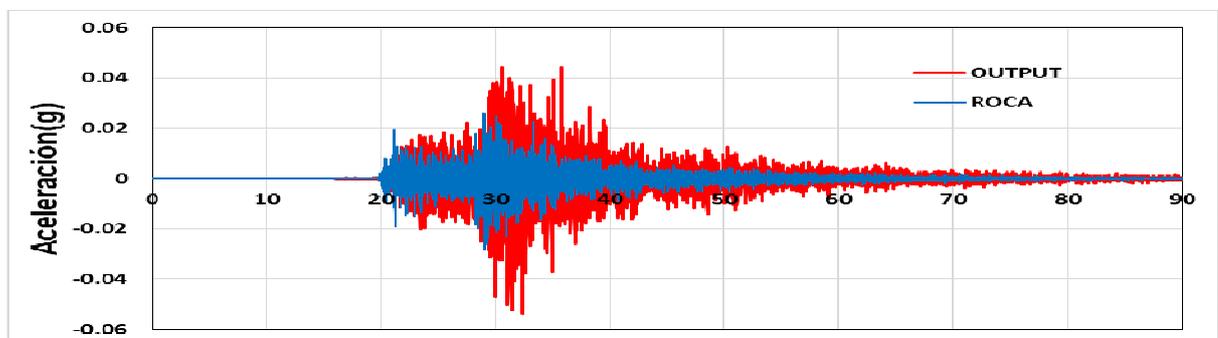


Figura 40. Registro de aceleraciones en roca (UCSG) y el registro del resultado de análisis de elementos finitos del sismo en Guayas.

Fuente: (Autor, 2019)

De color rojo se puede observar el espectro de sitio resultante al análisis de elementos finitos para el movimiento sísmico ocurrido en la provincia del Guayas y el espectro medido en sitio de color verde. A causa de que no se logró capturar el aumento del periodo del sismo la forma espectral entre ambos difiere. Para periodos bajos el modelo calculo amplificaciones muy altas, esto se puede notar en la diferencia del PGA entre ambos espectros de sitio.

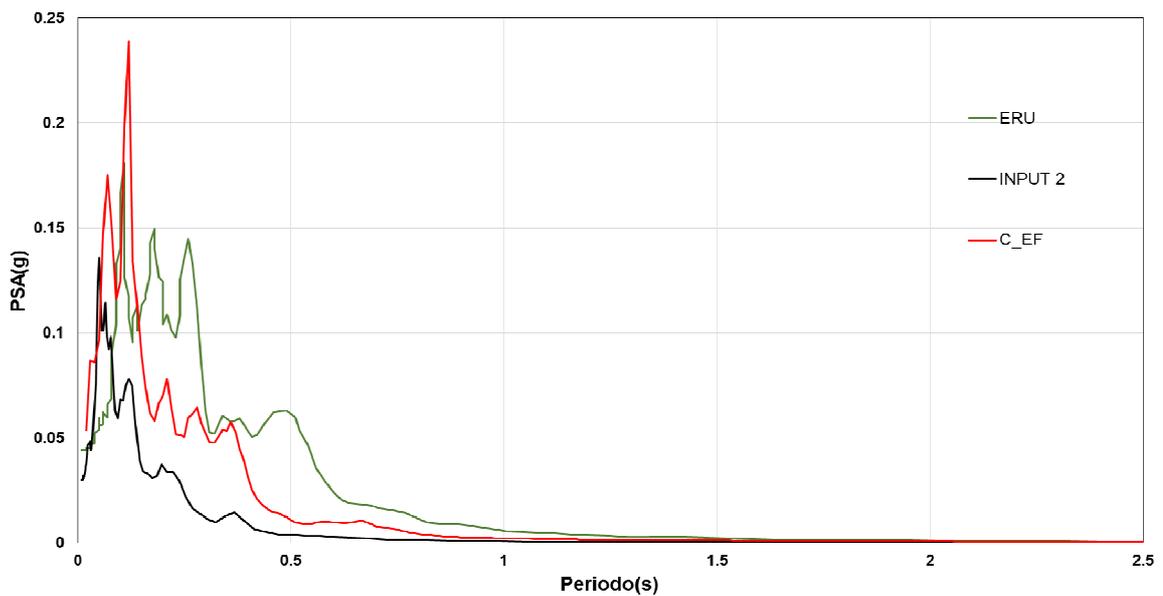


Figura 41. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia del Guayas.

Fuente: (Autor, 2019)

5.2.1.3 Chimborazo

Los resultados que se obtuvieron en el análisis de elementos finitos para el sismo de Chimborazo se muestran en la Figura 42. No existieron deformaciones considerables, el máximo valor de deformación fue de 0.01% y ocurrió a pocos metros de la superficie. Sobre la columna de suelo, PLAXIS da resultados de desplazamientos no mayores a 0.0005 m como se puede observar en la última gráfica.

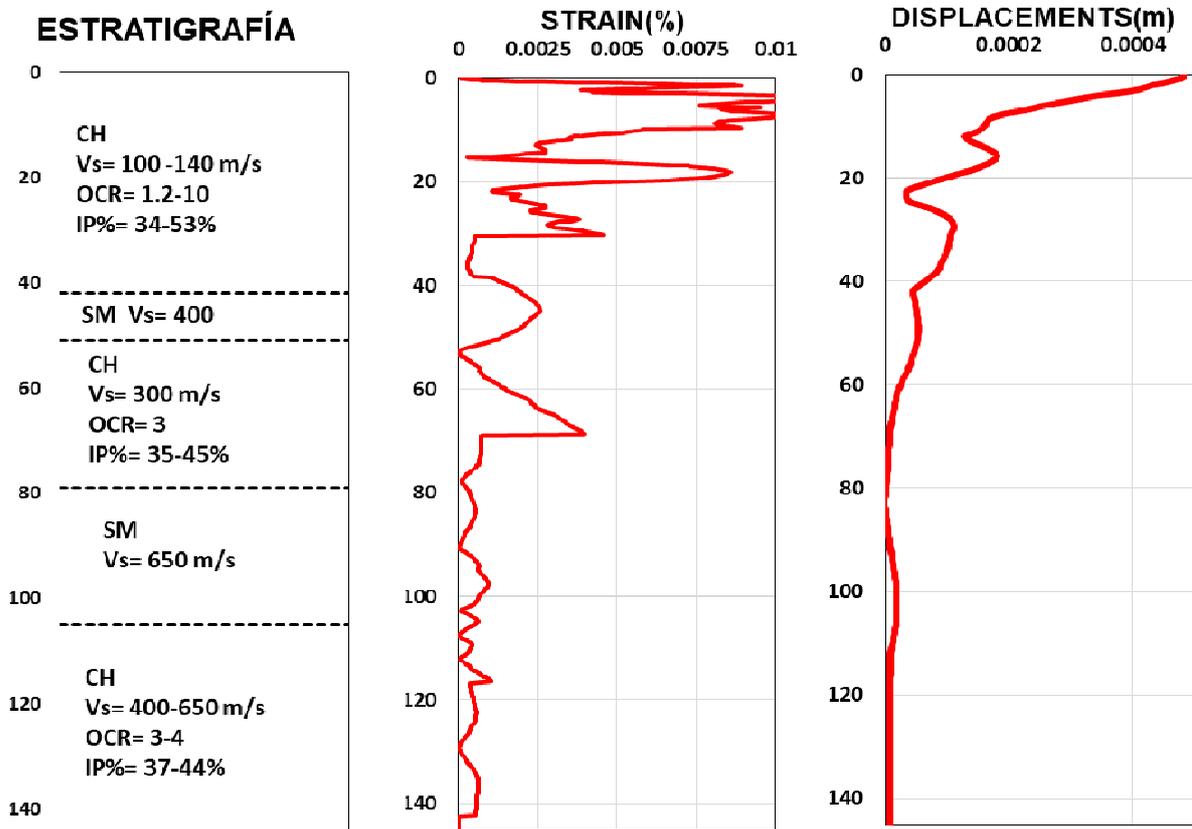


Figura 42. Resultados del Análisis de Elementos Finitos para el sismo de Chimborazo

Fuente: (Autor, 2019)

De color rojo se representa el registro de aceleraciones en la superficie una vez realizado el análisis de elementos finito. Se puede apreciar que el alargamiento de la duración del evento es casi nulo. Si existieron amplificaciones de aceleración a diferencia del registro en roca que posee un PGA de aproximadamente 0.011g, en superficie se calcularon aceleraciones de más de 0.02g.

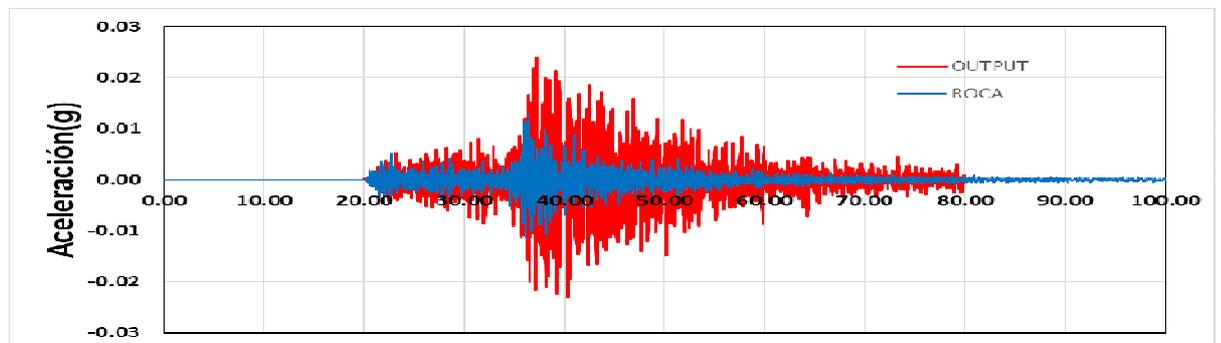


Figura 43. Registro de aceleraciones en roca (UCSG) y el registro del resultado de análisis de elementos finitos del sismo en Chimborazo.

Fuente: (Autor, 2019)

El espectro producto del registro medido en superficie (ERU) posee amplificaciones de mayor magnitud en un rango de 0.6s a 1s este comportamiento no se encontró en los resultados del análisis de elementos finitos representado por el espectro de color rojo en la Figura 44. Como se puede observar los resultados en el modelo solo se captaron amplificaciones a periodos bajos sin ningún alargamiento de la forma espectral debido a que los resultados no mostraron un aumento a la duración del evento.

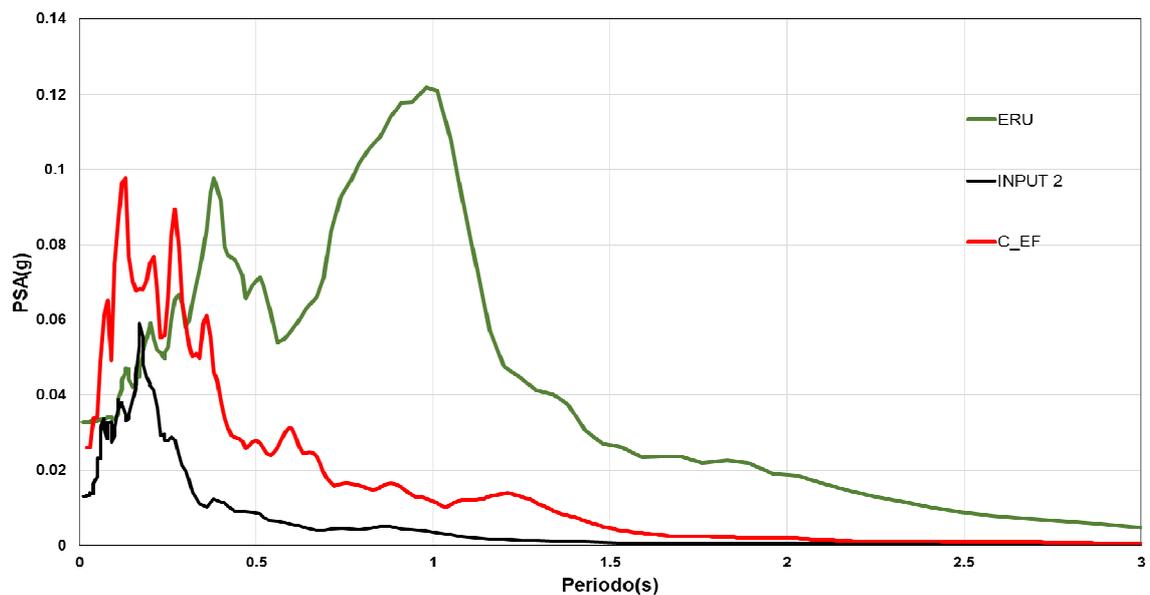


Figura 44. Espectro en roca (UCSG) y espectros en superficie del perfil suelos de ERU para el sismo de la provincia de Chimborazo.
Fuente: (Autor, 2019)

5.3 Comparación de Resultados.

Como se pudo observar en todos los resultados, para ambos programas, la respuesta del suelo ante un movimiento sísmico posee una misma tendencia. Existen amplificaciones y deamplificaciones a lo largo del perfil hasta llegar al estrato arcilloso sobre-consolidado que amplifica finalmente la señal hasta llegar a la superficie. A pesar de que en PLAXIS 2D no da como resultados el cambio del PGA a lo largo de la profundidad del estrato, la amplificación en el último estrato se puede verificar en las altas deformaciones que sufre el mismo, dichos valores se pueden comprobar en ambos programas. Este aumento considerable en el primer estrato de arcilla se debe a que, al ser cementadas con un grado de sobre-consolidación alto,

poseen un menor amortiguamiento bajando su capacidad de disipar energía, lo que produce el aumento de las aceleraciones. En las Tablas 6, 7 y 8 se mostrarán los parámetros más relevantes que se pudieron extraer de cada uno de los programas. La comparación entre los espectros de salida se presenta en las Figuras 45, 46 y 47.

Pedernales

Tabla 6. Comparación de resultados del sismo de Pedernales

Pedernales	PGA	$\gamma\%$(max)	Sa (max)
ERU	0.09	-	0.34
EQL	0.096	0.14	0.45
NL	0.065	0.1	0.26
EF	0.085	0.1	0.35

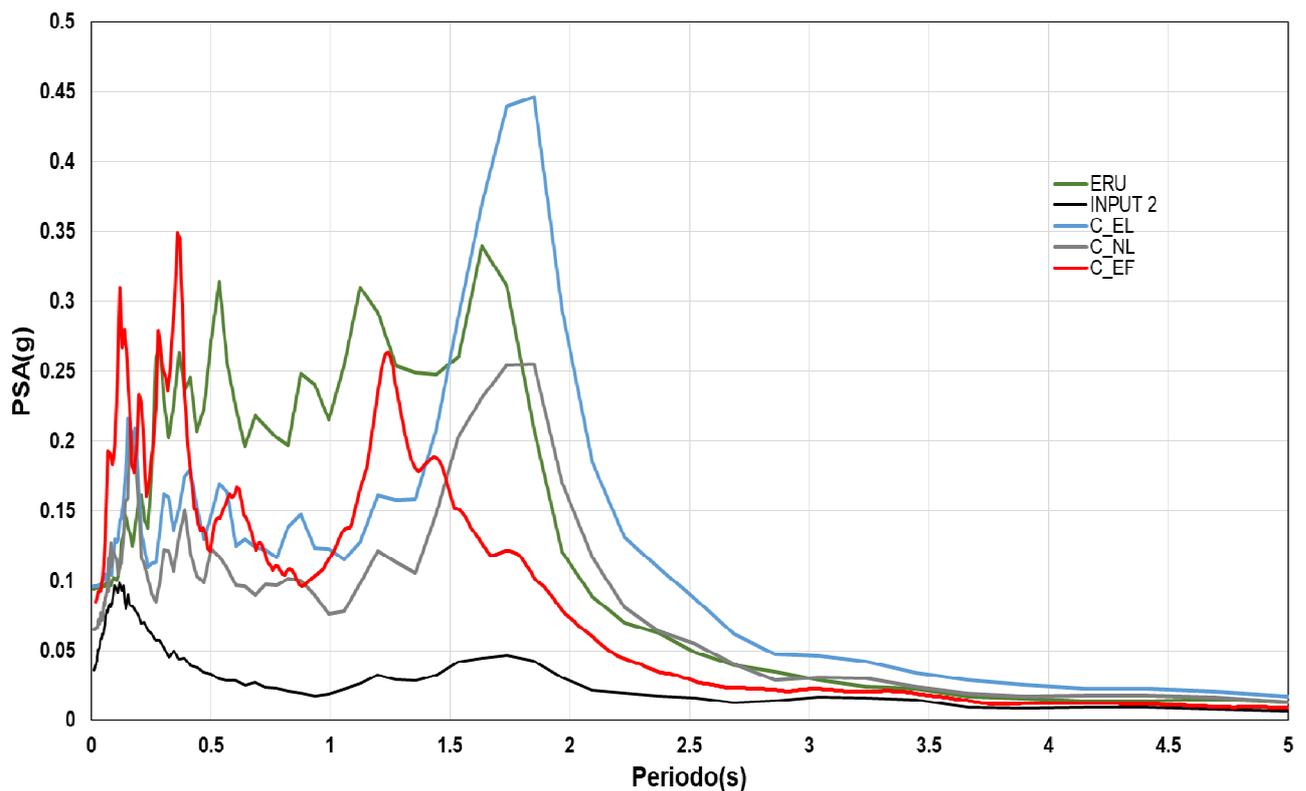


Figura 45. Comparación de cada uno de los espectros de salida en los programas versus el espectro medido en sitio (ERU) para el sismo de Pedernales.

Fuente: (Autor, 2019)

Realmente existe una diferencia notable entre los espectro de salida de cada uno de los programas. De color rojo se puede observar al espectro de salida del análisis ejecutado en PLAXIS 2D, de color azul y plateado son los espectros en sitio del software DeepsoilV7. En la zona inicial donde se encuentra el PGA en superficie, ambos programas son acertados, en altos periodos los comportamientos difieren. En PLAXIS se logra captar una forma espectral aceptable a pesar de no tener amplificaciones en el rango de 0.5 a 1 segundo, a diferencia de DeepsoilV7 que solo se captaron amplificaciones a altos periodos. Estas diferencias son causadas por la distinta metodología de amortiguamiento que utiliza cada programa. Para un análisis dinámico en PLAXIS se debe ingresar factores de corrección de amortiguamiento para un rango de periodos de importancia, debido a que el software integra la ecuación del movimiento para encontrar el factor de amortiguamiento del sistema. Para esta investigación se utilizó como rango el periodo de la columna de suelo y el periodo predominante del registro sísmico y un limitante de 0.5% de amortiguamiento. Este proceso no es utilizado en DeepsoilV7 ya que no se ingresa ningún parámetro que involucre el periodo del suelo versus el periodo del evento sísmico.

Guayas

Tabla 7. Comparación de resultados del sismo de Guayas.

Guayas	PGA	$\gamma\%$(max)	Sa (max)
ERU	0.044	-	0.18
EQL	0.045	0.006	0.16
NL	0.03	0.0062	0.13
EF	0.053	0.013	0.24

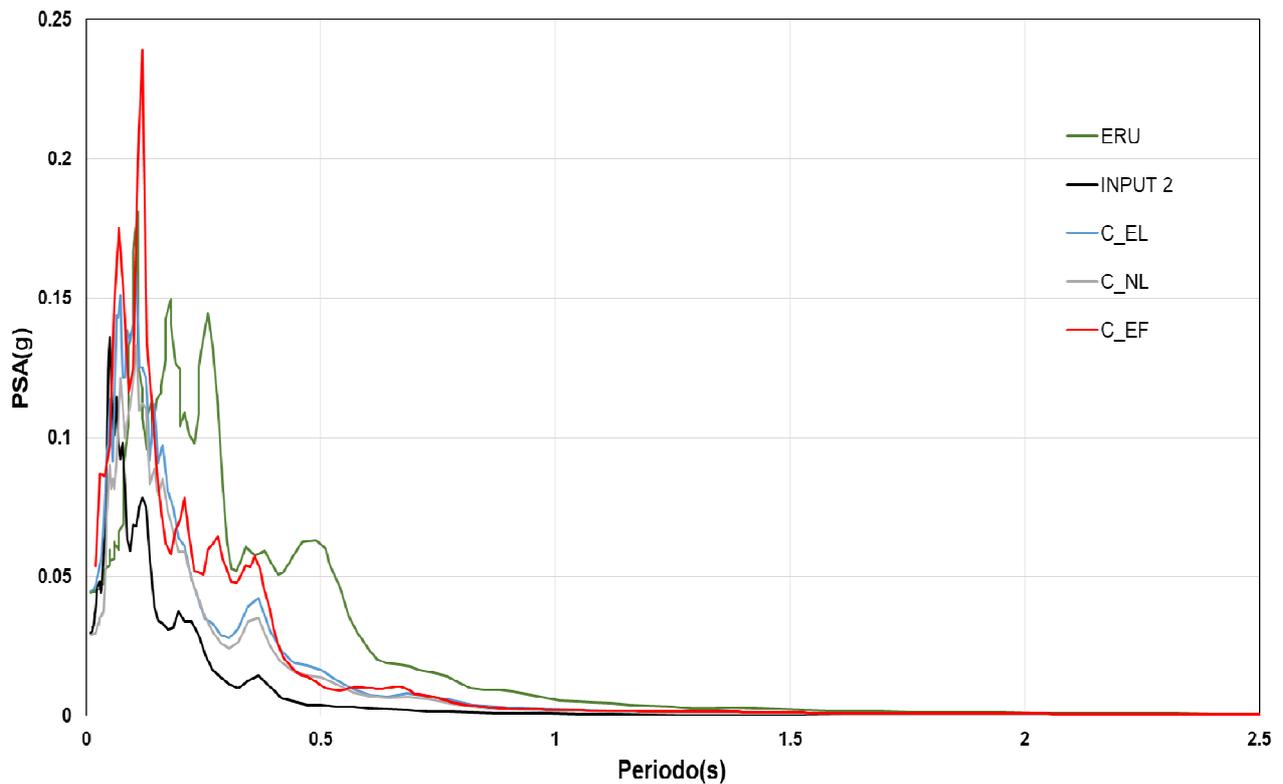


Figura 46. Comparación de cada uno de los espectros de salida en los programas versus el espectro medido en sitio (ERU) para el sismo de la provincia del Guayas.

Fuente: (Autor, 2019)

Como se puede observar los análisis lineales equivalentes y no lineales realizados en DeepsoilV7 no difieren de manera considerable entre sí, esto ocurre debido a que el suelo no cursó por el rango inelástico ya que las deformaciones del suelo fueron de muy baja magnitud. Una vez más, los resultados entre ambos software difiere mayormente por la magnitud de aceleraciones. La máxima aceleración en el modelo de PLAXIS es de 0.25g a diferencia de los valores obtenidos en DeepsoilV7 de 0.13g y 0.16g respectivamente.

Chimborazo

Tabla 8. Comparación de resultados del sismo de Chimborazo.

Chimborazo	PGA	$\gamma\%$ (max)	Sa (max)
ERU	0.030	-	0.12
EQL	0.033	0.009	0.16
NL	0.026	0.008	0.13
EF	0.026	0.010	0.10

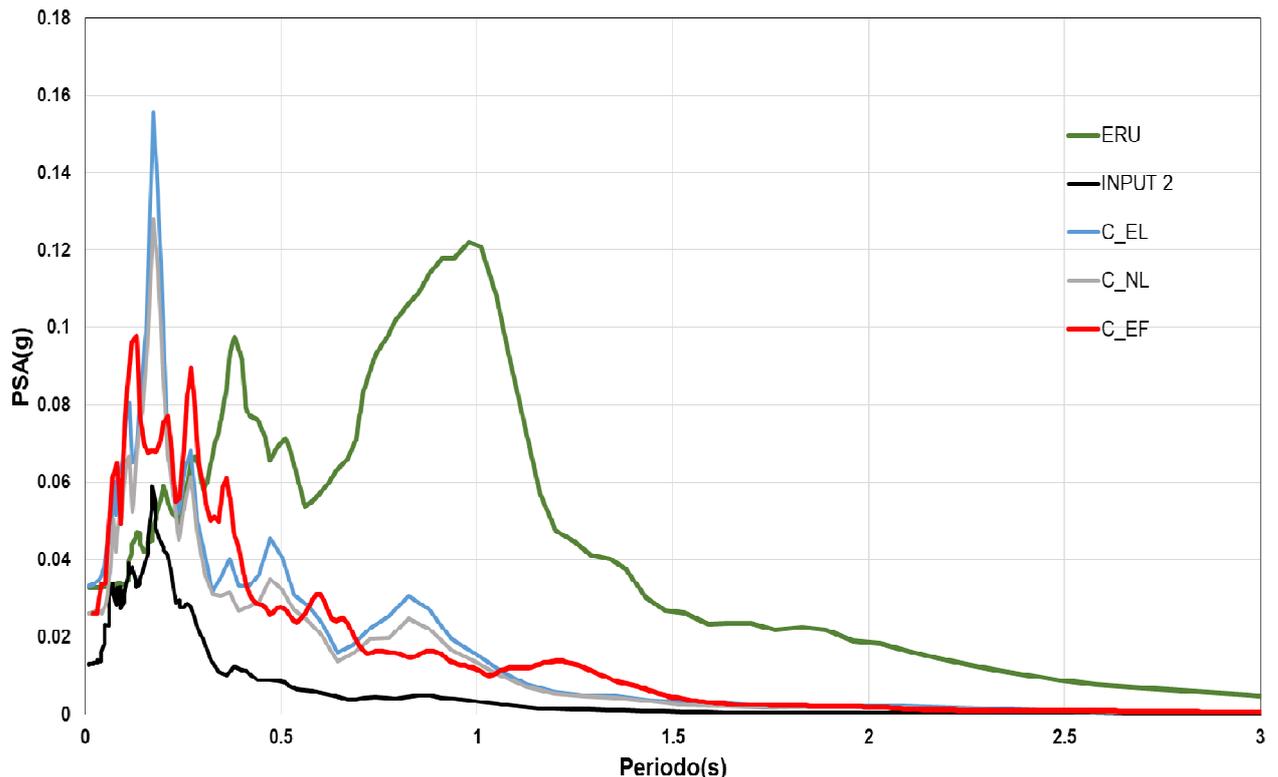


Figura 47. Comparación de cada uno de los espectros de salida en los programas versus el espectro medido en sitio (ERU) para el sismo de la provincia de Chimborazo.

Fuente: (Autor, 2019)

A pesar de ser el mismo modelo para cada uno de los registros sísmicos seleccionados, no se pudo captar la verdadera respuesta que tuvo el suelo durante el sismo ocurrido en la provincia de Chimborazo. Solo se obtuvieron resultados acertados de PGA. En ninguno de los modelos se logró captar las amplificaciones a períodos intermedios (0.5 - 1.5s).

5.4 Limitaciones del Análisis.

Cabe recalcar que de las consideraciones utilizadas para el proceso de investigación existen ciertas limitaciones del análisis que pueden influir en los resultados obtenidos. Las consideraciones más relevantes son las siguientes:

- Se utiliza un registro en afloramiento rocoso para el análisis asumiendo que fuese la señal por debajo del depósito de suelo. El mismo registro tomado pudo ser alterado por factores externos. Como por ejemplo, efectos topográficos que modifican las propiedades de las ondas, fenómeno que no influye bajo la superficie.
- Se comparan dos registros de fuentes distintas en donde existe la incertidumbre de que los datos registrados sean correctos. Puede suceder que durante el movimiento sísmico el acelerógrafo por factores externos como el ruido, tome datos que no le competen al evento sísmico. A pesar de realizar los filtros y correcciones necesarias para el análisis el registro ha sido afectado y puede influir en los resultados.
- La calibración de las curvas de degradación se basaron en función de las curvas construidas para el trabajo de investigación doctoral de (Vera, 2014). A pesar de ser la misma zona, deltaica estuarina, el sitio escogido para dicha investigación difiere del utilizado para el presente proyecto.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Para el presente proyecto de investigación se realizó un análisis de respuesta dinámica de sitio de un depósito de suelos blando característico de la ciudad de Guayaquil ubicado en el Estadio Ramón Unamuno. Este análisis fue realizado para tres eventos sísmicos; Pedernales (16 de abril del 2016; $M_w = 7.8$), Guayas (4 de febrero del 2019; $M_w = 6$) y Chimborazo (6 de septiembre del 2018, $M_w = 6.5$)
- Con base a las propiedades del suelo, ensayos in-situ, ensayos geofísicos y ensayos de resistencia del suelo, se construyeron curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento para realizar el modelo del sitio característico y poder generar el análisis. El modelo constitutivo consideró la presencia de la cementación por pirita en las arcillas y su efecto en las curvas de degradación de amortiguamiento.
- Para considerar los efectos de la cementación por pirita en las curvas de degradación se realizaron cambios en los factores de reducción de las ecuaciones propuestas por Darendeli. De esta manera se puede captar la influencia que posee la cementación en el amortiguamiento y en el módulo de corte en las arcillas. Una vez construidas las curvas se modelaron en DeepsoilV7 y en PLAXIS 2D se calibró el modelo Hardening Soil para que la curva de módulo sea similar a la obtenida de Darendeli.
- Mediante el análisis de respuesta de sitio llevado a cabo, se pudo demostrar la incidencia de los depósitos de suelos blandos de la ciudad de Guayaquil. Se obtuvieron amplificaciones en términos de la aceleración máxima en la superficie, deformaciones y desplazamientos en cada uno de los casos de investigación considerados en este trabajo.

- De manera general, se evidencia que existieron mejores resultados para un sismo de mayor magnitud (Pedernales) a diferencia de los análisis realizados con sismos de intensidades menores (Guayas y Chimborazo). Los espectros en superficie resultantes de los análisis para sismos de menor magnitud no lograron captar el alargamiento del periodo. Esto debido a que no sufrieron deformaciones importantes para que las propiedades del suelo se degraden. Si los resultados se comparan con los espectros medidos en sitio, el alargamiento ocurre durante el evento. Las posibles razones por lo que no se logró captar el alargamiento son las siguientes: (i) incertidumbre acerca del registro de entrada, (ii) incertidumbre asociada a las propiedades dinámicas, sobre todo en suelos profundos, (iii) incertidumbre y variabilidad en los modelos de curvas de amortiguamiento y de degradación de modulo, (iv) posibles efectos de cuenca en la zona de Guayaquil, etc.
- El método lineal equivalente a altas deformaciones muestra amplificaciones mayores a los resultados de los métodos de análisis no lineales y elementos finitos. A pesar de ello es recomendable usarlo para obtener resultados más conservadores a la hora de tomar decisiones al realizar una obra civil. Así mismo, se puede demostrar que a bajas deformaciones los análisis lineales equivalentes y no lineales de DeepsoilV7 no difieren entre sí debido a que el suelo no llega a tener un comportamiento inelástico para los casos estudiados.
- Dado los resultados se puede concluir que para el análisis realizado en la presente investigación que PLAXIS 2D fue el software más preciso. La causa principal de la diferencia entre los resultados de ambos programas radica en los parámetros utilizados para cada método de análisis. Por ejemplo, la metodología de PLAXIS 2D utiliza parámetros de amortiguamiento del sistema, dicho parámetro no es considerado por el software DeepsoilV7. Una de las posibles causas por la que los resultados obtenidos para Guayas y Chimborazo en el software PLAXIS 2D no fueron los más óptimos es que el número máximo de pasos de los registros ingresados era mayor al límite permitido por el programa.

6.2 Recomendaciones

- Es importante ampliar la data de propiedades dinámicas para la caracterización de suelos típicos de la ciudad de Guayaquil, de manera que se pueda captar el comportamiento dinámico, y así mejorar el procedimiento de los análisis de respuesta dinámica.
- Al realizar un análisis de respuesta dinámica en PLAXIS 2D es recomendable utilizar registros con incrementos de tiempo mayores a 0.01s de forma que el número máximo de pasos de cada registro no será mayor al permitido y se obtendrá un análisis más óptimo. Si solo se tienen registros con incrementos de tiempos bajos se puede acortar el registro dentro de un rango de importancia para disminuir el número de pasos máximos necesarios para el análisis.
- Para realizar un análisis de respuesta dinámica en la ciudad de Guayaquil se debe verificar la zonificación que le compete al área de trabajo en función de su localización, para de esta manera lograr la correcta construcción de las curvas de degradación. Adicionalmente, realizar una construcción del perfil de velocidad de onda más fidedigna, en base a ensayos geofísicos y correlaciones empíricas de ensayos in situ, se considera esencial para una correcta caracterización del sitio.
- Para un análisis de respuesta de sitio es recomendable siempre realizar más de una metodología distinta para poder comparar resultados y tomar decisiones más confiables. Al analizar sismos de mayor intensidad se deberá utilizar metodologías que captan la no linealidad del suelo, como por ejemplo análisis no lineal de DeepsoilV7 y elementos finitos en PLAXIS.
- El 65% del área de la ciudad de Guayaquil está asentada en depósitos de suelos blandos (Benítez, Vera Grauner, & Álvarez, 2005), dada su influencia en el registro de aceleraciones que incidirá en la superficie, y su importancia en cuanto al diseño de estructuras, se recomienda

aumentar estaciones de registros en superficie en más áreas de la ciudad. De esta manera existirá más data en distintas fuentes donde se encuentren diferentes comportamiento e influencia del suelo sometido a cargas cíclicas que permitan mejorar criterios de análisis de respuesta de sitio realizando comparaciones como las hechas en este trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Benítez, S., Vera Grauner, X., & Álvarez, V. (2005). *Informe Final de Investigación y Estudio del comportamiento dinámico del subsuelo y Microzonificación sísmica de Guayaquil*. Guayaquil.
- Castillo, & Zepeda. (2013). *Comparación entre análisis no-lineal y lineal equivalente aproximado respecto al RNC-07*. Nicaragua.
- Geostudios. (2011). *Elaboración del Documento de la Microzonificación Sísmica y Geotécnica de la Ciudad de Guayaquil Según la Norma ecuatoriana de la Construcción*. Guayaquil.
- Hashash. (27 de Mayo de 2019). *Uso de DeepsoilV7 para análisis de Respuesta de Sitio*. Lima, Perú.
- Hashash, & Philips. (2009). *Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Hashash, Y. M. (2010). *Recent Advances in Non-linear Site Response Analysis*. San diego.
- Hashash, Y. M. (2017). *DEEPSOIL 7.0, User Manual*. Illinois.
- Hashash, Y., & Park, D. (2001). *Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment*. Illinois.
- Krammer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Washington.
- Menq, F. M. (2003). *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*. Austin.
- NEC-15. (2015). *Peligro Sísmico- Diseño sismo resistente*. Guayaquil.
- PLAXIS. (2016). *Material Models Manual*.
- PLAXIS. (2016). *Scientific Manual*.
- Seed, H., & Idriss, I. (1969). *Analysis of Sheffield Dam Failure*. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*.
- Vera, X. (2014). *Seismic Response of a Soft, High Plasticity, Diatomaceous Naturally Cemented Clay Deposit*. Berkeley.

ANEXOS

Tabla 9. Variables de ingreso para el método de análisis Lineal Equivalente

Número de Capa	Nombre de Capa	Espesor (m)	Unidad de Peso (kN/m3)	Vs (m/s)	Su (kPa)	Modelo	Dmin(%)	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	A	P1	P2
1.00	CH	1.25	15.50	100.00	42.95	GQ/H	2.65	-9.31	8.80	0.00	1.00	0.66	1.00	0.33	0.10
2.00	CH	1.25	15.50	100.00	35.18	GQ/H	2.54	-9.60	9.52	0.00	1.00	0.56	1.00	0.33	0.10
3.00	MH	3.50	15.50	105.00	16.97	GQ/H	2.36	-9.59	10.28	0.00	1.00	0.42	1.00	0.33	0.10
4.00	CH	3.50	15.50	105.00	23.23	GQ/H	2.18	-9.50	9.31	0.00	1.00	0.56	1.00	0.33	0.10
5.00	MH	3.50	15.50	105.00	25.96	GQ/H	2.01	-9.83	9.87	0.00	1.00	0.53	1.00	0.33	0.10
6.00	MH	3.00	15.50	110.00	34.66	GQ/H	1.91	-8.93	8.73	0.00	1.00	0.60	1.00	0.33	0.10
7.00	CH	3.00	15.50	130.00	41.06	GQ/H	1.83	-9.26	9.43	0.00	1.00	0.52	1.00	0.33	0.10
8.00	CH	2.75	15.50	130.00	42.21	GQ/H	1.78	-9.26	9.42	0.00	1.00	0.52	1.00	0.33	0.10
9.00	CH	2.75	15.50	140.00	45.27	GQ/H	1.73	-8.80	9.09	0.00	1.00	0.51	1.00	0.33	0.10
10.00	CH	2.75	15.50	140.00	46.79	GQ/H	1.70	-9.14	9.39	0.00	1.00	0.51	1.00	0.33	0.10
11.00	CH	2.75	15.50	140.00	45.35	GQ/H	1.66	-8.64	8.94	0.00	1.00	0.51	1.00	0.33	0.10
12.00	CH	2.75	15.50	140.00	55.48	GQ/H	1.62	-9.67	9.64	0.00	1.00	0.55	1.00	0.33	0.10
13.00	CH	2.75	15.50	140.00	79.00	GQ/H	1.53	-10.00	9.40	0.00	1.00	0.65	1.00	0.42	0.15
14.00	CH	2.75	15.50	140.00	67.93	GQ/H	1.55	-9.80	9.37	0.00	1.00	0.62	1.00	0.33	0.10
15.00	CH	2.75	15.50	140.00	64.36	GQ/H	1.53	-9.07	8.74	0.00	1.00	0.62	1.00	0.33	0.10
16.00	SP-SM	2.50	19.00	400.00	193.75	GQ/H	0.57	0.16	0.77	0.98	1.00	0.70	1.00	0.42	0.05
17.00	SP-SM	2.50	19.00	400.00	209.79	GQ/H	0.57	0.08	0.85	1.17	1.00	0.60	1.00	0.42	0.05
18.00	SP-SM	2.50	19.00	400.00	213.47	GQ/H	0.57	0.06	0.80	0.93	1.00	0.59	1.00	0.42	0.05
19.00	SP-SM	2.50	19.00	400.00	218.81	GQ/H	0.57	0.07	0.61	0.52	1.00	0.71	1.00	0.42	0.05
20.00	CH	3.50	16.00	300.00	217.33	GQ/H	1.27	-7.42	8.27	0.00	1.00	0.42	1.00	0.24	0.05
21.00	CH	3.50	16.00	300.00	230.53	GQ/H	1.24	-7.80	8.62	0.00	1.00	0.42	1.00	0.24	0.05
22.00	CH	3.50	16.00	300.00	273.86	GQ/H	1.22	-7.04	7.74	0.00	1.00	0.46	1.00	0.24	0.05

23.00	CH	3.50	16.00	300.00	288.69	GQ/H	1.21	-6.05	6.64	0.00	1.00	0.51	1.00	0.24	0.05
24.00	CH	3.50	16.00	300.00	303.52	GQ/H	1.19	-6.27	6.81	0.00	1.00	0.52	1.00	0.24	0.05
25.00	CH	3.50	16.00	300.00	318.35	GQ/H	1.17	-8.91	9.54	0.00	1.00	0.45	1.00	0.24	0.05
26.00	CH	3.50	16.00	300.00	333.19	GQ/H	1.16	-7.67	8.20	0.00	1.00	0.49	1.00	0.24	0.05
27.00	CH	3.50	16.00	300.00	348.02	GQ/H	1.14	-7.98	8.49	0.00	1.00	0.49	1.00	0.24	0.05
28.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	436.95	GQ/H	0.58	0.28	0.61	0.25	1.00	0.59	1.00	0.42	0.05
29.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	476.76	GQ/H	0.58	0.29	0.50	0.25	1.00	0.69	1.00	0.42	0.05
30.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	516.56	GQ/H	0.57	0.40	0.59	1.29	1.00	0.95	1.00	0.42	0.05
31.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	556.37	GQ/H	0.57	0.34	0.63	1.51	1.00	0.69	1.00	0.46	0.05
32.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	596.18	GQ/H	0.57	0.32	0.58	1.41	1.00	0.79	1.00	0.46	0.05
33.00	CH	3.00	16.50	400.00	543.55	GQ/H	1.01	-5.29	5.98	0.00	1.00	0.50	1.00	0.24	0.10
34.00	CH	3.00	16.50	400.00	557.48	GQ/H	1.00	-5.40	6.08	0.00	1.00	0.50	1.00	0.24	0.10
35.00	CH	3.00	16.50	400.00	571.41	GQ/H	0.99	-5.50	6.17	0.00	1.00	0.50	1.00	0.24	0.10
36.00	CH	3.00	16.50	400.00	585.34	GQ/H	0.99	-6.86	7.61	0.00	1.00	0.45	1.00	0.24	0.10
37.00	CH	3.00	16.50	400.00	599.27	GQ/H	0.98	-6.99	7.70	0.00	1.00	0.46	1.00	0.24	0.10
38.00	CH-MH	3.00	16.50	400.00	613.20	GQ/H	0.97	-6.40	7.04	0.00	1.00	0.49	1.00	0.24	0.10
39.00	CH-MH	3.00	16.50	400.00	627.13	GQ/H	0.97	-6.52	7.15	0.00	1.00	0.49	1.00	0.24	0.10
40.00	CH-MH	4.75	18.00	650.00	720.00	GQ/H	0.93	-0.93	1.89	0.02	1.00	0.61	1.00	0.19	0.05
41.00	CH-MH	4.75	18.00	650.00	787.23	GQ/H	0.92	-1.60	2.62	0.01	1.00	0.50	1.00	0.19	0.05
42.00	CH-MH	4.75	18.00	650.00	818.44	GQ/H	0.91	-1.79	2.79	0.01	1.00	0.50	1.00	0.19	0.05
43.00	CH-MH	4.75	18.00	650.00	849.65	GQ/H	0.90	-1.35	2.28	0.02	1.00	0.58	1.00	0.19	0.05

Fuente: (Autor, 2019)

Tabla 10. Variables de ingreso para el método de análisis No Lineal

Número de Capa	Nombre de Capa	Espesor (m)	Unidad de Peso (kN/m3)	Vs (m/s)	Su (kPa)	Modelo	Dmin(%)	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	A	P1	P2
1.00	CH	0.50	15.50	100.00	30.00	GQ/H	3.29	-8.47	8.40	0.00	1.00	0.59	1.00	0.33	0.10
2.00	CH	0.50	15.50	100.00	37.07	GQ/H	2.69	-8.19	8.05	0.00	1.00	0.62	1.00	0.33	0.10
3.00	CH	0.50	15.50	100.00	51.60	GQ/H	2.39	-9.80	9.19	0.00	1.00	0.67	1.00	0.37	0.15
4.00	CH	0.50	15.50	100.00	39.74	GQ/H	2.34	-8.52	8.29	0.00	1.00	0.63	1.00	0.33	0.10
5.00	CH	0.50	15.50	100.00	48.28	GQ/H	2.21	-9.25	8.60	0.00	1.00	0.70	1.00	0.37	0.15
6.00	CH	0.75	15.50	105.00	19.72	GQ/H	2.31	-7.87	8.22	0.00	1.00	0.51	1.00	0.33	0.10
7.00	CH	0.75	15.50	105.00	16.34	GQ/H	2.33	-9.49	10.23	0.00	1.00	0.41	1.00	0.33	0.10
8.00	CH	0.75	15.50	105.00	17.55	GQ/H	2.28	-8.80	9.37	0.00	1.00	0.45	1.00	0.33	0.10
9.00	MH	0.75	15.50	105.00	17.20	GQ/H	2.24	-9.99	10.57	0.00	1.00	0.43	1.00	0.33	0.10
10.00	MH	0.75	15.50	105.00	23.44	GQ/H	2.20	-9.85	9.65	0.00	1.00	0.56	1.00	0.33	0.10
11.00	CH	0.75	15.50	105.00	23.63	GQ/H	2.16	-8.18	7.96	0.01	1.00	0.61	1.00	0.33	0.10
12.00	CH	0.75	15.50	105.00	24.82	GQ/H	2.12	-9.85	9.65	0.00	1.00	0.56	1.00	0.33	0.10
13.00	CH	0.75	15.50	105.00	26.00	GQ/H	2.08	-9.58	9.30	0.00	1.00	0.58	1.00	0.33	0.10
14.00	CH	0.75	15.50	105.00	28.43	GQ/H	2.03	-8.80	8.23	0.01	1.00	0.66	1.00	0.42	0.15
15.00	CL	0.75	15.50	105.00	25.18	GQ/H	2.01	-9.29	8.60	0.01	1.00	0.66	1.00	0.37	0.10
16.00	CL	0.75	15.50	105.00	23.94	GQ/H	1.98	-9.10	8.59	0.01	1.00	0.63	1.00	0.42	0.15
17.00	CH	0.75	15.50	105.00	28.35	GQ/H	1.96	-9.60	9.40	0.00	1.00	0.58	1.00	0.33	0.10
18.00	CH	0.75	15.50	105.00	28.24	GQ/H	1.93	-9.26	9.10	0.00	1.00	0.58	1.00	0.33	0.10
19.00	MH	0.75	15.50	105.00	31.12	GQ/H	1.91	-9.37	9.14	0.00	1.00	0.59	1.00	0.33	0.10
20.00	MH	0.75	15.50	105.00	33.36	GQ/H	1.89	-9.70	9.33	0.00	1.00	0.61	1.00	0.33	0.10
21.00	MH	0.75	15.50	110.00	34.44	GQ/H	1.87	-9.20	9.00	0.00	1.00	0.59	1.00	0.33	0.10
22.00	MH	0.75	15.50	110.00	37.82	GQ/H	1.85	-9.77	9.35	0.00	1.00	0.62	1.00	0.33	0.10
23.00	MH	0.75	15.50	110.00	37.33	GQ/H	1.84	-9.70	9.32	0.00	1.00	0.61	1.00	0.33	0.10

24.00	CH	0.75	15.50	110.00	36.92	GQ/H	1.82	-9.80	9.42	0.00	1.00	0.61	1.00	0.33	0.10
25.00	CH	0.75	15.50	130.00	40.37	GQ/H	1.80	-9.35	9.58	0.00	1.00	0.51	1.00	0.33	0.10
26.00	CH	0.75	15.50	130.00	44.98	GQ/H	1.79	-8.60	8.55	0.00	1.00	0.58	1.00	0.33	0.10
27.00	CH	0.75	15.50	130.00	44.37	GQ/H	1.78	-10.00	10.05	0.00	1.00	0.53	1.00	0.33	0.10
28.00	CH	1.00	15.50	130.00	43.44	GQ/H	1.76	-9.50	9.64	0.00	1.00	0.52	1.00	0.33	0.10
29.00	CH	1.00	15.50	140.00	44.85	GQ/H	1.74	-7.50	7.78	0.00	1.00	0.54	1.00	0.33	0.10
30.00	CH	1.00	15.50	140.00	43.12	GQ/H	1.73	-8.77	9.20	0.00	1.00	0.48	1.00	0.33	0.10
31.00	CH	1.00	15.50	140.00	45.63	GQ/H	1.71	-8.66	9.00	0.00	1.00	0.50	1.00	0.33	0.10
32.00	CH	1.00	15.50	140.00	48.13	GQ/H	1.69	-9.12	9.37	0.00	1.00	0.51	1.00	0.33	0.10
33.00	CH	1.00	15.50	140.00	49.46	GQ/H	1.67	-9.28	9.51	0.00	1.00	0.51	1.00	0.33	0.10
34.00	CH	1.00	15.50	140.00	53.13	GQ/H	1.66	-9.50	9.60	0.00	1.00	0.53	1.00	0.33	0.10
35.00	CH	1.00	15.50	140.00	50.90	GQ/H	1.66	-9.24	9.37	0.00	1.00	0.53	1.00	0.33	0.10
36.00	CH	1.00	15.50	140.00	43.95	GQ/H	1.65	-8.54	8.96	0.00	1.00	0.49	1.00	0.28	0.10
37.00	CH	1.00	15.50	140.00	42.73	GQ/H	1.64	-8.19	8.64	0.00	1.00	0.49	1.00	0.28	0.10
38.00	CH	1.00	15.50	140.00	51.92	GQ/H	1.62	-9.38	9.49	0.00	1.00	0.53	1.00	0.33	0.10
39.00	CH	1.00	15.50	140.00	56.56	GQ/H	1.61	-9.75	9.70	0.00	1.00	0.55	1.00	0.33	0.10
40.00	CH	1.00	15.50	140.00	58.87	GQ/H	1.60	-8.87	8.68	0.00	1.00	0.60	1.00	0.33	0.10
41.00	CH	1.00	15.50	140.00	63.64	GQ/H	1.56	-9.00	8.76	0.00	1.00	0.61	1.00	0.33	0.10
42.00	CH	1.00	15.50	140.00	79.82	GQ/H	1.51	-9.89	9.30	0.00	1.00	0.65	1.00	0.42	0.15
43.00	CH	1.00	15.50	140.00	83.14	GQ/H	1.50	-9.70	9.00	0.00	1.00	0.68	1.00	0.42	0.15
44.00	CH	1.00	15.50	140.00	68.51	GQ/H	1.55	-9.80	9.37	0.00	1.00	0.62	1.00	0.33	0.10
45.00	CH	1.00	15.50	140.00	69.69	GQ/H	1.54	-9.40	8.92	0.00	1.00	0.64	1.00	0.33	0.10
46.00	CH	1.00	15.50	140.00	69.24	GQ/H	1.53	-9.39	8.91	0.00	1.00	0.64	1.00	0.33	0.10
47.00	CH	1.00	15.50	140.00	68.70	GQ/H	1.52	-9.30	8.80	0.00	1.00	0.65	1.00	0.33	0.10
48.00	CH	1.00	15.50	140.00	62.80	GQ/H	1.51	-9.00	8.76	0.00	1.00	0.61	1.00	0.33	0.10

49.00	CH	1.00	15.50	140.00	67.40	GQ/H	1.50	-9.40	9.00	0.00	1.00	0.63	1.00	0.33	0.10
50.00	SP-SM	2.00	19.00	400.00	230.15	GQ/H	0.61	-1.67	1.40	0.01	1.00	0.52	1.00	0.64	0.15
51.00	SP-SM	2.00	19.00	400.00	243.07	GQ/H	0.60	-2.44	2.08	0.00	1.00	0.47	1.00	0.64	0.15
52.00	SP-SM	2.00	19.00	400.00	255.98	GQ/H	0.60	-2.09	1.59	0.00	1.00	0.59	1.00	0.64	0.15
53.00	SP-SM	2.00	19.00	400.00	268.89	GQ/H	0.60	-2.32	1.71	0.00	1.00	0.64	1.00	0.64	0.15
54.00	SP-SM	2.00	19.00	400.00	281.80	GQ/H	0.60	-3.12	2.42	0.00	1.00	0.62	1.00	0.69	0.15
55.00	CH	2.00	16.00	300.00	282.60	GQ/H	1.22	-7.50	8.09	0.00	1.00	0.48	1.00	0.24	0.05
56.00	CH	2.00	16.00	300.00	292.24	GQ/H	1.21	-7.73	8.30	0.00	1.00	0.48	1.00	0.24	0.05
57.00	CH	2.00	16.00	300.00	301.87	GQ/H	1.20	-7.95	8.50	0.00	1.00	0.48	1.00	0.24	0.05
58.00	CH	2.00	16.00	300.00	311.50	GQ/H	1.19	-8.09	8.63	0.00	1.00	0.48	1.00	0.24	0.05
59.00	CH	2.00	16.00	300.00	360.83	GQ/H	1.18	-7.86	8.34	0.00	1.00	0.50	1.00	0.24	0.05
60.00	CH	2.00	16.00	300.00	371.65	GQ/H	1.17	-9.06	9.58	0.00	1.00	0.47	1.00	0.24	0.05
61.00	CH	2.00	16.00	300.00	382.47	GQ/H	1.16	-9.33	9.80	0.00	1.00	0.48	1.00	0.24	0.05
62.00	CH	2.00	16.00	300.00	393.30	GQ/H	1.14	-9.47	9.93	0.00	1.00	0.48	1.00	0.28	0.10
63.00	CH	2.00	16.00	300.00	404.12	GQ/H	1.14	-9.72	10.16	0.00	1.00	0.48	1.00	0.28	0.10
64.00	CH	2.00	16.00	300.00	414.94	GQ/H	1.13	-8.14	8.47	0.00	1.00	0.53	1.00	0.28	0.10
65.00	CH	2.00	16.00	300.00	425.77	GQ/H	1.12	-8.37	8.68	0.00	1.00	0.53	1.00	0.28	0.10
66.00	CH	2.00	16.00	300.00	436.59	GQ/H	1.11	-8.50	8.79	0.00	1.00	0.53	1.00	0.28	0.10
67.00	CH	2.00	16.00	300.00	447.42	GQ/H	1.10	-9.82	10.15	0.00	1.00	0.50	1.00	0.28	0.10
68.00	CH	2.00	16.00	300.00	458.24	GQ/H	1.10	-9.97	10.28	0.00	1.00	0.50	1.00	0.28	0.05
69.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	458.40	GQ/H	0.59	0.02	0.67	0.59	1.00	0.78	1.00	0.42	0.05
70.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	501.00	GQ/H	0.62	-0.10	1.09	2.00	1.00	0.51	1.00	0.51	0.10
71.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	543.59	GQ/H	0.62	-0.16	1.10	2.29	1.00	0.44	1.00	0.51	0.10
72.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	586.19	GQ/H	0.61	-0.16	0.79	1.02	1.00	0.50	1.00	0.55	0.10
73.00	SP-SM	5.00	20.00	650.00	628.78	GQ/H	0.61	-0.39	1.14	1.48	1.00	0.29	1.00	0.55	0.10
74.00	CH	3.00	16.50	400.00	707.29	GQ/H	0.97	-6.78	7.39	0.00	1.00	0.49	1.00	0.24	0.05

75.00	CH	3.00	16.50	400.00	725.08	GQ/H	0.96	-6.88	7.45	0.00	1.00	0.50	1.00	0.24	0.05
76.00	CH	3.00	16.50	400.00	742.87	GQ/H	0.96	-6.95	7.51	0.00	1.00	0.50	1.00	0.24	0.05
77.00	CH	3.00	16.50	400.00	760.66	GQ/H	0.95	-7.86	8.44	0.00	1.00	0.48	1.00	0.24	0.05
78.00	CH	3.00	16.50	400.00	778.45	GQ/H	0.94	-8.09	8.68	0.00	1.00	0.47	1.00	0.24	0.05
79.00	CH-MH	3.00	16.50	400.00	796.24	GQ/H	0.94	-8.25	8.80	0.00	1.00	0.48	1.00	0.24	0.05
80.00	CH-MH	3.00	16.50	400.00	814.03	GQ/H	0.93	-8.41	8.95	0.00	1.00	0.48	1.00	0.24	0.05
81.00	CH-MH	4.75	18.00	650.00	890.00	GQ/H	0.90	-1.38	2.29	0.01	1.00	0.59	1.00	0.19	0.05
82.00	CH-MH	4.75	18.00	650.00	930.00	GQ/H	0.89	-1.48	2.39	0.01	1.00	0.58	1.00	0.19	0.05
83.00	CH-MH	4.75	18.00	650.00	950.00	GQ/H	0.88	-1.49	2.37	0.01	1.00	0.60	1.00	0.19	0.05
84.00	CH-MH	4.75	18.00	650.00	975.00	GQ/H	0.87	-2.58	3.59	0.00	1.00	0.45	1.00	0.24	0.05

Fuente: (Autor, 2019)

Tabla 11. Variables de ingreso para el método de análisis en PLAXIS.

	Modelo	Gamma(kPa)	Su(kPa)	Ko	E50(kPa)	OCR	eo	ζ%
CH1	Hard. S.	15.5	17	1	18116.00	4	1.9	0.5
CH2	Hard. S.	15.5	26	1	25116.00	1.8	1.9	0.5
CH3	Hard. S.	15.5	45	1	35207.00	1.4	1.9	0.5
CH4	Hard. S.	15.5	76	1	45210.00	1.5	1.9	0.5
SM1	Hard. S.	19	213	1	402854.23		1	0.5
CH5	Hard. S.	16	230.5	1	190825.69	3	1.9	0.5
CH6	Hard. S.	16	318	1	208990.83	3	1.9	0.5
SM2	Hard. S.	20	437	1	1119775.74		0.54	0.5
SM3	Hard. S.	20	550	1	1119775.74		0.54	0.5
CH7	Hard. S.	16.5	557	1	349847.09	3	1.9	0.5
CH8	Hard. S.	16.5	613	1	349847.09	3	1.9	0.5
CH9	Hard. S.	18	818	1	1007798.17	4	1.9	0.5

Fuente: (Autor, 2019)



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Caisapanta Moncayo, Jose Luis**, con C.C: # 0921671954 autor/a del trabajo de titulación: **Comparación de dos programas en el análisis de respuesta de sitio en depósitos con suelos blandos**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **10 de septiembre de 2019**

f. _____

Nombre: **Caisapanta Moncayo, Jose Luis**

C.C: **0921671954**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Comparación de dos programas en el análisis de respuesta de sitio en depósitos con suelos blandos.		
AUTOR	Jose Luis Caisapanta Moncayo		
REVISOR/TUTOR	Roberto Xavier Luque Nuques		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	DE 10 de septiembre de 2019	No. DE PÁGINAS:	91
ÁREAS TEMÁTICAS:	Geotecnia, Sísmica, Métodos Numéricos.		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Respuesta dinámica, Efecto de Sitio, Amortiguamiento, Modulo de corte, Resistencia al corte, Calibración, Espectros.		

Ecuador está ubicado dentro de los países que se asientan sobre el cinturón de fuego, llamado de esta manera debido al ser la zona donde ocurre la mayor parte de la actividad sísmica en el mundo. Datos históricos han demostrado que existen cambios en las señales sísmicas producto de las variadas características de los depósitos de suelo. Para evaluar este efecto es necesario realizar un análisis de respuesta de sitio con el fin de poder captar la verdadera magnitud de aceleraciones que incidirán en la superficie. Guayaquil es una ciudad donde abundan grandes depósitos de suelos blandos cuya influencia amplifica las aceleraciones de manera considerable. Existen distintos métodos para analizar la respuesta dinámica del suelo durante un movimiento sísmico. En el presente trabajo de investigación se realizará un análisis de respuesta dinámica en dos distintos programas (DeepsoilV7 – PLAXIS 2D) para un sitio en específico. Para la resolución de los modelos realizados en cada programa se utilizaron distintas metodologías; lineal equivalente y no lineal para el software DeepsoilV7 y de elementos finitos para PLAXIS 2D. Con los resultados obtenidos se realizaron comparaciones de cada una de las metodologías y los distintos parámetros que consideran ambos programas para ejecutar un mismo análisis y obtener cada uno de sus resultados.

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 593-987815640	E-mail: joseluis25_1996@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Clara Glas Cevallos	
	Teléfono: +593-4 -2206956	
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec	

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA

Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	