



**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIA DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ESPECTRO DE DISEÑO
PROPUESTOS POR LAS NORMAS ASCE 7-16 Y NEC-15 CON
LOS ESPECTROS DE RESPUESTA DEL SISMO DE
PEDERNALES DEL 16 DE ABRIL DEL 2016 OBTENIDOS PARA
LAS ESTACIONES DE LA RENAC DEL IG-EPN.”

**TRABAJO PRÁCTICO DE
EXAMEN DE GRADO DE CARÁCTER COMPLEXIVO**

AUTOR:

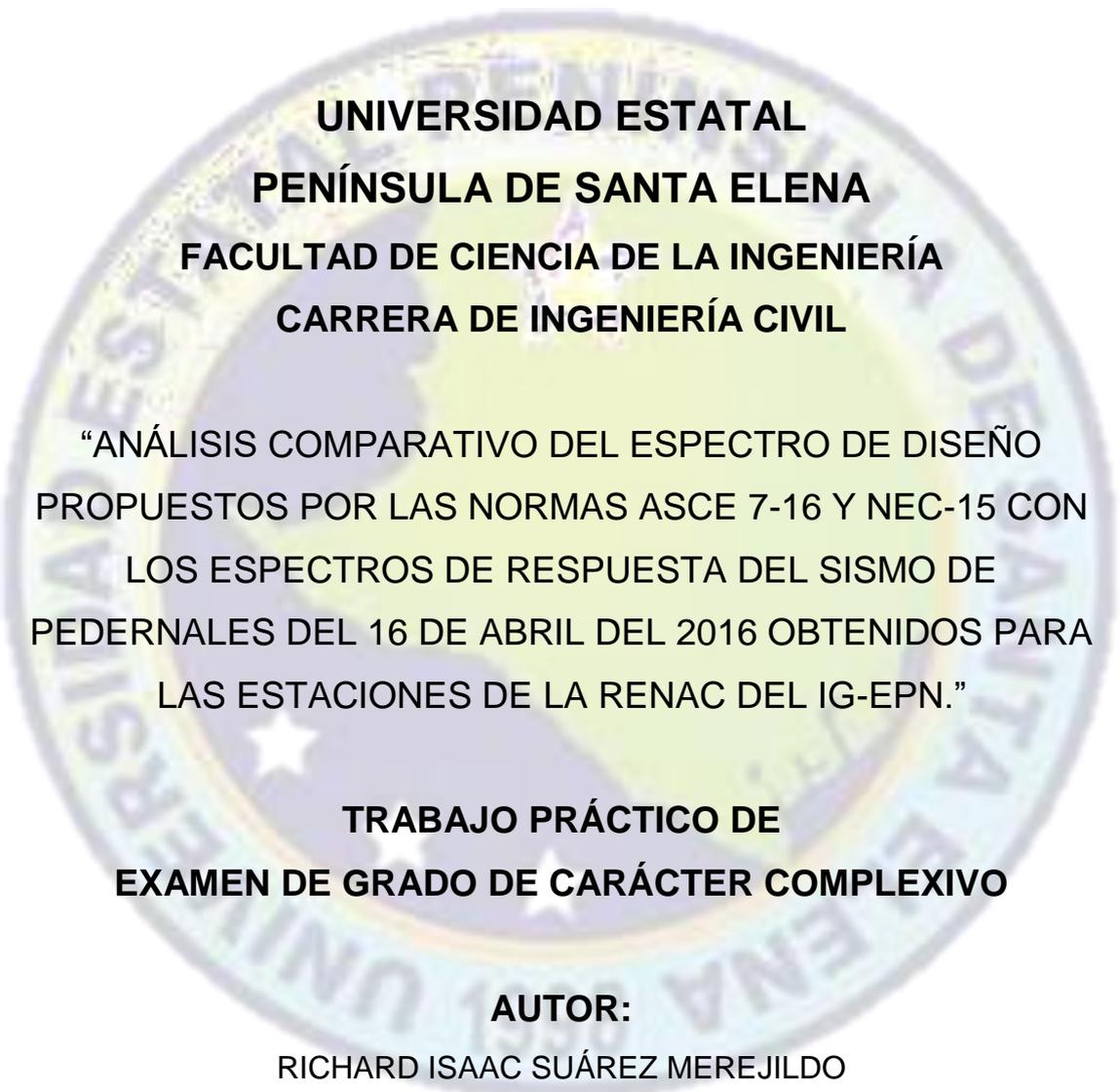
RICHARD ISAAC SUÁREZ MEREJILDO

TUTOR:

ING. JAIME FERNANDO ARGUDO RODRÍGUEZ PhD

La Libertad, Ecuador

2021



**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIA DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ESPECTRO DE DISEÑO
PROPUESTOS POR LAS NORMAS ASCE 7-16 Y NEC-15 CON
LOS ESPECTROS DE RESPUESTA DEL SISMO DE
PEDERNALES DEL 16 DE ABRIL DEL 2016 OBTENIDOS PARA
LAS ESTACIONES DE LA RENAC DEL IG-EPN.”

**TRABAJO PRÁCTICO DE
EXAMEN DE GRADO DE CARÁCTER COMPLEXIVO**

AUTOR:

RICHARD ISAAC SUÁREZ MEREJILDO

TUTOR:

ING. JAIME FERNANDO ARGUDO RODRÍGUEZ PhD

La Libertad, Ecuador

2021

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Richard Isaac Suárez Merejildo

DECLARO QUE:

El presente trabajo, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las referencias que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente, este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del presente trabajo.

AUTOR

f. _____



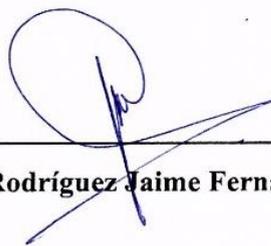
Suárez Merejildo Richard Isaac

La Libertad, a los 22 días del mes de septiembre del 2021

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del trabajo del componente práctico de la modalidad de Examen de Grado de carácter Complexivo, denominado “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ESPECTRO DE DISEÑO PROPUESTOS POR LAS NORMAS ASCE 7-16 Y NEC-15 CON LOS ESPECTROS DE RESPUESTA DEL SISMO DE PEDERNALES DEL 16 DE ABRIL DEL 2016 OBTENIDOS PARA LAS ESTACIONES DE LA RENAC DEL IG-EPN”, elaborado por el Sr. SUÁREZ MEREJILDO RICHARD ISAAC, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, matriculado en la Unidad de Integración Curricular, período académico 2021-1, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

TUTOR

f. 

Ing. Argudo Rodríguez Jaime Fernando, PhD.

La Libertad, a los 22 días del mes de septiembre del 2021

AUTORIZACIÓN

Yo, **Suárez Merejildo Richard Isaac**

Autorizo a la Universidad Península de Santa Elena la **publicación** en la biblioteca de la Institución del Trabajo de Titulación, **Análisis comparativo del espectro de diseño propuestos por las normas ASCE 7-16 y NEC-15 con los espectros de respuesta del sismo de Pedernales del 16 de abril del 2016 obtenidos para las estaciones de la RENAC del IG-EPN**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

La Libertad, a los 22 días del mes de septiembre del 2021

AUTOR:

f.  _____

Suárez Merejildo Richard Isaac

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	VI
INDICE DE FIGURAS.....	VII
RESUMEN	XI
ABSTRACT.....	XII
INTRODUCCIÓN	1
UNIDAD I	2
1. Planteamiento del Problema.....	2
1.1 Formulación del Problema	2
1.2 Justificación de la Investigación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	4
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.4 Reconocimiento al IG-EPN. Datos del Sismo del 16 de abril-2016.....	4
UNIDAD II	5
2. Marco Teórico.....	5
2.1 Sismos de Subducción	5
2.2 Sismos Volcánico.....	5
2.3 Sismos Originados en las Fallas.....	6
2.3.1 <i>Fallas Normales</i>	6
2.3.2 <i>Fallas Inversas</i>	6
2.3.3 <i>Fallas Transcurrentes o Desplazamiento</i>	6
2.4 Análisis de Peligro Sísmico	7
2.5 Amenaza sísmica	7
2.6 Espectros de Respuesta Elástico	8
2.7 Espectros de Respuesta Inelástico.....	10
2.8 Espectro de Diseño Elástico.....	11
2.9 Método de Newmark-Hall	11
2.10 Software ViewWave	14
2.11 Sismo del 16 de abril del 2016.....	15
2.12 Espectros de Diseño Elásticos e Inelásticos de la NEC-15.....	15
2.12.1 <i>Determinación de la zonificación sísmica y factor z</i>	15
2.12.2 <i>Tipos de Perfiles de Suelos para el Diseño Sísmico</i>	16
2.12.3 <i>Coeficientes de Perfil de Suelo Fa, Fd y Fs</i>	17
2.12.4 <i>Espectro elástico de diseño horizontal según la NEC-15</i>	18
2.12.5 <i>Periodos Límites de Vibración</i>	20

2.12.6	<i>Espectro de Respuesta Elástico de Aceleraciones</i>	21
2.12.7	<i>Espectro Inelástico de diseño según NEC-15</i>	21
2.13	American Society of Civil Engineers ASCE 7-16.....	22
2.13.1	<i>Coefficientes de sitio</i>	22
2.13.2	<i>Espectro Elástico de Diseño de Respuesta según ASCE 7-16</i>	23
2.13.3	<i>Espectro Inelástico de Diseño según ASCE 7-16</i>	24
UNIDAD III.....		26
3.	Análisis Comparativo del Espectro de Diseño propuestos por las normas ASCE 7-16 y NEC-15 con los Espectros de Respuesta del sismo de Pedernales del 16 de abril del 2016 obtenidos para las estaciones de la RENAC del IG-EPN	26
3.1	Red Nacional de Acelerógrafos RENAC.....	26
3.2	Espectro Elástico de aceleración horizontal de diseño NEC-SE-DS 15	27
3.3	Espectro Elástico de aceleración horizontal de diseño ASCE 7-16.....	28
3.4	Espectro Inelástico de aceleración horizontal de diseño NEC-SE-DS 15	30
3.5	Análisis de Espectros de Respuesta del sismo del 16 de abril	31
3.6	Resultados Obtenidos.....	42
CONCLUSIONES		47
RECOMENDACIONES		48
BIBLIOGRAFÍA		49
ANEXOS		51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Niveles de amenaza sísmica.....	7
Tabla 2 Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada	16
Tabla 3 Coeficientes de ampliación de suelo F_a	17
Tabla 4 Coeficientes de ampliación de suelo F_d	17
Tabla 5 Coeficiente comportamiento no lineal del suelo F_s	18
Tabla 6 Parámetros del Espectros Elásticos de Aceleración	19
Tabla 7 Coeficiente de aceleraciones para periodos cortos F_a . (ASCE 7-16).....	22
Tabla 8 Coeficiente de aceleraciones para periodos largos F_v . (ASCE 7-16).....	23
Tabla 9 Datos de Estaciones de la RENAC	26
Tabla 10 Parámetros para representación del espectro de diseño elástico NEC-15	27
Tabla 11 Factores del espectro de diseño de suelo tipo C, para una zona sísmica alta.....	29
Tabla 12 Parámetros para reducción de fuerza sísmica - Espectro Inelástico NEC-15	30
Tabla 13 Comparación de Espectros de Diseño Elásticos, Suelo C y D de normas NEC-15, ASCE 7-16 y Espectros de Respuesta del sismo de Pedernales del 16 A-2016.....	45
Tabla 14 Comparación de Espectros de Diseño Inelásticos, Suelo C de normas NEC-15, ASCE 7-16 y Espectros de Respuesta del sismo de Pedernales del 16 A-2016.....	46

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Placas de Nazca y Sudamericana en la zona del Ecuador.....	5
Figura 2 Esquema de una Falla Normal.....	6
Figura 3 Esquema de una Falla Inversa.....	6
Figura 4 Esquema de una Falla de Desplazamiento.....	6
Figura 5 Indicativo del Método de Determinación del Espectro de Respuesta Elástico.	9
Figura 6 Espectro de respuesta aceleraciones elástico	10
Figura 7 Comportamiento Inelástico de una Estructura sometido a fuerza horizontal.....	11
Figura 8 Representación tripartita para el espectro del sismo de El Centro ($\xi = 0, 2, 5$ y 10%).....	12
Figura 9 Método de Aceleración Lineal - Newmark.....	13
Figura 10 Temblor del Imperial Valley, El Centro -18 de mayo de 1940.....	14
Figura 11 Mapa de zonas sísmicas del Ecuador y valor z.....	16
Figura 12 Espectro Elástico de aceleración S_a (g) según NEC - 15	19
Figura 13 Espectro de diseño de aceleraciones según ASCE 7-16.....	23
Figura 14 Distribución de la Red Nacional de Acelerógrafos.....	27
Figura 15 Espectro de diseño elástico según NEC-15 para Ambato - Suelo "C"	28
Figura 16 Espectro de diseño elástico según ASCE 7-16 ciudad de San Francisco - Suelo "C"	29
Figura 17 Espectro de Diseño Elástico vs Inelásticos NEC-2015.....	30
Figura 18 Espectros de Respuesta de la Estación de Ambato AAM2, y Espectros de Diseños Elásticos.....	32
Figura 19 Espectros de Respuesta de la Estación de Chone ACHN, y Espectros de Diseños Elásticos.....	32
Figura 20 Espectros de Respuesta de la Estación de Cuenca ACUE, y Espectros de Diseños Elásticos.....	33
Figura 21 Espectros de Respuesta de la Estación de Esmeraldas AES2, y Espectros de Diseños Elásticos	33
Figura 22 Espectro de Respuesta de la Estación de Guayaquil (Pascuales) AGYE, y Espectros de Diseños Elásticos	34
Figura 23 Espectros de Respuesta de la Estación de Ibarra AIB1, y Espectros de Diseños Elásticos.....	34
Figura 24 Espectros de Respuesta de la Estación de Ibarra AIB2, y Espectros de Diseños Elásticos.....	35
Figura 25 Espectros de Respuesta de la Estación de La Libertad ALIB, y Espectros de Diseños Elásticos	35

Figura 26 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Latacunga ALAT, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	36
Figura 27 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Loja ALJI, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	36
Figura 28 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Machala ACHI, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	37
Figura 29 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Manta AMNT, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	37
Figura 30 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Milagro AMIL, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	38
Figura 31 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Otavalo AOTA, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	38
Figura 32 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Pedernales APED, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	39
Figura 33 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Portoviejo APOI, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	39
Figura 34 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Quito EPNL, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	40
Figura 35 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Quito (La Carolina) PRAM, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	40
Figura 36 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de San Lorenzo ALOR, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	41
Figura 37 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Santo Domingo ASDO, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	41
Figura 38 <i>Espectros de Respuesta de la Estación de Tulcán ATUL, y Espectros de Diseños Elásticos</i>	42

AXENOS

<i>Anexo 1 Estación de Ambato AAM2. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>51</i>
<i>Anexo 2 Estación de Chone ACHN. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>52</i>
<i>Anexo 3 Estación de Cuenca ACUE. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>53</i>
<i>Anexo 4 Estación de Esmeraldas AES2. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>54</i>
<i>Anexo 5 Estación de Guayaquil (Pascuales) AGYE. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo</i>	<i>55</i>
<i>Anexo 6 Estación de Ibarra AIB1. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>56</i>
<i>Anexo 7 Estación de Ibarra AIB2. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>57</i>
<i>Anexo 8 Estación de La Libertad ALIB. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>58</i>
<i>Anexo 9 Estación de Latacunga ALAT. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>59</i>
<i>Anexo 10 Estación de Loja ALJI. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>60</i>
<i>Anexo 11 Estación de Machala ACHI. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>61</i>
<i>Anexo 12 Estación de Manta AMNT. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>62</i>
<i>Anexo 13 Estación de Milagro AMIL. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>63</i>
<i>Anexo 14 Estación de Otavalo AOTA. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>64</i>
<i>Anexo 15 Estación de Pedernales APED. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>65</i>
<i>Anexo 16 Estación de Portoviejo APO1. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>66</i>
<i>Anexo 17 Estación de Quito EPNL. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>67</i>

<i>Anexo 18 Estación de Quito – La Carolina PRAM. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo</i>	<i>68</i>
<i>Anexo 19 Estación de San Lorenzo ALOR. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>69</i>
<i>Anexo 20 Estación de Santo Domingo ASDO. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo</i>	<i>70</i>
<i>Anexo 21 Estación de Tulcán ATUL. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.....</i>	<i>71</i>

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ESPECTRO DE DISEÑO PROPUESTOS
POR LAS NORMAS ASCE 7-16 Y NEC-15 CON LOS ESPECTROS DE
RESPUESTA DEL SISMO DE PEDERNALES DEL 16 DE ABRIL DEL 2016
OBTENIDOS PARA LAS ESTACIONES DE LA RENAC DEL IG-EPN.”**

Autor: Suárez Merejildo Richard Isaac

Tutor: Ing. Argudo Rodríguez Jaime Fernando, PH.D.

RESUMEN

Debido a que Ecuador se encuentra en una zona de alta probabilidad de ocurrencia de sismos, la presente investigación tiene por objetivo comparar los espectros de diseño de la norma ASCE 7-16 y NEC -15, con los espectros de respuesta del sismo de Pedernales del 16 de abril del 2016, con los registros sísmicos obtenidos de las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos RENAC. Para la construcción de los espectros de respuesta de aceleración, se aplica el programa de visualización de ondas ViewWave, ingresando los datos de aceleraciones de las estaciones en sus dos componentes horizontales N-S y E-W. Se elaboran los espectros de diseño siguiendo los parámetros propuestos por las normas NEC-15 y ASCE 7-16, mediante la utilización del programa Excel para conseguir las gráficas de los espectros de diseño para los perfiles de suelos tipo C y D en ambas normativas. Posterior a ello, se hace un análisis comparativo de los espectros de diseño de las normas, entre los espectros de respuesta de los registros en las ciudades de Ecuador en sus dos componentes del sismo del 16 de abril- 2016. Y como resultado se obtienen los gráficos comparativos de una manera condensada para una mejor visualización de los espectros de diseño elásticos, frente a los espectros de respuestas máximas del sismo para cada estación de la RENAC.

Palabras claves: Espectros de Respuesta, espectros de diseño elástico, espectros inelásticos, terremoto Pedernales, registro de aceleraciones, NEC-15, ASCE 7-16.

ABSTRACT

Ecuador is located in an area of high earthquake occurrence probability. The present research aims to compare the design spectra of the ASCE 7-16 and NEC -15 standards, with the response spectra of the Pedernales April 16, 2016, earthquake. Seismic records were obtained from the RENAC National Accelerometer Network stations from IG-EPN. ViewWave software is used for constructing acceleration response spectra, using data of 21 stations for their two horizontal components N-S and E-W. The design spectra are prepared following the parameters proposed by the NEC-15 and ASCE 7-16 standards, for the soil profiles type C and D.

Subsequently, a comparative analysis is made between design spectra from NEC-15 and ASCE7-16 standards and the response spectra for the records of 21 sites in Ecuador. And as a result, comparative graphs are presented in a condensed way for a better visualization of the elastic design spectra, versus the maximum response spectra of the earthquake for each RENAC station.

Keywords: Response spectra, elastic design spectra, inelastic spectra, Pedernales earthquake, acceleration log, NEC-15, ASCE 7-16.

INTRODUCCIÓN

El Ecuador se encuentra en una zona donde existe una alta probabilidad de ocurrencia de sismos, y durante la historia del país, se han presentado evidentes daños causados a la comunidad y cuantiosas pérdidas económicas durante estos eventos sísmicos. De acuerdo con Angulo y Azañedo (2013) p. 1, el principal objetivo de la Ingeniería Sismo resistente es la de proteger las obras civiles de un colapso, con la finalidad de resguardar la vida de los ocupantes durante un evento sísmico de gran magnitud. En la actualidad se proponen nuevos objetivos para proteger las estructuras en sismos leves, reduciendo el daño ante estos terremotos severos. Silva Rodríguez (2011) p. 3, aclara que las estructuras tienen un comportamiento deficiente frente a los sismos, incluso en eventos moderados, debido a la autoconstrucción, por la falta de resistencia y ductilidad escasa.

Crisafulli y Villafañe (2002) p. 1, argumentan que los espectros tienen una gran importancia en el diseño de estructuras por el hecho de que estos gráficos poseen una gran información de respuesta dinámica, los valores de respuestas máximas son los que usualmente se requieren para el diseño de un cálculo estructural. Según Avilés y Pérez (2004) p. 3, sostienen que para un diseño estructural se debe tener en cuenta la interacción suelo-estructura, exclusivamente en el modo fundamental de vibración. Miragall y Samartin (1983) p. 335, también exponen que el tipo de suelo en que se encuentran las estructuras tiene mucha importancia en un posible movimiento sísmico.

En este trabajo de investigación, se evalúan las formas espectrales de diseño siguiendo los requerimientos de la Norma NEC-SE-DS y ASCE 7-16, realizando una comparación con los espectros de respuesta de las 2 componentes horizontales, siendo estas N-S, E-W, con la base de datos de la Red Nacional de Acelerógrafos RENAC del sismo de Pedernales del 16 de abril del 2016, que registra aceleraciones del suelo en 21 estaciones del Ecuador, con la finalidad de determinar la relación que tiene el espectro de diseño de la Norma NEC -SE-DS con las aceleraciones que soportan las estructuras durante un evento sísmico.

UNIDAD I

1. Planteamiento del Problema

Tejada (2011) p. 5, destaca que gran parte de las estructuras alrededor del mundo están sometidos a diversos tipos de acciones dinámicas, provocadas algunas por la actividad humana, vibraciones de maquinarias, tráfico, choques o impacto, explosiones y algunas naturales como oleajes, vientos, movimientos de masa, sismos entre otros. Este tipo de acciones cuya posición, dirección, sentido y magnitud pueden ser variables en el tiempo, provocan una respuesta dinámica a las estructuras que pueden ocasionar efectos de distinta importancia, desde las vibraciones no perceptibles por los sentidos del ser humano, hasta lograr grandes desplazamientos, daños severos, fisuras o el colapso total de la estructura.

Ecuador al ubicarse en una zona de alto peligro sísmico y un constante crecimiento en el sector de la construcción, requiere de análisis sismo resistentes para el diseño de estructuras, por tal motivo se propone comparar los espectros de diseño siguiendo los parámetros de la NEC-SE-DS con los espectros según ASCE 7-16, y a su vez con los espectros de respuesta de las 2 componentes horizontales del sismo de Pedernales del 16 de abril del 2016, con la finalidad de verificar que los espectros de diseño de la NEC-15, sean razonables a la realidad sísmica de nuestro país.

Se hace necesario hacer estos análisis debido al complejo comportamiento de las estructuras frente a un sismo, y es conveniente continuar con investigaciones que busquen comprobar los requerimientos y exigencia de la normativa de diseño sísmico NEC-15, con el fin de disminuir la vulnerabilidad en estructuras ante eventos sísmicos.

1.1 Formulación del Problema

Investigar mediante comparación a los espectros de diseño de la norma ecuatoriana NEC-SE-DS-15, con los de la norma americana ASCE 7-16, y su relación con el espectro de respuesta del sismo del 16 de abril del 2016.

1.2 Justificación de la Investigación

Lagos (2015), p. 6, destaca que los terremotos de mayor magnitud son los tectónicos, estos traen altas consecuencias afectando severamente a las estructuras, debido a esta situación es que se toma en cuenta la creación de normas para analizar y diseñar edificaciones sismo resistentes. Además, con registros existentes de sismos, se pueden realizar estudios de valiosa importancia para saber cómo se comportan las estructuras durante estos eventos.

Esta investigación tiene su justificación en la importancia de realizar una evaluación de las formas espectrales de diseño de la Norma NEC-SE-DS usando los registros del sismo del 16 de abril del 2016, obtenidos de las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos *RENAC* del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional *IG-EPN*.

Como expresa López (2017), p. 9, cuando se produce un evento sísmico, se obtiene información que se expresa en acelerogramas, las respuestas máximas se expresan en parámetros de desplazamientos, aceleraciones y velocidad. Datos que ayudan a establecer las normas de diseño sismo resistente. La presente investigación es para comparar los espectros de diseño de NEC-SE-DS -2015 con los espectros de respuesta del sismo de Pedernales a fin de describir su relación.

Es fundamental contar con la norma de diseño sismo resistente que cumpla con los estándares mínimos de diseño asociados a sismos, y que asegure un buen desempeño de las edificaciones para salvaguardar la vida de quienes hacen uso de las mismas. Así mismo, una sobreestimación de los efectos producidos por los sismos puede llevar a elevar los costos en la construcción. Por este motivo es imprescindible conocer los parámetros de la NEC-SE-DS y compararla con una de las normas internacionales más importantes y estudiadas como es la ASCE 7-16.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar la relación que existe entre los espectros de diseño de la NEC-SE-DS-15 y ASCE 7-16, en comparación con los espectros de respuesta del sismo del 16 de abril del 2016, registrados en las estaciones de la RENAC del IG-EPN.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Construir los espectros de diseño elásticos de la NEC-15 y ASCE 7-16, para los distintos tipos de suelo.
- Analizar los espectros de respuesta del registro sísmico del 16 de abril del 2016 en sus dos componentes horizontales.
- Determinar la relación que existe entre los espectros de diseño de las normas NEC-15, ASCE 7-16 y el espectro de respuesta del sismo del 16 de abril del 2016 para varios sitios.

1.4 Reconocimiento al IG-EPN. Datos del Sismo del 16 de abril-2016.

“Los datos usados en este trabajo fueron obtenidos por la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN). El IG-EPN ha utilizado para la instalación y ampliación de la RENAC, recursos de la Escuela Politécnica Nacional, del Proyecto SENESCYT PIN-08-EPNGEO-0001 “Fortalecimiento del Instituto Geofísico: Ampliación y Modernización del Servicio Nacional de Sismología y Vulcanología” y del Proyecto de inversión “Generación de Capacidades para la Difusión de Alertas Tempranas y para el Desarrollo de Instrumentos de Decisión ante las Amenazas Sísmicas y Volcánicas dirigidos al Sistema Nacional de Gestión de Riesgos” Singaicho, Laurendeau et al. (2016).

UNIDAD II

2. Marco Teórico

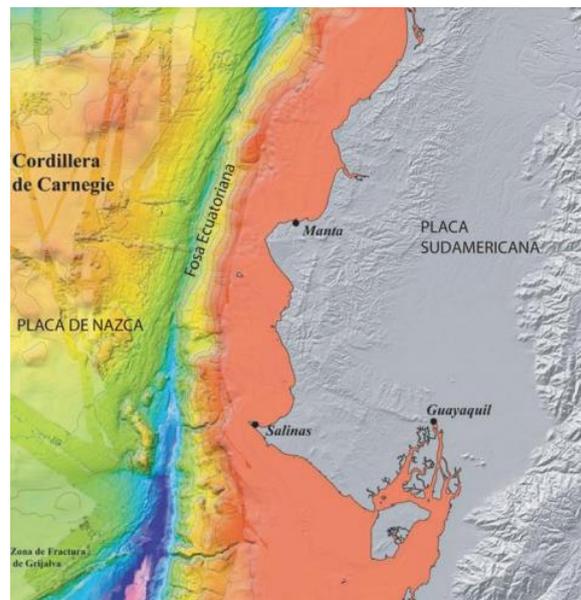
2.1 Sismos de Subducción

De acuerdo con Leyton (2010), se pueden encontrar 3 tipos de sismos que son producto de la subducción de placas, primero está el *sismo interplaca* que ocurre en el contacto de las dos placas tectónicas Sudamericana y Nazca, el segundo es la *intraplaca* que se produce dentro de la placa tectónica de Nazca, y los *sismos corticales* que son sismos superficiales que ocurren en el interior de la placa Sudamericana.

Falconí (2008), p.5 , sostiene que el fenómeno de subducción entre las placas de Nazca y la Continental, sobre la que se ubica el Ecuador genera movimientos, deformaciones y liberación de energía. Constantemente se desplaza la placa de Nazca hacia la placa Sudamericana aproximadamente 5 a 7 centímetros al año.

Figura 1

Placas de Nazca y Sudamericana en la zona del Ecuador



Nota: Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador, Francisco Rivadeneira

2.2 Sismos Volcánico

Rivadeneira (2007) p. 25, expresa que el Ecuador se ubica en una zona de muy alta actividad sísmica además de una elevada actividad volcánica. Los sismos que son producidos por los volcanes, en su mayoría son muy bajos y rápidos. Ocurren muy cerca de un volcán y generalmente su magnitud oscila entre 1 y 4.5 grados.

2.3 Sismos Originados en las Fallas

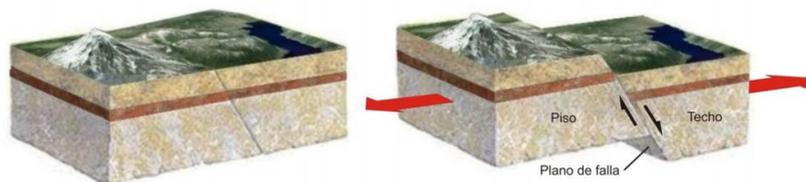
Narváez (2015), manifiesta que Ecuador presenta numerosas fallas geológicas entre las placas Nazca y la Continental que ha ocasionado el fenómeno de subducción que producen fuerzas importantes en los bordes de las placas tectónicas. El Instituto Nacional de Prevención Sísmica de Argentina INPRES (2015), sostiene que existen tres tipos de fallas.

2.3.1. *Fallas Normales.*

Generada por fuerzas de tensión horizontal, perpendicular al plano de falla.

Figura 2

Esquema de una Falla Normal

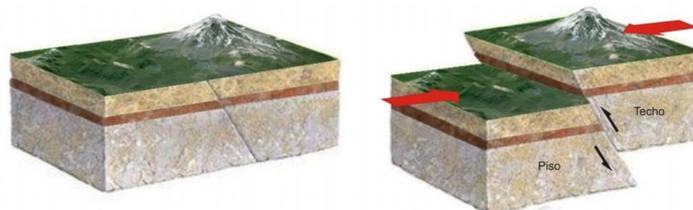


2.3.2. *Fallas Inversas.*

Actúa de manera perpendicular al plano de falla y sus fuerzas son de compresión.

Figura 3

Esquema de una Falla Inversa



2.3.3. *Fallas Transcurrentes o Desplazamiento.*

Este tipo de falla dan lugar a movimientos horizontales en relación al plano.

Figura 4

Esquema de una Falla de Desplazamiento



Los sismos que se generan en fallas, resultan por la acumulación de energía en la corteza de la tierra, que libera esta energía en formas de ondas sísmicas que finalmente hacen que el suelo tenga desplazamientos bruscos.

2.4 Análisis de Peligro Sísmico

Benito y Jiménez (1999), mencionan que el análisis probabilístico del peligro sísmico modela la probabilidad de predecir un movimiento sísmico debido al estudio de la sismicidad de una región. Para esto se hace necesario conocer bien la ocurrencia de los terremotos pasados y los estudios de movimientos de suelos, cuyos parámetros de aceleración, velocidad, desplazamiento y magnitud son cuantificados.

2.5 Amenaza sísmica

La norma sismo resistente vigente NEC-15, tiene por objetivo principal el desempeño de las estructuras para evitar pérdidas de vidas a través de impedir el colapso de las estructuras, las que deberán tener un buen comportamiento inelástico ante un evento sísmico severo. El sismo de diseño se define mediante estudios de peligrosidad sísmica, teniendo en cuenta una vida útil de la estructura de 50 años, con el 10% de probabilidad de excedencia. El sismo de diseño tiene un periodo de retorno de 475 años.

Este evento sísmico tiene muy poca probabilidad de ocurrir en la vida útil de la estructura, y se requiere que la edificación disipe una gran cantidad de energía y no llegue al colapso. La NEC-15, también define cuatro sismos como amenaza sísmica para diseño de estructuras Esenciales y Especiales , como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1
Niveles de amenaza sísmica

Nivel de sismo	Sismo	Probabilidad de excedencia en 50 años	Período de retorno Tr (años)	Tasa anual de excedencia (1/Tr)
1	Frecuente (menor)	50%	72	0.01389
2	Ocasional (moderado)	20%	225	0.00444
3	Raro (severo)	10%	475	0.00211
4	Muy raro* (extremo)	2%	2 500	0.0004

Se considerarán los siguientes niveles de frecuencia y amenaza sísmica

- Frecuente (intensidad baja) o Sismo de Servicio, su periodo de retorno de 42 y 72 años para estructuras de uso normal.
- Ocasional (intensidad moderada); El sismo con periodo de retorno de 72 y 225 años para estructuras de uso normal, y las especiales y esenciales; respectivamente.
- Raro (intensidad severa): Sismo de diseño (período de retorno de 475 años)
- Muy raro (intensidad extrema): Período de retorno de 2500 años. Este último se utiliza para estructuras esenciales y de ocupación especial.

2.6 Espectros de Respuesta Elástico

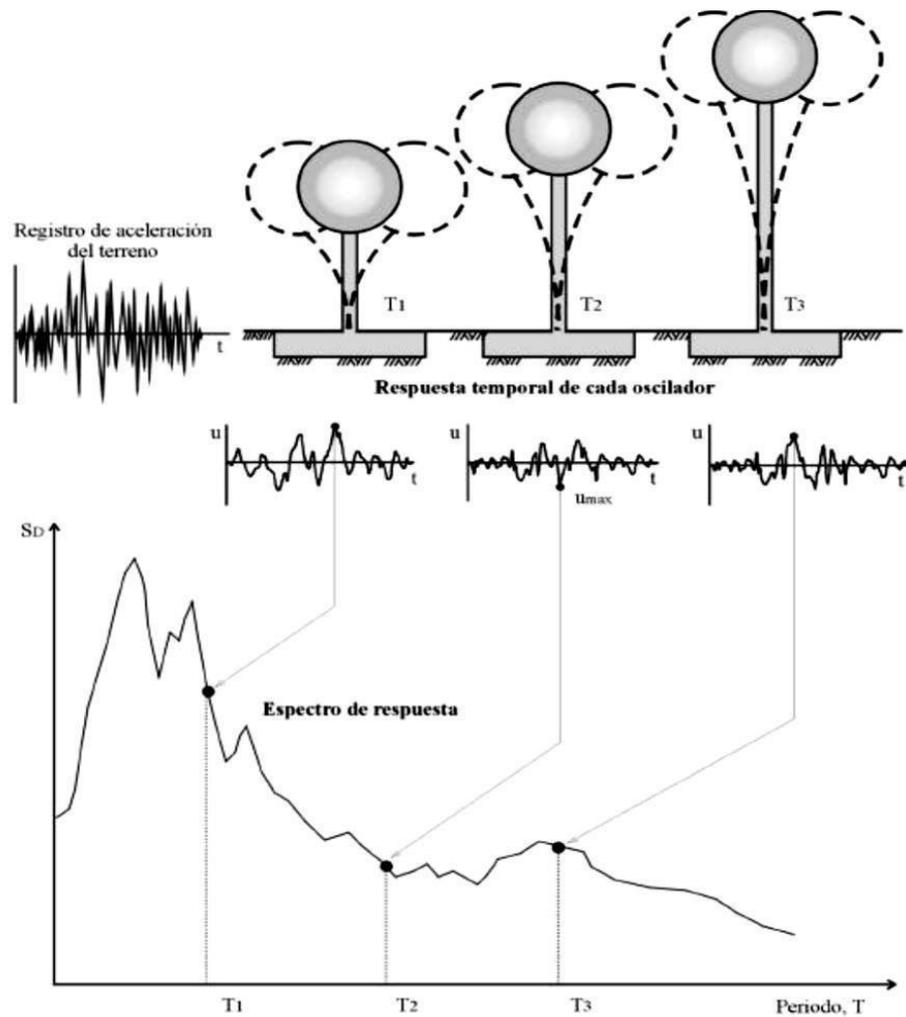
Es la solución matemática de la respuesta máxima absoluta de las historias tiempo de un oscilador elástico calculados para periodo T y amortiguamiento crítico ξ constante del 5% para un sismo determinado. Por otro lado, Paz (2012), p. 156, indica que se debe analizar la estructura para saber el tipo de amortiguamiento que posee, de 0%, 1%, 2%, 3%, ..., 10% y analizar el espectro de respuesta para dicho amortiguamiento.

Carvajal y Tapia (2014), expresan que los espectros de respuesta elástico se realizarán con el fin de conocer las características y los movimientos del suelo ante un evento sísmico y el efecto que provocan a las estructuras. En la actualidad los espectros de respuesta, proporcionan respuestas máximas de aceleraciones, velocidades y desplazamientos. En estos gráficos se representan las respuestas máxima en las ordenadas y el periodo o la frecuencia con la que ocurre el movimiento en las abscisas.

En la figura 5, se muestra la respuesta máxima de tres sistemas de estructuras de un grado de libertad con diferentes periodos de vibración e igual porcentaje de amortiguamiento. Cada sistema refleja diferente respuesta, el cual se representa a través de la historia de desplazamientos que luego es posible determinar su valor máximo absoluto.

Figura 5

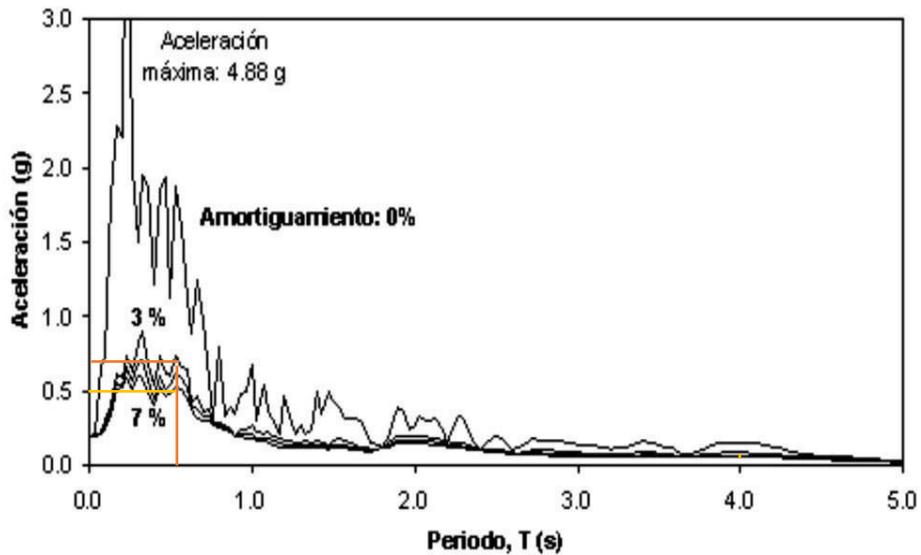
Indicativo del Método de Determinación del Espectro de Respuesta Elástica.



Nota: Espectros de respuesta y de diseño, Francisco Crisafulli, 2002.

Las estructuras vibran y experimentan aceleraciones, velocidades y desplazamientos que pueden llegar a ser superiores a los movimientos de los suelos. En la figura 6, se observa el espectro de aceleración elástica con diferentes porcentajes de amortiguamiento debido a su sistema constructivo, es decir, se tiene una estructura con un amortiguamiento del 3% con un periodo de vibración de 0.5seg, la que tendría una aceleración de 0.7g. Otra estructura del mismo periodo, experimentará una aceleración de 0.5g, al 7% de amortiguamiento. Toda estructura vibra en función de las características dinámicas del terremoto y las características dinámicas de su sistema estructural.

Figura 6
Espectro de respuesta aceleraciones elástico



Nota: Espectros de respuesta elástico y de diseño, Francisco Crisafulli, 2002.

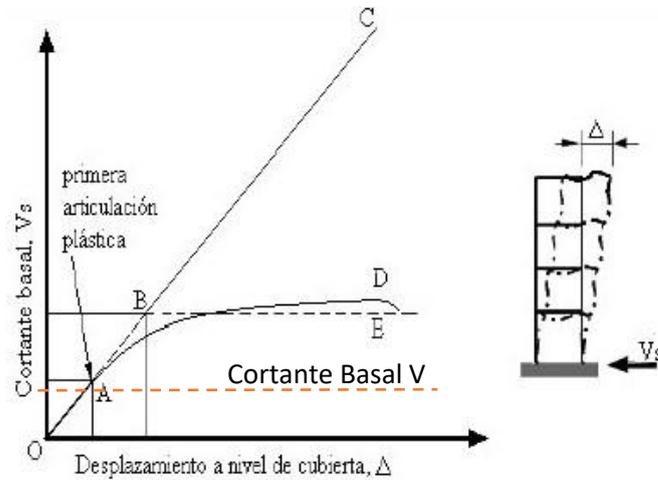
2.7 Espectros de Respuesta Inelástico

Los espectros de respuesta inelástico se utilizan para estudiar la respuesta elástica de las estructuras a sismos frecuentes o de servicio con intensidad VI. Pero en este caso los sistemas de 1GDL tendrán comportamiento no lineal o inelástico para eventos que exceden el nivel de servicio y tienen frecuencia de ocurrencia Ocasional, Raro o Muy Raro, presentando una intensidad del evento sísmico de VII, VIII y IX respectivamente, además de variaciones de aceleraciones debido al tipo de suelo.

Este tipo de espectro son importantes para un diseño sismorresistente por razones de economía en la mayoría de las construcciones, ya que se diseñan con la hipótesis de que al ocurrir un evento sísmico las estructuras entran en el rango plástico experimentando deformaciones por acción del terremoto. En la figura 7 se muestra la curva de capacidad (Cortante basal V vs desplazamiento Δ), que presenta un rango de comportamiento lineal desde el punto O al A, un rango de comportamiento inelástico con pérdida significativa de rigidez desde A hasta B y un rango inelástico de tipo plástico donde la rigidez se pierde significativamente desde B en adelante. En este último rango se tiene la ductilidad requerida por un terremoto.

Figura 7

Comportamiento Inelástico de una Estructura sometido a fuerza horizontal



Para que la estructura desarrolle toda su ductilidad provista por diseño frente a la demanda de ductilidad de un terremoto, se debe usar un espectro de diseño inelástico que corresponde a un Cortante Basal de diseño V originado en la ocurrencia del Sismo Frecuente o Sismo de Servicio

2.8 Espectro de Diseño Elástico

Según NEC-SE-DS (2015), el espectro de diseño se ha representado a partir de espectros de respuesta, características de las condiciones geológicas, tectónicas, sismológicas y según el tipo de suelo asociado con el sitio de emplazamiento. Es un espectro de tipo elástico, calculado para una fracción de amortiguamiento crítico del 5%, que es utilizado con fines de diseño para representar los efectos dinámicos de un terremoto con 10% de probabilidad de ser excedido en 50 años ($T_r=475$ años).

Crisafulli y Villafañe (2002) sostienen que las estructuras no deben diseñarse para un terremoto específico, porque es probable que pueda existir un evento sísmico con características muy diferentes. Por este motivo, el diseño de las construcciones que puedan soportar sismos, se realizan con los espectros suavizados (no presentan variaciones de aceleraciones bruscas) que consideran el efecto de varios terremotos, como una envolvente de los espectros de respuesta de varios sismos característicos.

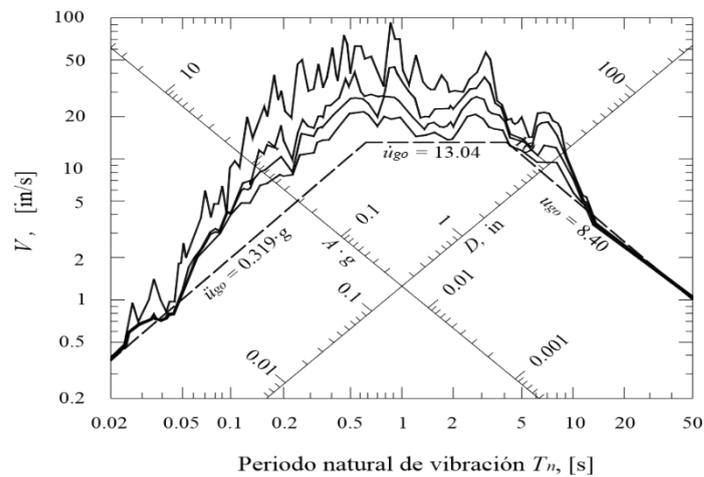
2.9 Método de Newmark-Hall

Newmark y Hall, en el año 1960 iniciaron un sin número de investigaciones sobre las formas espectrales, con base a estos estudios propusieron describir los espectros de respuesta por medio de líneas rectas dibujadas en papel tripartito. Los

autores encontraron la posibilidad de estimar independientemente la máxima aceleración, velocidad y desplazamiento del terreno, y en determinado periodo las mismas eran aproximadamente constantes. En la figura 8 se muestra un ejemplo de representación tripartita del espectro de respuesta para un amortiguamiento del 5%, siendo el más usado para edificios de hormigón armado, aunque no es un límite idealizar las estructuras con el 5% de amortiguamientos. Paz (2012) p. 158.

Figura 8

Representación tripartita para el espectro del sismo de El Centro ($\zeta = 0, 2, 5$ y 10%)



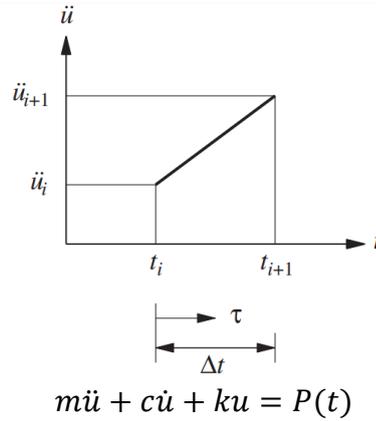
Nota: Procedimiento de cálculo para la elaboración de espectros sísmicos para el diseño sismo resistente de estructuras, por Eder Paz Tiguila (2012).

En la figura 8, se observa una forma aproximadamente trapezoidal del espectro, tal como indicaba Newmark y Hall, en la zona de la izquierda correspondiente a los periodos cortos, la aceleración es constante, en la zona central con periodos moderados, la velocidad es constante y en la zona de la derecha donde los periodos son largos, los desplazamientos son constantes, representando a los valores máximos del movimiento del suelo.

Método de la Aceleración Lineal – Newmark

CHOPRA (2014) indica que Newmark desarrolló varios métodos paso a paso para determinar la respuesta de un sistema lineal de un grado de libertad. En la figura 9, se aprecian las variaciones de la aceleración durante el paso de tiempo que varía linealmente. El método de la aceleración lineal de Newmark que se describe matemáticamente a continuación, sirve para calcular la respuesta vibratoria en el tiempo de una estructura de un grado de libertad de amortiguamiento “ ζ ”, masa “ m ” y rigidez “ k ” para la acción de un sismo determinado.

Figura 9
Método de Aceleración Lineal - Newmark



Si la aceleración varía linealmente durante el intervalo de tiempo, entonces:

$$\ddot{u}_{(\tau)} = \ddot{u}_i + \frac{\tau}{\Delta t} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i)$$

Se integra esta expresión, y se obtiene la ecuación de la velocidad:

$$\dot{u}_{(\tau)} = \dot{u}_i + \ddot{u}_i \tau + \frac{\tau^2}{2\Delta t} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i)$$

$\tau = \Delta t$, se sustituye en la ecuación de la velocidad \dot{u}_{i+1} en el instante $i+1$.

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i)$$

Esta última ecuación de velocidad se vuelve a integrar para obtener la ecuación de desplazamiento:

$$u_{(\tau)} = u_i + \dot{u}_i \tau + \ddot{u}_i \frac{\tau^2}{2} + \frac{\tau^3}{6\Delta t} (\ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i)$$

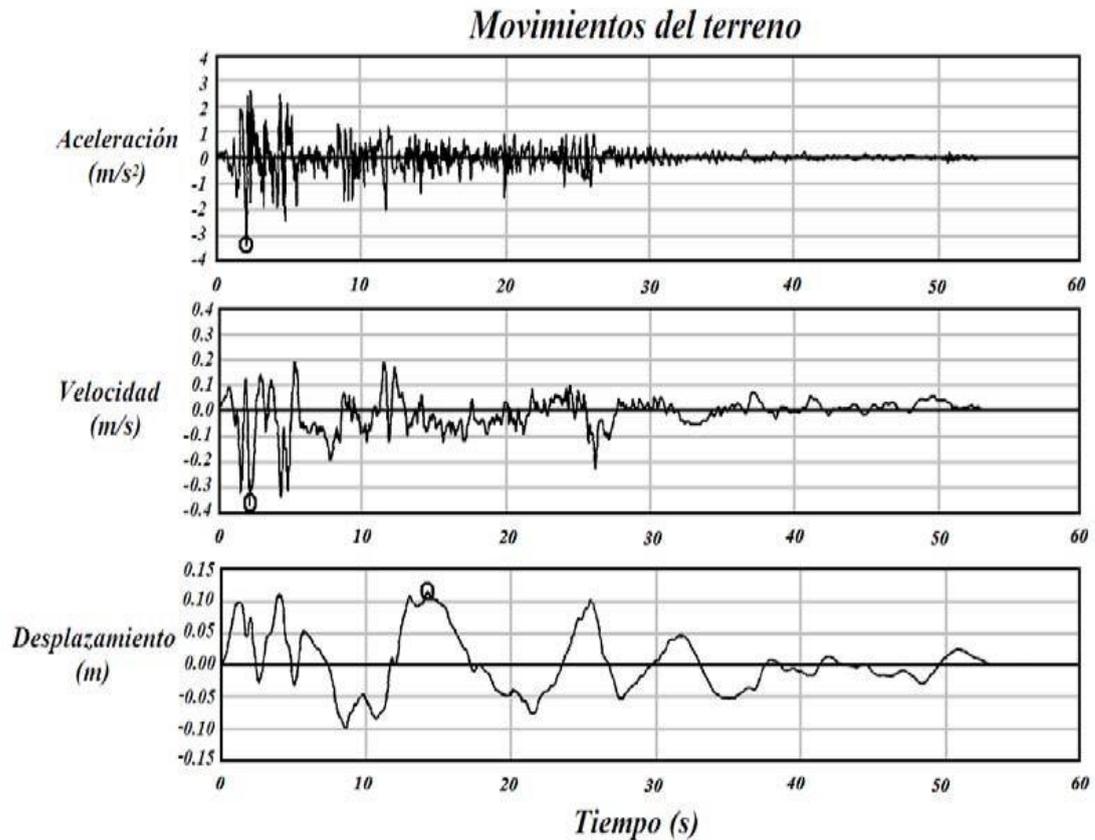
Se sustituye $\tau = \Delta t$ para obtener el desplazamiento u_{i+1} en el instante $i+1$.

$$u_{i+1} = u_i + \dot{u}_i \Delta t + (\Delta t)^2 \left(\frac{1}{6} \ddot{u}_{i+1} - \frac{1}{3} \ddot{u}_i \right)$$

Se muestra en la figura 10 los resultados para el sismo de “El Centro” en California del 18 de mayo de 1940, los registros de aceleraciones del terreno, las velocidades que se obtiene de integrar las aceleraciones y desplazamiento que fueron integradas de las velocidades. Se obtuvieron valores máximos de aceleración ($A_{te} = 3,417 \text{ m/s}^2$, equivalente a $0,348g$), la velocidad ($V_{te} = 0,334 \text{ m/s}$) y un desplazamiento ($D_{te} = 0,109 \text{ m}$) correspondiente al suelo.

Figura 10

Temblor del Imperial Valley, El Centro -18 de mayo de 1940



Nota: Procedimiento de cálculo para la elaboración de espectros sísmicos para el diseño sismo resistente de estructuras, por Eder Paz Tiguila (2012).

Luego de obtener los valores máximos absolutos de la respuesta de un sistema con periodo T , la colección de dichos valores para todo el dominio de periodos, lleva a las gráficas de los Espectros de Respuesta Elásticos de un sismo.

2.10 Software ViewWave

Es un programa de análisis de datos para movimientos fuertes, desarrollado por T Kashima, ingeniero investigador de fuertes movimientos sísmicos. Resolviendo los datos de un sismo para encontrar respuestas vibratorias en el tiempo, mediante integración numérica con el método de Newmark para espectros de respuesta o de Fourier para hallar espectros de densidad de Frecuencias.

ViewWave puede mostrar:

- Formas de la respuesta en el tiempo de aceleración
- Formas de la respuesta en el tiempo de velocidad y desplazamiento integrada

- Espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración

Ademas ViewWave, puede mostrar gráficos que usan dos componentes específicas, si el archivo de datos posee dos o más componentes.

- Órbita de la partícula
- Relación de amplitudes de Fourier
- Espectro de potencia de correlación cruzada
- Funciones de coherencia
- Angulos de fase

2.11 Sismo del 16 de abril del 2016

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IG-EPN (2020), aclara que el 16 de abril del 2016 a las 18H58, en Pedernales ocurrió uno de los terremotos más destructivos en los últimos tiempos de la historia sísmica del Ecuador, que tuvo una magnitud de momento $M_w=7.8$ y una intensidad máxima de IX (según la Escala Macrosísmica Europea, EMS-98). Se convitió en el evento sísmico más catastrófico, dejando gran cantidad de víctimas, 700 personas fallecidas y más de 7000 heridos, además de una extensa destrucción en las costas del país.

En ciudades de Manabí, se observó que la mayoría de las cosntrucciones fallaron en las columnas, y se estima que éstas fueron causa de la autoconstrucción por lo que las estructuras no fueron realizadas por personas calificadas que no implementan normas de construcción del país. Otra de las anomalías que se presentaron en las estructuras, es que fueron construidas directamente en suelo arenoso, causando asentamiento y posiblemente licuación de suelo, por esta razón se vieron afectadas las estructuras.

2.12 Espectros de Diseño Elásticos e Inelásticos de la NEC-15.

2.12.1 Determinación de la zonificación sísmica y factor z.

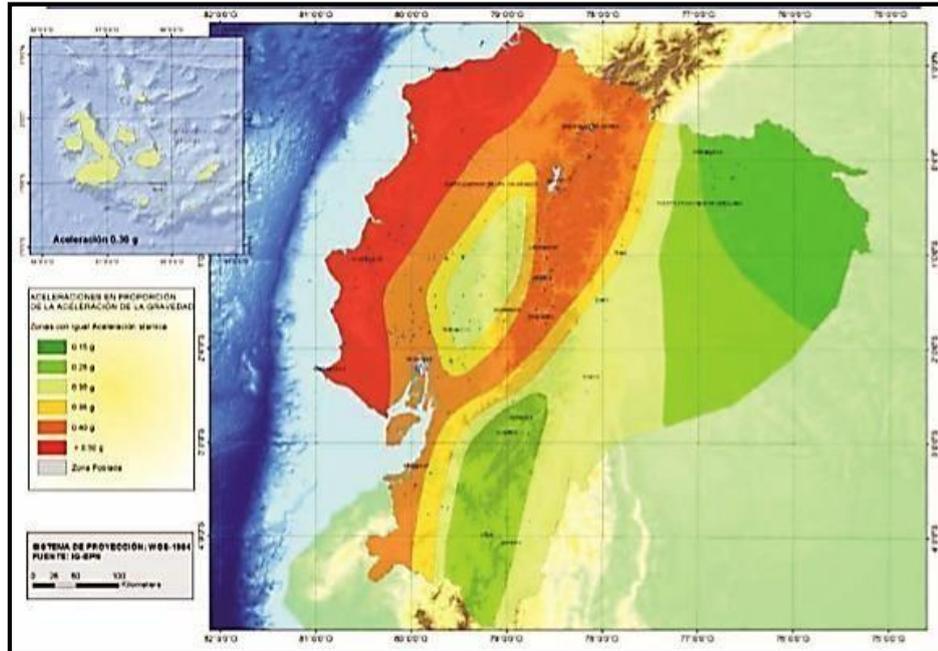
Cada ciudad del Ecuador se encuentra catalogada por la Norma Ecuatoriana de la Construcción desde el mínimo al máximo peligro sísmico, a su aceleración máxima esperado en roca $Z = A_{m\acute{a}x}/g$. Este valor de aceleración está expresado en fracción de la gravedad.

De acuerdo con la NEC (2015) p. 27, se debe determinar el valor “z” dependiendo de la ubicación de la estructura, para desarrollar el diseño sísmico.

En la figura 11 se muestra las seis zonas sísmicas que tiene el Ecuador, estas son:

Figura 11

Mapa de zonas sísmicas del Ecuador y valor z



Nota: Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS – 2015

Tabla 2

Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

2.12.2 Tipos de Perfiles de Suelos para el Diseño Sísmico.

La norma ecuatoriana de la construcción, define seis tipos de perfil de suelo. Los parámetros utilizados en la clasificación son los correspondientes a los 30 m superiores para los perfiles tipo A, B, C, D y E. Para el perfil tipo F se aplican otros criterios. Además de que su estudio no debe limitarse a los 30 m superiores del perfil.

2.12.3 Coeficientes de Perfil de Suelo Fa, Fd y Fs.

Después de analizar el valor “z” al que corresponde el perfil de suelo, se procede a seleccionar los coeficientes del suelo Fa, Fd y Fs, como lo establece la norma ecuatoriana de construcción del año 2015.

Fa. - Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto. Los valores se muestran en la tabla 3, donde Fa amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de sitio. Indica la NEC (2015) p. 31.

Tabla 3
Coeficientes de ampliación de suelo Fa.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1	0.85
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección 10.5.4					

Nota: Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS – 2015

Fd. - Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca. Los valores se muestran en la tabla 4, donde Fd amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio. Indica la NEC (2015) p. 31.

Tabla 4
Coeficientes de ampliación de suelo Fd.

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

Nota: Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS – 2015

Fs.- Comportamiento no lineal de los suelos. Los valores se muestran en la tabla 5, y F_s considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos, según NEC (2015) p. 32.

Tabla 5
Coefficiente comportamiento no lineal del suelo F_s .

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥ 0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.4
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y 10.6.4					

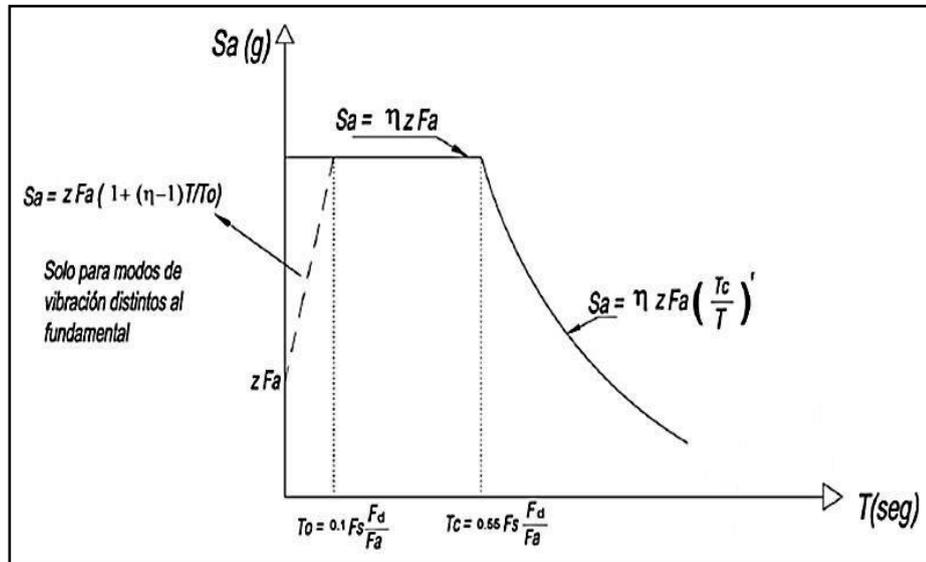
Nota: Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS – 2015

2.12.4 Espectro elástico de diseño horizontal según la NEC-15.

Para la construcción del espectro de respuesta elástica de aceleraciones S_a , expresado como fracción de la aceleración de la gravedad, se necesita el factor de zona sísmica Z , el tipo de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura, y la consideración de los valores de los coeficientes de amplificación de suelo F_a , F_d y F_s . NEC (2015) p. 32.

Figura 12

Espectro Elástico de aceleración S_a (g) según NEC - 15



Nota: Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS – 2015

En la tabla 6 se aprecia los diferentes significados en donde constan cada uno de los parámetros establecidos para determinar los espectros elásticos de aceleración que se muestra en la figura 12.

El espectro de diseño en aceleraciones que plantea la NEC tiene los siguientes parámetros:

Tabla 6

Parámetros del Espectros Elásticos de Aceleración

PARÁMETROS	SIGNIFICADO
η	<p>Razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0.1$ s) y el PGA para el período de retorno seleccionado. Se basan de acuerdo con la región del Ecuador donde esta ubica la estructura:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $\eta = 1.80$: Provincias de la Costa (excepto Esmeraldas) • $\eta = 2.48$: Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos • $\eta = 2.60$: Provincias del Oriente
F_a	<p>Coefficiente de amplificación de suelo en la zona de período. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de sitio</p>

Fd	Coefficiente de amplificación de suelo. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio
Fs	Coefficiente de amplificación de suelo. Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos
Sa	Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (expresado como fracción de la aceleración de la gravedad g). Depende del período o modo de vibración de la estructura
T	Período fundamental de vibración de la estructura
To	Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño
Tc	Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño
Z	Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad g
r	Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto. <ul style="list-style-type: none"> • r = 1 para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E • r = 1.5 para tipo de suelo E.

Nota: Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS – 2015

El espectro elástico de aceleración Sa, se determina con las siguientes ecuaciones:

2.12.5 Periodos Límites de Vibración

La norma, propone límites de periodos que son utilizados para la construcción del espectro de diseño. Se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$T_0 = 0.10F_S * \frac{F_d}{F_a} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$T_C = 0.55F_S \left(\frac{F_d}{F_a} \right) \quad \text{Ec. (2)}$$

$$T_L = 2.4F_d \quad \text{Ec. (3)}$$

Para los perfiles de suelos tipo D y E, los valores de T_L se limitarán a un valor máximo de 4 segundos.

2.12.6 Espectro de Respuesta Elástico de Aceleraciones

Para hallar el espectro expresado en fracción de la aceleración de la gravedad, con amortiguamiento del 5%, se propuso las siguientes ecuaciones:

$$S_a = \eta * Z * F_a \quad \text{para } 0 \leq T \leq T_c \quad \text{Ec. (4)}$$

$$S_a = \eta * Z * F_a * \left(\frac{T_c}{T}\right)^r \quad \text{para } T > T_c \quad \text{Ec. (5)}$$

Para un estudio dinámico, y únicamente para evaluar la respuesta de los modos de vibración diferentes al modo fundamental, el valor de S_a para periodos menores al T_0 , se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_a = Z F_a \left[1 + (\eta - 1) \frac{T}{T_0}\right] \quad \text{para } T \leq T_0 \quad \text{Ec. (6)}$$

2.12.7 Espectro Inelástico de diseño según NEC-15

Los espectros inelásticos se definen mediante la reducción de los espectros elásticos para el factor R, con el propósito de diseñar las estructuras para un comportamiento inelástico a partir de exceder la carga correspondiente al Sismo de Servicio. Si se cumple los requisitos de diseño de la norma ecuatoriana de construcción NEC-SE-DS-2015, R podrá ser aplicado en el cálculo del cortante basal, el cual corresponde al Sismo de Servicio.

$$V = C_s * W \quad \text{Ec. (7)}$$

V: Cortante basal total de diseño

Cs: Coeficiente Sísmico

W: Carga sísmica reactiva

$$C_s = \frac{I * S_a}{R * \Phi_P * \Phi_E} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

I: Coeficiente de importancia

Sa: Espectro de diseño Elástico de aceleración

Φ_P y Φ_E : Coeficientes de configuración en planta y elevación

R: Factor de reducción de resistencia sísmica

2.13 American Society of Civil Engineers ASCE 7-16

De acuerdo con Noriega Vega (2016) p. 47, la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE), es una de las normas más antiguas en la ingeniería, para análisis y diseño sísmico de estructuras. Gracias a esta normativa, que ha realizado estudios geológicos, se pueden determinar factores de sitios propios de los Estados Unidos. En estos mapas se obtienen las aceleraciones espectrales de la máxima Amenaza Sísmica considerada con $T_r=2475$ años S_s y S_1 , para los periodos de 0.1 y 1.0 seg; respectivamente.

Se presentan a continuación los términos importantes para la construcción del espectro de diseño según la normativa ASCE 7-16.

2.13.1 Coeficientes de sitio

De acuerdo con ASCE7-16 (2016) p. 84, las aceleraciones de respuesta espectral S_s y S_1 de terremoto MCE, son ajustadas según los coeficientes de tipo de suelo, F_a para las aceleraciones de periodos cortos, y F_v para aceleraciones a 1 segundo.

$$S_{MS} = F_a S_s \quad \text{Ec. (9)}$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad \text{Ec. (10)}$$

Los coeficientes de sitio F_a y F_v se encuentran en las *Tabla 7* y *8*, respectivamente.

Tabla 7

Coeficiente de aceleraciones para periodos cortos F_a . (ASCE 7-16)

Tipo de Suelo	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1	1
E	2.4	1.7	1.3	Ver Sección 11.4.8	Ver Sección 11.4.8	Ver Sección 11.4.8
F	Ver Sección 11.4.8					

Nota: American Society of Civil Engineers (ASCE 7-16)

Tabla 8*Coefficiente de aceleraciones para periodos largos Fv. (ASCE 7-16)*

Tipo de Suelo	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2	2	1.9	1.8	1.7
E	4.2	Ver Sección 11.4.8				
F	Ver Sección 11.4.8					

Nota: American Society of Civil Engineers (ASCE 7-16)

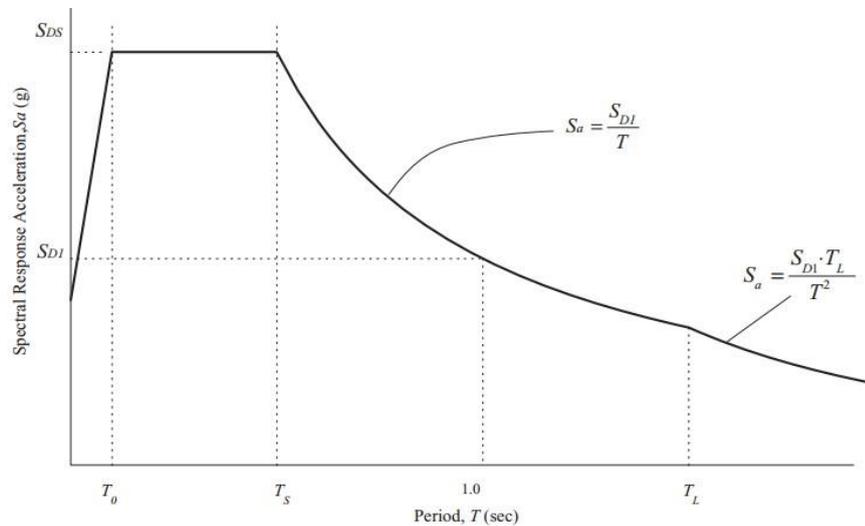
Los parámetros de aceleraciones para diseño sísmico de periodo corto, S_{DS} , y para el periodo de 1 segundo, S_{D1} , se determinan a partir de las ecuaciones 9 y 10, respectivamente.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad \text{Ec. (12)}$$

2.13.2 Espectro Elástico de Diseño de Respuesta según ASCE 7-16

Se presenta el espectro de diseño de aceleraciones en la figura 13, de acuerdo con la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles ASCE 7-16, que sigue un procedimiento para obtener estas aceleraciones de diseño, según el tipo de suelo o sitio del movimiento. La curva del espectro se desarrolla como se indica.

Figura 13*Espectro de diseño de aceleraciones según ASCE 7-16*

- Para períodos inferiores a T_0 la aceleración de respuesta espectral S_a , se determina por la siguiente ecuación:

$$S_a = S_{DS} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right) \quad \text{Ec. (13)}$$

- Para períodos mayores o iguales a T_0 y menores o iguales a T_s , la aceleración de la respuesta espectral de diseño S_a , será igual a S_{DS} .
- Para períodos mayores a T_s y menores o iguales a T_L , la aceleración de respuesta espectral de diseño S_a , se determina por la ecuación:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad \text{Ec. (14)}$$

- Para períodos superiores a T_L , S_a se determina por la siguiente ecuación:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad \text{Ec. (15)}$$

Dónde:

S_{DS} = es el parámetro de aceleración de respuesta espectral de diseño a periodo corto,

S_{D1} = el parámetro de aceleración de la respuesta espectral de diseño a 1seg. período

T = el período fundamental de la estructura, s

$T_0 = 0,2 (S_{D1} / S_{DS})$

$T_s = S_{D1} / S_{DS}$

T_L = período (s) de transición en período largo mostrado en las Figs. 22-14 hasta el 22-17 de la ASCE 7-16.

T_L = Período de transición en período largo mostrado en la figura 22-12 a figura 22-16 de la ASCE7-16, también se puede obtener en la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

2.13.3 Espectro Inelástico de Diseño según ASCE 7-16

La norma americana define el cortante basal como la reacción sísmica en la base V y se determina con la siguiente ecuación:

$$V = C_S * W \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde:

V: Cortante Basal de diseño

Cs: Coeficiente de respuesta sísmica

W: Peso sísmico efectivo

El coeficiente de respuesta sísmica Cs, se determina con la siguiente ecuación:

$$\text{Para: } T \leq T_S \quad C_S = \frac{S_{DS}}{\frac{R}{I}} = \frac{S_{DS} * I}{R} \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde:

S_{DS}: Parámetro de aceleración del espectro de respuesta de diseño

I: Factor de importancia

R: Factor de modificación de respuesta de aceleración

El coeficiente sísmico no necesita exceder:

$$\text{Para: } T_S \leq T_L \quad C_S = \frac{S_{D1}}{T * \left(\frac{R}{I}\right)} \quad \text{Ec. (18)}$$

$$\text{Para: } T > T_L \quad C_S = \frac{S_{D1} * T_L}{T^2 * \left(\frac{R}{I}\right)} \quad \text{Ec. (19)}$$

Cs, no debe ser menor que:

$$C_S = 0.044 * S_{DS} * I \geq 0.01 \quad \text{Ec. (20)}$$

UNIDAD III

3. Análisis Comparativo del Espectro de Diseño propuestos por las normas ASCE 7-16 y NEC-15 con los Espectros de Respuesta del sismo de Pedernales del 16 de abril del 2016 obtenidos para las estaciones de la RENAC del IG-EPN

3.1 Red Nacional de Acelerógrafos RENAC

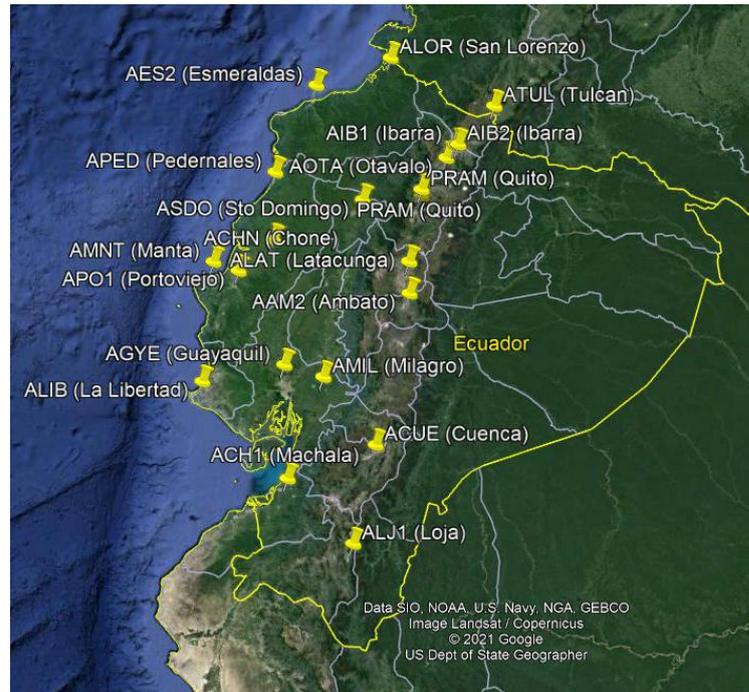
EL Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, IG-EPN (2020) indica que los acelerógrafos permiten obtener gráficos denominados “acelerogramas”, los cuales muestran la variación de aceleraciones de un lugar específico debido a que poseen tres sensores ortogonales, registrando así los movimientos del suelo en la componente norte-sur, este-oeste y vertical. En la tabla 9, se presentan las estaciones, ciudad y ubicación, además de las aceleraciones máximas en suelo PGA que se registraron en los acelerógrafos en el sismo de Pedernales el 16 de abril del 2016.

Tabla 9
Datos de Estaciones de la RENAC

RED	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)	R _{epi} (km)*	PGA E (m/s ²)	PGA N (m/s ²)	PGA Z (m/s ²)
	AAM2	-1,269	-78,611	2664	235	0,2545	0,3476	0,1465
	ACH1	-3,287	-79,910	13	407	0,2501	0,2365	0,0805
	ACHN	-0,698	-80,084	18	120	3,2349	3,6266	1,7287
	ACUE	-2,910	-78,959	2578	381	0,3492	0,2911	0,1748
	AES2	0,991	-79,646	4	76	1,5120	1,0831	0,4314
	AGYE	-2,054	-79,952	30	270	0,1832	0,2304	0,1462
	AIB1	0,347	-78,125	2208	202	0,4839	0,5682	0,1223
	AIB2	0,349	-78,106	2298	204	0,2080	0,3246	0,0839
RENAC	ALAT	-0,926	-78,618	2777	206	0,3104	0,2738	0,1191
	ALIB	-2,243	-80,846	40	308	0,4113	0,3895	0,2066
	ALJ1	-3,987	-79,197	2147	492	0,1519	0,1600	0,0878
	ALOR	1,293	-78,847	22	159	0,2564	0,2623	0,1512
	AMIL	-2,181	-79,529	20	288	0,5103	0,4504	0,1836
	AMNT	-0,941	-80,735	38	171	3,9720	5,1421	1,6213
	AOTA	0,240	-78,256	2529	188	0,4203	0,3441	0,1822
	APED	0,068	-80,057	15	36	13,8049	8,127	7,2738
	APO1	-1,038	-80,460	47	167	3,1150	3,7303	1,0184
	ASDO	-0,263	-79,124	615	115	2,0223	1,0884	0,4988
	ATUL	0,772	-77,723	3097	251	0,1598	0,2065	0,0664
	EPNL	-0,212	-78,492	2813	174	0,2632	0,1987	0,1307
	PRAM	-0,145	-78,495	2840	171	0,2458	0,2290	0,1318

Figura 14

Distribución de la Red Nacional de Acelerógrafos



Nota: Google Earth

3.2 Espectro Elástico de aceleración horizontal de diseño NEC-SE-DS 15

Los parámetros para realizar el espectro se especifican en la sección 2.12 NEC-15.

Los factores para elaborar el espectro de diseño elástico S_a , se detallan en la tabla 10.

Para demostración se escoge la ciudad de Ambato con el tipo de suelo C.

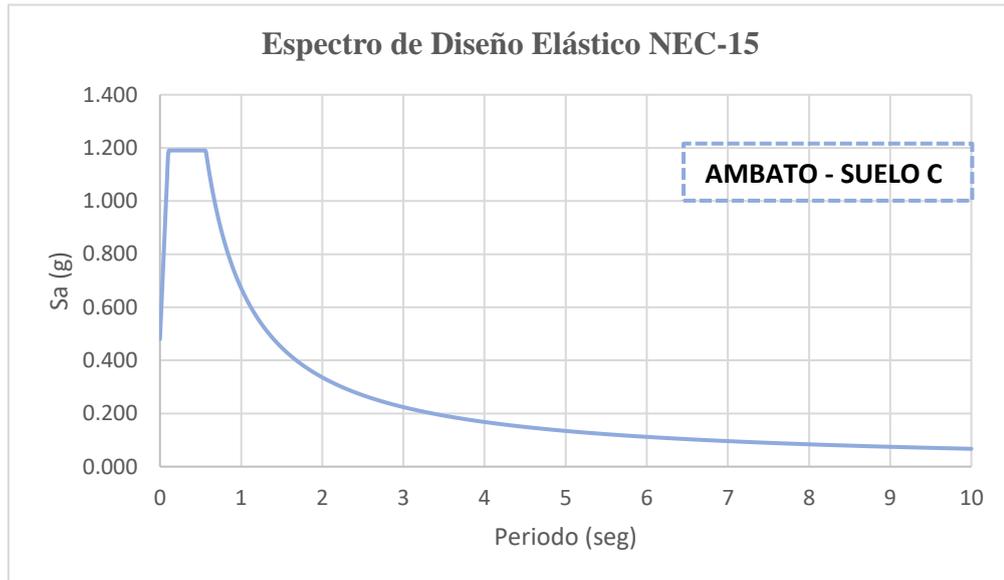
Tabla 10

Parámetros para representación del espectro de diseño elástico NEC-15

ESPECIFICACION DE SUELO	
Tipo de Suelo	C
Factor Z	0.4
Fa	1.20
Fd	1.11
Fs	1.11
r	1.00
n	2.48
Periodos	
To	0.10
Tc	0.56

Figura 15

Espectro de diseño elástico según NEC-15 para Ambato - Suelo "C"



3.3 Espectro Elástico de aceleración horizontal de diseño ASCE 7-16

Los parámetros para realizar el espectro se especifican en la sección 2.13 ASCE7-16.

La norma americana ASCE 7-16, no considera regiones de otros países distintos a USA y Puerto Rico para la representación de los espectros de diseño, por lo tanto, se homologan los valores de S_s y S_1 que se obtienen mediante los mapas de ASCE 7-16. Para esta demostración se escoge la ciudad de Ambato. El sitio homologado con un procedimiento matemático es la ciudad de San Francisco – California. Los factores para elaborar el espectro de diseño del tipo de suelo C, se presentan a continuación:

- $F_a = 1.20$ (Tabla 7)
- $F_v = 1.40$ (Tabla 8)
- $S_s = 1.50$ (valor homologado con NEC-15)
- $S_1 = 0.60$ (valor homologado con NEC-15)

De la ecuación Ec. 11.4-1 (ASCE 7-16)

$$S_{MS} = F_a * S_s = (1.20) * (1.50) = 1.80$$

De la ecuación Ec. 11.4-2 (ASCE 7-16)

$$S_{M1} = F_v * S_1 = (1.40) * (0.60) = 0.84$$

$$S_{DS} = 2/3 * S_{MS} = 2/3 * (1.80) = 1.20$$

$$S_{D1} = 2/3 * SM1 = 2/3 * (0.84) = 0.51$$

Ejemplo de homologación ciudad San Francisco - USA y Ambato – Ecuador.

$$S_s = \frac{3}{2} * \frac{SDS}{Fa_{ASCE}} = \frac{3}{2} * \frac{1.20}{1.20} = \mathbf{1.50}$$

$$S_s = \frac{3}{2} * \frac{n z Fa_{NEC}}{Fa_{ASCE}} = \frac{3}{2} * \frac{2.48 * 0.4 * 1.20}{1.20} = \mathbf{1.49}$$

Con la homologación se obtienen resultados similares de aceleración en los espectros de diseño elásticos de la ciudad San Francisco en Estados Unidos y Ambato en Ecuador, con variación del 0,7%.

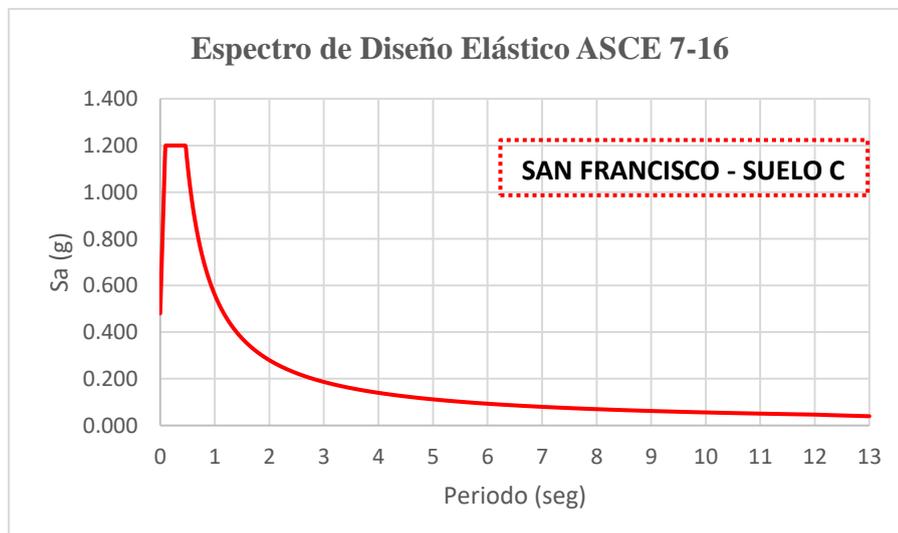
Tabla 11

Factores del espectro de diseño de suelo tipo C, para una zona sísmica alta.

ESPECIFICACIONES DE SUELO	
Tipo de Suelo	C
Ss	1.50
S1	0.60
Fa	1.20
Fv	1.40
T_L	12
S_{MS}	1.80
S_{M1}	0.84
S_{DS}	1.20
S_{D1}	0.56
T_0	0.09
T_S	0.47

Figura 16

Espectro de diseño elástico según ASCE 7-16 ciudad de San Francisco - Suelo "C"



3.4 Espectro Inelástico de aceleración horizontal de diseño NEC-SE-DS 15

Para obtener las gráficas de los espectros de diseño inelásticos, con los parámetros de la tabla 12, se adopta una estructura de ocupación o importancia normal y sin ninguna irregularidad en planta o elevación que afecten a la estructura. Con dichas consideraciones se elaboran los espectros inelásticos para los siguientes factores de reducción de fuerzas sísmicas:

R=3: Hormigón Armado con secciones menor a las especificadas en NEC, limitada a viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 metros.

R=5: Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas bandas.

R=8: Pórticos especiales sismo resistentes de hormigón armado con vigas descolgada.

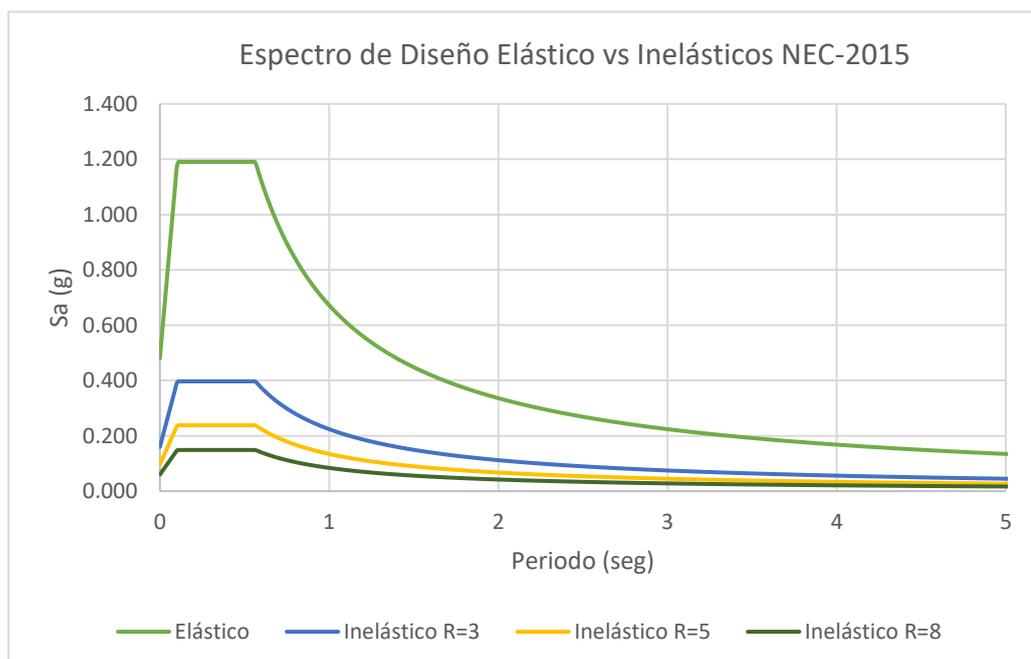
Tabla 12

Parámetros para reducción de fuerza sísmica - Espectro Inelástico NEC-15

PARÁMETROS DE Cs	
Sa	1.190
I	1
ϕ_P	1
ϕ_E	1
Factor de Reducción R	
R	3
R	5
R	8

Figura 17

Espectro de Diseño Elástico vs Inelásticos NEC-2015



3.5 Análisis de Espectros de Respuesta del sismo del 16 de abril

ViewWave es un programa de uso libre y sin costo, que se utiliza como una herramienta académica, y también lo usan profesionales e investigadores con la finalidad de analizar eventos de movimientos fuertes, sean estos eventos sísmicos u otros movimientos. Es apropiado para la visualización e interpretación de señales de ondas sísmicas, se estudian acelerogramas hasta obtener como resultado los espectros de respuesta a partir de los datos de un sismo ocurrido.

En los Anexos se encuentran las siguientes gráficas de registro de aceleraciones:

- Acelerogramas (a). Representando las variaciones de la aceleración del suelo en cada estación registrada en la RENAC.
- Espectros de respuesta (b). Representando las variaciones de las aceleraciones en las estructuras.
- Órbita de la partícula (c). En base a los registros de aceleración de cada estación de la RENAC, se obtiene un gráfico que muestra las trayectorias de las aceleraciones del suelo en las dos componentes horizontales N-S y E-W durante terremoto del 16-abril del 2016.

Los resultados de los espectros de respuesta que fueron obtenidos mediante el programa ViewWave y exportados a Excel para representar los espectros de respuesta de aceleración en sus dos componentes de desplazamiento N-S y E-W, y los espectros de diseño elásticos de cada ciudad, con suelo tipo C y D según la NEC-SE-DS, homologados con los espectro de diseño elásticos de ASCE 7-16. Las unidades se ajustaron en % de aceleraciones de la gravedad (g) en las ordenadas, y (*seg*) para los periodos de las abscisas.

Figura 18

Espectros de Respuesta de la Estación de Ambato AAM2, y Espectros de Diseños Elásticos

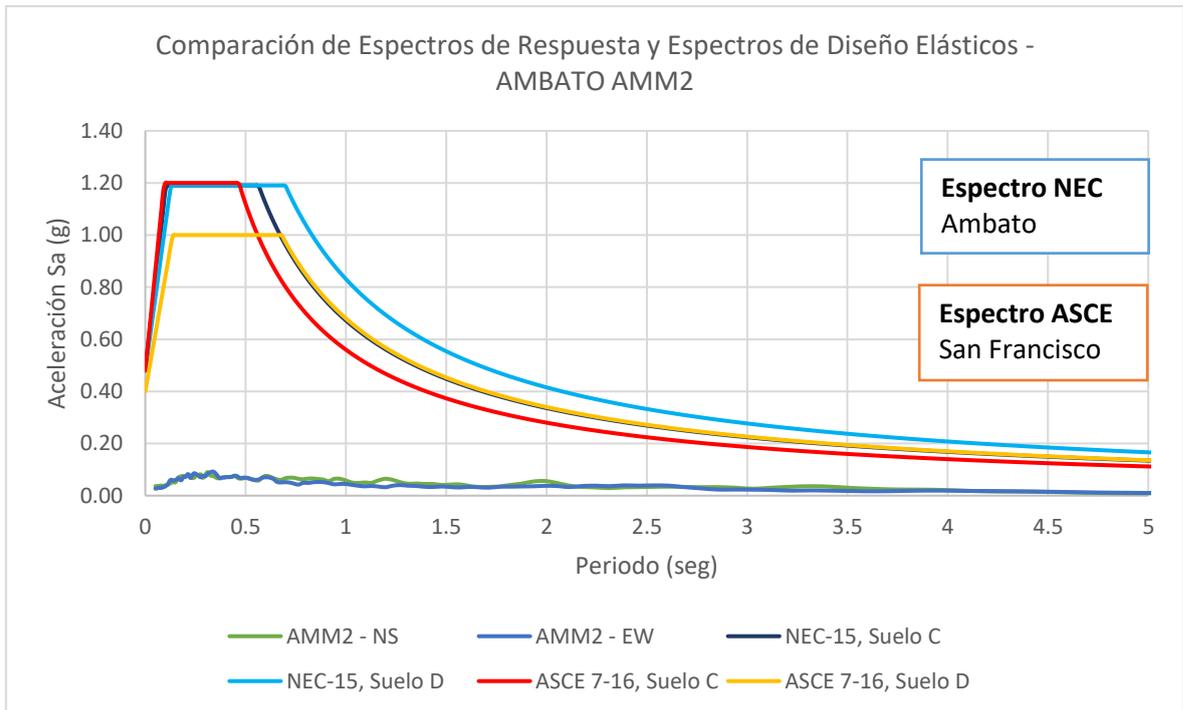


Figura 19

Espectros de Respuesta de la Estación de Chone ACHN, y Espectros de Diseños Elásticos

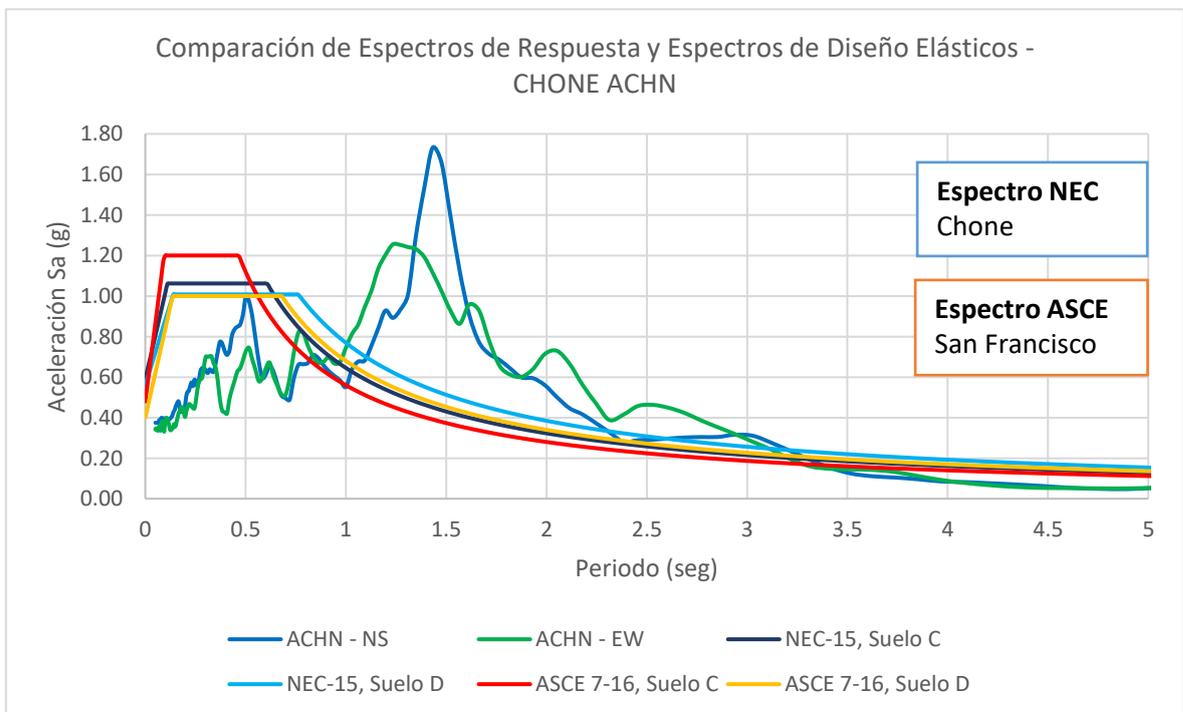


Figura 20

Espectros de Respuesta de la Estación de Cuenca ACUE, y Espectros de Diseños Elásticos

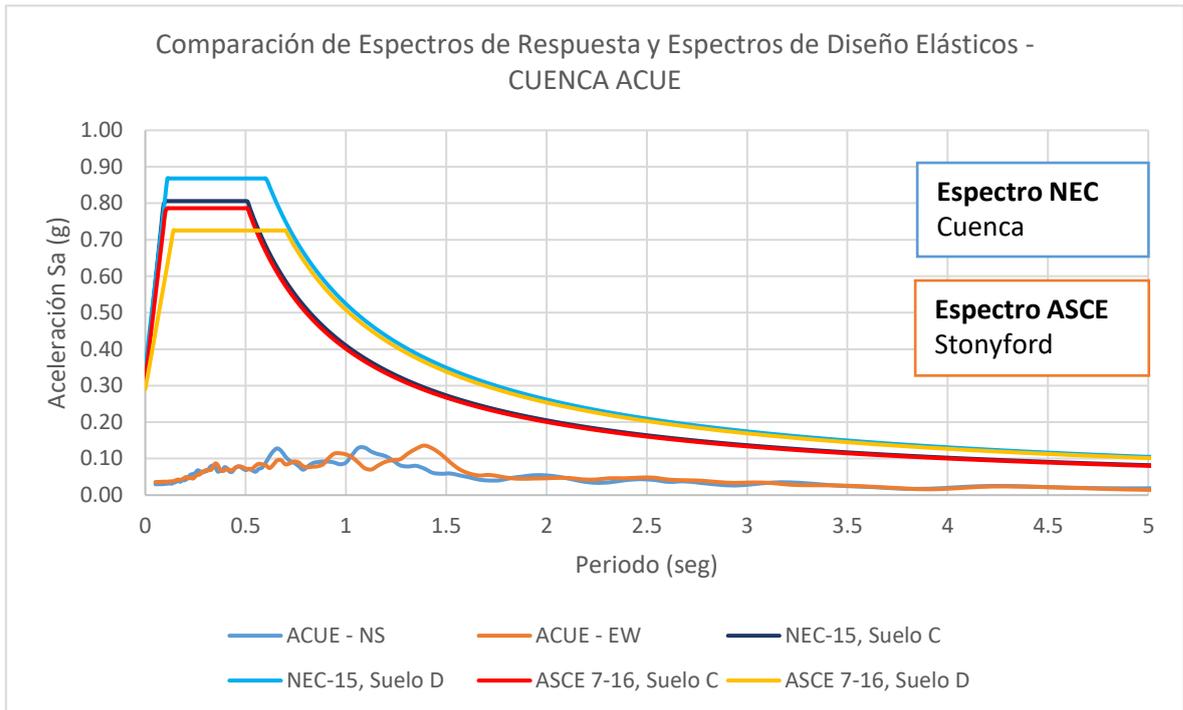


Figura 21

Espectros de Respuesta de la Estación de Esmeraldas AES2, y Espectros de Diseños Elásticos

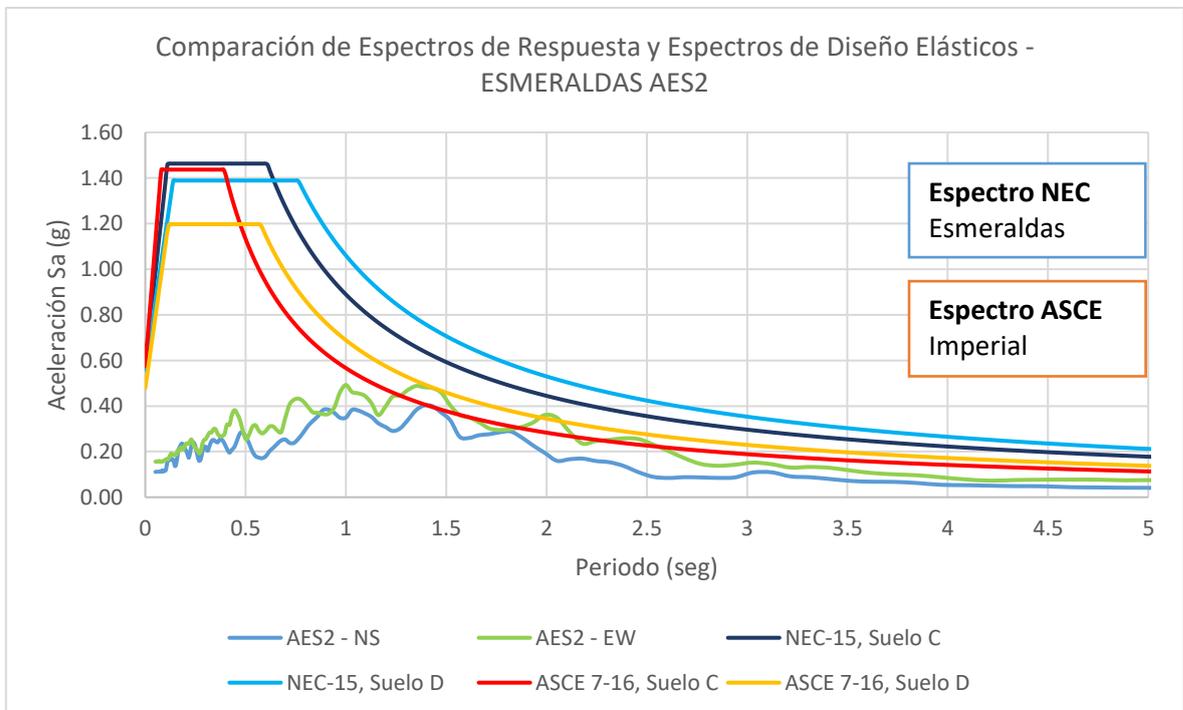


Figura 22

Espectro de Respuesta de la Estación de Guayaquil (Pascuales) AGYE, y Espectros de Diseños Elásticos

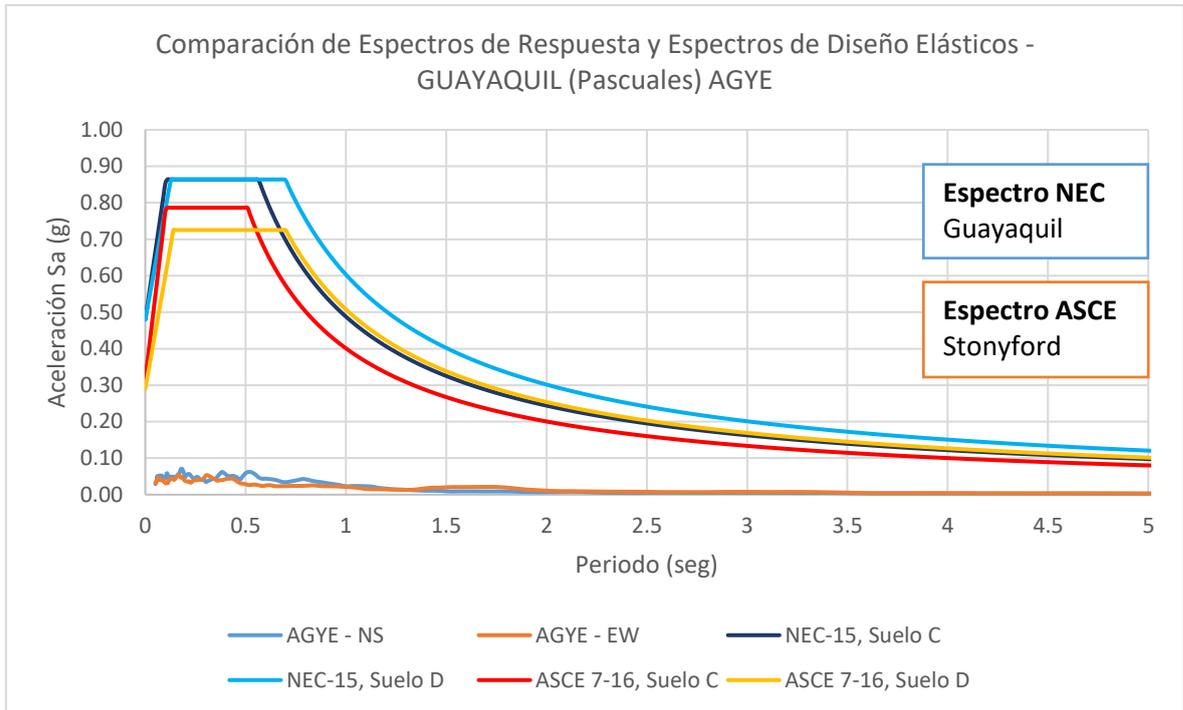


Figura 23

Espectros de Respuesta de la Estación de Ibarra AIB1, y Espectros de Diseños Elásticos

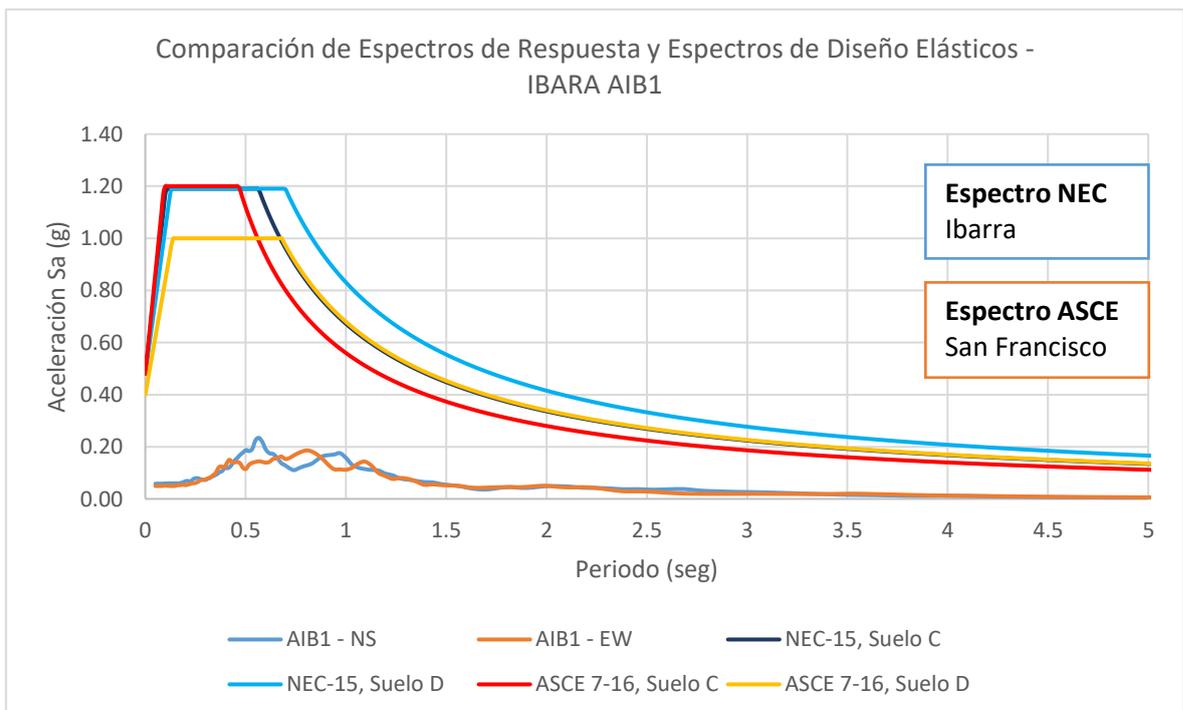


Figura 24

Espectros de Respuesta de la Estación de Ibarra AIB2, y Espectros de Diseños Elásticos

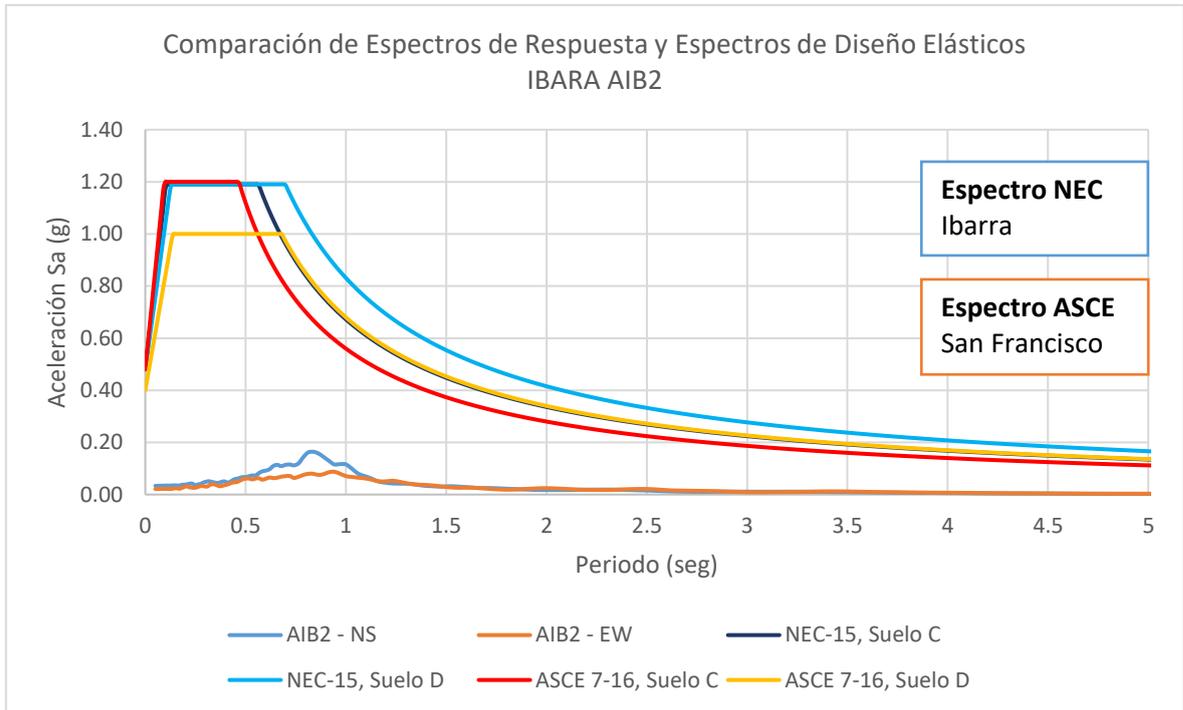


Figura 25

Espectros de Respuesta de la Estación de La Libertad ALIB, y Espectros de Diseños Elásticos

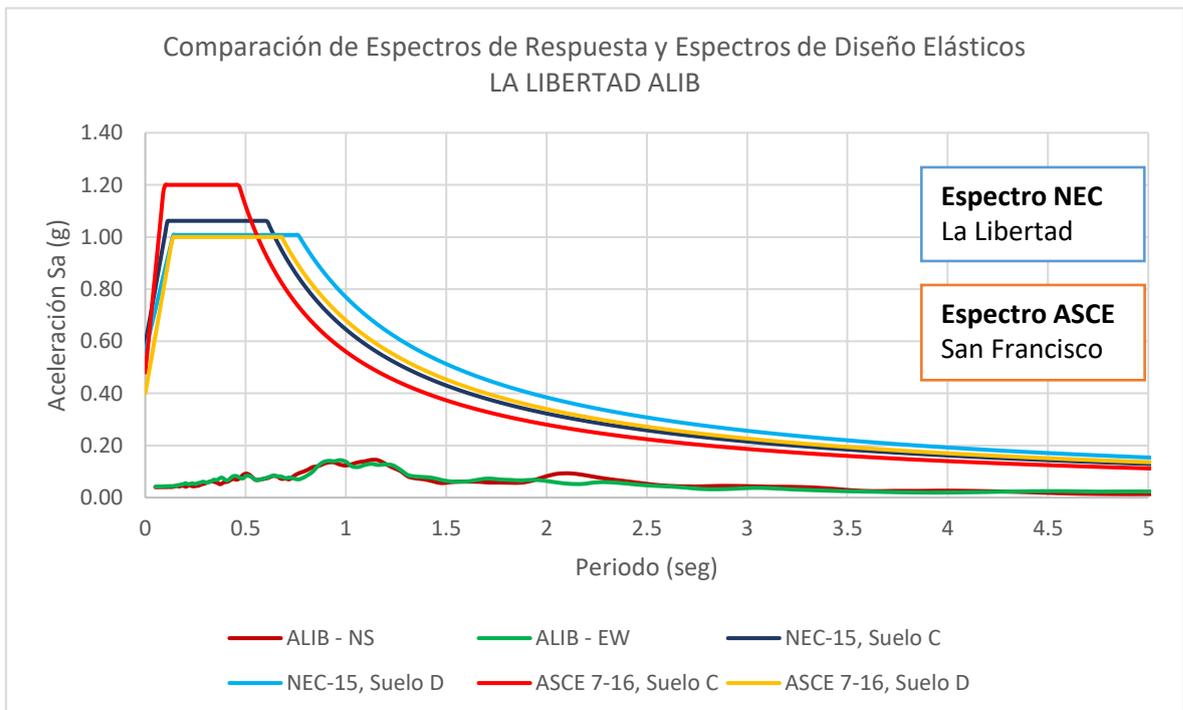


Figura 26

Espectros de Respuesta de la Estación de Latacunga ALAT, y Espectros de Diseños Elásticos

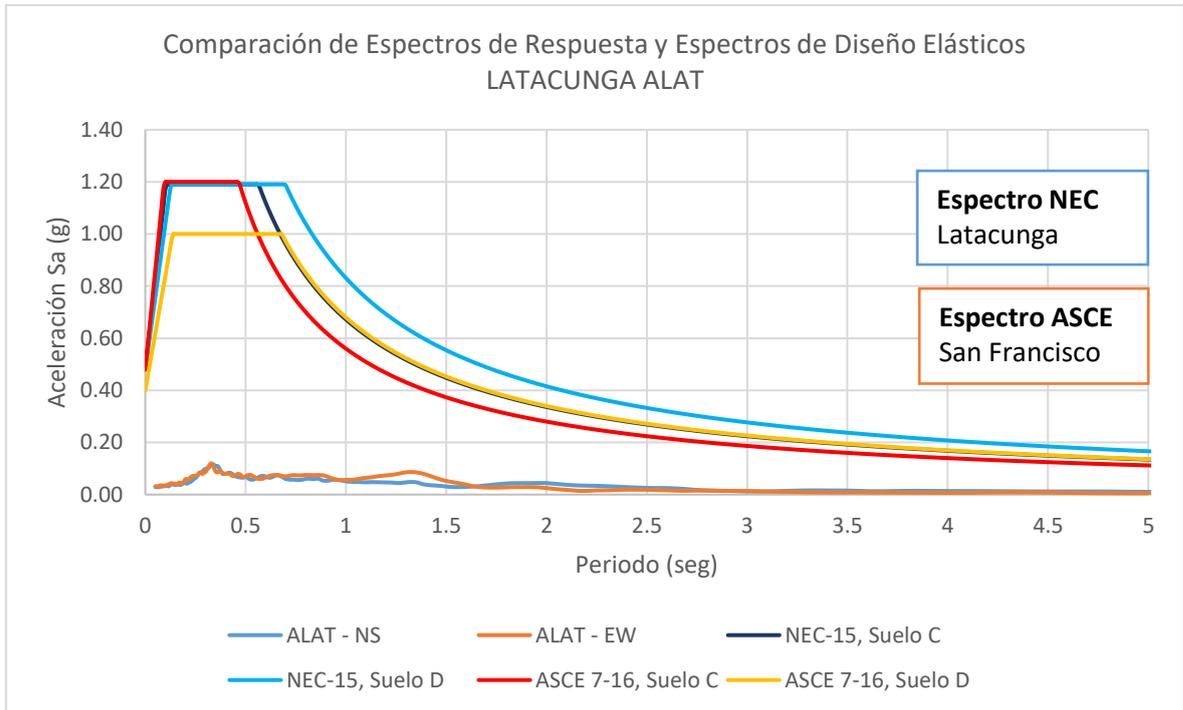


Figura 27

Espectros de Respuesta de la Estación de Loja ALJ1, y Espectros de Diseños Elásticos

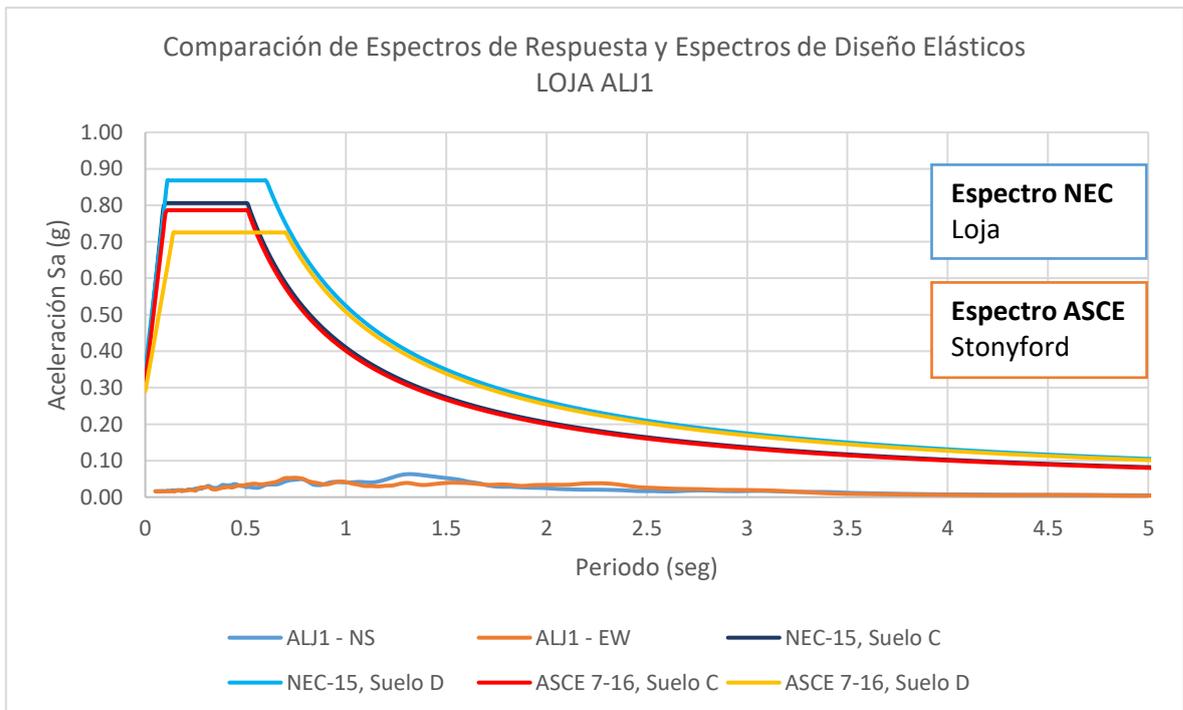


Figura 28

Espectros de Respuesta de la Estación de Machala ACH1, y Espectros de Diseños Elásticos

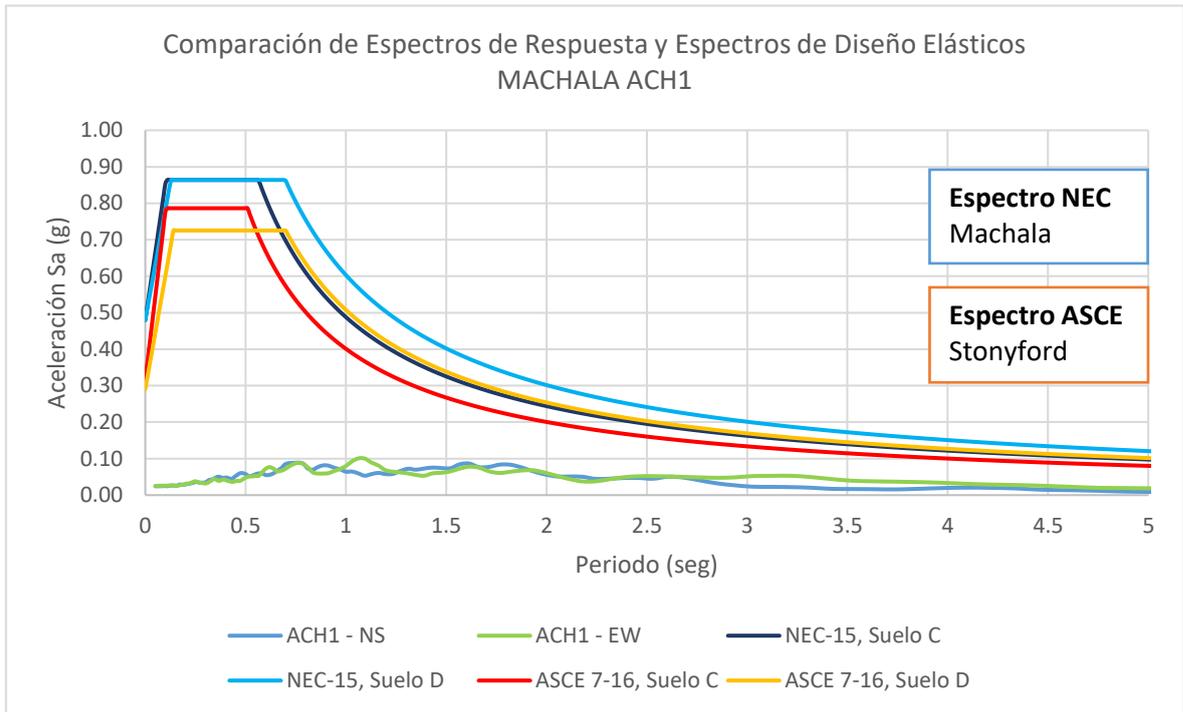


Figura 29

Espectros de Respuesta de la Estación de Manta AMNT, y Espectros de Diseños Elásticos

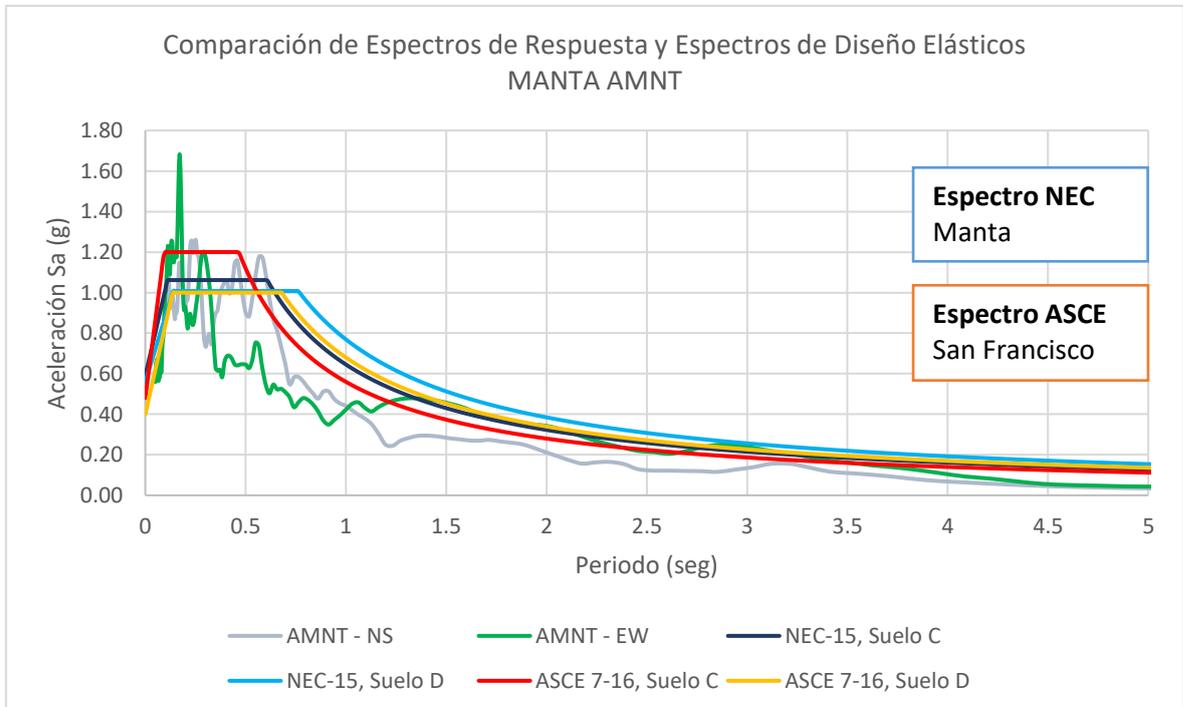


Figura 30

Espectros de Respuesta de la Estación de Milagro AMIL, y Espectros de Diseños Elásticos

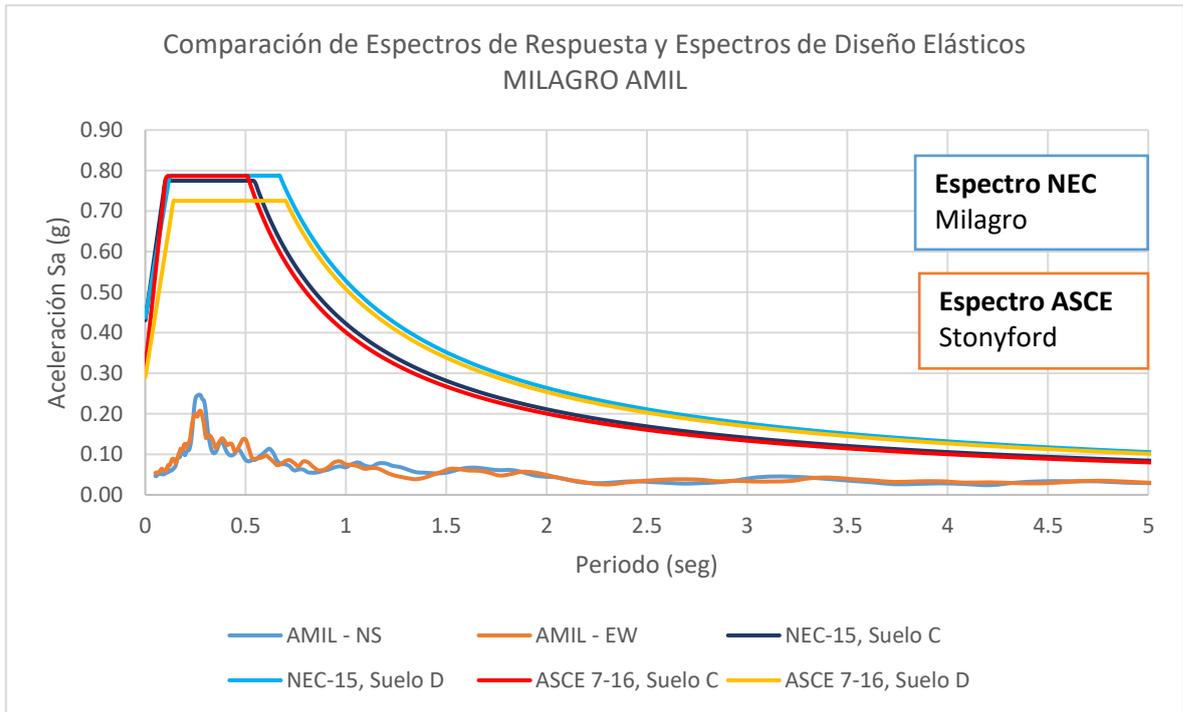


Figura 31

Espectros de Respuesta de la Estación de Otavalo AOTA, y Espectros de Diseños Elásticos

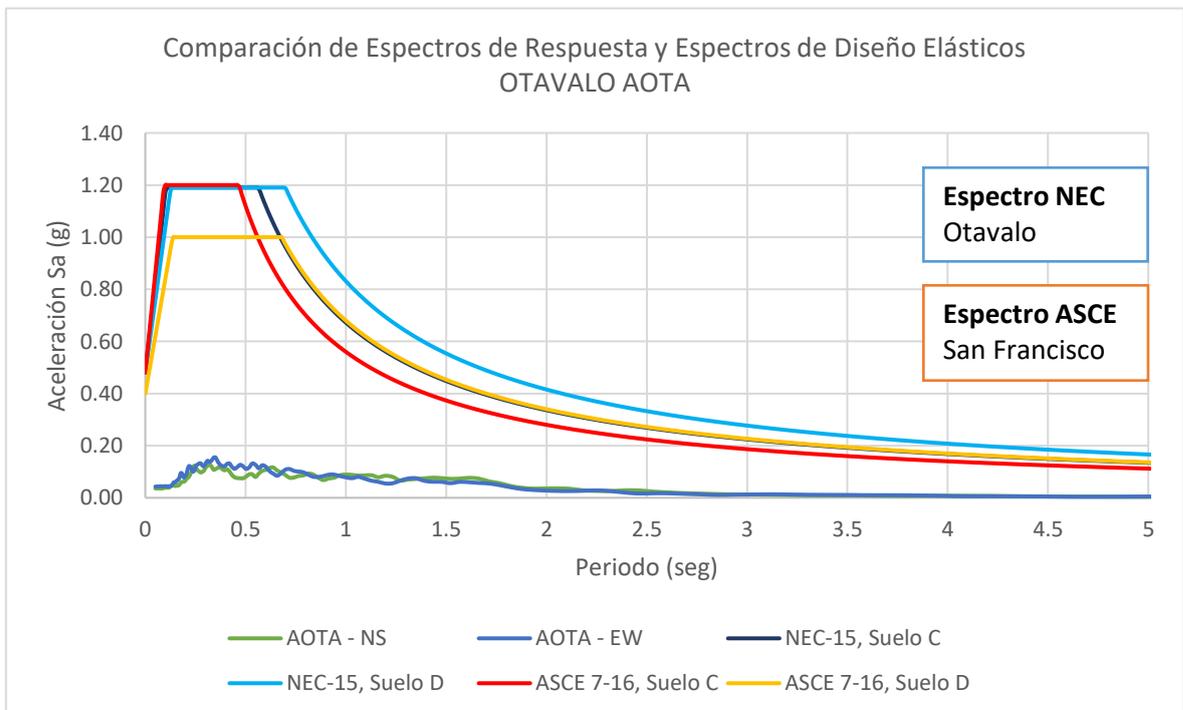


Figura 32

Espectros de Respuesta de la Estación de Pedernales APED, y Espectros de Diseños Elásticos

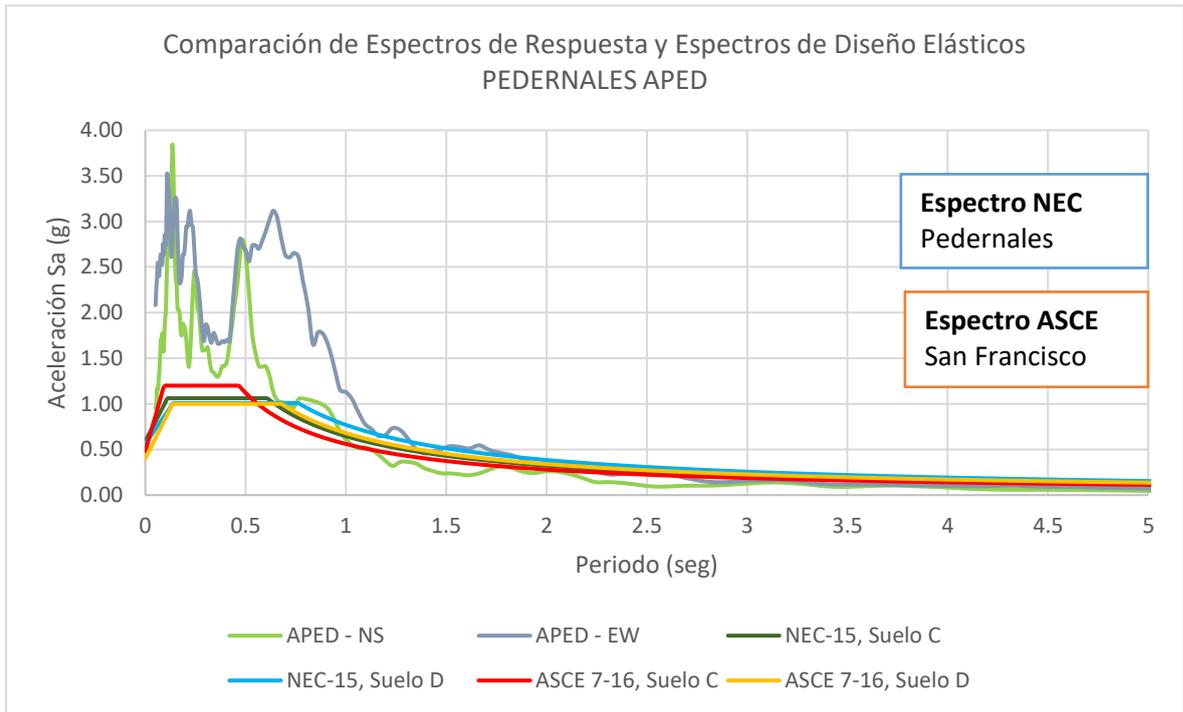


Figura 33

Espectros de Respuesta de la Estación de Portoviejo APO1, y Espectros de Diseños Elásticos

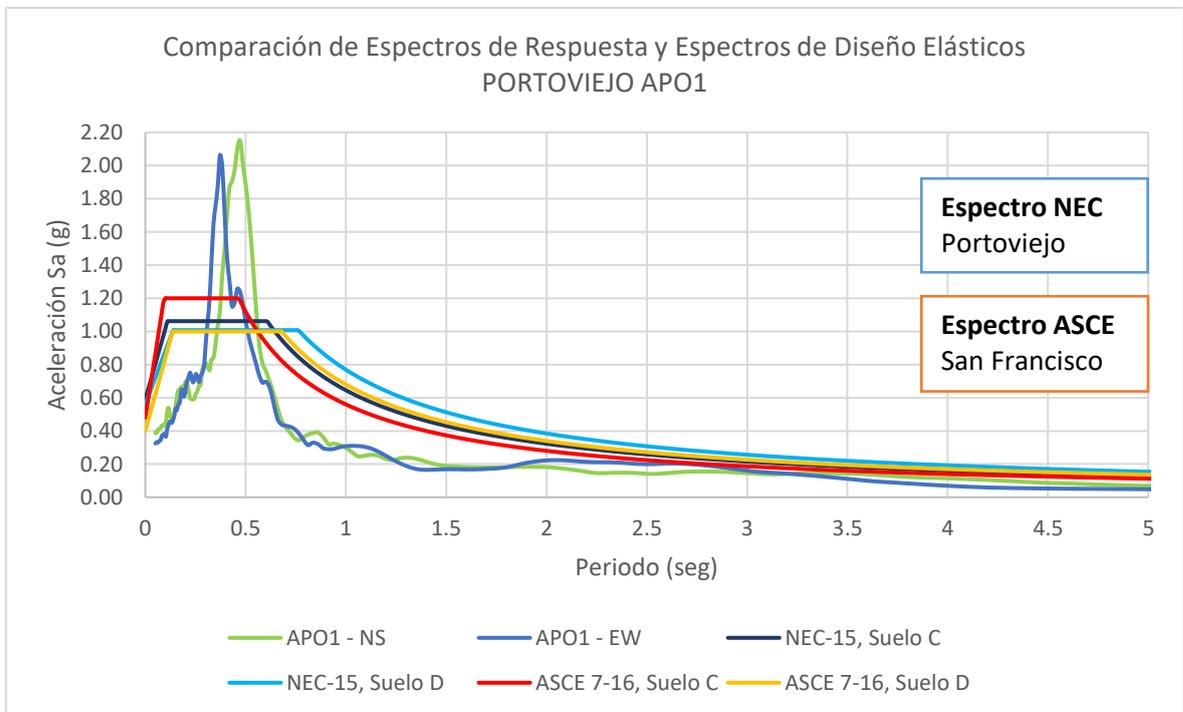


Figura 34

Espectros de Respuesta de la Estación de Quito EPNL, y Espectros de Diseños Elásticos

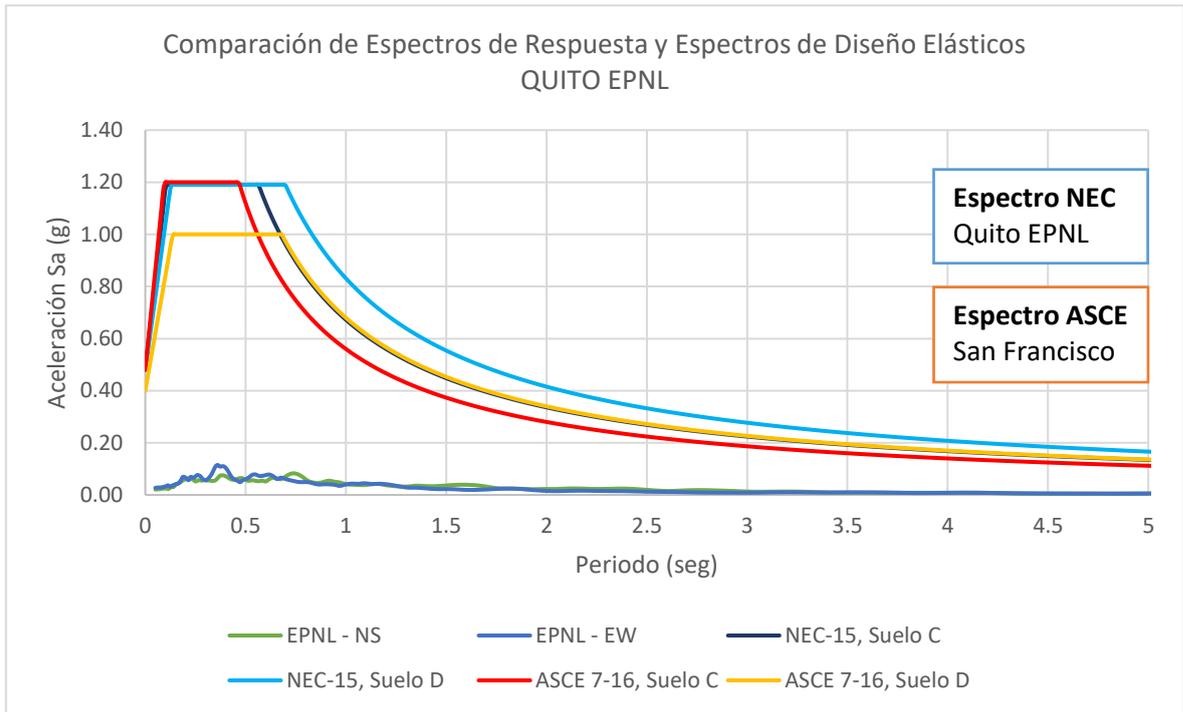


Figura 35

Espectros de Respuesta de la Estación de Quito (La Carolina) PRAM, y Espectros de Diseños Elásticos

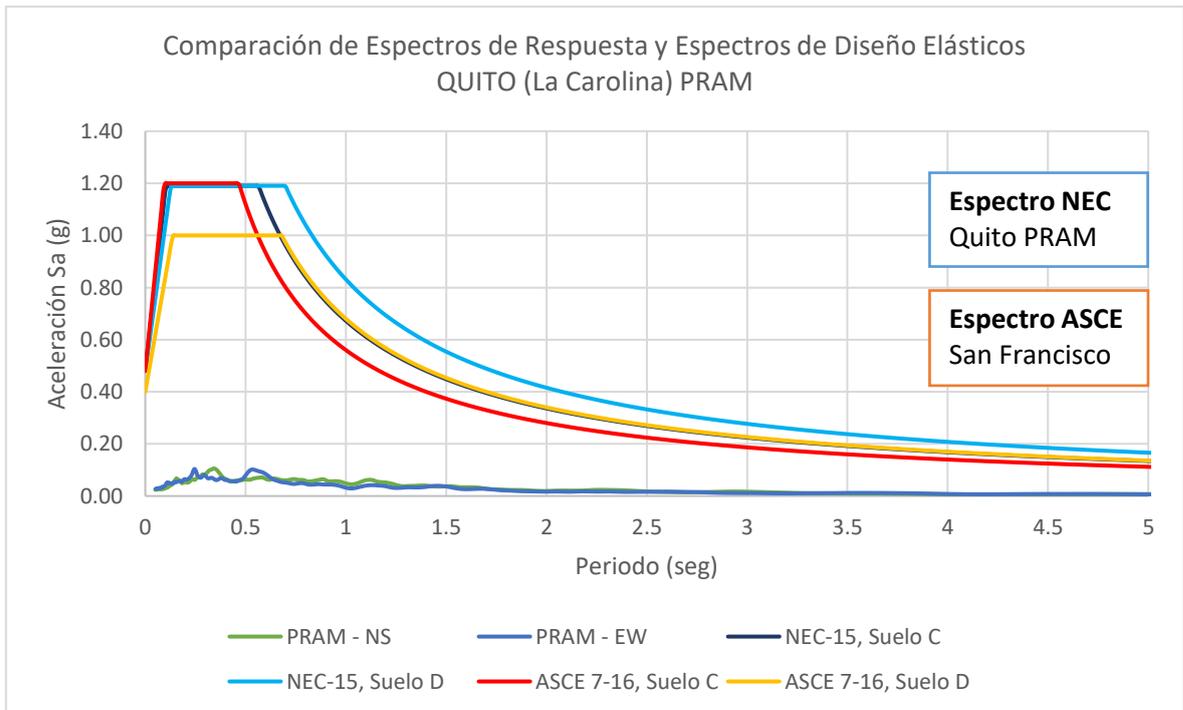


Figura 36

Espectros de Respuesta de la Estación de San Lorenzo ALOR, y Espectros de Diseños Elásticos

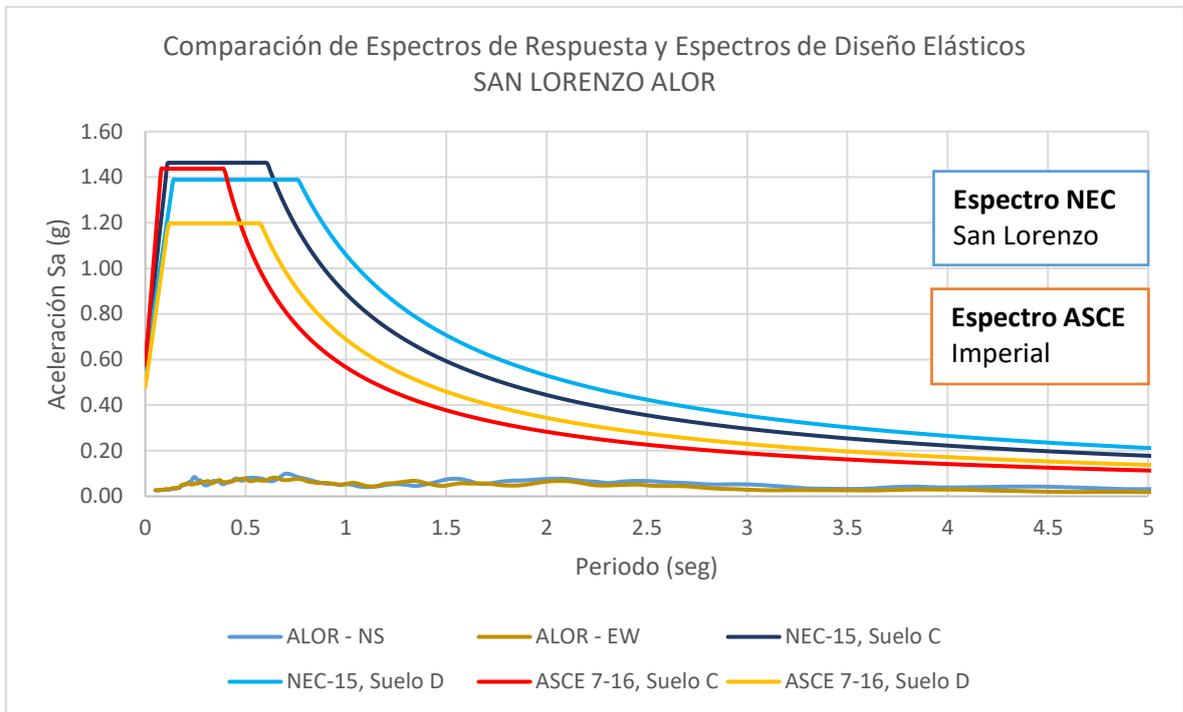


Figura 37

Espectros de Respuesta de la Estación de Santo Domingo ASDO, y Espectros de Diseños Elásticos

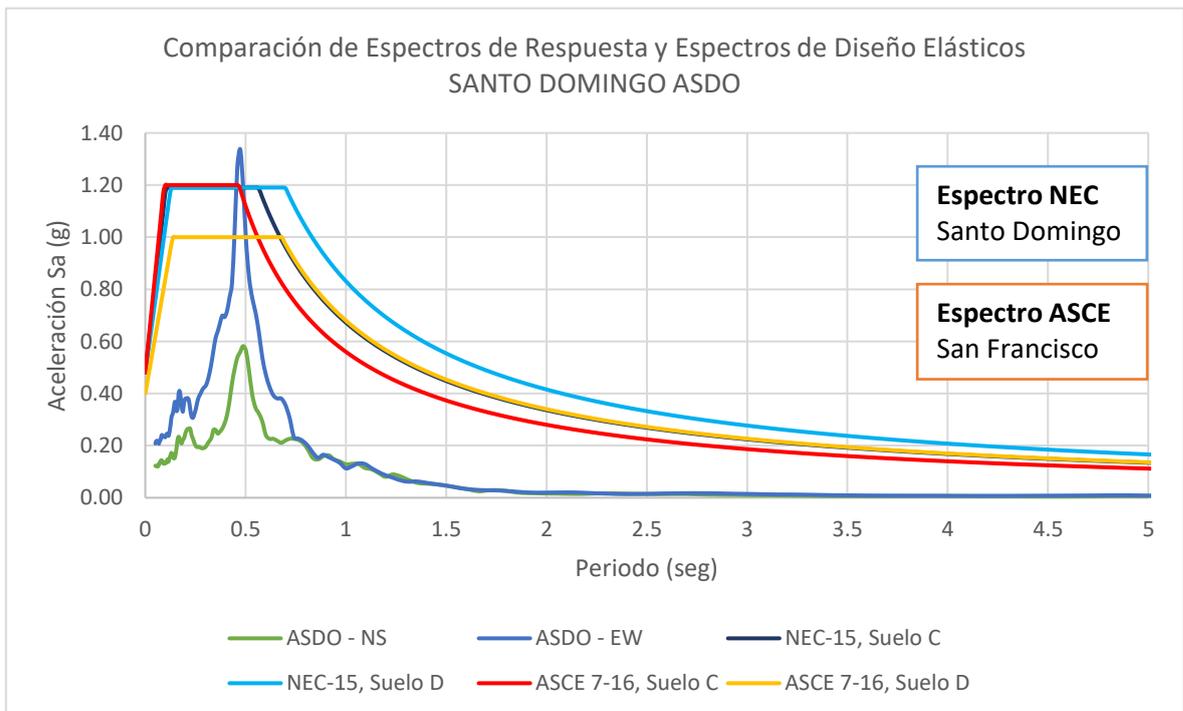
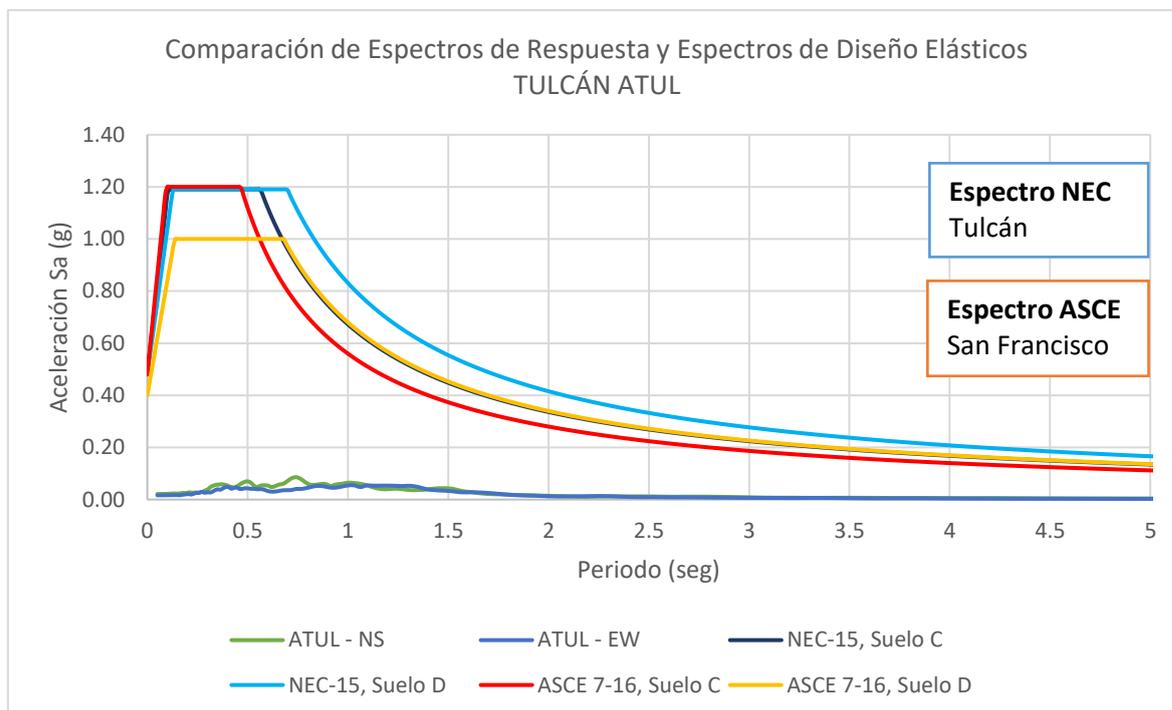


Figura 38

Espectros de Respuesta de la Estación de Tulcán ATUL, y Espectros de Diseños Elásticos



3.6 Resultados Obtenidos

A continuación se describen los resultados obtenidos de la comparación de los espectros de diseño con tipo de suelo C y D para las Normas NEC-15 y ASCE 7-16; y los espectros de respuesta del sismo de Pedernales del 16 Abril-2016, que se obtuvieron mediante el programa de visualización de ondas ViewWave con los datos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IG-EPN.

Comparación de Espectros de Diseño Elástico de NEC-15 y ASCE 7-16, con registro de aceleraciones en ciudades de la Región Costa Norte.

Según los resultados mostrados en la tabla 13, las siguientes ciudades de la región Costa; Chone, Manta, Pedernales y Portoviejo, situadas en una zona sísmica muy alta donde $PGA = 0.5g$, se homologa con la ciudad de San Francisco de California. Las aceleraciones para el tipo de suelo C, para el rango de periodos desde 0.11seg hasta los 0.61seg tienen valores máximos de 1.06g y 1.20g para las normas NEC-15 y ASCE 7-16 respectivamente. Las aceleraciones máximas que se muestran en el tipo de suelo D, para el rango de periodos desde 0.14seg hasta 0.76seg, resultaron en 1.01g y 1.0g en NEC-15 y ASCE 7-16 respectivamente.

Las respuestas máximas de aceleraciones del sismo que se registraron en estas ciudades, superaron las aceleraciones de los espectros de diseño elásticos según la norma NEC, teniendo resultados elevados en Chone, Manta, Pedernales y Portoviejo (Provincia de Manabi), con aceleraciones de 1.73g, 1.68g, 3.84g y 2.15g respectivamente.

Se obtiene también los espectros de diseño elásticos de las ciudades de Esmeraldas y San Lorenzo, donde se manifiestan aceleraciones mayores en comparación a otras ciudades de la Región Costa, que resultan 1.46g y 1.39g en suelo de tipo C y D respectivamente; según NEC-15. Estas aceleraciones se homologan con la ciudad de Imperial en California de Estados Unidos (con procedimiento ASCE 7-16), donde se obtienen resultados de 1.44g y 1.20g en los suelos C y D respectivamente.

En los Espectros de Respuestas se obtuvieron aceleraciones en la ciudad de Esmeraldas igual a 0.49g en la componente E-W, y en San Lorenzo de 0.10g en la componente N-S, que representan valores inferiores en comparación con los espectros de diseño elásticos, aunque las aceleraciones de Esmeraldas son respuestas altas comparadas con los espectros inelásticos.

Comparación de Espectros de Diseño Elástico de NEC-15 y ASCE 7-16, con registro de aceleraciones en ciudades de la Región Sierra Norte.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 13, las ciudades de la región Sierra; Ambato, Ibarra, Latacunga, Otavalo, Quito, Santo Domingo y Tulcán, situadas en una zona sísmica alta con $PGA = 0.4g$, se encuentran relacionada con la amenaza sísmica de la ciudad de San Francisco de California en Estados Unidos, obteniéndose aproximadamente las mismas aceleraciones de los espectros de diseño elástico de la Norma Ecuatoriana en los espectros de diseño de la Normas Americana.

Los Espectros de Respuesta de estas ciudades antes mencionadas en comparación con los Espectros de Diseño Elásticos de la Norma Ecuatoriana NEC, representan aceleraciones bajas en su mayoría, excepto la ciudad de Santo Domingo que registró aceleraciones de 0.58g en su componente N-S y una aceleración de 1.34g en la componente E-W, superando las aceleraciones de los espectros de diseño elásticos de NEC-15.

Comparación de Espectros de Diseño Elásticos de NEC-15 y ASCE 7-16, con registro de aceleraciones en ciudades del Sur de la Costa y Sierra.

Las ciudades de Cuenca y Loja localizadas a una zona sísmica moderada con $Z = 0.25g$, representan aceleraciones en los espectros de diseño elásticos de NEC en suelo tipo C y D de $0.81g$ y $0.87g$ respectivamente. Mientras que la norma Americana muestra aceleraciones igual a $0.79g$ y $0.73g$ equivalente a los suelos C y D, homologado con la ciudad de Stonyford de California. En estas ciudades se registraron aceleraciones bajas en los espectros de respuestas. Se obtuvieron resultados de $0,14g$ en Cuenca y $0.06g$ en Loja.

Para las ciudades de Guayaquil y Machala que se ubican en una zona sísmica alta con $Z = 0.4g$, los espectros de diseño elásticos de NEC muestran aceleraciones de $0.86g$ en los suelo tipo C y D. Además para dichas ciudades se registraron aceleraciones en los espectros respuestas de $0.07g$ y $0.1g$ respectivamente. Las aceleraciones del sismo en estos sitios se consideran bajas en comparación con los espectros de diseño elásticos de la norma ecuatoriana de construcción NEC-15.

Análisis de Espectros de Diseño Inelásticos de NEC-15 y ASCE 7-16, con Espectros de Respuesta.

Se muestran los resultados de los espectros inelásticos de ambas normativas en la tabla 14, donde se observa que las ciudades que no cumplen con las aceleraciones de los espectros de diseño inelásticos, son aquellas que se encuentran en la región Costa Norte, que registraron las mayores aceleraciones de respuesta durante el sismo, las ciudades de Chone, Esmeraldas, Manta, Pedernales, Portoviejo y Santo Domingo, obtuvieron aceleraciones en los espectros de respuesta superiores a los espectros de diseño inelásticos según la NEC-15.

En otras ciudades de la región Costa Sur y Sierra, los espectros de diseño inelásticos de NEC, con factores de reducción de fuerza sísmica $R=3$ y $R=5$, se superan las aceleraciones de los espectros de respuesta en estas ciudades. Mientras que para las aceleraciones que con la norma ecuatoriana se calculan para un factor de reducción $R=8$, son bajas en comparación con las respuestas de un Sismo Frecuente o Sismo de Servicio.

Tabla 13

Comparación de Espectros de Diseño Elásticos, Suelo C y D de normas NEC-15, ASCE 7-16 y Espectros de Respuesta del sismo de Pedernales del 16 A-2016

RED	ECUADOR	CALIFORNIA	ESPECTROS DE DISEÑO ELÁSTICOS Sa (g)				ESPECTRO DE RESPUESTA Sa (g)		
			NEC-15		ASCE 7-16		Sismo 16 A-2016		
	Estación	Ciudades	Suelo C	Suelo D	Suelo C	Suelo D	N-S	E-W	
RENAC	AMM2	Ambato	San Francisco	1.19	1.19	1.20	1.00	0.090	0.092
	ACHN	Chone	San Francisco	1.06	1.01	1.20	1.00	1.73	1.25
	ACUE	Cuenca	Stonyford	0.81	0.87	0.79	0.73	0.13	0.14
	AES2	Esmeraldas	Imperial	1.46	1.39	1.44	1.20	0.40	0.49
	AGYE	Guayaquil	Stonyford	0.86	0.86	0.79	0.73	0.07	0.05
	AIB1	Ibarra	San Francisco	1.19	1.19	1.20	1.00	0.23	0.19
	AIB2	Ibarra	San Francisco	1.19	1.19	1.20	1.00	0.16	0.09
	ALIB	La Libertad	San Francisco	1.06	1.01	1.20	1.00	0.145	0.144
	ALAT	Latacunga	San Francisco	1.19	1.19	1.20	1.00	0.12	0.12
	ALJ1	Loja	Stonyford	0.81	0.87	0.79	0.73	0.06	0.05
	ACH1	Machala	Stonyford	0.86	0.86	0.79	0.73	0.09	0.10
	AMNT	Manta	San Francisco	1.06	1.01	1.20	1.00	1.26	1.68
	AMIL	Milagro	Stonyford	0.81	0.87	0.79	0.73	0.25	0.21
	AOTA	Otavalo	San Francisco	1.19	1.19	1.20	1.00	0.13	0.15
	APED	Pedernales	San Francisco	1.06	1.01	1.20	1.00	3.84	3.51
	APO1	Portoviejo	San Francisco	1.06	1.01	1.20	1.00	2.15	2.06
	EPNL	Quito	San Francisco	1.19	1.19	1.20	1.00	0.08	0.11
	PRAM	Quito	San Francisco	1.19	1.19	1.20	1.00	0.11	0.10
	ALOR	San Lorenzo	Imperial	1.46	1.39	1.44	1.20	0.10	0.08
	ASDO	Sto. Domingo	San Francisco	1.19	1.19	1.20	1.00	0.58	1.34
ATUL	Tulcán	San Francisco	1.19	1.19	1.20	1.00	0.09	0.05	

Tabla 14

Comparación de Espectros de Diseño Inelásticos, Suelo C de normas NEC-15, ASCE 7-16 y Espectros de Respuesta del sismo de Pedernales del 16 A-2016

REC	ECUADOR	CALIFORNIA	ESPECTROS DE DISEÑO INELÁSTICOS Sa (g)						ESPECTRO DE RESPUESTA Sa (g)		
			NEC-15			ASCE 7-16			Sismo 16 A-2016		
	Estación	Ciudades	R = 3	R = 5	R = 8	R = 3	R = 5	R = 8	N-S	E-W	
RENAC	AMM2	Ambato	San Francisco	0.40	0.24	0.15	0.40	0.24	0.15	0.090	0.092
	ACHN	Chone	San Francisco	0.35	0.21	0.13	0.40	0.24	0.15	1.73	1.25
	ACUE	Cuenca	Stonyford	0.27	0.16	0.10	0.26	0.16	0.10	0.13	0.14
	AES2	Esmeraldas	Imperial	0.49	0.29	0.18	0.48	0.29	0.18	0.40	0.49
	AGYE	Guayaquil	Stonyford	0.29	0.17	0.11	0.26	0.16	0.10	0.07	0.05
	AIB1	Ibarra	San Francisco	0.40	0.24	0.15	0.40	0.24	0.15	0.23	0.19
	AIB2	Ibarra	San Francisco	0.40	0.24	0.15	0.40	0.24	0.15	0.16	0.09
	ALIB	La Libertad	San Francisco	0.35	0.21	0.13	0.40	0.24	0.15	0.145	0.144
	ALAT	Latacunga	San Francisco	0.40	0.24	0.15	0.40	0.24	0.15	0.12	0.12
	ALJ1	Loja	Stonyford	0.27	0.16	0.10	0.26	0.16	0.10	0.06	0.05
	ACH1	Machala	Stonyford	0.29	0.17	0.11	0.26	0.16	0.10	0.09	0.10
	AMNT	Manta	San Francisco	0.35	0.21	0.13	0.40	0.24	0.15	1.26	1.68
	AMIL	Milagro	Stonyford	0.27	0.16	0.10	0.26	0.16	0.10	0.25	0.21
	AOTA	Otavalo	San Francisco	0.40	0.24	0.15	0.40	0.24	0.15	0.13	0.15
	APED	Pedernales	San Francisco	0.35	0.21	0.13	0.40	0.24	0.15	3.84	3.51
	APO1	Portoviejo	San Francisco	0.35	0.21	0.13	0.40	0.24	0.15	2.15	2.06
	EPNL	Quito	San Francisco	0.40	0.24	0.15	0.40	0.24	0.15	0.08	0.11
	PRAM	Quito	San Francisco	0.40	0.24	0.15	0.40	0.24	0.15	0.11	0.10
	ALOR	San Lorenzo	Imperial	0.49	0.29	0.18	0.48	0.29	0.18	0.10	0.08
	ASDO	Sto. Domingo	San Francisco	0.40	0.24	0.15	0.40	0.24	0.15	0.58	1.34
ATUL	Tulcán	San Francisco	0.40	0.24	0.15	0.40	0.24	0.15	0.09	0.05	

CONCLUSIONES

Es interesante observar que las curvas de los espectros de diseño elásticos de aceleración de las normas NEC-15, son similares a las aceleraciones de los espectros elásticos de diseño de ASCE de ciudades de California donde el peligro sísmico varía de moderado a muy alto, con esto se concluye que la norma NEC-SE-DS, está estrictamente basado en la norma americana ASCE 7-16, por ello la aceleración espectral de ambas normas son similares.

Los espectros de respuesta de aceleración del sismo del 16 de abril del 2016, resultan similares a los espectros de diseño elásticos de NEC-15 en las ciudades de la provincia de Manabí, con excepción de Pedernales que superó ampliamente las ordenadas del espectro elástico 3 veces más, catalogado como un evento sísmico de ocurrencia Muy Rara. Con esto se llega a la conclusión que los espectros de diseño elásticos de la norma NEC-SE-DS-2015 están bastante relacionados con las aceleraciones del sismo de diseño con ocurrencia Rara (periodo de retorno de 475 años).

Sobre lo que se observa en las ciudades del sur de Ecuador y gran parte de la región Sierra, donde las aceleraciones de los espectros de respuesta son similares e incluso menores a las aceleraciones de los espectros de diseño inelásticos y mucho menores que los espectros de tipo elásticos, se concluye que los niveles de aceleración en estos sitios están correlacionados con el sismo frecuente o de servicio con periodo de retorno menor a los 50 años.

Se puede concluir que la diferencia que existe entre los espectros elásticos e inelásticos, es que el elástico define aceleraciones que modelan el sismo de diseño con periodo de retorno de 475 años, mientras que el inelástico define aceleraciones que modelan un Sismo de Servicio de poca intensidad y permite diseñar a las estructuras con condiciones de economía. Por esta razón, es fundamental que al usar los espectros inelásticos en NEC-15, se diseñe a las estructuras con alta ductilidad, a fin de que se puedan deformar mucho más allá de su punto de cedencia o fluencia, sin llegar a perder su resistencia. Para conseguir una estructura dúctil se debe seguir las condiciones de diseño sismo resistente de la norma ecuatoriana de construcción.

RECOMENDACIONES

Se recomienda incrementar estaciones de acelerógrafos en el país, en especial en la zona costera y principalmente en la provincia de Santa Elena que cuenta con una sola estación en La Libertad. La finalidad de esta recomendación es obtener mayor información de las ondas sísmicas que producen estos eventos, y hacer estudios que aporten al diseño sismo-resistente de las estructuras en Ecuador.

Para el desarrollo de proyectos importantes en la zona costera catalogado como una zona de muy alto peligro sísmico, la NEC-15 nos indica que se use valores de $Z \geq 0.5g$, por esta razón se podría usar valores de aceleración máxima en roca igual a $0.6g$ o incluso diseñar con la norma americana ASCE 7-16, con los parámetros de ciudades de California que se encuentren más cerca de la Falla de San Andrés que ciudades como San Francisco o Imperial. Se recomienda adoptar fuerzas de diseño más altas para las ciudades del perfil costero como Pedernales, Esmeraldas, Manta, Bahía de Caraquez, Santa Elena, Salinas, entre otras.

Las estructuras se deberían diseñar con pórticos especiales que resistan sismos con alta ductilidad por flexión o momentos, reduciendo las fuerzas sísmicas de diseño con $R=8$. Sin embargo, cuando no sea posible lograr altas ductilidades en un diseño, por irregulares en las estructuras u otras razones, se recomienda usar valores de $R=3$ o $R=5$, correspondientes a un sistema estructural con un comportamiento más elástico, donde la estructura tenga más rigidez y ductilidad provista baja o media, respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

Angulo, J. and W. M. Azañedo (2013). "Propuesta para la modificación del espectro elástico de la actual norma peruana de diseño sísmoresistente."

ASCE7-16 (2016). "Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles." 84.

Avilés, J. and L. Pérez (2004). "Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura." (71): 1-36.

Benito and Jiménez (1999). "Peligrosidad sísmica." **11**: 13-47.

Carvajal, A. and P. Tapia (2014). "Espectro de respuesta."

CHOPRA, A. (2014). Dinámica de Estructuras. México.

Crisafulli, F. and E. Villafañe (2002). "ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO No de hojas: 22."

Falconí, R. (2008). "Análisis sísmico de edificios."

IG-EPN (2020). "Cuatro años después del terremoto de pedernales: un testimonio sobre el peligro sísmico en el Ecuador." from <https://www.igepn.edu.ec/>.

INPRES (2015). "FALLAS GEOLOGICAS."

Lagos, P. (2015). Estudio de los registros sísmicos existentes en el Ecuador, caso red sísmica del austro y su incidencia en el análisis estructural, vulnerabilidad y desempeño sísmico de edificios de mediana altura.

Leyton, F. (2010). "Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central." **37**(2): 455-472.

López, V. (2017). Evaluación estructural mediante aplicación de normativa NEC y propuestas de reforzamiento de la Residencia Universitaria Hogar Santa Teresita del DMQ, Quito: UCE.

Miragall, C. and A. Samartin (1983). "Respuesta sísmica de suelos."

Narváez, E. (2015). Daños que se presentan en edificaciones de hormigón armado después de un evento sísmico (Terremoto de Bahía de Caraquez).

Aislación sísmica con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, Quito/UIDE/2015.

NEC-SE-DS (2015). Peligro sísmico, diseño sismoresistente Norma, NEC-SE-DS.

NEC (2015). Peligro sísmico, diseño sismoresistente Norma, NEC-SE-DS.

Noriega Vega, M. C. (2016). Definición y estudio comparativo de espectros para diseño sísmico de la norma NEC se DS con otras normas internacionales, PUCE: 47.

Paz, E. (2012). Procedimiento de cálculo para la elaboración de espectros sísmicos para el diseño sismorresistente de estructuras, Tesis (Ingeniero Civil). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala: 282.

Rivadeneira, F. (2007). "Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador."

Silva Rodríguez, J. V. (2011). Análisis estructural sismo-resistente del bloque A del edificio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato Campus Huachi para garantizar la seguridad de sus ocupantes.

Singaicho, et al. (2016). "Observaciones del sismo del 16 de Abril de 2016 de magnitud Mw 7.8, Intensidades y Aceleraciones.". from <http://www.igepn.edu.ec/1324-informe-sismico-especial-n-18-2016.html>.

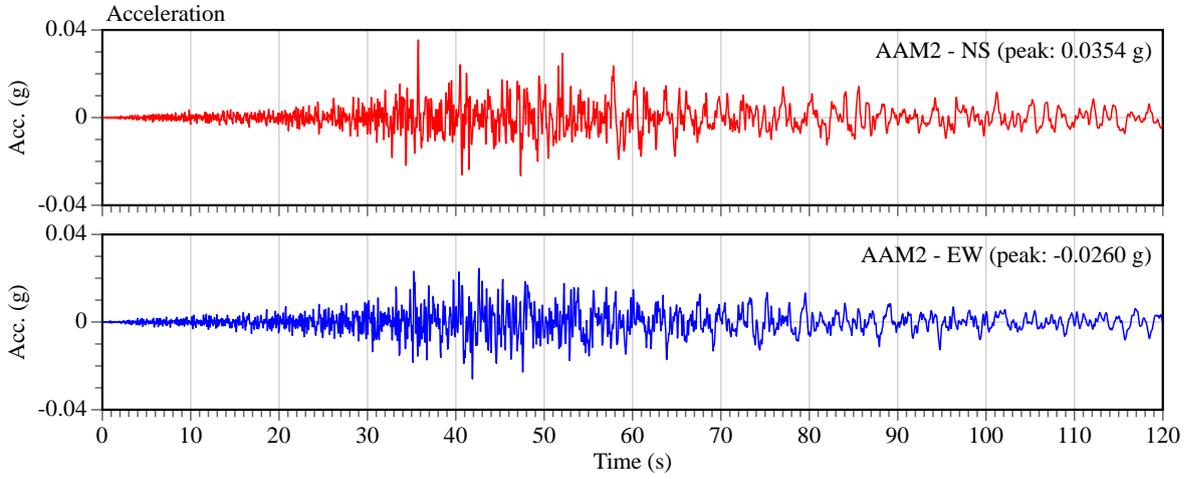
Tejada, A. (2011). Analisis dinamico de estructuras en el dominio de la frecuencia., UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.

ANEXOS

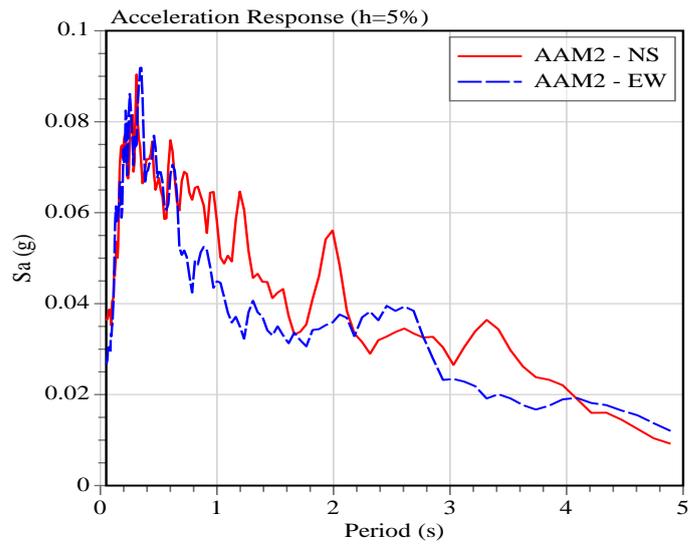
Registro de Aceleración

Anexo 1

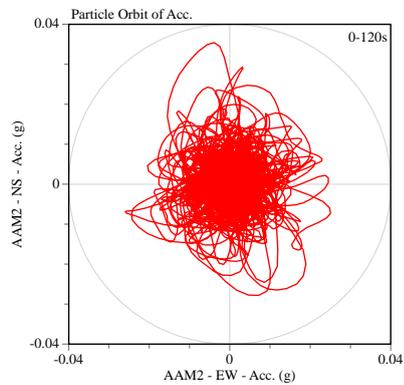
Estación de Ambato AAM2. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.



a)



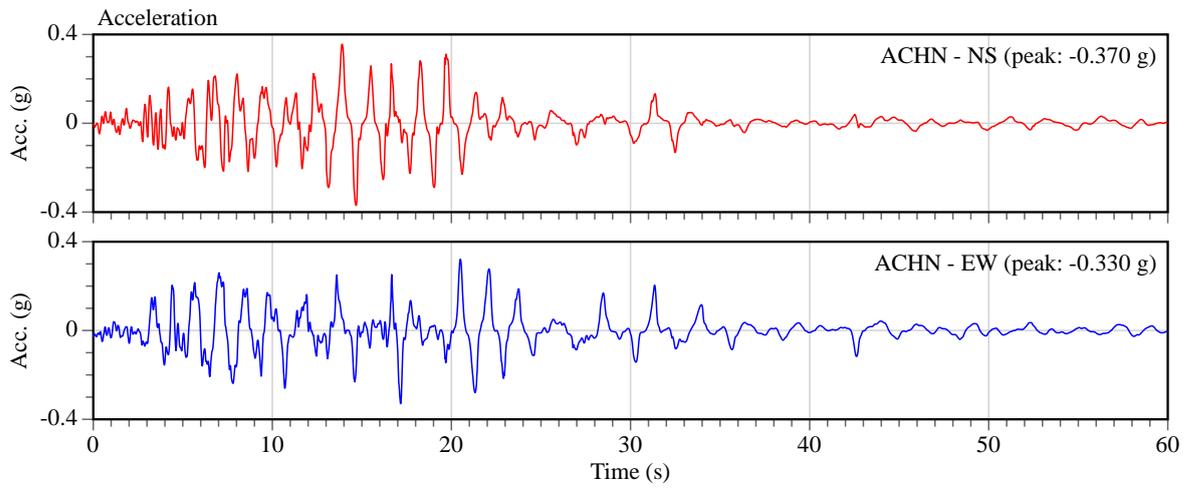
b)



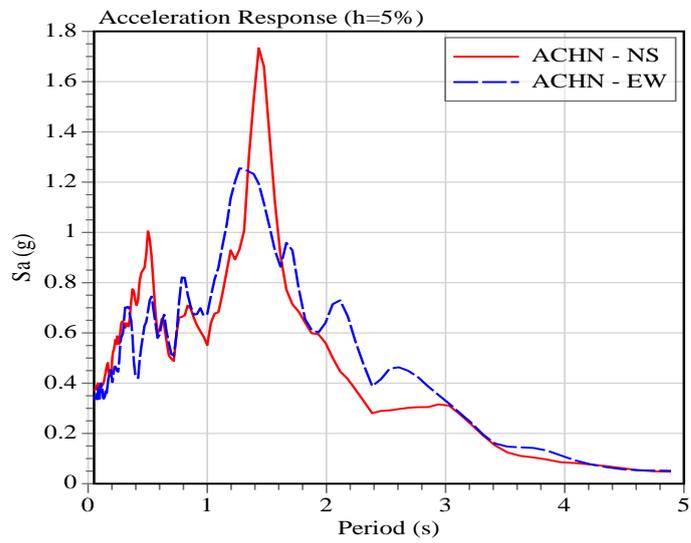
c)

Anexo 2

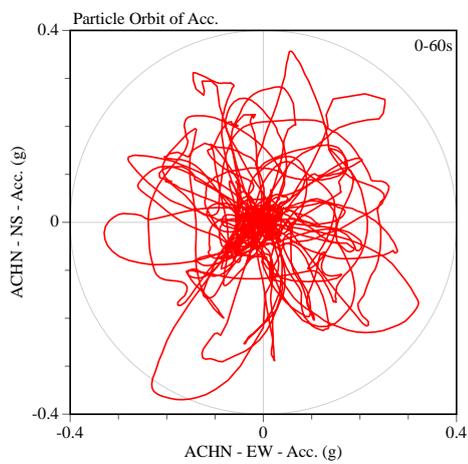
Estación de Chone ACHN. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.



a)



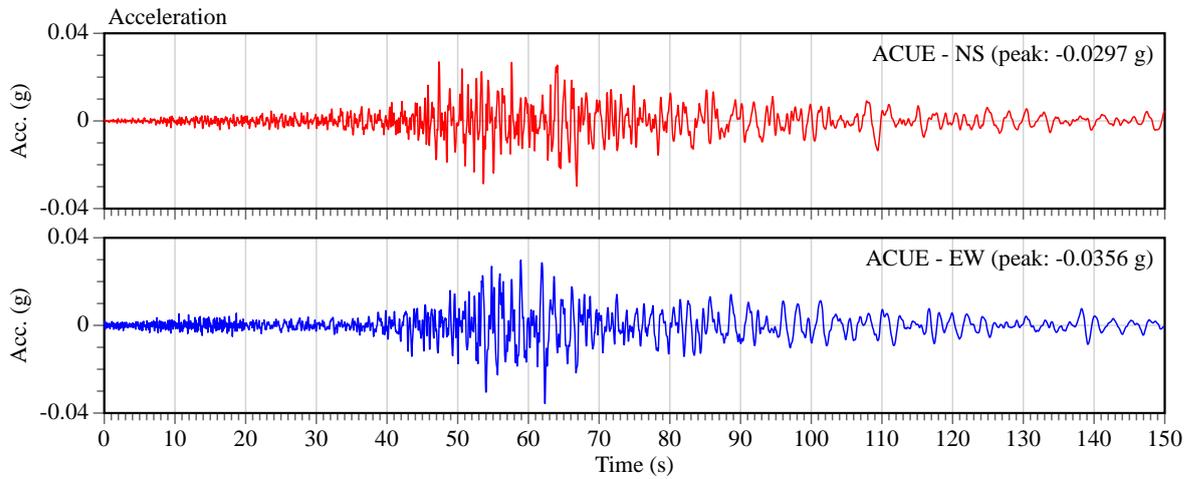
b)



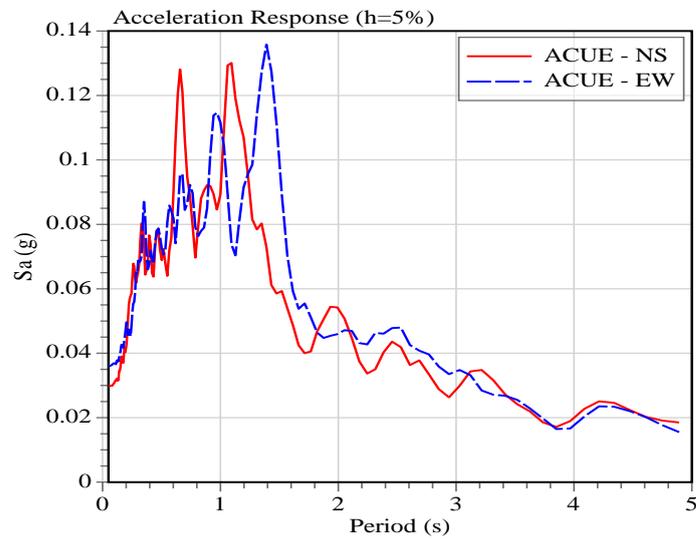
c)

Anexo 3

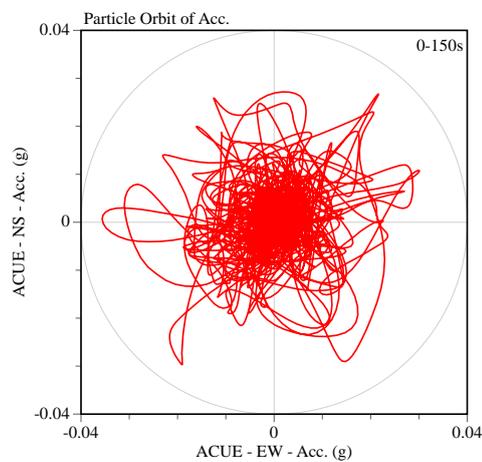
Estación de Cuenca ACUE. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.



a)



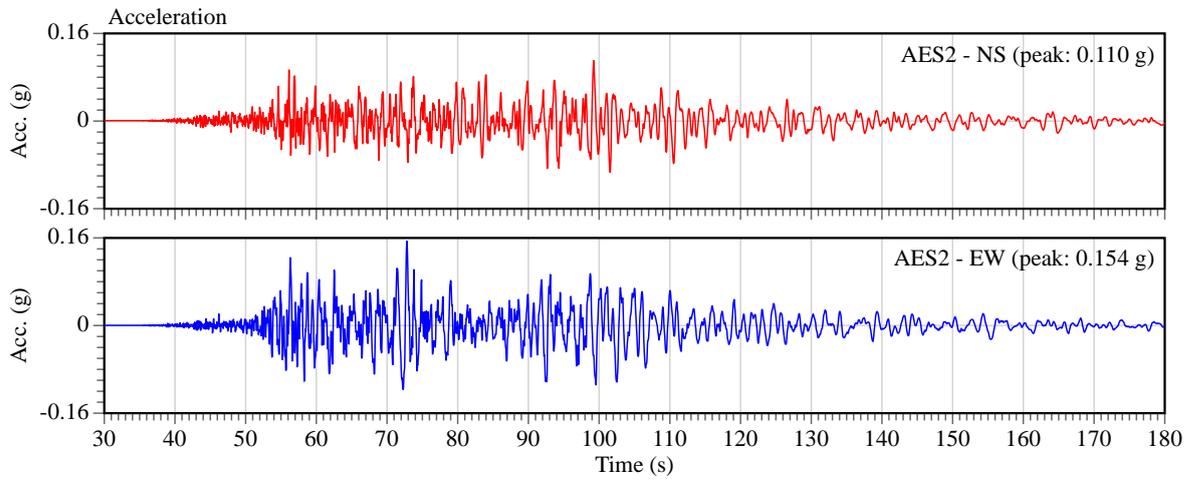
b)



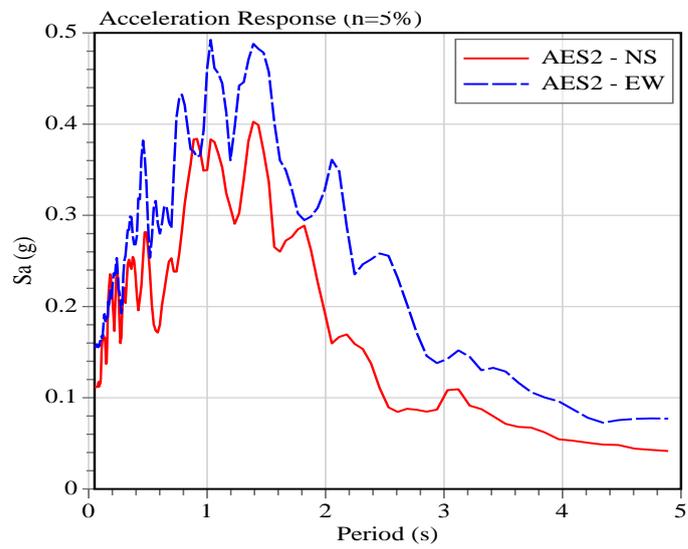
c)

Anexo 4

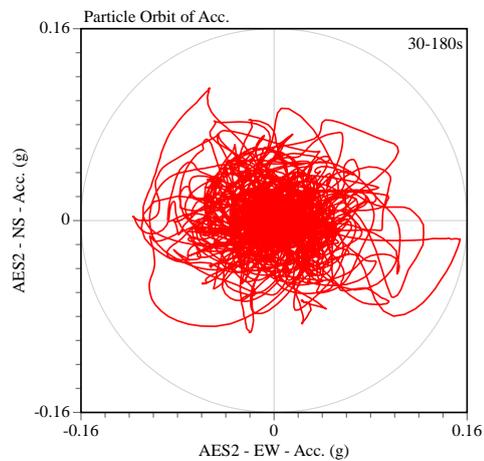
Estación de Esmeraldas AES2. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo.



a)



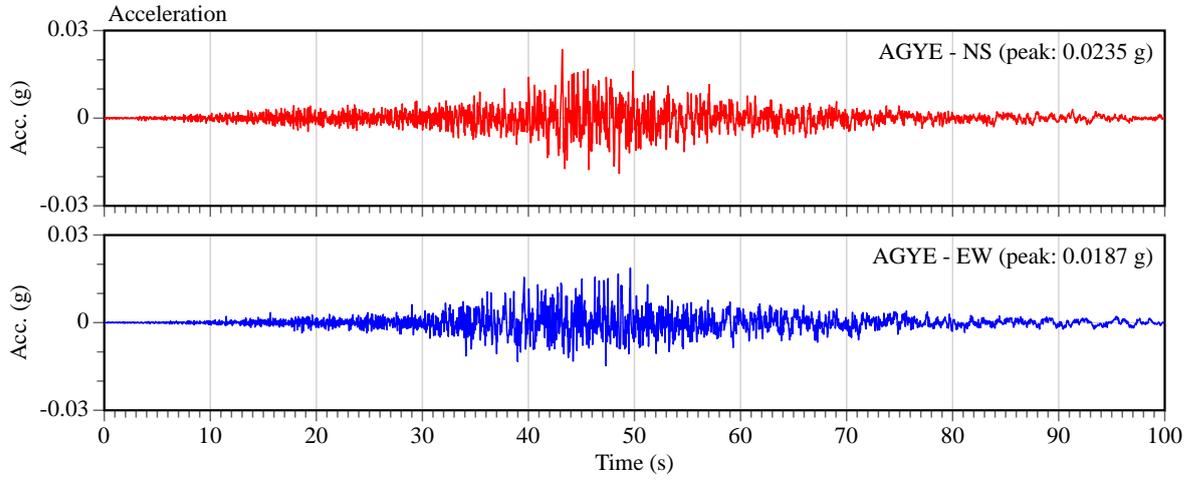
b)



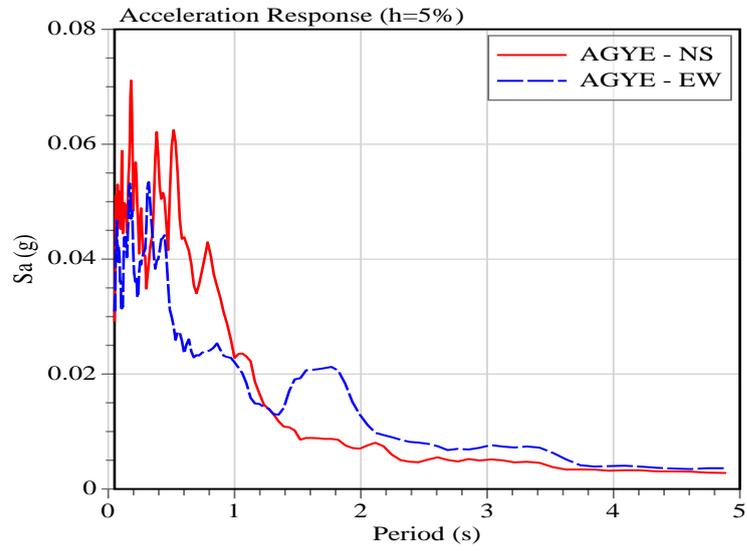
c)

Anexo 5

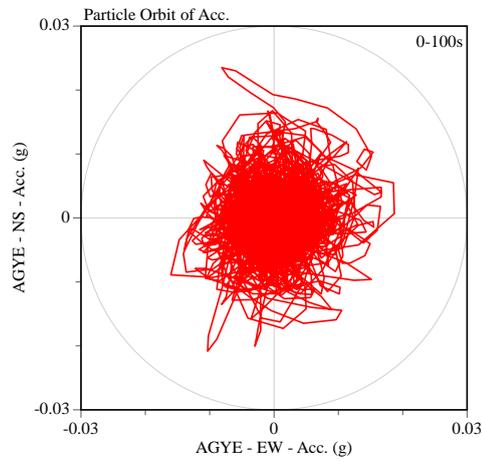
Estación de Guayaquil (Pascuales) AGYE. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



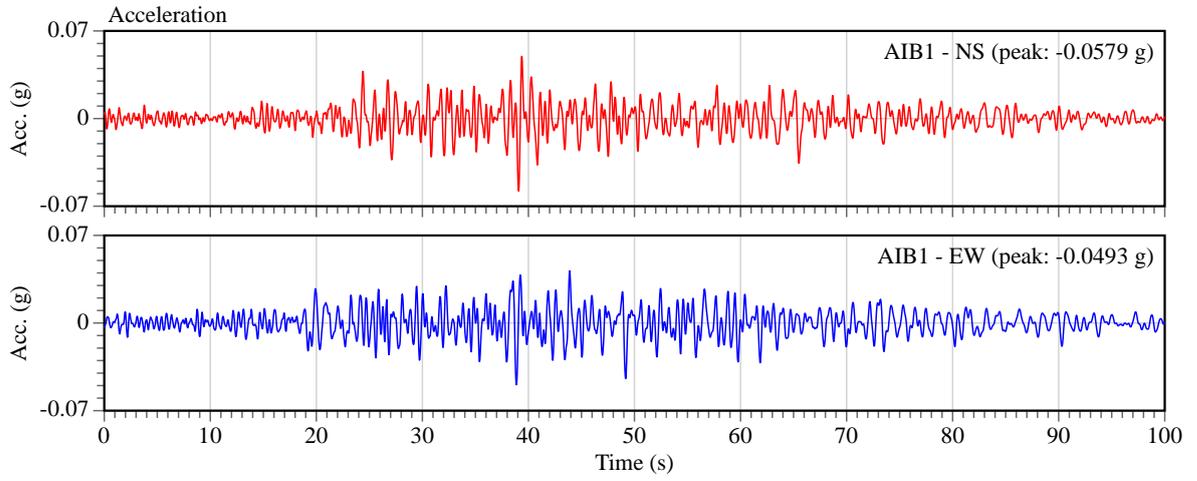
b)



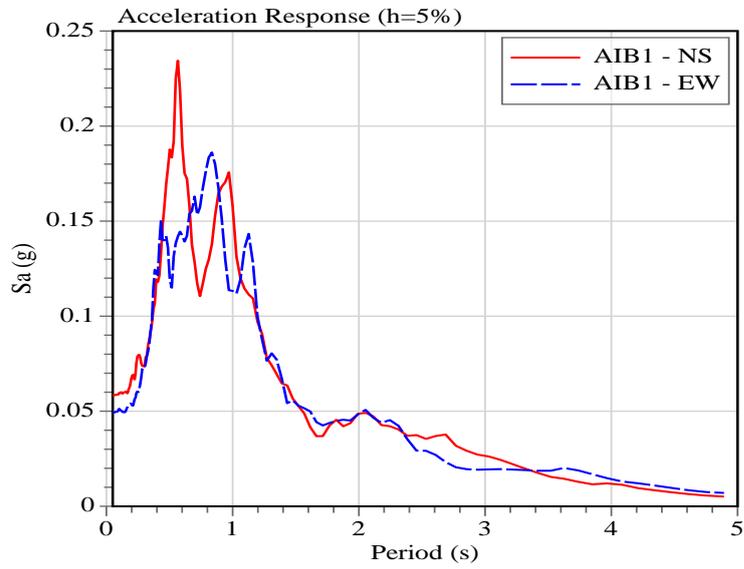
c)

Anexo 6

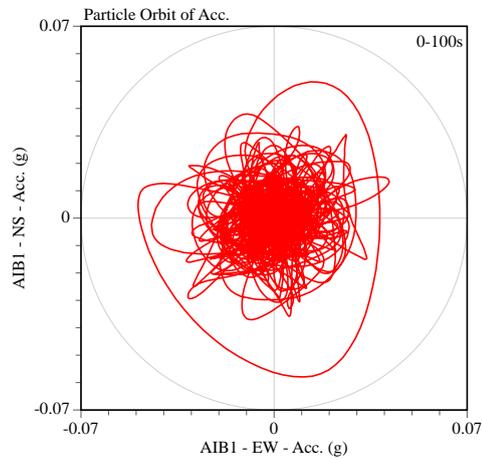
Estación de Ibarra AIB1. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



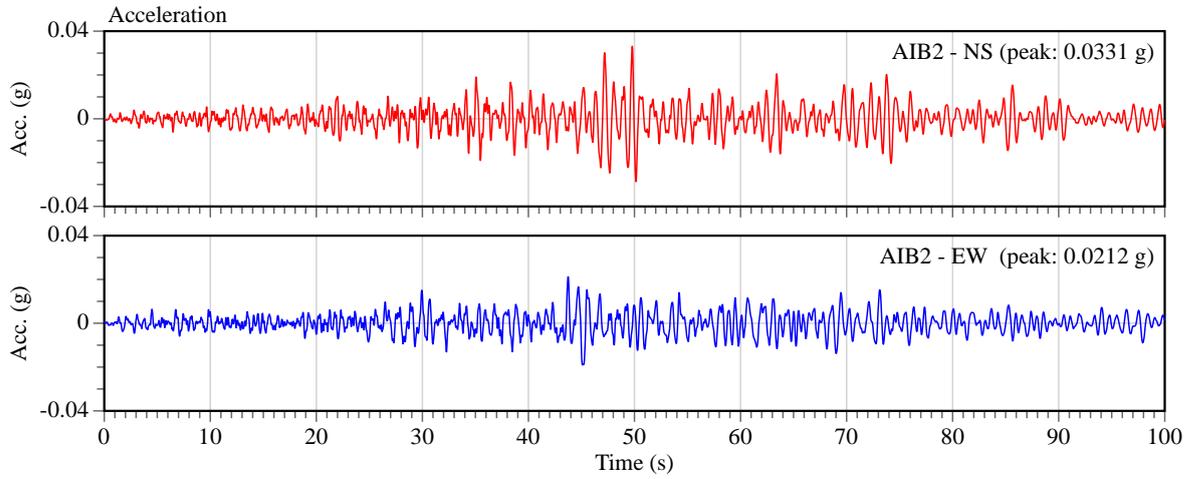
b)



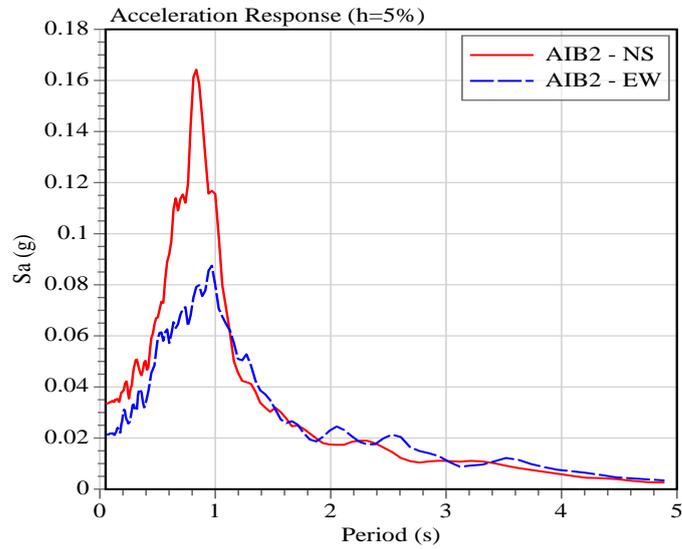
c)

Anexo 7

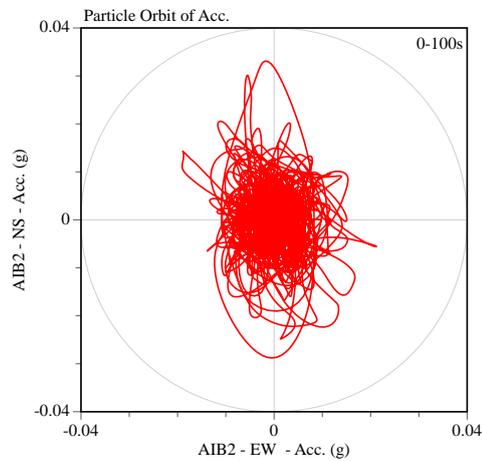
Estación de Ibarra AIB2. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



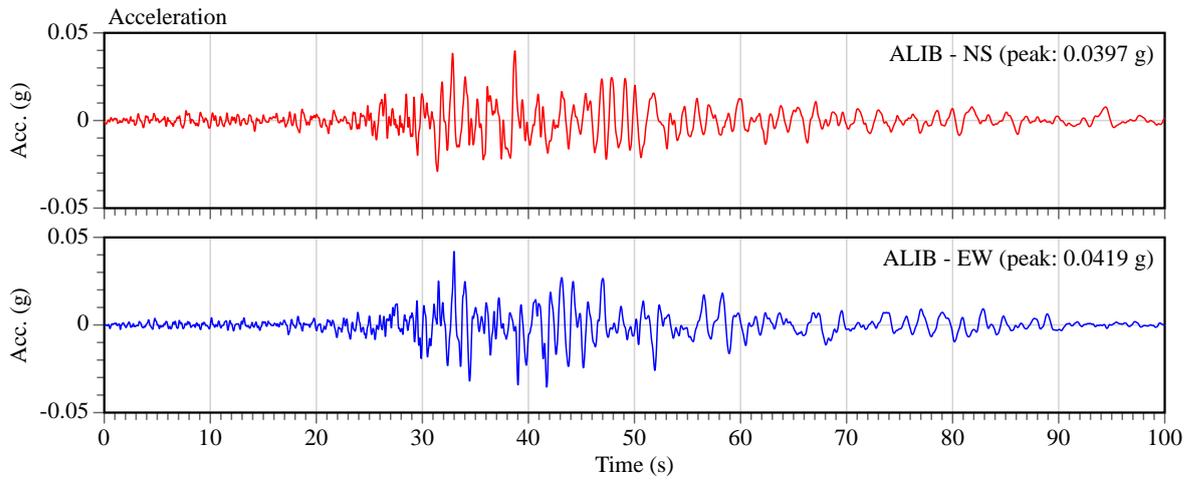
b)



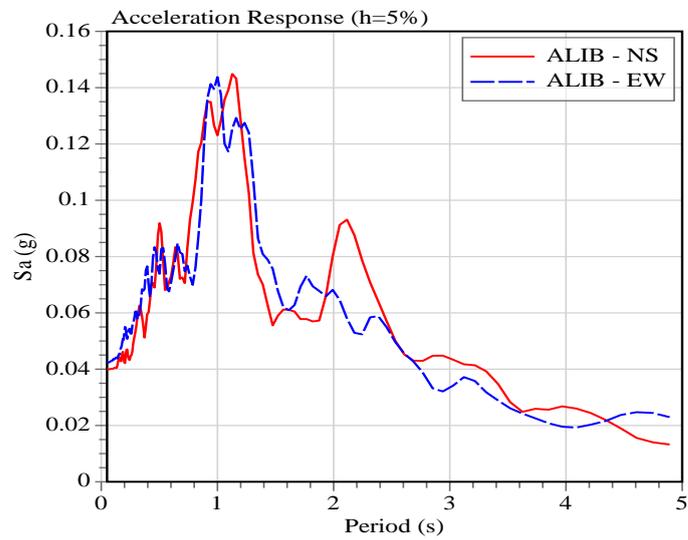
c)

Anexo 8

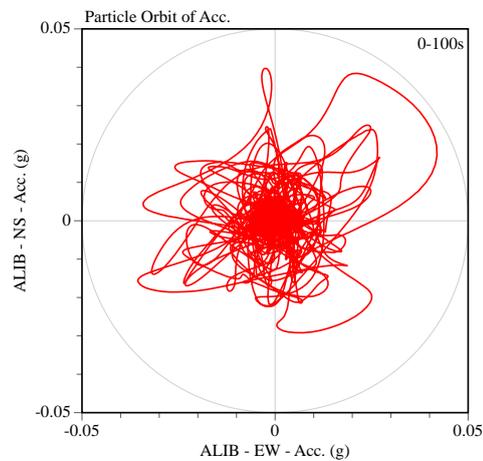
Estación de La Libertad ALIB. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



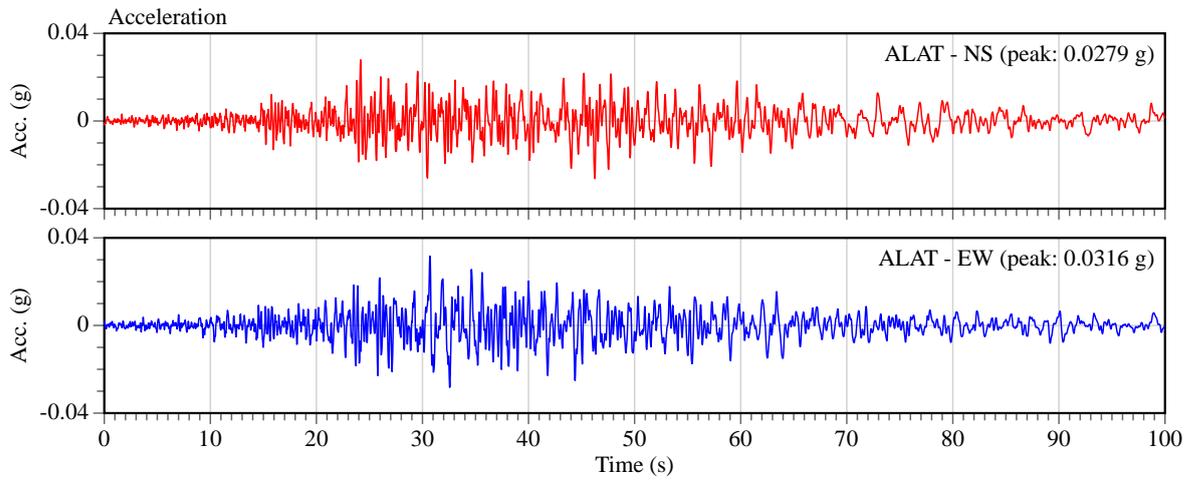
b)



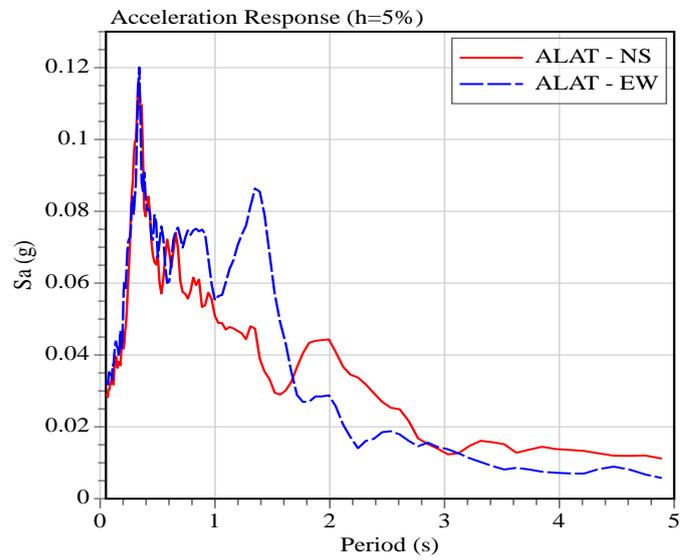
c)

Anexo 9

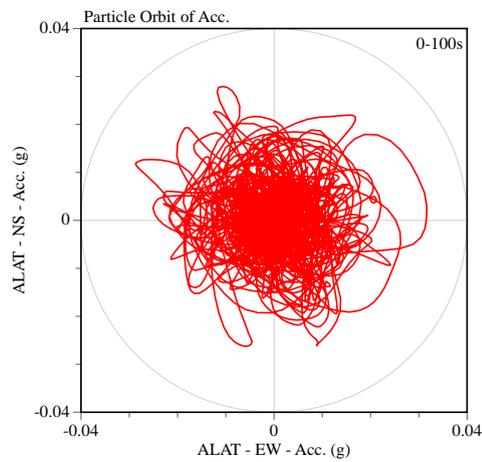
Estación de Latacunga ALAT. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



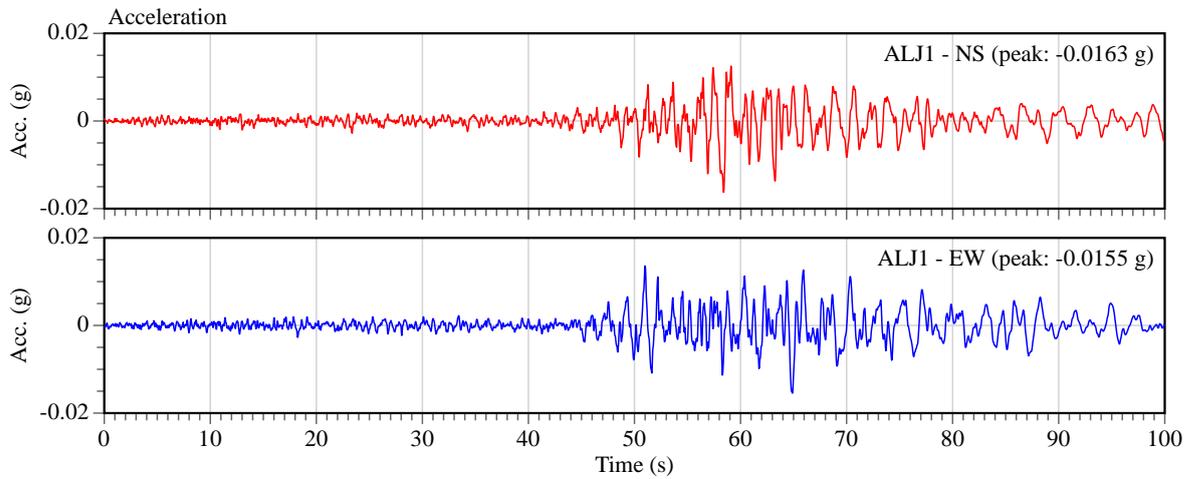
b)



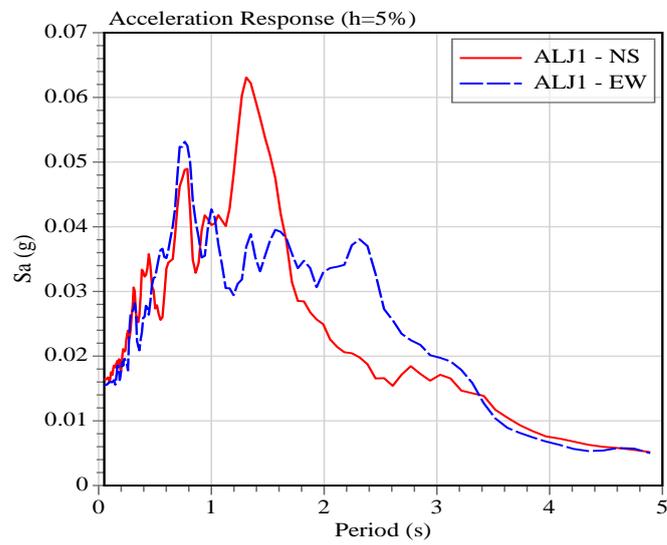
c)

Anexo 10

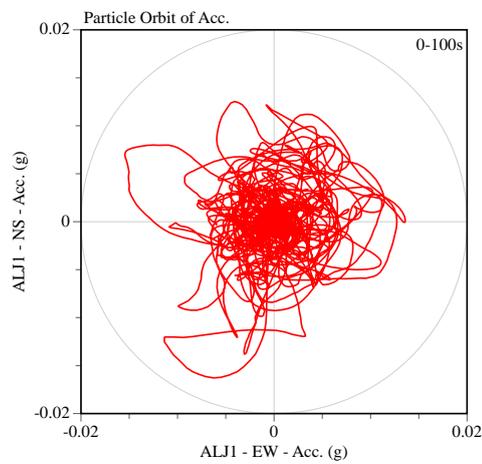
Estación de Loja ALJ1. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



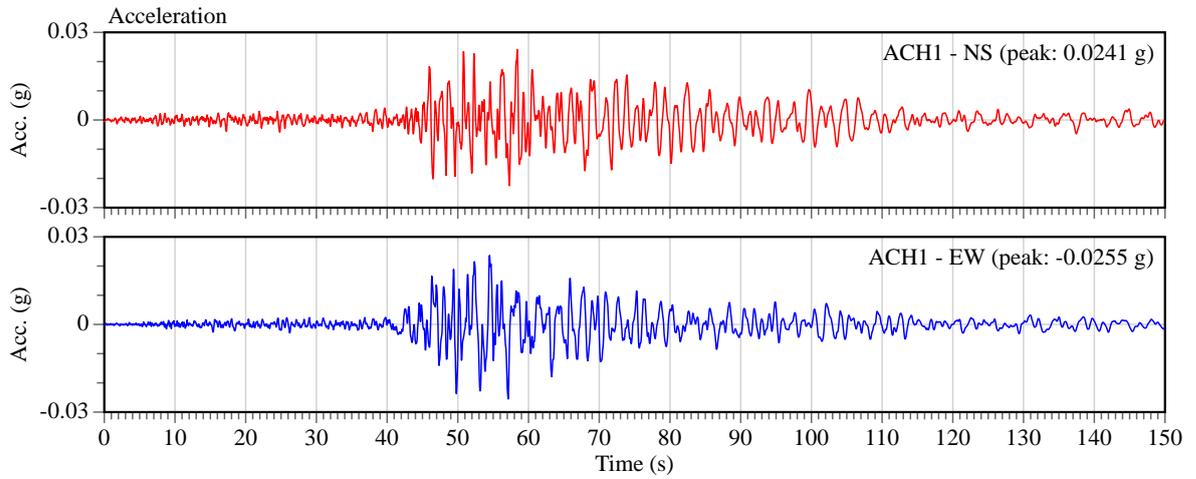
b)



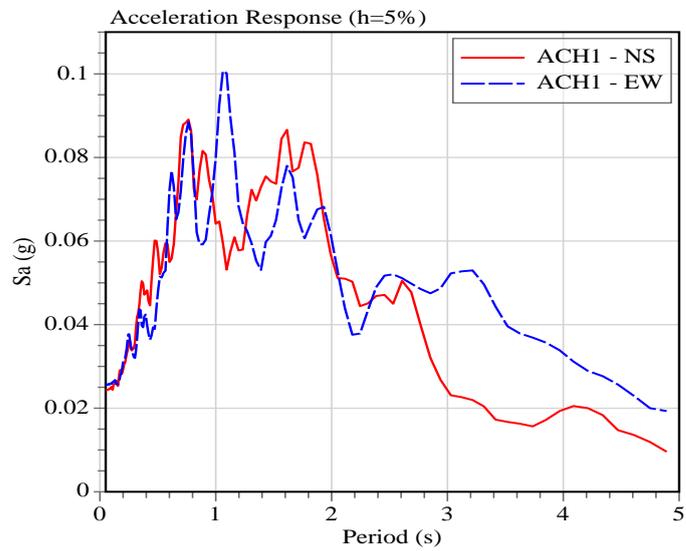
c)

Anexo 11

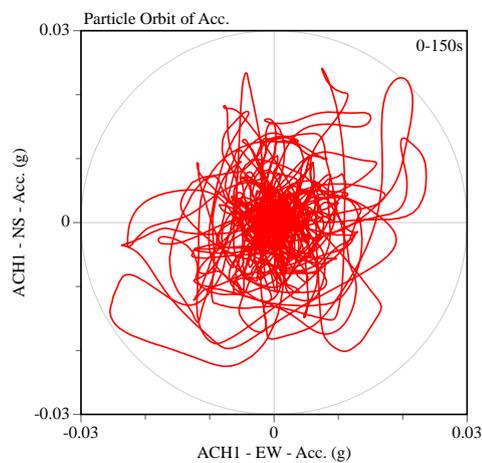
Estación de Machala ACH1. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



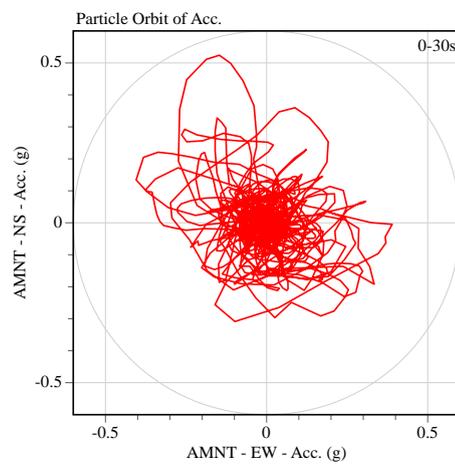
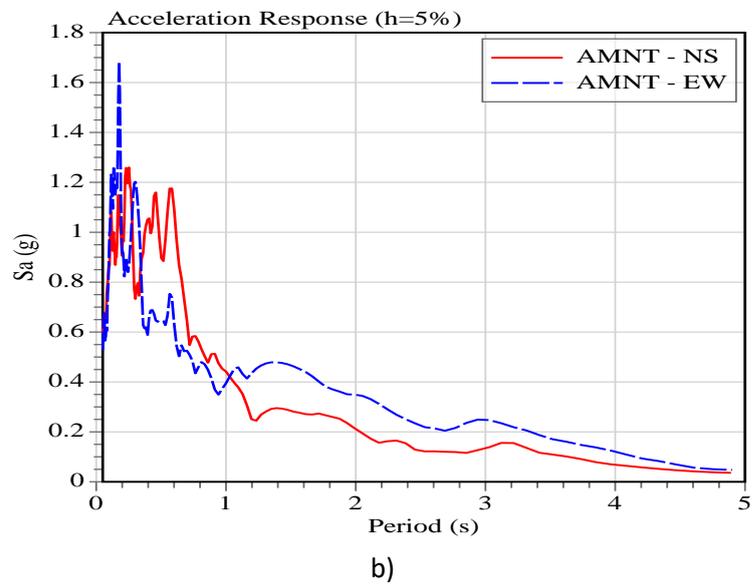
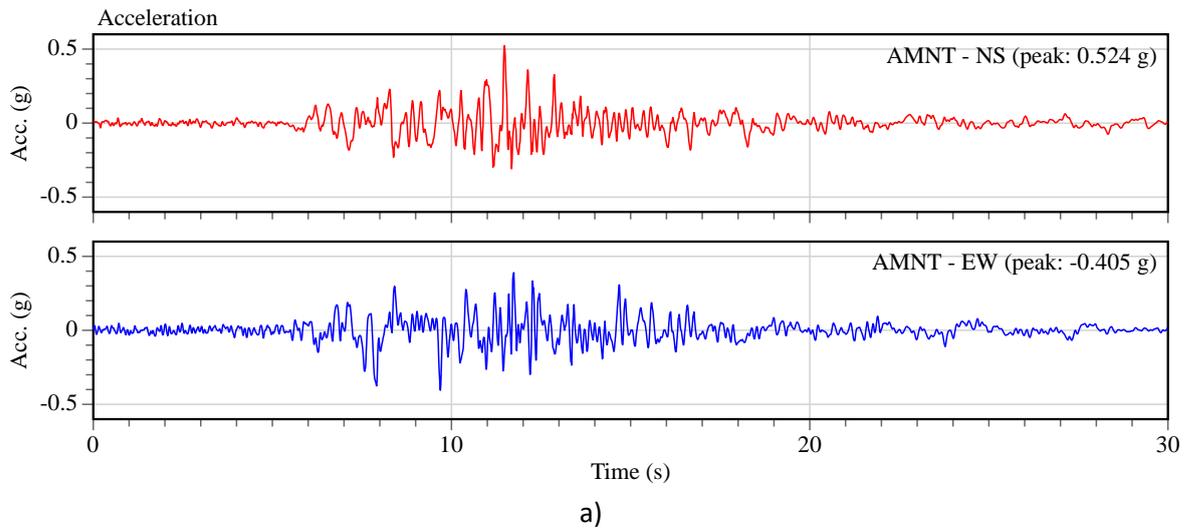
b)



c)

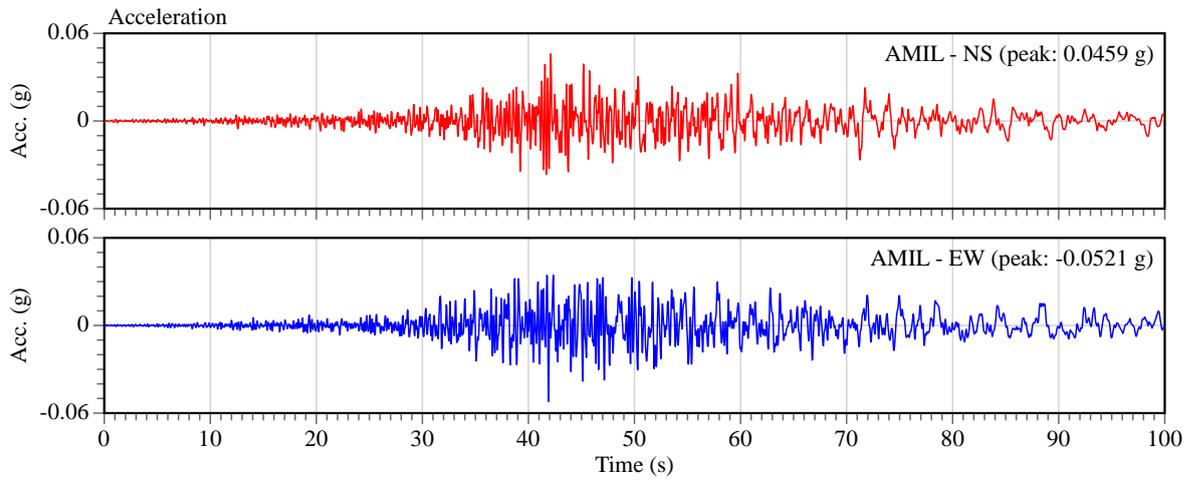
Anexo 12

Estación de Manta AMNT. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo

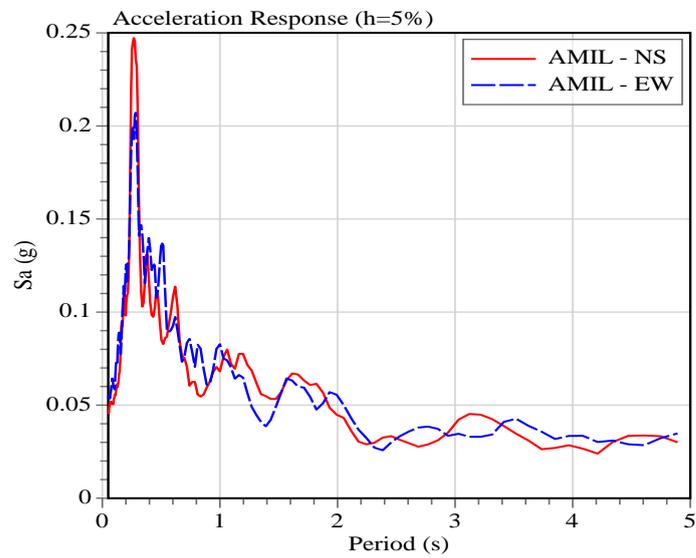


Anexo 13

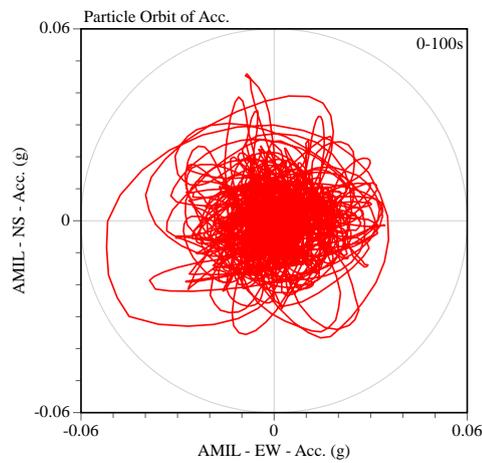
Estación de Milagro AMIL. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



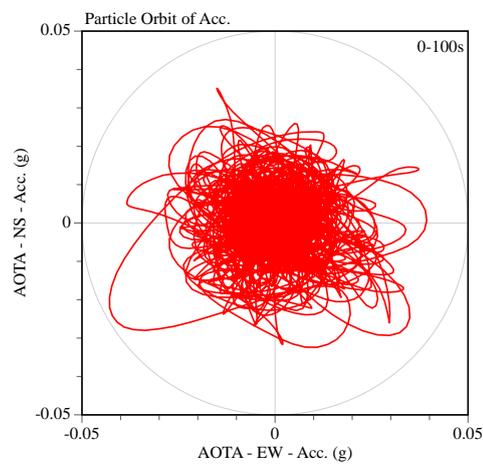
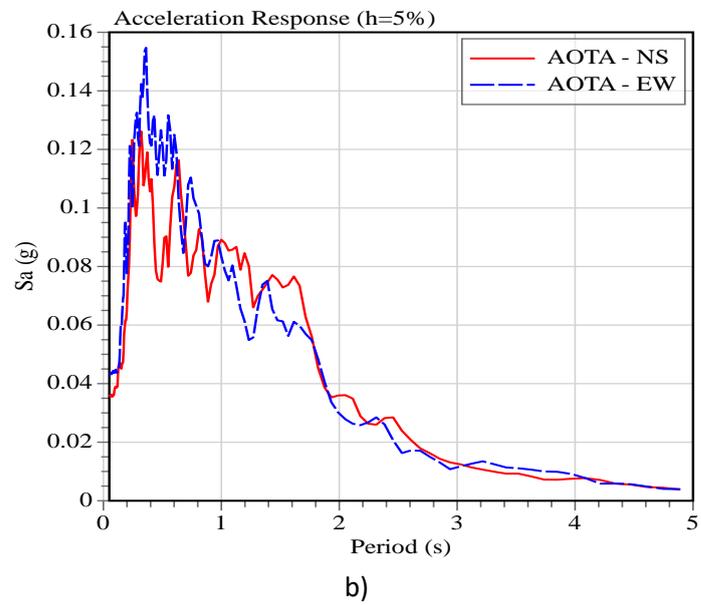
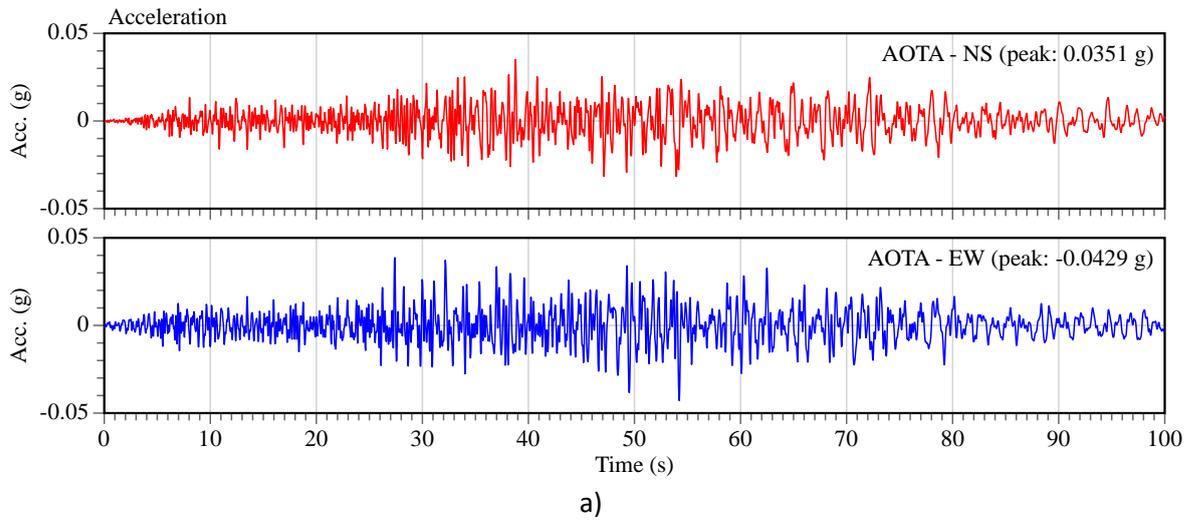
b)



c)

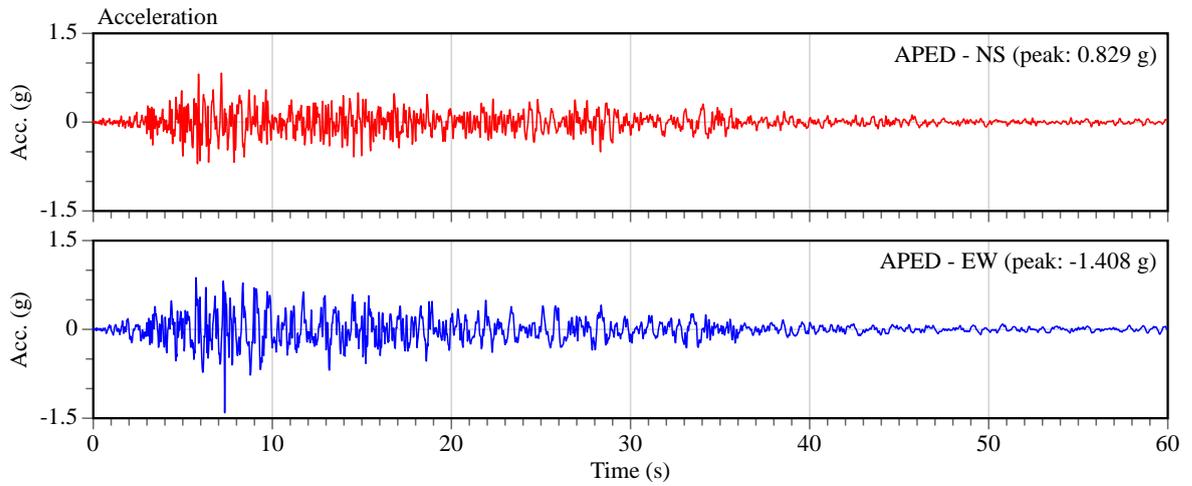
Anexo 14

Estación de Otavalo AOTA. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo

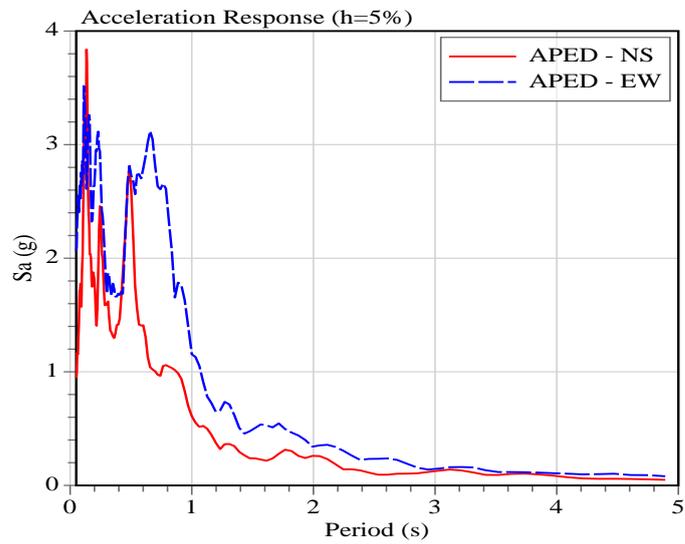


Anexo 15

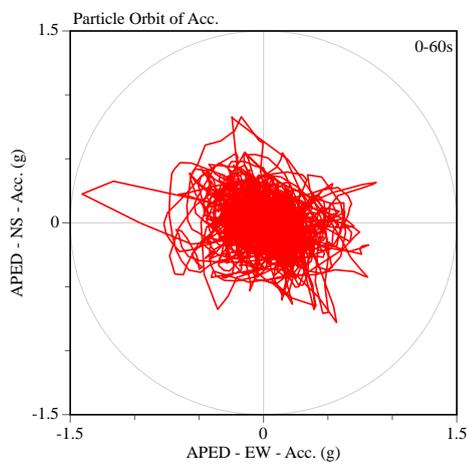
Estación de Pedernales APED. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



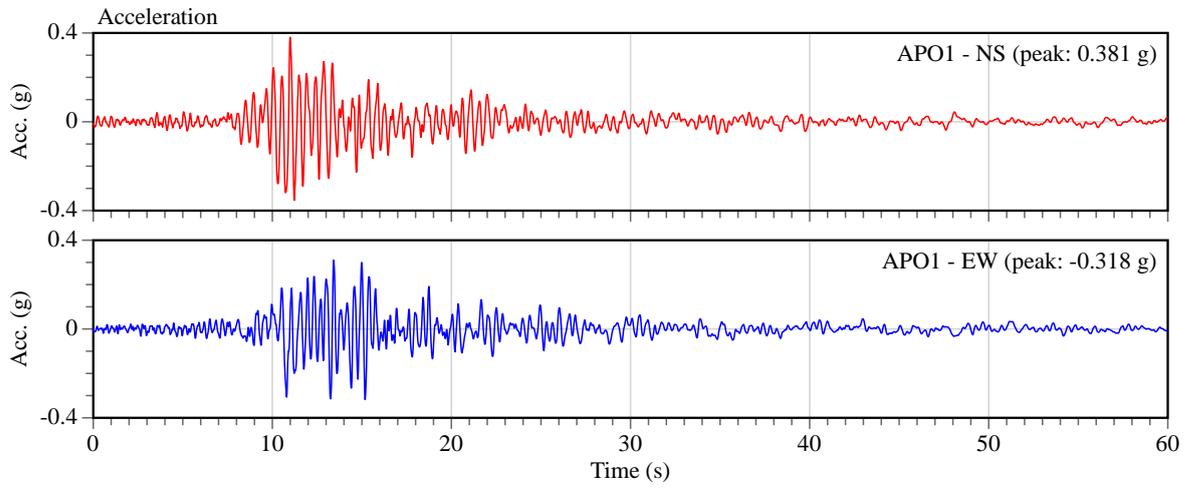
b)



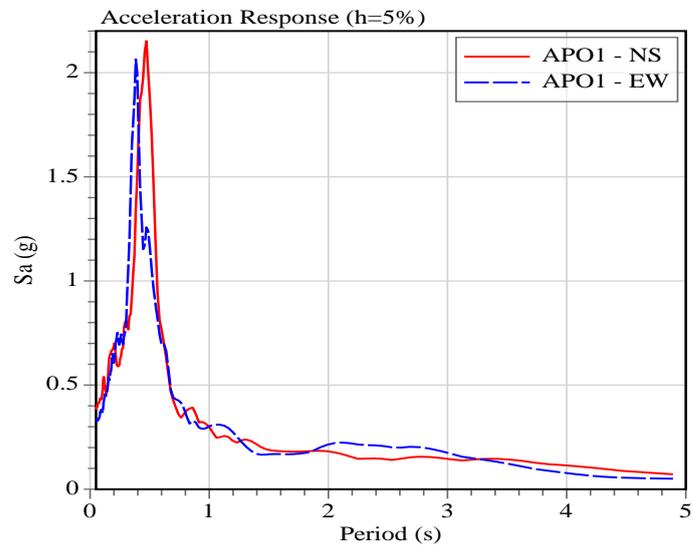
c)

Anexo 16

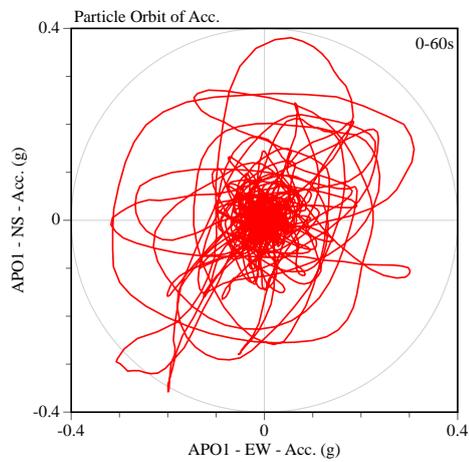
Estación de Portoviejo APO1. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



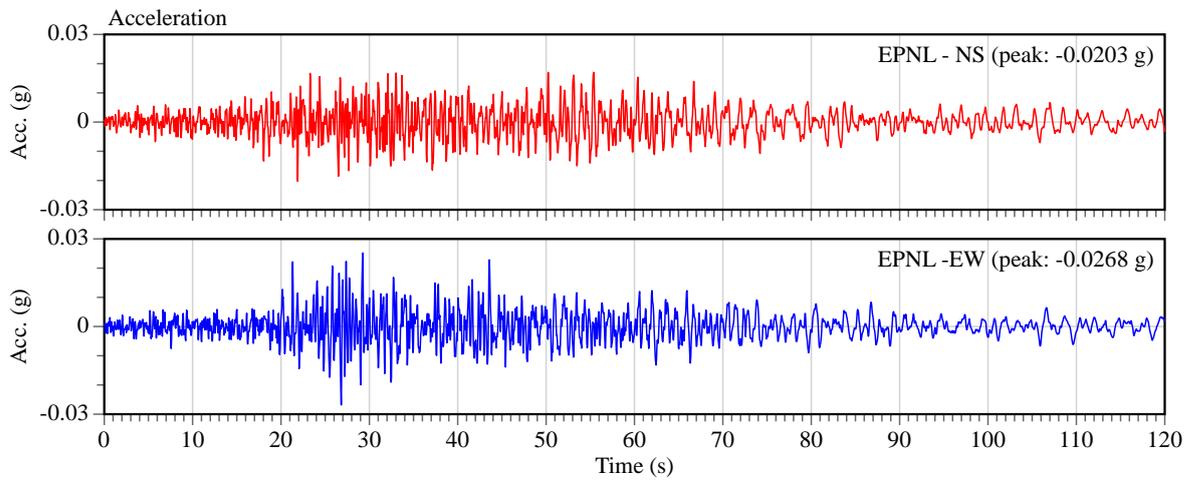
b)



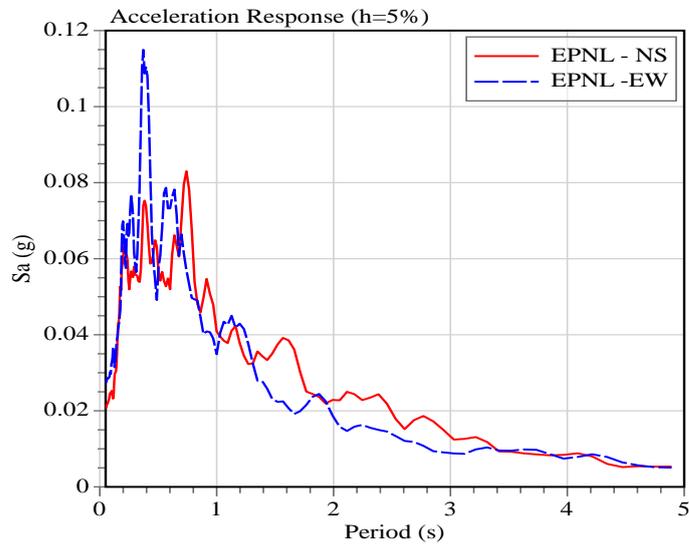
c)

Anexo 17

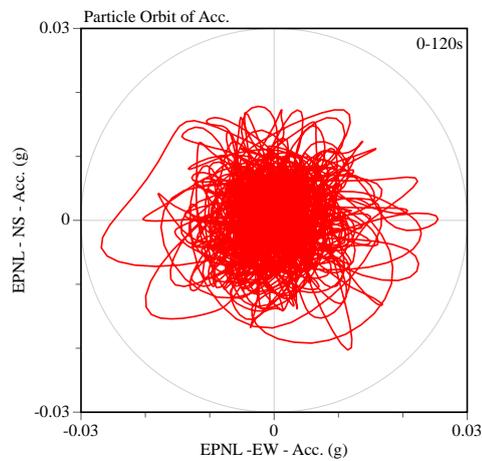
Estación de Quito EPNL. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



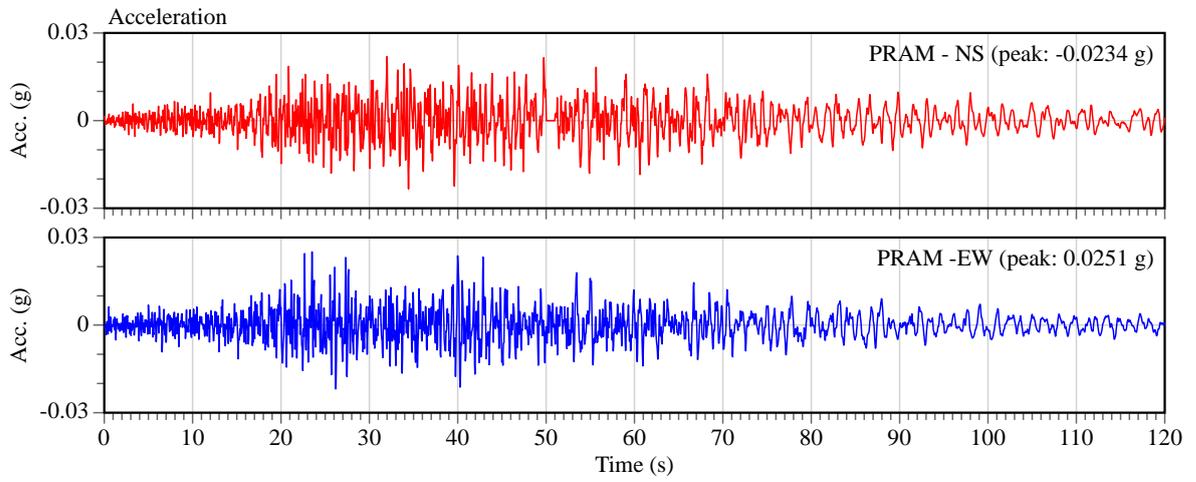
b)



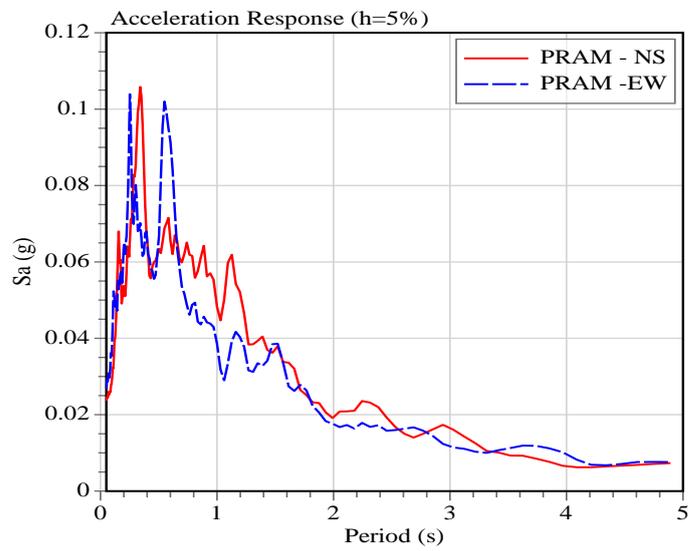
c)

Anexo 18

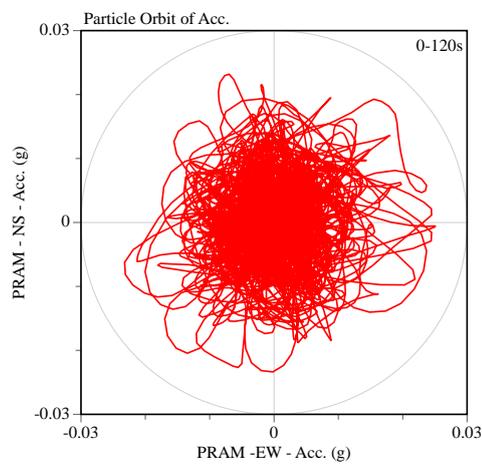
Estación de Quito – La Carolina PRAM. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



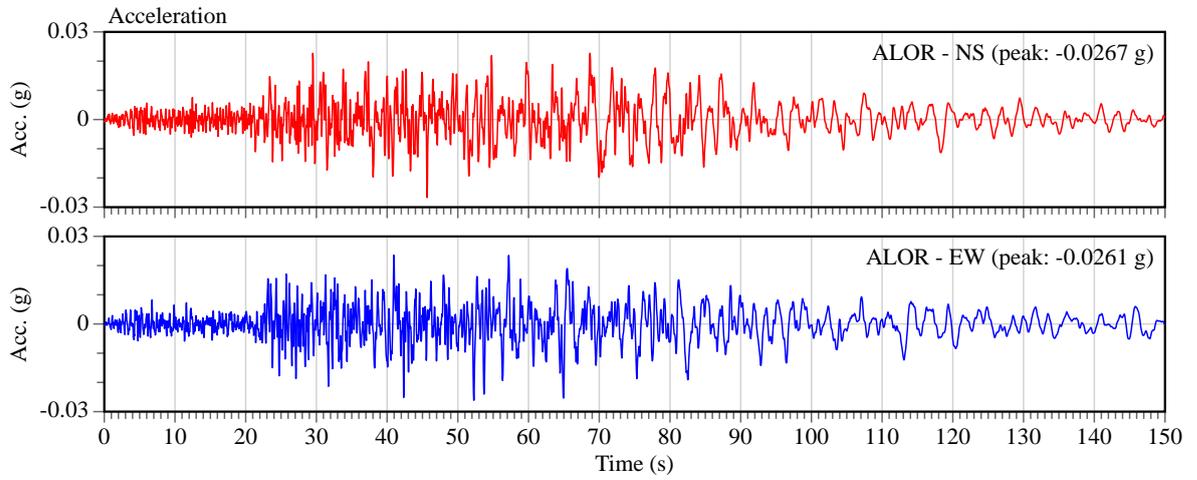
b)



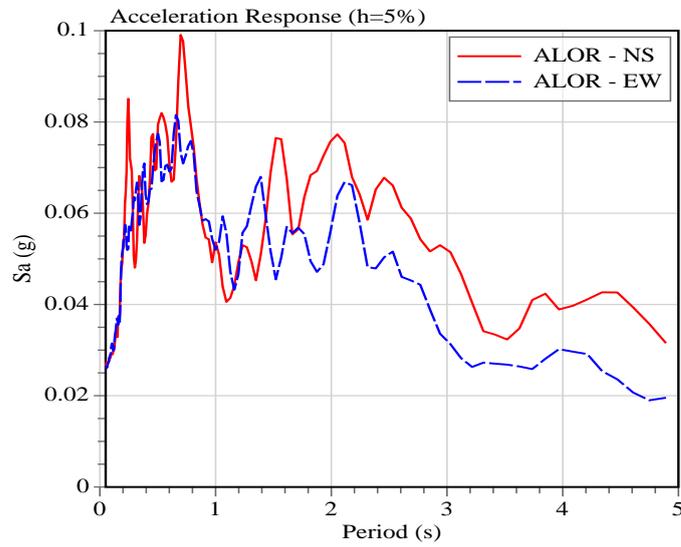
c)

Anexo 19

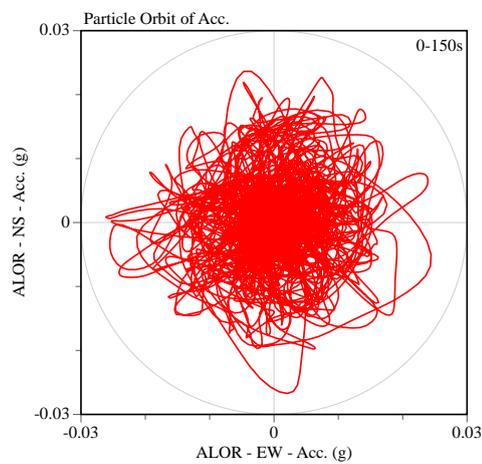
Estación de San Lorenzo ALOR. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



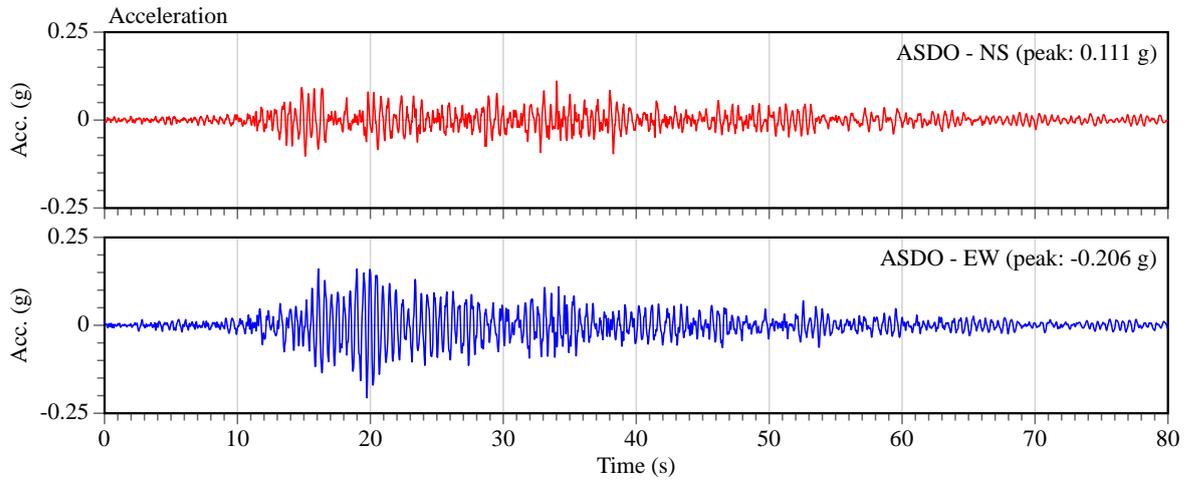
b)



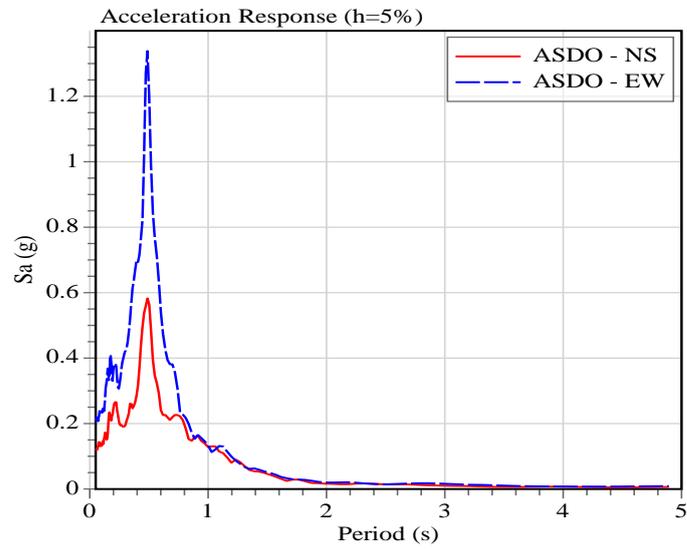
c)

Anexo 20

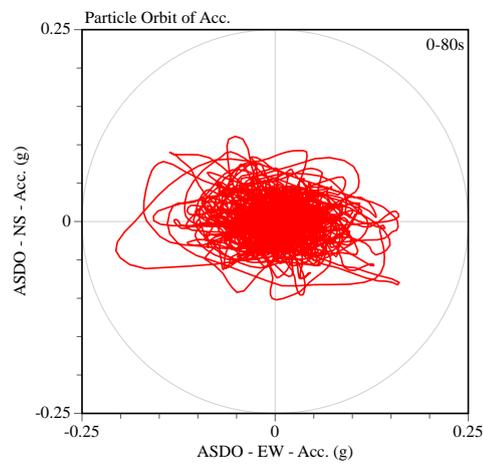
Estación de Santo Domingo ASDO. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



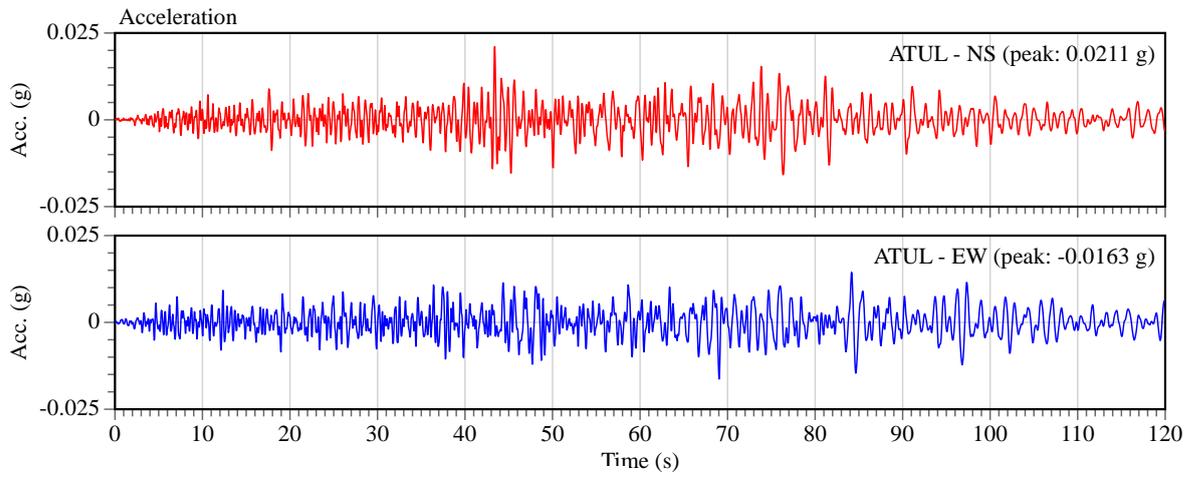
b)



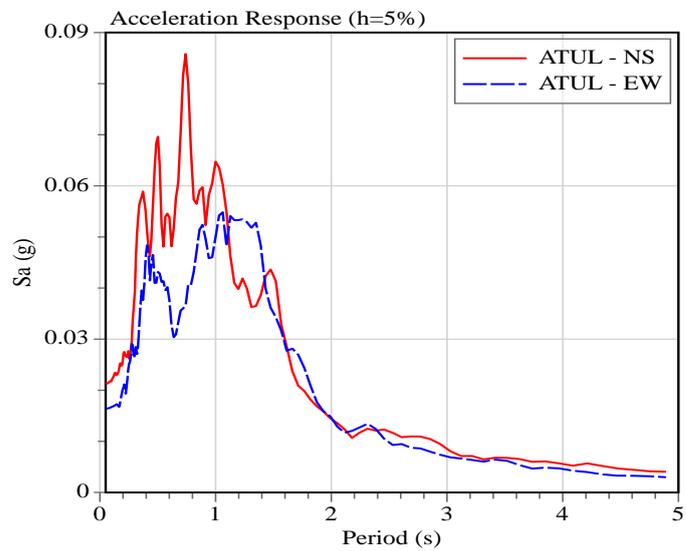
c)

Anexo 21

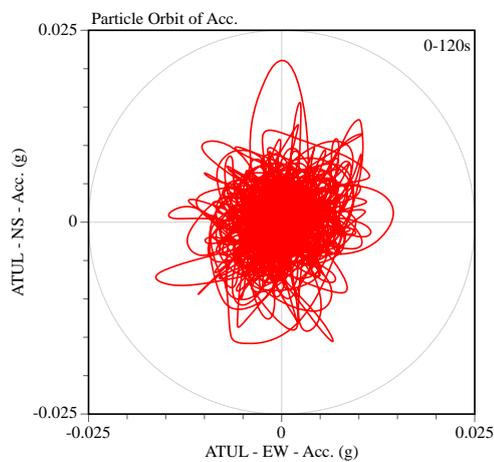
Estación de Tulcán ATUL. Acelerograma, Espectro de Respuesta y Orbita de la Partícula de Suelo



a)



b)



c)