



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

**TEMA:**

“HOMOLOGACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO  
MULTI-PERÍODO DEL ASCE 7-22 PARA SITIOS ESPECÍFICOS  
DEL ECUADOR”

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**AUTORES:**

DODDY EDUARDO GUTIÉRREZ REYES  
GABRIEL ANDRÉS PILCO RODRÍGUEZ

**TUTOR:**

ING. JAIME FERNANDO ARGUDO RODRÍGUEZ Ph.D.

**LA LIBERTAD, ECUADOR**

2023

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

HOMOLOGACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO  
SÍSMICO MULTI-PERÍODO DEL ASCE 7-22 PARA  
SITIOS ESPECÍFICOS DEL ECUADOR

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**AUTOR:**

DODDY EDUARDO GUTIÉRREZ REYES  
GABRIEL ANDRÉS PILCO RODRÍGUEZ

**TUTOR:**


ING. JAIME FERNANDO ARGUDO RODRÍGUEZ Ph.D.


**LA LIBERTAD – ECUADOR**


2023


UPSE

# TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f.   
Ing. Jonny Villao Borbor, MSc.  
**DIRECTOR DE CARRERA**

f.   
Ing. Jaime Argudo Rodríguez, Ph.D.  
**DOCENTE TUTOR**

f.   
Ing. Raúl Villao Vera, MSc.  
**DOCENTE ESPECIALISTA**

f.   
Ing. Lucrecia Moreno Alcivar, Ph.D.  
**SECRETARIA DEL TRIBUNAL**

# DEDICATORIA

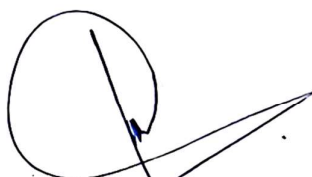
*Este trabajo está  
dedicado a nuestros  
amados padres, apoyo  
incondicional durante  
el pregrado.*

**GABRIEL ANDRÉS PILCO RODRÍGUEZ &  
DODDY EDUARDO GUTIÉRREZ REYES**



## CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema **“HOMOLOGACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO MULTI-PERÍODO DEL ASCE 7-22 PARA SITIOS ESPECÍFICOS DEL ECUADOR”**, elaborado por los estudiantes **PILCO RODRÍGUEZ GABRIEL ANDRÉS** y **GUTIÉRREZ REYES DODDY EDUARDO**, egresados de la carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, de la Facultad de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 1% de similitudes y por tal razón dentro de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el presente informe.



f.

**Ing. Jaime Argudo Rodríguez, Ph.D.**

**C.I.: 0908377229**

**DOCENTE TUTOR**



CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
mugiser

# TESIS - DISEÑO DE ESPECTROS MULTIPERÍODO FINAL

**1%** Similitudes  
 < 1% Texto entre comillas  
 0% similitudes entre comillas  
 < 1% Idioma no reconocido

Nombre del documento: TESIS - DISEÑO DE ESPECTROS MULTIPERÍODO FINAL.pdf  
 ID del documento: 66af84e39e4bb4f5d605df743ee065d116446a0d  
 Tamaño del documento original: 6,43 MB

Depositante: JAIME FERNANDO ARGUDO RODRIGUEZ  
 Fecha de depósito: 10/10/2023  
 Tipo de carga: interface  
 fecha de fin de análisis: 10/10/2023

Número de palabras: 35.838  
 Número de caracteres: 236.808

Ubicación de las similitudes en el documento:



## Fuentes principales detectadas


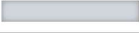

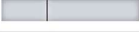

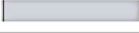

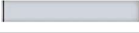

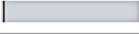



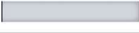

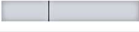





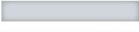


N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	Documento de otro usuario #618238 E documento proviene de otro grupo 5 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (173 palabras)
2	idoc.pub   Espectros Sísmicos [1430m7(19y4)] https://idoc.pub/documents/espectros-sismicos-1430m7(19y4) 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (112 palabras)
3	Documento de otro usuario #67506 E documento proviene de otro grupo 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (96 palabras)
4	www.slideshare.net   Espectros de respuesta y de diseño https://www.slideshare.net/Keivi-RobertoGonzalez/espectros-de-respuesta-y-de-diseño 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (55 palabras)
5	www.sctelo.cl   Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Park... https://www.sctelo.cl/bsci/ptmci/artex&pid=907182813201400020000 3 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (60 palabras)

## Fuentes con similitudes fortuitas






N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.espe.edu.ec   Estimación de la Poligradidad Sísmica en Ecuador Contin... http://repositorio.espe.edu.ec/8090/bitstream/2100013741/3/978_9942_765_10_9.pdf.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (34 palabras)
2	dspace.ups.edu.ec https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14/071/AUP5-57003021.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (36 palabras)
3	www.dspace.espol.edu.ec   Estudio de Riesgo Sísmico Para Las Zonas Sensibles d... http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/308772/D-70109.pdf.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)
4	Documento de otro usuario #6623a E documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (33 palabras)
5	dspace.ucaena.edu.ec   Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y evalu... http://dspace.ucaena.edu.ec/bitstream/23/56789/26/5473/tesis.pdf.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (28 palabras)

Fuentes ignoradas Estas fuentes han sido retiradas del cálculo del porcentaje de similitud por el propietario del documento.

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.upse.edu.ec https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/9929/1/AUP5-11C-2023-0022.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (185 palabras)
2	repositorio.upse.edu.ec https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/990/1/1/AUP5-11C-2023-0009.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (144 palabras)
3	repositorio.upse.edu.ec https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/990/5/1/AUP5-11C-2023-0003.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (139 palabras)
4	repositorio.upse.edu.ec   Redes neuronales artificiales para determinar curvas din... https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7234/1/AUP5-11C-2022-0003.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (99 palabras)
5	repositorio.upse.edu.ec   Estudio del comportamiento de los balancines accionad... https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/8570/1/AUP5-11C-2021-0070.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (66 palabras)
6	repositorio.upse.edu.ec   Análisis estructural y verificación de propuesta de reforz... https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5955/1/AUP5 TIC 2021 0003.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (68 palabras)
7	repositorio.upse.edu.ec   Análisis comparativo del espectro de diseño propuestos ... https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6504/1/AUP5 TIC 2021 0025.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (61 palabras)

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
8	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5029/1/AUPSE-TIC-2019-0011.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a>   Estudio comparativo de los diseños sísmicos, de una est... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5029/1/AUPSE-TIC-2019-0011.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5029/1/AUPSE-TIC-2019-0011.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (54 palabras)
9	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6950/1/AUPSE-TIC-2022-0016.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a>   Diseño estructural de un pabellón de tres plantas para l... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6950/1/AUPSE-TIC-2022-0016.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6950/1/AUPSE-TIC-2022-0016.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (50 palabras)
10	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7417/1/AUPSE-TEB-2022-0001.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a>   Estrategias metodológicas para asegurar el aprendizaje ... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7417/1/AUPSE-TEB-2022-0001.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7417/1/AUPSE-TEB-2022-0001.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (44 palabras)
11	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7460/1/AUPSE-TEB-2022-0017.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a>   La lectoescritura y su incidencia en el proceso de enseñ... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7460/1/AUPSE-TEB-2022-0017.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7460/1/AUPSE-TEB-2022-0017.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (41 palabras)
12	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7139/0/AUPSE-MTH-2022-0018.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a>   El estrés laboral y su incidencia en el desempeño del pe... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7139/0/AUPSE-MTH-2022-0018.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/7139/0/AUPSE-MTH-2022-0018.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (36 palabras)
13	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5304/1/AUPSE-TIC-2020-0005.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a>   Estudio de la evaluación del potencial de licuefacción de... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5304/1/AUPSE-TIC-2020-0005.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5304/1/AUPSE-TIC-2020-0005.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (34 palabras)
14	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5035/1/AUPSE-TIC-2019-0014.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a>   Caracterización geotécnica de la vía alterna Punta Carre... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5035/1/AUPSE-TIC-2019-0014.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5035/1/AUPSE-TIC-2019-0014.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (31 palabras)
15	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6946/1/AUPSE-TIC-2022-0013.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a>   Estudio comparativo entre la filosofía de diseño sismore... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6946/1/AUPSE-TIC-2022-0013.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6946/1/AUPSE-TIC-2022-0013.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)
16	 <a href="http://repositorio.uwsoc.occu.ec:8080/jspui/bitstream/46000/258/1/6-U75C-TCT-2016-0022.pdf.txt">repositorio.upse.edu.ec</a>   Diseño e implementación de un módulo de entrenamie... <a href="http://repositorio.uwsoc.occu.ec:8080/jspui/bitstream/46000/258/1/6-U75C-TCT-2016-0022.pdf.txt">http://repositorio.uwsoc.occu.ec:8080/jspui/bitstream/46000/258/1/6-U75C-TCT-2016-0022.pdf.txt</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (22 palabras)
17	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/567">repositorio.upse.edu.ec</a>   Repositorio Universidad Estatal Peninsula de Santa Clen... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/567">https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/567</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (18 palabras)
18	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/2291/1/AUPSE-TIC-2015-013.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a> <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/2291/1/AUPSE-TIC-2015-013.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/2291/1/AUPSE-TIC-2015-013.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (13 palabras)
19	 <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6442/1/AUPSE-TEN-2021-0119.pdf">repositorio.upse.edu.ec</a>   Calidad de atención del personal de enfermería según l... <a href="https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6442/1/AUPSE-TEN-2021-0119.pdf">https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6442/1/AUPSE-TEN-2021-0119.pdf</a>	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)

**Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)** Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

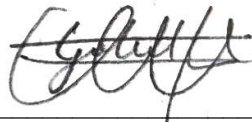
- 1  <https://yodata>
- 2  [https://ngmdb.usgs.gov/ngmdb/ngmdb\\_home.html](https://ngmdb.usgs.gov/ngmdb/ngmdb_home.html)
- 3  <http://alabamamaps.ua.edu/historicalmaps/sol survey/index.html>
- 4  <https://doi.org/10.3390/app122312089>
- 5  <https://doi.org/10.1080/13632460409350521>

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **GABRIEL ANDRÉS PILCO RODRÍGUEZ** y **DODDY EDUARDO GUTIÉRREZ REYES**, declaramos bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado “**HOMOLOGACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO MULTI-PERÍODO DEL ASCE 7-22 PARA SITIOS ESPECÍFICOS DEL ECUADOR**”, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**, Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, por lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedemos los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,



f. \_\_\_\_\_

**Gabriel Andrés Pilco Rodríguez**

**Autor de Tesis**

**C.I. 2450255548**



f. \_\_\_\_\_

**Doddy Eduardo Gutiérrez Reyes**

**Autor de Tesis**

**C.I. 0707049862**

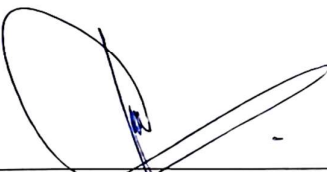
## CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Jaime Fernando Argudo Rodríguez Ph.D.

**TUTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Estudio de caso **“HOMOLOGACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO MULTI-PERÍODO DEL ASCE 7-22 PARA SITIOS ESPECÍFICOS DEL ECUADOR”**, elaborado por los **SRES. GABRIEL ANDRÉS PILCO RODRÍGUEZ** y **DODDY EDUARDO GUTIÉRREZ REYES**, egresados de la carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA** de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención de Título de **INGENIERO CIVIL**, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.

f. 

**Ing. Jaime Argudo Rodríguez, Ph. D.**

**C.I.: 0908377229**

**Cel.: 0993765637**

**Correo: jargudo@upse.edu.ec**

# CERTIFICACIÓN DE GRAMATOLOGÍA

*Certificación de Gramatólogo*

Lic. ALEXI JAVIER HERRERA REYES

*Magister En Diseño Y Evaluación*

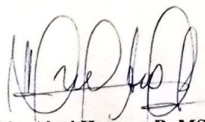
*De Modelos Educativos*

La Libertad, noviembre 3 del 2023.

## Certifica:

Que después de revisar el contenido del trabajo de integración curricular en opción al título de **INGENIERO/A CIVIL** de: **DODDY EDUARDO GUTIÉRREZ REYES & GABRIEL ANDRÉS PILCO RODRÍGUEZ**, cuyo tema es: **“HOMOLOGACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO MULTI-PERÍODO DEL ASCE 7-22 PARA SITIOS ESPECÍFICOS DEL ECUADOR”**, me permito declarar que el trabajo investigativo se encuentra idóneo y puede ser expuesto ante el jurado respectivo para la defensa del tema en mención.

Es todo cuanto puedo manifestar en honor a la verdad.



Lic. Alexi Herrera R, MSc.

Docente de Español A: Literatura

Cel: 0962989420

e-mail: alexiherrerareyes@hotmail.com

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera empezar dando gracias a Dios por darme la sabiduría para seguir un camino de bien y por las oportunidades que me ha brindado al transcurso de mi vida, por no soltar mi mano y ayudarme a levantarme contra las adversidades que han existido en mi camino como persona. Agradezco a mis padres por su dedicación, trabajo y esfuerzo para darme el apoyo incondicional en mi etapa de estudios y forjar en mí una personalidad de respeto, responsabilidad, puntualidad y humildad para sobrellevar las decisiones que tome en mi vida.

Agradezco a mi tutor por la sabiduría y el conocimiento que me ha brindado, para así mejorar mis cualidades como profesional, por saber escuchar y atender a las incertidumbres que he tenido, además de estar presente en un trabajo tan importante para mi etapa de estudiante universitario. A mis docentes no cabe la honra y orgullo de haberlos tenido como maestros en esta etapa llena de retos y sacrificios, siendo pilares fundamentales de conocimiento, para poder crear un Ingeniero con las capacidades necesarias para llevarlas a cabo en el transcurso de mi etapa profesional.

Agradecer a mis compañeros, los cuales estuvieron conmigo en mis momentos difíciles, que me ayudaron a levantarme de una situación complicada, con los cuales viví momentos de felicidad y tristeza, los mismos que crearon recuerdos que llevaré en mi corazón y mente de este periodo de mi vida. Al final, quisiera agradecer a la UPSE por abrirme las puertas de su institución y por dejarme adquirir el conocimiento y disciplina que debe tener un profesional para sobrellevar la vida laboral.

**Doddy Eduardo Gutiérrez Reyes**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, doy gracias a Dios por brindarme la oportunidad de llegar hasta aquí, por iluminar mi camino y darme fuerza en momentos de debilidad. Su amor y su presencia en mi vida han sido fundamentales en todo momento, y le agradezco por ser mi guía y mi protector. Agradezco a mi familia por su amor, su apoyo y su paciencia en cada etapa de mi formación. Han sido mi motor y mi motivación, y estoy agradecido por su incondicionalidad. Gracias a ellos, he encontrado siempre el refugio y la seguridad necesaria para avanzar.

También quiero agradecer a mi tutor, cuyo apoyo y dedicación han sido fundamentales en mi crecimiento académico y personal. Siempre estuvo dispuesto a escucharme, aconsejarme y guiarme en el camino correcto. Sus enseñanzas y su experiencia han sido valiosas para mí, y su guía me ha llevado hasta donde estoy hoy. Agradezco a mis docentes por su dedicación, su compromiso y su vocación. Me han brindado una educación de calidad, han compartido sus conocimientos y han fomentado en mí el amor por el aprendizaje. A ellos debo mi formación y mi crecimiento académico, y estoy agradecido por su labor en mi formación.

También quiero agradecer a mis amigos por su amistad, su compañía y su apoyo incondicional. Han sido mi red de apoyo en los momentos difíciles, mis cómplices en los momentos felices y han formado parte de los mejores recuerdos de esta etapa de mi vida. Por último, pero no menos importante, agradezco a la UPSE por ofrecerme una educación de calidad y por brindarme la oportunidad de crecer académicamente. Gracias a ella, he encontrado mi vocación y he adquirido las herramientas necesarias para enfrentar el mundo laboral. Estoy agradecido por la formación integral que me ha brindado y por todo lo que he aprendido en sus aulas.

**Gabriel Andrés Pilco Rodríguez**



# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	II
DEDICATORIA.....	III
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO ..;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	VII
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR .....;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
CERTIFICACIÓN DE GRAMATOLOGÍA.....	IX
AGRADECIMIENTOS .....	X
TABLA DE CONTENIDO.....	XII
LISTA DE FIGURAS .....	XVII
LISTA DE TABLAS .....	XX
RESUMEN.....	XXI
ABSTRACT .....	XXII
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.2. ANTEDECENTES .....	2
1.3. HIPÓTESIS .....	6
1.3.1. <i>Hipótesis General</i> .....	6
1.3.2. <i>Hipótesis Específica</i> .....	6
1.4. OBJETIVOS .....	6
1.4.1. <i>Objetivo General</i> .....	6
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	6
1.5. ALCANCE.....	7
1.6. VARIABLES .....	8

1.6.1. Variables Dependientes: .....	8
1.6.2. Variables Independientes.....	8
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. SISMICIDAD .....</b>	<b>9</b>
2.1.1. Fuentes Sísmicas.....	10
2.1.1.1. Fallas Corticales .....	10
2.1.1.2. Sismos por Subducción tectónica.....	10
2.1.2. Magnitud .....	11
2.1.3. Intensidad.....	12
2.1.4. Profundidad focal.....	13
2.1.5. Distancias a la falla.....	14
2.1.6. Mecanismo Focal.....	16
2.1.7. Velocidad de onda de corte (S) a 30 metros de profundidad ( $V_{s30}$ )	17
<b>2.2. REGISTROS SÍSMICOS .....</b>	<b>19</b>
2.2.1. Sismograma.....	19
2.2.2. Acelerogramas.....	19
2.2.3. Amplitud del Movimiento del suelo.....	19
2.2.4. Frecuencia y Período .....	20
<b>2.3. ESPECTROS DE RESPUESTA SÍSMICA .....</b>	<b>21</b>
2.3.1. Parámetros que influyen en el espectro de respuesta.....	21
2.3.1.1. Período fundamental del suelo ( $T_s$ ) .....	21
2.3.1.2. Aceleración máxima del suelo (PGA).....	22
2.3.1.3. Amortiguamiento ( $\xi$ ).....	22
2.3.1.4. Efecto de sitio.....	23
<b>2.4. ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO .....</b>	<b>23</b>
2.4.1. Peligro Sísmico.....	25
2.4.2. Vulnerabilidad.....	25
2.4.3. Riesgo Sísmico.....	25
2.4.4. Métodos de análisis del Peligro Sísmico.....	25
2.4.4.1. Análisis determinístico del Peligro Sísmico (DSHA).....	25
2.4.4.2. Análisis probabilístico del Peligro Sísmico (PSHA).....	27
2.4.5. Categorías de Riesgo .....	29
2.4.5.1. Categoría de Riesgo Múltiple.....	30

<b>2.5. ESPECTROS DE DISEÑO DE LA NORMA ECUATORIANA</b>	
<b>NEC-SE-DS-2015 .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.1. Construcción de Espectros de Diseño .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.2. Tipos de Suelo .....</b>	<b>32</b>
<b>2.6. ESPECTROS DE DISEÑO DEL ASCE 7-16.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.1. Generalidades.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6.2. Tipos de suelo (ASCE 7-16).....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.3. Parámetros de construcción del espectro elástico para suelos A, B,</b>	
<b>C, D y E. (ASCE 7-16) .....</b>	<b>35</b>
<b>2.6.4. Construcción espectro de diseño de 2 periodos. (ASCE 7-16) .....</b>	<b>35</b>
<b>2.7. ESPECTROS DE DISEÑO DEL ASCE 7-22.....</b>	<b>37</b>
<b>2.7.1. Espectros de diseño de dos periodos (ASCE 7-22).....</b>	<b>37</b>
<b>2.7.2. Espectros de Diseño Multi-período (ASCE 7-22).....</b>	<b>38</b>
<b>2.7.2.1 Parámetros de diseño del espectro sísmico multi-período.</b>	
<b>(ASCE 7-22).....</b>	<b>39</b>
<b>2.7.2.2 Tipos de suelo (ASCE 7-22).....</b>	<b>40</b>
<b>2.7.2.3 Comparación de cambios Normativos entre ASCE 7-22 y</b>	
<b>ASCE 7-16 para Espectros de Diseño del MCE<sub>R</sub>.....</b>	<b>41</b>
<b>2.7.2.4 Mapas de zonificación para valores S<sub>MS</sub> y S<sub>M1</sub> (ASCE 7-22)...</b>	<b>43</b>
<b>2.8. CRITERIOS DE HOMOLOGACIÓN DE ESPECTROS SÍSMICOS</b>	
<b>43</b>	
<b>2.8.1. Criterios de selección de sitio.....</b>	<b>44</b>
<b>2.8.2. Criterio de emparejamiento de las ordenadas espectrales.....</b>	<b>45</b>
<b>2.9. REGISTROS TIEMPO-HISTORIA .....</b>	<b>48</b>
<b>2.9.1. Análisis lineal tiempo-historia.....</b>	<b>49</b>
<b>2.9.2. Análisis no lineal tiempo-historia.....</b>	<b>49</b>
<b>CAPITULO III: METODOLOGÍA .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.1. Tipo .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.2. Nivel.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2. MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.1. Método .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.2. Enfoque .....</b>	<b>51</b>

3.2.3. <i>Diseño</i> .....	51
3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO .....	51
3.3.1. <i>Población</i> .....	51
3.3.2. <i>Muestra</i> .....	51
3.3.3. <i>Muestreo</i> .....	51
3.4. ESQUEMA DEL PROCESO DE HOMOLOGACIÓN.....	52
3.5. UBICACIÓN DE LOS SECTORES DE ESTUDIO .....	53
3.5.1. <i>Área y ubicación de estudio.</i> .....	53
3.5.2. <i>Características Geológicas del sitio.</i> .....	54
3.5.3. <i>Características sismotectónicas del sitio</i> .....	58
3.5.4. <i>Peligrosidad Sísmica.</i> .....	60
3.6. ELABORACIÓN DEL ESPECTRO OBJETIVO.....	61
3.6.1. <i>Espectro de diseño elástico.</i> .....	61
3.7. OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DE REFERENCIA .....	62
3.7.1. <i>Selección por zonificación sísmica y tipo de suelo</i> .....	64
3.7.1.1. Por Zonificación Sísmica .....	64
3.7.1.2. Por tipo y compacidad del suelo .....	67
3.7.2. <i>Selección por parámetros causales sismológicos</i> .....	68
3.7.2.1. Rango de magnitud de momento probable ( $M_w$ ).....	69
3.7.2.2. Distancia más cercana al plano de falla ( $R_{rup}$ ).....	70
3.7.2.3. Rango de velocidad de onda de corte promedio ( $V_{s30}$ ).....	70
3.7.2.4. Búsqueda de Ciudades usando el NGA-West2.....	71
3.8. EVALUACIÓN DE COINCIDENCIA ESPECTRAL.....	73
3.8.1. <i>Coincidencia en la forma espectral</i> .....	73
3.8.2. <i>Método de cálculo de proximidad espectral con el Factor <math>D_{rms}</math></i> .....	74
3.9. OBTENCIÓN DE REGISTROS TIEMPO-HISTORIA A PARTIR DEL ESPECTRO MULTI-PERÍODO.....	74
3.10. FLUJO OPERATIVO DE LAS VARIABLES.....	77
CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	79
4.1. ESPECTROS OBJETIVO PARA LAS 3 CIUDADES DE LA PROVINCIA DE SANTA ELENA .....	79
4.2. ESPECTROS DE REFERENCIA .....	82
4.2.1. <i>Espectros de Diseño coincidentes en la forma y tipo de suelo.</i> .....	82

4.2.2. Valores $D_{rms}$ de los intervalos de los espectros de respuesta. ....	86
4.2.3. Espectro Multi-Período de diseño y $MCE_R$ .....	87
4.3. REGISTROS TIEMPO-HISTORIA .....	89
4.4. ESPECTROS DE DISEÑO MULTI-PERÍODO HOMOLOGADOS PARA LAS CIUDADES DEMOGRÁFICAMENTE MÁS IMPORTANTES DEL PAÍS.....	91
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>92</b>
5.1. CONCLUSIONES.....	92
5.2 RECOMENDACIONES.....	93
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>102</b>
<i>ANEXO 1</i> .....	102
<i>ANEXO 2</i> .....	103
<i>ANEXO 3</i> .....	103
<i>ANEXO 4</i> .....	104
<i>ANEXO 5</i> .....	105

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Ilustración de la difusión de las ondas sísmicas</i> .....	9
<i>Figura 2: Nomograma de Richter</i> .....	12
<i>Figura 3: Escala Modificada de Mercalli</i> .....	13
<i>Figura 4: Distancia focal medida desde el foco hacia el epicentro</i> .....	14
<i>Figura 5: Distancias Fuente-sitio más utilizadas</i> .....	15
<i>Figura 6: Posibles escenarios en la localización Fuente-sitio</i> .....	16
<i>Figura 7: Ondas P vistas en diferentes ángulos de azimut desde un plano de falla</i> .....	17
<i>Figura 8: Historia Tiempo de desplazamiento, velocidad y aceleración</i> .....	20
<i>Figura 9: Procedimiento para estimar el espectro de respuesta usando la forma espectral normalizada</i> .....	22
<i>Figura 10: Espectro de diseño en forma de meseta (2 períodos)</i> .....	24
<i>Figura 11: Proceso de análisis de peligro sísmico determinístico</i> .....	26
<i>Figura 12: Proceso de análisis de peligro sísmico probabilístico</i> .....	28
<i>Figura 13: Categoría de Riesgo de Construcciones y edificios del ASCE 7-22</i>	30
<i>Figura 14: Parámetros y fórmulas de diseño de un espectro elástico de dos períodos</i> .....	31
<i>Figura 15: Clasificación de suelos del ASCE 7-16</i> .....	34
<i>Figura 16: Construcción del Espectro de diseño de 2 periodos</i> .....	37
<i>Figura 17: Forma general de los Espectros de diseño multi-período</i> .....	38
<i>Figura 18: Clasificación de los suelos del ASCE 7-22</i> .....	40
<i>Figura 19: Valores de aceleración mínimas para los espectros construidos por métodos determinísticos, considerando el máximo terremoto según un riesgo-objetivo</i> .....	42
<i>Figura 20: Opciones disponibles para la selección de espectros sísmicos</i> .....	46
<i>Figura 21: Esquema del proceso de homologación</i> .....	52
<i>Figura 22: Mapa de la provincia de Santa Elena</i> .....	54
<i>Figura 23: Mapa Geológico de Santa Elena</i> . ....	54
<i>Figura 24: Descripciones de los depósitos de suelo de Santa Elena</i> .....	55

<i>Figura 25: Marco estratigráfico de los suelos de la provincia de Santa Elena.</i>	56
<i>Figura 26: Proceso de subducción de la Placa Nazca.....</i>	58
<i>Figura 27: Mapa sismotectónico del golfo de Guayaquil, y segmento continental de Santa Elena.....</i>	59
<i>Figura 28: Zonificación Sísmica del Ecuador.....</i>	60
<i>Figura 29: Curva de peligrosidad sísmica para Santa Elena .....</i>	61
<i>Figura 30: Datos disponibles en el aplicativo ASCE 7 Hazard Tool.....</i>	63
<i>Figura 31: Parámetros de búsqueda del ASCE 7 Hazard Tool.....</i>	63
<i>Figura 32: Mapa de Zonificación sísmica (SMS) de EEUU.....</i>	66
<i>Figura 33: Mapa de Zonificación sísmica amplificado a la zona costera de California.....</i>	66
<i>Figura 34: Portal de ingreso del Espectro objetivo .....</i>	71
<i>Figura 35: Ingreso de parámetros sismológicos recabados .....</i>	72
<i>Figura 36: Ciudad(es) con parámetros sismológicos similares .....</i>	72
<i>Figura 37: Parámetros de búsqueda para las ordenadas espectrales.....</i>	75
<i>Figura 38: Espectros de respuesta sísmicos del registro comparados con el de diseño .....</i>	75
<i>Figura 39: Método de escalado en el NGA-West2.....</i>	76
<i>Figura 40: Espectros coincidentes con la media escalada hacia el espectro Multi-Período de Diseño .....</i>	76
<i>Figura 41: Espectro de Diseño NEC-15 para Chanduy.....</i>	79
<i>Figura 42: Espectro de Diseño NEC-15 para Salinas.....</i>	80
<i>Figura 43: Espectro de Diseño NEC-15 para Santa Elena.....</i>	81
<i>Figura 44: Comparación de Espectros de Diseño de Chanduy vs Napa (Suelo CD).....</i>	82
<i>Figura 45: Comparación de Espectros de Diseño de Chanduy vs Ukiah (Suelo CD).....</i>	83
<i>Figura 46: Comparación de Espectros de Diseño de Salinas vs Napa (Suelo D) .....</i>	83
<i>Figura 47: Comparación de Espectros de Diseño de Salinas vs Redwood City (Suelo D).....</i>	84
<i>Figura 48: Comparación de Espectros de Diseño de Santa Elena vs Oakland (Suelo E).....</i>	84

<i>Figura 49: Comparación de Espectros de Diseño de Santa Elena vs San Rafael (Suelo DE).....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 50: Espectros de Diseño multi-período homologados – Chanduy (Suelo CD).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 51: Espectros de Diseño multi-período homologados – Salinas (Suelo D).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 52: Espectros de Diseño multi-período homologados – Santa Elena (Suelo DE).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 53: Espectro de respuesta obtenido para la ciudad de Chanduy.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 54: Espectro de respuesta obtenido para la ciudad de Salinas.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 55: Espectro de respuesta obtenido para la ciudad de Santa Elena.....</i>	<i>90</i>



## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1: Datos de las ciudades a usar en el marco metodológico de estudio. ...</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 2: Valor Z y Caracterización del peligro Sísmico.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 3: Datos de los coeficientes obtenidos para las ciudades de estudio .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 4: Valores de aceleración máxima de los espectros de las ciudades. ....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 5: Equivalencia entre los tipos de suelos dados por el ASCE 7-22 y NEC-15.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 6: Ciudades que cuentan con coincidencia en los valores SMS y tipo de suelo. ....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 7: Datos de magnitud probable para las ciudades de estudio .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 8: Datos de cercanía a falla de las ciudades de estudio .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 9: Velocidades de ondas de corte de los suelos de las ciudades de estudio .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 10: Ciudades con parámetros sismológicos similares a las ciudades objetivo.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 11: Flujo operativo de las variables independientes .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 12: Flujo operativo de las variables dependientes.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 13: Ordenadas del Espectro de Diseño de Chanduy.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 14: Ordenadas del Espectro de Diseño de Salinas .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 15: Ordenadas del Espectro de Diseño de Santa Elena.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 16: Evaluación espectral Chanduy vs Napa (CA) – Tipo de suelo CD ...</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 17: Evaluación espectral Salinas vs Napa (CA) – Tipo de suelo D.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 18: Evaluación espectral Santa Elena vs Oakland (CA) – Tipo de suelo DE .....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 19: Valores espectrales de los modelos homologados .....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 20: Registros tiempo-historia asociados a los espectros multi-período homologados.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 21: Ciudades escogidas para la homologación de los Espectros de Diseño multi-período .....</i>	<i>91</i>

# “HOMOLOGACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO MULTI-PERÍODO DEL ASCE 7-22 PARA SITIOS ESPECÍFICOS DEL ECUADOR”

**Autores:** Pilco Rodríguez Gabriel Andrés, Gutiérrez Reyes Doddy Eduardo

**Tutor:** Ing. Jaime F. Argudo, Ph.D.

## RESUMEN

*Este trabajo de titulación consiste en proponer un método de homologación espectral entre los Espectros de Diseño con forma de meseta (2 períodos) de la norma ecuatoriana NEC-15 y los espectros de 2 períodos y multi-período (22 períodos) estandarizados por la normativa ASCE 7-22 para ciudades de los Estados Unidos. Se tiene como metodología obtener del aplicativo ASCE 7 Hazard Tool el espectro de respuesta de diseño de múltiples períodos del ASCE 7-22 y las historia-tiempo asociadas a dicho espectros de la plataforma del proyecto NGA-West2 de la base de datos de movimiento de suelo del PEER, para su uso en nuestro país como sismos característicos. En el capítulo 4 se presenta la metodología con los resultados cuantitativos de la homologación espectral para 3 ciudades con 3 tipos de suelo de la provincia de Santa Elena, obteniéndose resultados satisfactorios en cuanto a coincidencia en la forma y en las ordenadas espectrales, para cada clase de suelo considerado, además se encontraron registros historia-tiempo característicos a los Espectros de Diseño homologados. Adicionalmente en el Anexo 5, se presentan a través de fichas técnicas el resultado de la homologación de Espectros de Diseño para las 20 ciudades demográficamente más importantes del país, considerando los tipos de suelos existentes más relevantes en dichas ciudades.*

**PALABRAS CLAVE:** *Espectro de Diseño, Espectro Multi-período, Clases de suelo, ASCE 7-22, Registros tiempo-historia.*

# **“HOMOLOGATION OF ASCE 7-22 MULTI-PERIOD SEISMIC DESIGN SPECTRA FOR SPECIFIC SITES IN ECUADOR”**

**Autores:** Pilco Rodríguez Gabriel Andrés, Gutiérrez Reyes Doddy Eduardo

**Tutor:** Ing. Jaime F. Argudo, Ph.D.

## **ABSTRACT**

*This graduation thesis involves proposing a spectral matching method between the plateau-shaped Design Spectra (2 periods) of the Ecuadorian standard NEC-15 and the 2-period and multi-period spectra (22 periods) standardized by the ASCE 7-22 regulation for cities in the United States. The methodology involves obtaining both the multi-period design response spectrum from the ASCE 7 Hazard Tool and the corresponding time histories from the NGA-West2 project platform within the PEER ground motion database, for use in our country as characteristic earthquake ground motions. Chapter 4 presents the methodology and quantitative results of the spectral matching for three cities with three types of soil in the Santa Elena province. Satisfactory results were achieved in terms of spectral shape and spectral ordinates alignment for each considered soil class. Additionally, characteristic time history records matching the Design Spectra were found. Furthermore, in Annex 5, technical sheets present the results of the Design Spectra matching for the 20 most populous cities in the country, considering the most relevant soil types in those cities.*

**KEYWORDS:** *Design Spectrum, Multi-period Spectrum, Soil classes, ASCE 7-22, Time-history records.*

# **CAPITULO I: INTRODUCCIÓN**

Este trabajo de titulación se enfoca principalmente en la proposición un método que establezca relaciones eficientes y confiables que permitan la homologación entre los Espectros de Diseño en forma de meseta (2 períodos) de la normativa ecuatoriana NEC-15 y los espectros de 2 períodos y multi-período (22 períodos) estandarizados o normalizados por el ASCE 7-22 pertenecientes a las ciudades de los Estados Unidos.

La aplicación del proceso permitirá usar estos nuevos espectros multi-período para la búsqueda de registros sísmicos en cualquier base de datos de registros de terremotos mundiales, lo que posibilita usar estas respuestas espectrales reales para el análisis y diseño de estructuras en el Ecuador.

El aporte de este trabajo a la comunidad ingenieril es valioso, ya que se pretende generar Espectros de Diseño multi-período homologados para las ciudades más importantes del país, lo que permitirá a los ingenieros civiles disponer de estas herramientas para el rubro de la construcción en cualquier parte del Ecuador.

## **1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

Actualmente en el Ecuador se diseñan las edificaciones sismo resistentes usando formas espectrales genéricas de meseta basadas en el uso de dos períodos de transición de la forma espectral, según los parámetros geológicos y geofísicos inherentes a cada sitio. No obstante:

- a) Los Espectros de Diseño Sísmico multi-período permitirían capturar con amenaza uniforme la respuesta sísmica de las estructuras y proporcionarían información generalmente más adecuada de las amplitudes de las aceleraciones máximas para estructuras con períodos de vibración dentro de la meseta espectral o entre dos periodos de transición.

- b) Los Espectros de Diseño Sísmico multi-período del ASCE 7-22 pueden ajustarse para adaptarse a diferentes condiciones de sitio. Además, esta norma propone 3 tipos de suelos adicionales con respecto a su versión anterior, por lo que, al considerar estas nuevas condiciones específicas, se podría obtener una evaluación más detallada de la respuesta sísmica esperada.

Por tanto, con un mayor detalle en la caracterización del suelo, el modelamiento de la respuesta estructural podría ser más aproximado a su comportamiento real, lo que permitiría realizar evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo más confiables, optimizando los elementos y sistemas estructurales que requieren mayor refuerzo o atención en términos de resistencia sísmica y ductilidad.

## **1.2. ANTECEDENTES**

Los Espectros de Diseño sísmico han sido una herramienta que se ha ido desarrollando y refinando a lo largo de las décadas, y su origen se remonta a estudios pioneros realizados por ingenieros y sismólogos desde hace más de un siglo.

El 10 de marzo de 1933 se produce un terremoto de Long Beach California (USA), para el cual se registró data por primera instancia a través de un acelerograma. A partir de este registro se hizo una modificación de los coeficientes sísmicos (C) considerados en el UBC del año 1927. Se debe tener en cuenta que en este mismo lapso se propuso el concepto de espectros de respuesta, introducido por Biot 1933 y que después fuera mejorado por Housner en 1941. (Astroza Eulufi, 2007)

El primer Espectro de Diseño sísmico de la Ingeniería Sísmica fue desarrollado e implementado en 1952 por George W. Housner, quien propuso un método para calcular las fuerzas sísmicas en estructuras de varios grados de libertad en función de un espectro de respuesta sísmica basado en registros de terremotos. Esta propuesta es la que sentó las bases para la configuración de los espectros tal cual han evolucionado hasta la actualidad. (Astroza Eulufi, 2007)

La *American Society of Civil Engineers* (ASCE), en 1952 publica la primera versión de un espectro de diseño sísmico basado en una combinación de respuesta elástica y respuesta inelástica. Este espectro, conocido como "Espectro Elástico-Plástico", proporciona una aproximación inicial para estimar las fuerzas sísmicas en diferentes periodos de vibración de una estructura. (Clough & Penzien, 1993)

En 1957, se publica una nueva versión de los espectros basada en el concepto de "período fundamental de vibración" de la estructura, que es la característica más dominante del comportamiento dinámico de las estructuras. (Clough & Penzien, 1993)

El ASCE 7-10 cambia la manera de representar la amenaza sísmica, abandonando los mapas de Peligro Sísmico Uniforme para el Sismo Máximo Considerado (MCE), vigente hasta ese entonces, y los reemplaza por los mapas de Riesgo Sísmico Uniforme. Entra desde esa fecha la consideración el concepto del  $MCE_R$  (Máximo Sismo Considerado en base a un Objetivo de Riesgo), en el que la combinación de las curvas de amenaza sísmica y las curvas de fragilidad calculadas para las estructuras producen mapas que se presentan estimaciones uniformes de la probabilidad de colapso. (López Menjivar et al., 2021)

En el Ecuador, el primer Código Nacional de la Construcción se publica de manera emergente el 12 de febrero de 1951 bajo el mandato de Galo Plaza Lasso, luego del terremoto catastrófico ocurrido en Ambato el 5 de agosto de 1949 que provocó la muerte de 6 mil personas. Tal código es elaborado en las oficinas del Plan Regulador junto con el apoyo del ingeniero estadounidense Henry J. Brunner, basándose en normativas internacionales contemporáneas tales como el "*Uniform Building Code*" de los Estados Unidos y la "*Ordenanza General de Urbanismo y Construcción*" de Chile, entre otras. El documento contenía reglas para construcción sismo resistentes que lamentablemente no se aplicaron durante muchos años. (Quinatoa Martínez, 2022)

En 1976, el INEN publica la Guía de Construcciones Sismo Resistentes, documento basado en las 2 partes del proyecto CEC (Código Ecuatoriano de la Construcción),

que eran los “Requisitos de Diseño” y “Requisitos de la Construcción de Hormigón Armado”

La guía estaba basada en el *ACI 318-71* y el *Blue Book* de 1973 y diferentes investigaciones realizadas en Estados Unidos, Reino Unido, México, entre otros. El CEC se publica mediante el Registro Oficial N. 369 el 30 de junio de 1977 con 21 capítulos, con especial carácter emergente y de uso obligatorio, el cual mencionaba que todas las estructuras debían ser diseñadas para resistir tanto cargas verticales como horizontales, estas últimas se calculaban mediante coeficientes tales como: la importancia del edificio (I), tipo de estructura (K), condiciones del suelo (CS) y la carga muerta del edificio (W). (Quinatoa Martínez, 2022)

Los sismos subsiguientes que dejaron secuelas importantes en el país, tales como en las provincias de Napo (1987), Morona Santiago (1995) y sobre todo en la ciudad de Bahía de Caráquez (1998), fueron claves para la elaboración y posterior incorporación del nuevo *Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2001*, incluyendo la zonificación sísmica de las ciudades del país, así como las formas espectrales basadas en investigaciones locales. (Quinatoa Martínez, 2022)

Esta norma introduce el concepto de *Cortante Basal* de diseño, proponiendo una fórmula similar a la ecuación planteada por el *UBC* de 1994. Usando el coeficiente “Z” basado en la antes mencionada zonificación sísmica, el factor de reducción de resistencia “R”, el coeficiente sísmico C que estaría en función de la aceleración  $S^S$  correspondiente al período T de la estructura, además de coeficientes de configuración y regularidad estructural. (Quinatoa Martínez, 2022)

Luego de los eventos sísmicos de 2001, 2005 y 2008 ocurridos en Perú y en Chile en 2005 y 2010, se llevó a cabo un proceso de actualización de la normativa de acuerdo con los avances tecnológicos con el objetivo de mejorar los procesos de control en la construcción. En 2011 se conforma el Comité Ejecutivo NEC, el cual sería el encargado de consensuar, expedir y difundir la *Norma Ecuatoriana de la Construcción* del 2011, incluyendo el capítulo “*Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente*” o NEC-SE-DS. (Quinatoa Martínez, 2022)

Actualmente la *NEC-15* es la versión vigente, aprobada el 15 de diciembre del 2014 y publicada el 10 de enero de 2015. Respaldada por los estudios de sismicidad de la EPN-IGN, y se toma en consideración factores de clasificación de suelos ( $F_a$ ,  $F_d$  y  $F_s$ ). (Silva, 2019) Mantiene el procedimiento estándar de elaboración de espectros elásticos de diseño en forma de meseta cuyas aceleraciones parten de la selección del factor de Zona Sísmica “Z”, un valor de aceleración máximo en roca categorizado por sitio, y dos períodos característicos  $T_0$ , y  $T_c$ .

A finales del 2021 se publica la norma ASCE 7-22 en los Estados Unidos, la cual considera a los movimientos del suelo asociados al  $MCE_R$  como:

- a) Movimientos probabilísticos del suelo que se basan en riesgo uniforme.
- b) Movimientos determinísticos del suelo que se basan en el 84th percentil.
- c) Intensidad del movimiento del suelo en el plano horizontal, basado en la máxima respuesta de aceleración espectral.

En los documentos NEHRP 2020 y ASCE 7-22 la forma espectral característica del  $MCE_R$  será definida a través de Espectros multi-período (22 periodos). Allí se propone que un Espectro de Diseño multi-período representa una mejor aproximación para las estructuras con respecto a los contenidos de frecuencias de los movimientos de un suelo característico y mejora la confiabilidad de los parámetros de diseño sísmico obtenidos a partir de estos movimientos.

Además, pone a disposición un aplicativo para la obtención de estos espectros para diferentes ciudades de los Estados Unidos llamado ASCE 7 Hazard Tool. La norma ASCE 7-22 aclara que el uso de los espectros de dos períodos (forma de meseta) se mantiene como herramienta alternativa de diseño sismo resistente, lo que en esta investigación permitirá su homologación con los espectros de la norma ecuatoriana NEC-SE-DS-2015. (Sismica Institute, 2023)



## **1.3. HIPÓTESIS**

### **1.3.1. Hipótesis General.**

Los Espectros de Diseño de dos períodos y multi-período del ASCE 7-22 obtenidos del aplicativo ASCE 7 Hazard Tool, cuentan con similitud en su forma espectral con respecto a los de NEC-15 y podrán ser homologados bajo criterios predefinidos.

### **1.3.2. Hipótesis Específica.**

El uso del aplicativo NGA-West2 del PEER luego de la homologación espectral, permitirá definir las historias-tiempo asociadas al espectro multi-período que podrán contribuir a un mejor modelamiento estructural sismo resistente.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo General.**

Elaborar un método de homologación de los Espectros de Diseño sísmico multi-período del ASCE 7-22, para su aplicación en cualquier sitio específico del Ecuador.

### **1.4.2. Objetivos Específicos.**

**O.E1.:** Analizar los cambios normativos del ASCE 7-22 con respecto a su edición anterior, para la definición y obtención de los Espectros de Diseño sísmico multi-período.

**O.E2.:** Definir los criterios de homologación según el sitio, mediante la comparación de formas espectrales con aproximación en compatibilidad geotécnica y riesgo sísmico, para determinar parámetros de coincidencia espectral.

**O.E3.:** Elegir un conjunto de localidades del país que cuenten con parámetros sísmicos definidos y normados por la NEC-15, mediante un proceso cuidadoso de selección bajo criterios especificados, para la aplicación del método propuesto en la mayor cantidad de tipos de suelo posible, y de esta forma comprobar la eficiencia del método de homologación espectral propuesto.

**O.E4.:** Utilizar las respuestas espectrales homologadas para obtener mediante el *PEER Ground Motion Database de California*, registros de tiempo-historia coincidentes con el espectro homologado, que servirán para ejecutar análisis historia-tiempo de los sistemas estructurales y mejorar la comprensión de la respuesta dinámica a cargas sísmicas.

## **1.5. ALCANCE**

Esta investigación plantea descubrir un método que sea útil para proporcionar un espectro de diseño sísmico multi-período homologado con la norma ASCE 7-22 para cualquier sitio determinado del país. Su alcance cubrirá la homologación espectral para 20 ciudades con importancia demográfica, que sobrepasen los cien mil habitantes.

No obstante, en este procedimiento es indispensable asumir el perfil estratigráfico del suelo del sitio como requisito para realizar una homologación, ya que la definición del perfil de suelo es importante en un análisis de riesgo sísmico, debido a que éste tiene un efecto significativo en la forma en que las ondas sísmicas se propagan y amplifican.

## **1.6. VARIABLES**

### **1.6.1. Variables Dependientes.**

- Formas espectrales genéricas normalizadas.
- Espectros de Diseño homologados.

### **1.6.2. Variables Independientes.**

- Tipos de suelo de NEC-15 y ASCE 7-22.
- Aceleración máxima en roca (PGA).
- Aceleraciones máximas de los Espectros de Diseño.

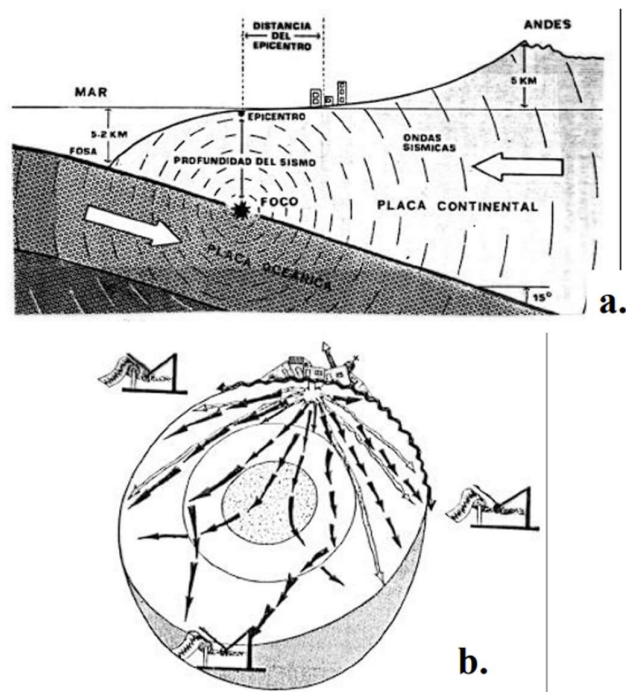
## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. SISMICIDAD

Al generarse un sismo o terremoto, se desarrolla una liberación de energía en el medio circundante. Esta liberación de energía provocará la ruptura del equilibrio isostático del interior de la tierra haciendo que se rompa o fracture. La ruptura, desencadenará en el medio una vibración con movimientos ondulatorios de la tierra; esta energía liberada que se propaga como ondas elásticas se llaman “ondas sísmicas”, que se transmitirán por el interior hasta la superficie de la tierra. (Tavera, 1993)

#### *Figura 1*

*a) Ilustración de la difusión de las ondas sísmicas. b) Esquema que muestra el registro de las ondas en algunas estaciones sismográficas ubicadas a diferentes distancias.*



*Nota. Tomado de Tavera (1993)*

### **2.1.1. Fuentes Sísmicas.**

Las fuentes sísmicas son regiones de la corteza terrestre donde el mecanismo de generación de un sismo puede ser caracterizado estadísticamente mediante una función de Gutenberg-Richter. Se estudian en varias disciplinas tales como la sismología, geología y la geofísica (Nuñez et al., 2005). A continuación, se detallan las de mayor incidencia:

#### ***2.1.1.1. Fallas Corticales.***

Las fallas corticales son aquellas que reproducirán sismos superficiales, es decir, dentro de los 30 primeros km de la corteza. Las fallas más potentes de este tipo son capaces de desarrollar eventos de magnitud  $M_w < 7.5$  con recurrencias de 1000 a 10000 años. (Cesen , 2022)

Estos sismos causan daños severos a las poblaciones cercanas al epicentro debido a su poca profundidad. Según Cesen (2022) existen tres tipos de fallas corticales:

- a) Falla de deslizamiento horizontal
- b) Falla de bloque hundido
- c) Falla de bloque levantado.

#### ***2.1.1.2. Sismos por Subducción tectónica.***

Son aquellos que se producen en las zonas de subducción, que son regiones donde una placa tectónica se desliza debajo de otra placa en un límite convergente produciendo una liberación repentina de energía acumulada.

Este tipo de límite se encuentra comúnmente en las zonas donde una placa oceánica se sumerge por debajo de una placa continental o cuando dos placas oceánicas convergen. La profundidad focal para este tipo de modelos de subducción es de hasta 125 km, es decir, desde profundidades superficiales a intermedias. (Cesen , 2022)

## 2.1.2. Magnitud

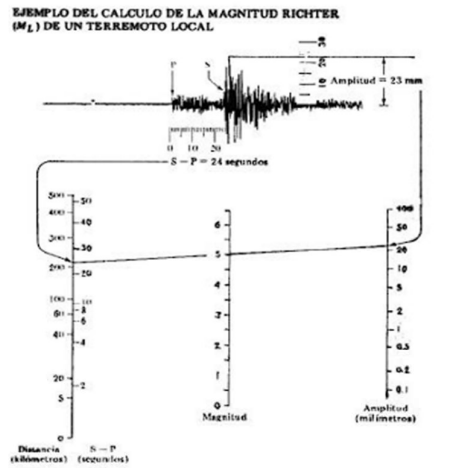
Según Tavera (1993), una escala de magnitud es aquella que medirá la cantidad de energía disipada en el foco de un terremoto y transformada y propagada en ondas sísmicas elásticas. Por lo tanto, la magnitud es una medida cuantitativa originada en las ondas elásticas desarrolladas por un terremoto, y observadas por medio de los sismógrafos en un sismograma.

En general, la magnitud es estimada a partir de cualquiera de las diferentes ondas que constituyen el registro del terremoto, tal como se definen a continuación (Shearer, 2009):

- a) **M<sub>L</sub>**: Es la Magnitud Local, se usa si se analizan registros de eventos ocurridos a distancias pequeñas a la estación sísmica.
- b) **M<sub>s</sub>**: Es la Magnitud de Ondas de Superficie, se usa si se desarrollan registros de ondas superficiales.
- c) **M<sub>b</sub>**: Es la magnitud de Ondas de Cuerpo, se usa cuando se utilizan registros de ondas P y S.
- d) **M<sub>d</sub>**: Es la Magnitud de Duración, medida en función de la duración total del registro de la señal sísmica en los sismogramas de período corto y a distancias regionales.
- e) **M<sub>w</sub>**: Conocida como Magnitud de Momento, estimada a partir del Momento Sísmico asociado a la energía liberada durante el terremoto.
- f) **M<sub>e</sub>**: Es la Magnitud de Energía, es una medida de la energía total liberada durante un terremoto.

**Figura 2**

*Nomograma de Richter*



Procedimiento para el cálculo de la magnitud local  $M_L$ :

1. Medir la distancia al foco utilizando el intervalo de tiempo entre las ondas S y P (S-P = 24 segundos).
2. Medir la altura de la máxima onda del movimiento sobre el sismograma (23 milímetros).
3. Trazar una línea recta entre los puntos correspondientes de las escalas de distancia (izquierda) y amplitud (derecha) para obtener la magnitud  $M_L=5.0$ .

*Nota. Nomograma para el cálculo de la magnitud local,  $M_L$  según los modelos de Richter. Tomado de Tavera (1993)*

### 2.1.3. Intensidad.

La intensidad sísmica es una medida no instrumental del impacto que produce el movimiento del suelo en las personas, objetos, en las construcciones y en la naturaleza. Se han desarrollado diferentes tipos de escalas, en las cuales los grados de intensidad se analizan dependiendo de una descripción de los efectos observados en el sitio. La intensidad será una medida en una escala en forma cualitativa de acuerdo con los daños observados. (Astroza et al., 2012)

Una de las escalas más conocidas es la escala modificada de Mercalli, esta escala tiene 12 grados y cada grado está representado por un número romano del I al XII, en donde cada grado de intensidad tendrá una descripción de daños. (Astroza et al., 2012)

**Figura 3**

*Escala Modificada de Mercalli*

Grado	Descripción
<b>I. Muy débil</b>	Imperceptible para la mayoría excepto en condiciones favorables. Aceleración menor a 0.5 Gal.
<b>II. Débil</b>	Perceptible sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios. Los objetos colgantes suelen oscilar. Aceleración entre 0.5 y 2.5 Gal.
<b>III. Leve</b>	Perceptible por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en pisos altos. Muchos no lo reconocen como terremoto. Los automóviles detenidos se mueven ligeramente. Sensación semejante al paso de un camión pequeño. Aceleración entre 2.5 y 6.0 Gal.
<b>IV. Moderado</b>	Perceptible por la mayoría de personas dentro de los edificios, por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche algunas personas pueden despertarse. Perturbación en cerámica, puertas y ventanas. Las paredes suelen hacer ruido. Los automóviles detenidos se mueven con más energía. Sensación semejante al paso de un camión grande. Aceleración entre 6.0 y 10 Gal.
<b>V. Poco fuerte</b>	La mayoría de los objetos se caen, caminar es dificultoso, las ventanas suelen hacer ruido. Aceleración entre 10 y 20 Gal.
<b>VI. Fuerte</b>	Lo perciben todas las personas, muchas personas asustadas suelen correr al exterior, paso insostenible. Ventanas, platos y cristalería dañadas. Los objetos se caen de sus lugares, muebles movidos o caídos. Revoque dañado. Daños leves a estructuras. Aceleración entre 20 y 35 Gal.
<b>VII. Muy fuerte</b>	Pararse es dificultoso. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables estructuras pobremente construidas. Mampostería dañada. Perceptible por personas en vehículos en movimiento. Aceleración entre 35 y 60Gal.
<b>VIII. Destructivo</b>	Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles colapsos. Daño severo en estructuras pobremente construidas. Mampostería seriamente dañada o destruida. Muebles completamente sacados de lugar. Aceleración entre 60 y 100 Gal.
<b>IX. Ruinoso</b>	Plúmico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes fuera de plomo. Grandes daños en importantes edificios, con colapsos parciales. Edificios desplazados fuera de las bases. Aceleración entre 100 y 250 Gal.
<b>X. Desastroso</b>	Algunas estructuras de madera bien construida destruidas. La mayoría de las estructuras de mampostería y el marco destruido con sus bases. Rieles doblados. Aceleración entre 250 y 500 Gal.
<b>XI. Muy desastroso</b>	Pocas, si las hubiera, estructuras de mampostería permanecen en pie. Puentes destruidos. Rieles curvados en gran medida. Aceleración mayor a 500 Gal.
<b>XII. Catastrófico</b>	Destrucción total con pocos sobrevivientes. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

*Nota.* Tomado de *Bomberos de Cajeme (2012)*

Muñoz (2002), menciona que a causa de que los primeros grados de la escala de intensidades tienen mucho que ver con el análisis subjetivo de cada persona y los grados medios con la valoración de daños en las estructuras. Se afirma que la intensidad resulta ser una medida cuantitativa de la subjetividad de las personas. Pero, por otro lado, el hecho de que las edificaciones modernas tengan menores daños para la sismicidad local que las edificaciones antiguas en épocas pasadas, complica la determinación de los valores de intensidad.

Aun así, la escala permite cuantificar de forma simple la intensidad del movimiento y establecer diferencias entre puntos desiguales en una región afectada, o así mismo conocer los efectos de diferentes sismos en un lugar determinado. (Muñoz A. , 2002)

#### **2.1.4. Profundidad focal.**

Es la distancia medida en línea recta desde el hipocentro de un terremoto hasta la superficie de la tierra cuando este produce su liberación de energía. La

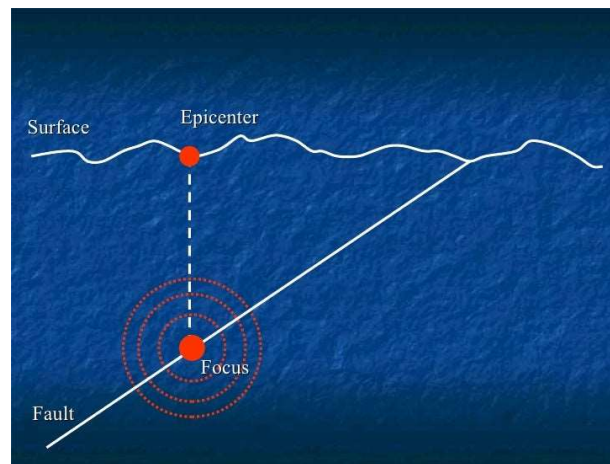


profundidad focal será importante para determinar el nivel de daño y parámetros que un terremoto tuvo en la superficie.

Por lo tanto, se ha considerado que un evento superficial está entre profundidades de 0.1 a 30 km representando a los terremotos corticales asociados a sistemas de fallas activas y capaces de deformar considerablemente la superficie del terreno; en cambio los eventos intermedios y profundos se asocian a profundidades de 40 a 700 km definiendo por ejemplo la zona de Benioff donde ocurre la inmersión de la placa Nazca. (Chunga K. , 2010)

#### ***Figura 4***

*Distancia focal medida desde el foco hacia el epicentro.*



*Nota. Tomado de Stuart Kirkham (2009)*

#### **2.1.5. Distancias a la falla.**

Se sabe que la distancia desde la fuente sísmica al sitio es una variable dentro de una función más compleja para la estimación de las intensidades sísmicas del suelo. La distancia a la falla proporciona un efecto de atenuación en la propagación de las ondas sísmicas en su trayectoria. (Quiroga, 2020)

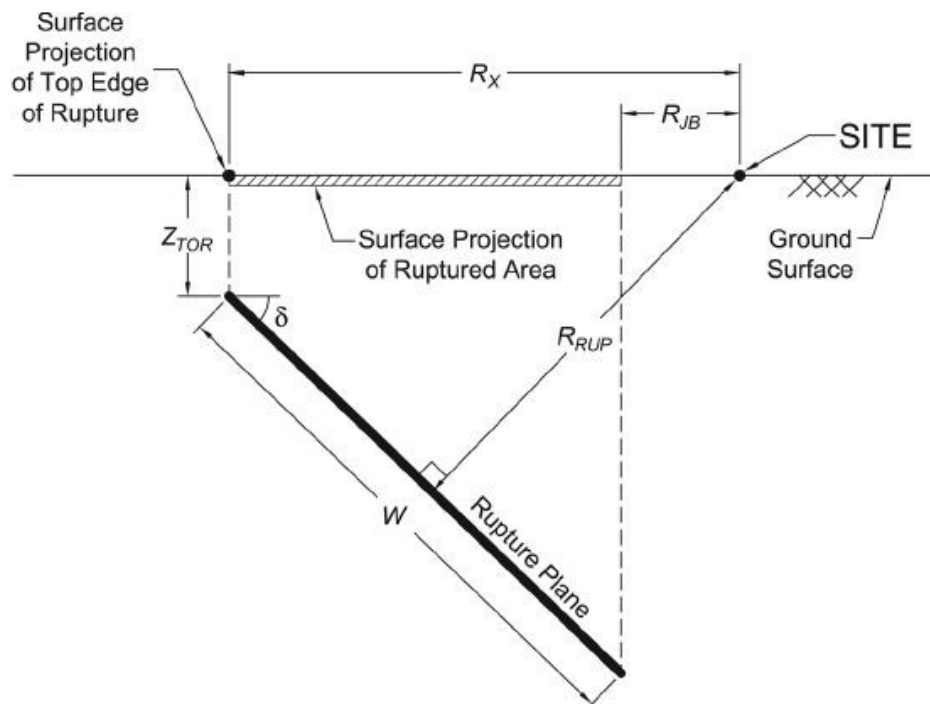
Bastias (2016), define que existen diferentes maneras de incorporar a la distancia como una variable que define la trayectoria entre la fuente sísmica y el sitio en el cual se estudia la intensidad sísmica. Las más usadas son:

- a)  $R_e$ : La distancia del epicentro hacia el sitio de interés, que caracteriza de forma aceptable la atenuación desde focos superficiales.
- b)  $R_h$ : La distancia desde el hipocentro del evento al sitio de interés, denominada por muchos como distancia hipocentral (mejor medida que la epicentral).
- c)  $R_{rup}$ : La distancia más corta entre el sitio y el plano de ruptura. Desde la resolución de mecanismos focales de rupturas, se puede usar la distancia mínima  $R_{rup}$  como la mejor caracterización de los efectos de atenuación.

La distancia al plano de ruptura es asociada a la equivalencia de la distancia hipocentral para eventos de magnitud pequeña. Mientras que las distancias sitio-fuente más usadas por su idoneidad en los modelos predictivos de intensidades superficiales son  $R_{rup}$  y  $R_h$ , las cuales se observan en las *figuras 5 y 6*. (Bastias, 2016).

**Figura 5**

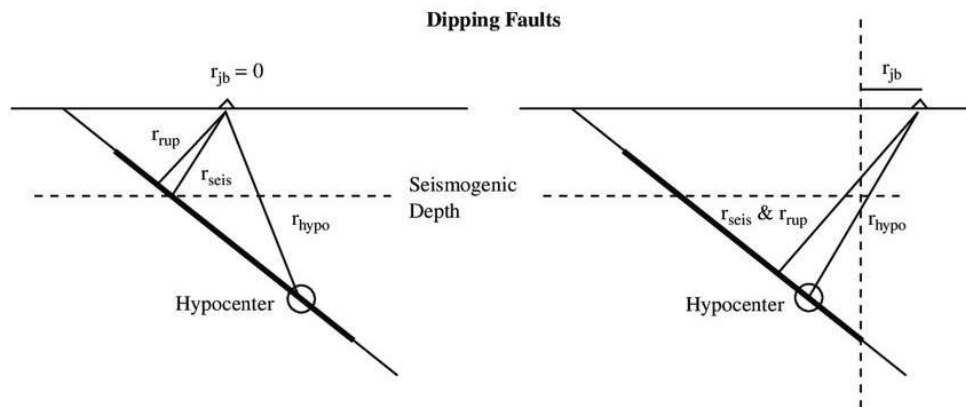
*Distancias Fuente-sitio más utilizadas*



*Nota. Tomado de Kakkamanos, Baise & Boore (2011)*

## Figura 6

Posibles escenarios en la localización Fuente-sitio



Nota: Tomado de Campbell (2002)

La intensidad sísmica que se registre en la superficie en general se reduce con la distancia, y la duración del evento registrado en un sitio aumenta con la distancia, esto debido al desfase en el arribo de las ondas sísmicas y la respuesta local del suelo del sitio. (Bastias, 2016)

### 2.1.6. Mecanismo Focal.

Los sismogramas registrados en diferentes distancias, así como ángulos de azimut son aplicados para estudiar la geometría de la falla o el llamado mecanismo focal. Por lo tanto, es importante entender el comportamiento de las ondas elásticas que se emiten desde la falla (Rodríguez Losada, 2019).

Para comprender como se caracteriza el mecanismo focal se incluyen dos tipos de ondas sísmicas:

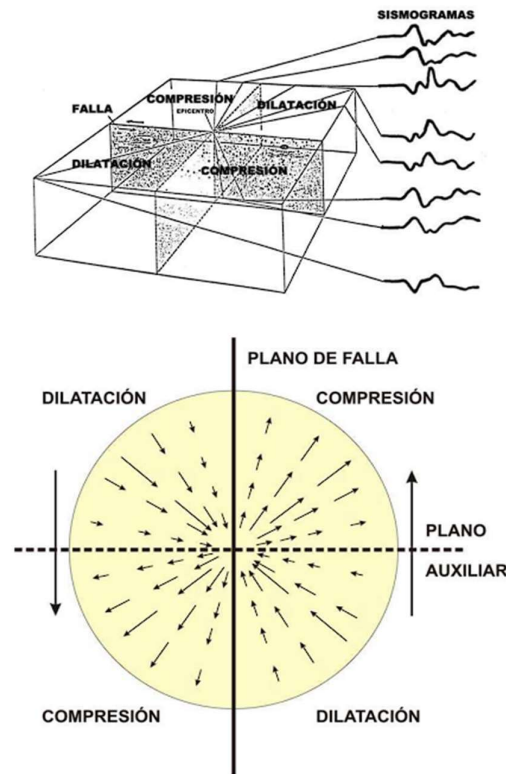
- a) **Ondas de cuerpo:** que se propagan desde el interior de la tierra, es decir desde el foco sísmico o hipocentro.
- b) **Ondas de superficie:** que se propagan de manera radial desde el epicentro sísmico a una velocidad mucho menor que las ondas de cuerpo.

Las ondas de cuerpo son más sencillas de usar en la determinación del mecanismo focal de un terremoto. La primera onda vertical de cuerpo en llegar a

un sensor sísmico especial desde un terremoto ocurrido a gran distancia es la de compresión en superficie (Onda P) donde el desplazamiento a la falla es por explosión en el foco. El movimiento producido por la primera onda P vertical será de tipo expansivo o de dilatación en superficie si el movimiento de la falla es por implosión al foco. (Rodríguez Losada, 2019)

**Figura 7**

*Ondas P vistas en diferentes ángulos de azimut desde un plano de falla*



*Nota. Tomado de Rodríguez Losada (2019)*

### **2.1.7. Velocidad de onda de corte (S) a 30 metros de profundidad ( $V_{s30}$ ).**

Schmidt (2012), menciona que uno de los parámetros más significativos en la actualidad para determinar la clasificación de los suelos es el denominado  $V_{s30}$ , que es el promedio de las velocidades de ondas cortantes de la estratigrafía del suelo desde la superficie hasta los 30 metros de profundidad.

Cuando se necesite determinar la velocidad de onda de corte en suelo es preferible emplear ensayos geotécnicos como SPT o CPT. Estos ensayos se pueden realizar en lotes pequeños con fines residenciales, aunque estos métodos alteran el suelo debido a la deformación por corte, su sencillez los vuelve muy prácticos de disponer. (Gutierrez et al., 2020)

Ahora bien, si se necesitara determinar la velocidad de onda de corte en roca o en terrenos extensos, es preferible usar ensayos Geofísicos tales como el de Refracción Sísmica, Tomografía Sísmica de ondas de corte (SASW), entre otras. Debido a que la información que se obtenga del subsuelo se hará a diferentes profundidades, sin la necesidad de realizar excavaciones o recolección de material, así como parámetros elásticos propios de la zona de estudio. (Monge, 2022)

Al definir el  $V_{s30}$ , se asume que el suelo a esa profundidad es el que afecta mayormente al comportamiento de las estructuras que se edifiquen sobre él. (Schmidt, 2012)

En la norma ASCE 7-16, en el *capítulo 20*, el  $V_{s30}$  se define mediante la siguiente fórmula:

### ***Fórmula 1***

*Fórmula del promedio de velocidad de onda de corte para varios estratos*

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$

*Nota. Tomado del ASCE (2022)*

Donde:

**d<sub>i</sub>**: el espesor de cada capa de suelo del perfil hasta alcanzar los 30 m de profundidad.

**v<sub>si</sub>**: La velocidad de la onda de cortante de cada estrato de suelo en m/s.

**n**: El número de capas hasta alcanzar los 30 m.

En este método de caracterización se analiza que las vibraciones ambientales estarán compuestas en forma trascendente por ondas superficiales y que la estructura del subsuelo está formada por estratos horizontales. (Schmidt, 2012)

## **2.2. REGISTROS SÍSMICOS**

### **2.2.1. Sismograma.**

Se obtienen de sismógrafos que dan señales que representan el tiempo y amplitud del movimiento de la tierra durante un terremoto. Además, recolectan los registros de velocidad, hora, intensidad y distancia de estas ondas sísmicas que se propagan desde el hipocentro hacia la superficie de estudio. (Portillo, 2023)

Párraga (2020) declara que, aunque es muy útil un sismograma para conocer la actividad del suelo durante un movimiento, dada la sensibilidad de los sismógrafos, los terremotos se registran con señales débiles a muy grandes distancias y eso hace que no se puedan usar como respuesta a sismos de gran magnitud.

### **2.2.2. Acelerogramas.**

“Un acelerograma se obtiene de un instrumento llamado acelerógrafo, los cuales muestran la variación de aceleraciones en el sitio determinado, que se obtienen en base a registros reales de terremotos, donde se consideran las acciones que se aplican en los apoyos de las estructuras y permiten generar un espectro de respuesta”. (Dlupal, 2020)

### **2.2.3. Amplitud del Movimiento del suelo.**

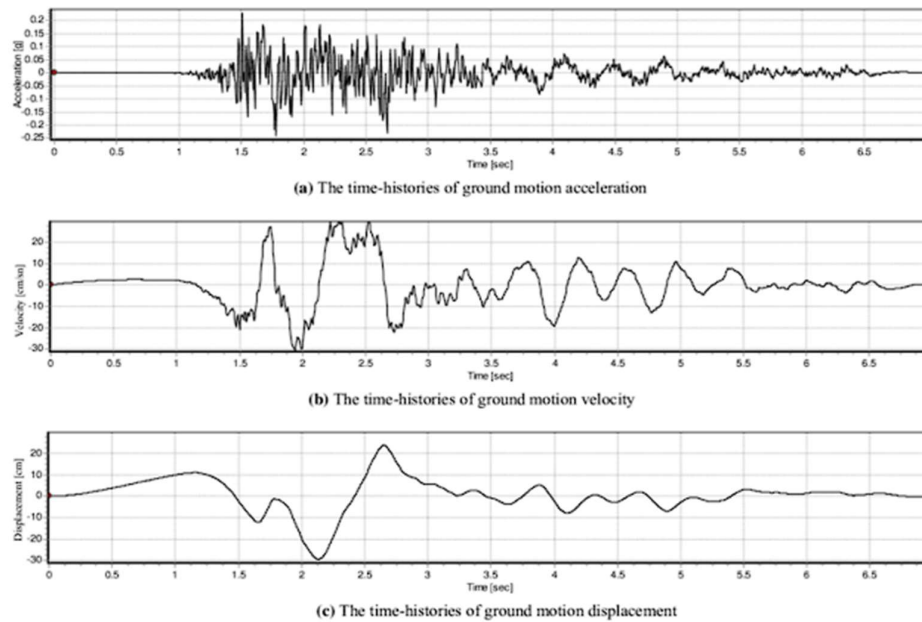
La amplitud puede ser medida como:

- a) Desplazamiento
- b) Velocidad
- c) Aceleración

En las siguientes graficas de Historia-tiempo se muestran las amplitudes medidas:

### **Figura 8**

*Historia Tiempo de desplazamiento, velocidad y aceleración*



*Nota. Tomado de Cavdar (2012)*

### **2.2.4. Frecuencia y Período.**

Según Párraga (2020), las señales proporcionadas durante un movimiento sísmico tienen una gran variedad de frecuencias. El contenido de frecuencia define la distribución de la amplitud del movimiento a lo largo de diferentes frecuencias. Cuando se produce un terremoto, varias ondas son transmitidas, donde el contenido de frecuencia puede variar según las propiedades del medio donde viajan.

La frecuencia de una onda sísmica se conceptualiza como el número de ciclos de vibración que ocurren en una unidad de tiempo (segundo). Por lo tanto, será inverso al periodo de vibración, que es nada más que el tiempo requerido para que se complete un ciclo de vibración.

## **2.3. ESPECTROS DE RESPUESTA SÍSMICA**

Rodríguez et al. (2016), exponen que un espectro de respuesta es una gráfica de la respuesta máxima expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés, que produce una acción dinámica determinada en una estructura considerada como un sistema de un grado de libertad.

Carvajal & Araya (2014) mencionan que el espectro de respuesta se ideó como un método práctico para describir las características del movimiento del suelo durante un terremoto y cómo afecta a las estructuras. También señalan que es una forma conveniente de resumir la respuesta máxima de diferentes sistemas estructurales lineales de un grado de libertad a una componente específica del movimiento del terreno. Además, anotan que proporciona un enfoque práctico para aplicar el conocimiento de la dinámica estructural al diseño de edificios y al establecimiento de requisitos de resistencia lateral en los códigos de construcción. (Carvajal & Araya, 2014)

### **2.3.1. Parámetros que influyen en el espectro de respuesta.**

#### ***2.3.1.1. Período fundamental del suelo ( $T_s$ ).***

Bermúdez et al. (2002) dicen que el periodo fundamental del suelo ( $T_s$ ), es uno de los parámetros más usados para valorar los efectos locales de los suelos al ser controlados por sollicitaciones sísmicas. En varias situaciones se ha podido hacer referencia a estos efectos en los daños observados en edificaciones, por el fenómeno de resonancia en el cual tanto el suelo como la estructura oscilan sincronizados y esta última se ve sometida a esfuerzos y desplazamientos mayores, los cuales pueden provocar el colapso de la estructura. (Bermudez et al., 2002)



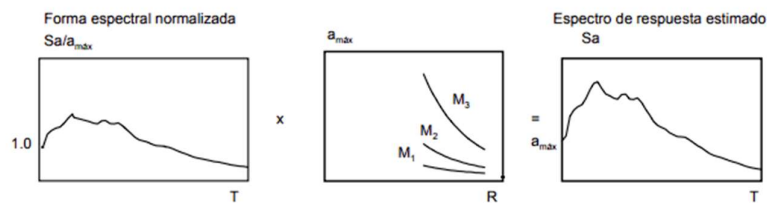
### 2.3.1.2. Aceleración máxima del suelo (PGA).

Según Cambell & Borzorgnia 1997, el PGA es la amplitud de la mayor aceleración absoluta registrada en un acelerograma en un sitio durante un sismo. Las vibraciones del terremoto se miden y registran en 3 direcciones, cuáles son las dos componentes horizontales , ortogonales (generalmente con dirección N-S y E-W) y una vertical. Siendo por lo general, las componentes horizontales de mayor amplitud.

En la *figura 9* se muestra un ejemplo del uso de la aceleración máxima del suelo. Donde  $S_a$  es la aceleración espectral,  $a_{max}$  es la aceleración máxima del terreno (PGA),  $T$  es el periodo de una oscilación de un grado de libertad,  $R$  es la distancia epicentral y  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$  son tres magnitudes para las cuales se obtendrá la variación de  $a_{max}$  con respecto a la distancia. Los factores de escalamiento se obtienen de una ley de atenuación para estimar los movimientos máximos del terreno. (Reyes et al., 2002)

**Figura 9**

*Procedimiento para estimar el espectro de respuesta usando la forma espectral normalizada*



*Nota: Tomado de Reyes y Miranda (2002)*

### 2.3.1.3. Amortiguamiento ( $\xi$ ).

Villafañe (2002), alude a que el amortiguamiento en una estructura tiene un comportamiento benéfico sobre la respuesta estructural dado que reduce los valores de desplazamiento, velocidad y aceleración máxima. Esto se debe que por acción del amortiguamiento existirá disipación de energía, en forma de calor y sonido, disminuyendo así la vibración de la estructura. (Villafañe & Crisafulli, 2002)

#### **2.3.1.4. Efecto de sitio.**

Chávez & Montalva, (2014) mencionan que el movimiento del suelo respecto a un sismo en una zona se asocia a parámetros de la fuente sísmica y de la atenuación de la energía sísmica acorde se propaga desde la fuente al sitio. Además, menciona que una de las herramientas que se utilizan para anticipar el movimiento sísmico son las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo (leyes de atenuación), y que en estudios de riesgo sísmico se conocen como movimiento de suelo estimado para un sitio con presencia de roca dura. (Chávez-García & Montalva, 2014)

Si un sitio no se halla en roca dura, su movimiento estimado se mostrará afectado por la amplificación dada por las irregularidades geológicas, la presencia de estratos de suelo, y la geometría irregular de las interfases entre medios con distintas propiedades. (Chávez-García & Montalva, 2014)

La amplificación del movimiento sísmico es lo que se denomina *efecto de sitio*, el cual cambiará la predicción del movimiento del terreno, para un sismo dado con respecto al movimiento en roca dura, a la misma distancia desde la fuente. (Chávez-García & Montalva, 2014)

### **2.4. ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO**

Salas (2021), define a los Espectros de Diseño de la siguiente manera: “El espectro de diseño se conceptualiza en base a movimientos sísmicos en algún sitio de interés, generando un conjunto de datos de curvas y líneas suavizadas que describirán cada nivel de amortiguamiento en cada periodo.” (Salas Mendoza, 2021)

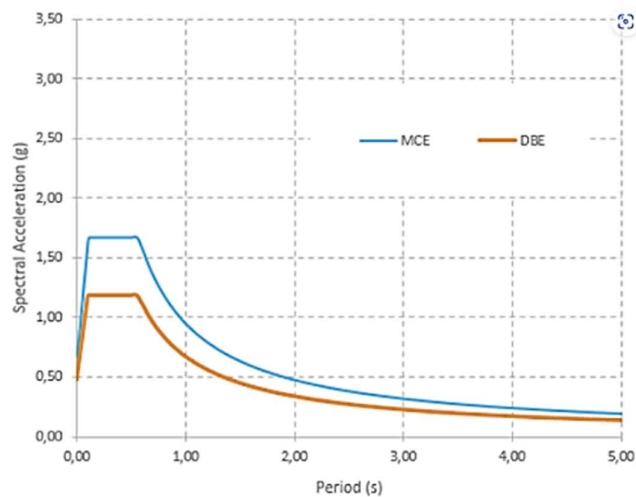
El Espectro de Diseño debe ser representativo de los movimientos del terreno registrados en el sitio durante los sismos pasados y proyectar la amenaza probable futura. Si no existen registros en el sitio, el Espectro de Diseño debe basarse en los movimientos del terreno registrados en otras instalaciones con condiciones similares (Chopra, 2014). Los factores que deben seleccionarse para modelar una similitud entre sitios incluyen la magnitud del sismo, la distancia del lugar de la

falla causante, el mecanismo de falla, la geología en la trayectoria de desplazamientos de las ondas sísmicas desde la fuente hasta el sitio, y las condiciones locales del terreno del sitio. (Armas, 2021)

Kramer (1996), alega que “los Espectros de Diseño son comúnmente suavizados con ecuaciones sencillas (recta, hipérbola), para cuyo propósito se combinan o envuelven los espectros de respuesta de múltiples movimientos. Además, menciona que el uso de Espectros de Diseño reconoce implícitamente la incertidumbre sobre el comportamiento dinámico del suelo y las propiedades estructurales al evitar fluctuaciones bruscas en las aceleraciones espectrales con pequeños cambios en el período estructural.” (Kramer, 1996)

### **Figura 10**

*Espectro de diseño en forma de meseta (2 períodos)*



*Nota. Tomado de Aguiar (2016)*

Para obtener información para los Espectros de Diseño, se requieren Espectros de respuesta de sitios característicos, que contengan datos de un análisis estadístico de una serie de movimientos sísmicos. Los Espectros de Diseño buscan simplificar las formas irregulares de los espectros de respuesta y proporcionar soluciones gráficas más simples, prácticas y seguras para la construcción de nuevas estructuras o la evaluación de la seguridad sísmica de las estructuras existentes en un sitio, todo con el objetivo de proporcionar soluciones para futuros eventos sísmicos probables. (Muñoz et al., 2013)

### **2.4.1. Peligro Sísmico.**

El peligro o amenaza se refiere a todo movimiento de suelo que puede exceder las características de una probabilidad de ocurrencia o excedencia para una aceleración máxima en un sitio que es proyectada para un periodo de exposición determinado. (Maraboto, 2018)

### **2.4.2. Vulnerabilidad.**

Se refiere a la susceptibilidad de un sistema a diversos niveles de daños probables que puede sufrir, como por ejemplo el impacto de un evento sísmico a una construcción, y la correspondiente intensidad del movimiento del terremoto como una medida cuantitativa. Por tanto, vulnerabilidad se describe como las posibles respuestas de un sistema de interés (estructuras), donde la respuesta aumenta o disminuye dependiendo del estado de este. (Maraboto, 2018)

### **2.4.3. Riesgo Sísmico.**

El Riesgo sísmico estará ligado al resultado entre la interacción entre el peligro y la vulnerabilidad, donde el trabajo esperado de una estructura se determinará mediante el comportamiento de un modelo probabilístico, que nos dirá si existe o no riesgo sísmico. (Maraboto, 2018)

$$Riesgo = Peligro * Vulnerabilidad$$

### **2.4.4. Métodos de análisis del Peligro Sísmico.**

#### ***2.4.4.1. Análisis determinístico del Peligro Sísmico (DSHA).***

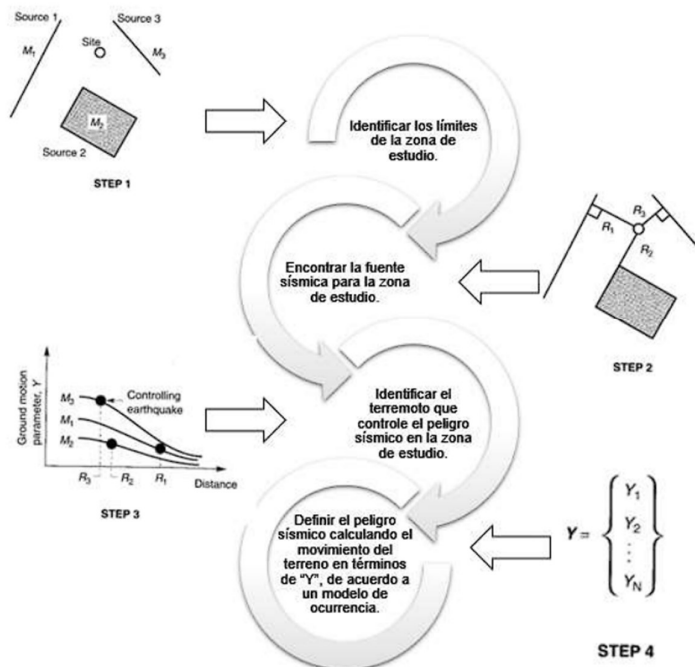
Ancco (2018) afirma que el DSHA se calcula en base al sismo definido con la magnitud que caracteriza a la única fuente que puede afectar al sitio seleccionado. Sin embargo, este análisis es muy singular, ya que al estar en función solamente de una fuente sísmica (máxima magnitud) y asociada a

la máxima amenaza considerada, no es recomendable usarlo cuando el sitio puede ser afectado por múltiples fuentes sísmicas con varios movimientos sísmicos de múltiples magnitudes características.

En la *figura 11* se observa el esquema en cuatro pasos para llegar al peligro sísmico determinístico, según la adaptación de Kramer (1996) donde hay múltiples fuentes sísmicas donde cada una de ellas es tratada determinísticamente por separado, como eventos probabilísticamente independientes y con modelos matemáticos separados que no se combinan probabilísticamente:

**Figura 11**

*Proceso de análisis de peligro sísmico determinístico*



*Nota. Tomado de Kramer (1996)*

Para realizar un DSHA que indica el peor caso de un sismo en un sitio de análisis, se debe cumplir con:

1. Definir las fuentes que provocan un terremoto en el sitio que se analizará. Se debe tener en cuenta la geometría y sismicidad de cada fuente. (Páiz Hernández & Bendaña Salinas, 2016)
2. Ubicar la distancia de la fuente al sitio. Por lo general, se selecciona la distancia menor existente entre la fuente y el sitio. (Páiz Hernández & Bendaña Salinas, 2016)
3. Escoger el sismo el cual definirá el potencial sísmico de la fuente de acuerdo con la intensidad en el sitio. Este se deberá escoger a comparación de otros sismos históricos generados por un nivel de intensidad en el lugar o en otros con características geotectónicas parecidas. (Páiz Hernández & Bendaña Salinas, 2016)
4. Designación de las funciones de atenuación que faciliten la selección completa de la amenaza en el sitio. Esto de acuerdo con el alcance del análisis, se necesitará la atenuación de aceleración, velocidad, desplazamiento, componentes espectrales, duración, etc. (Páiz Hernández & Bendaña Salinas, 2016)

#### ***2.4.4.2. Análisis probabilístico del Peligro Sísmico (PSHA).***

Ancco (2018), menciona que los métodos probabilísticos consideran la sismicidad que ha transcurrido anteriormente, para deducir las leyes de atenuación que “controlarán” la sismicidad futura. A diferencia del método determinístico que toma en cuenta la potencia de la falla de un sitio no expuesto a otra amenaza diferente a la falla única considerada, y se modela con la aceleración máxima del terremoto en el sitio.

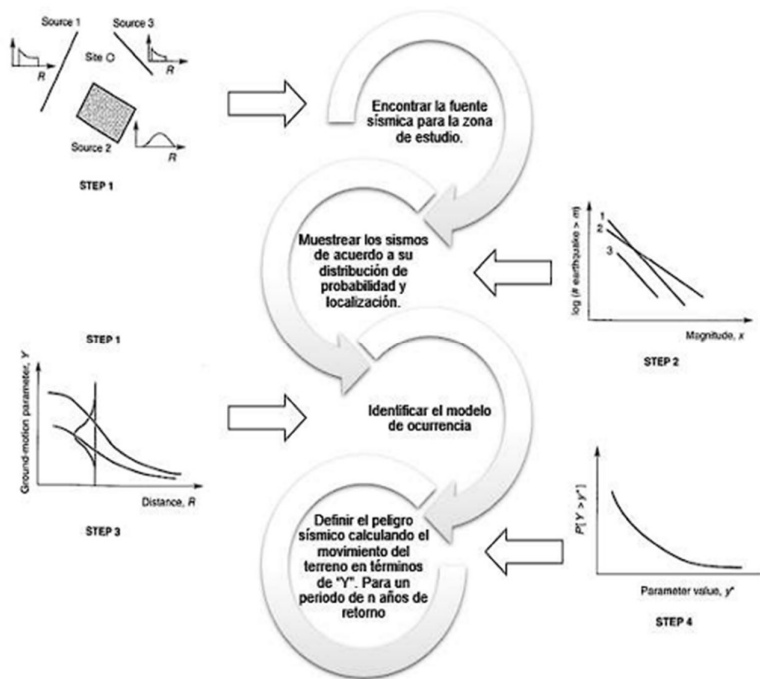
El método probabilístico definirá a la probabilidad de ocurrencia de una aceleración máxima en correspondencia con varios sismos de varias fuentes integradas dentro de un solo modelo. De esta manera será posible seleccionar el valor que corresponda al tipo de estructura que se quiere diseñar en base a un período de retorno definido.

Las inherentes incertidumbres de la sismología y la existencia de múltiples fuentes sísmicas han motivado que los métodos probabilísticos sean más usados hoy en día que los determinísticos, en zonas como Ecuador y otras regiones con múltiples fuentes sísmicas.

En la *figura 12* se muestra la esquematización en cuatro pasos para determinar el peligro sísmico probabilístico según la adaptación de Kramer (1996), donde el producto final es solo una curva de peligrosidad obtenida a partir del aporte de múltiples fuentes que se han procesado en una integral triple de convolución de funciones de probabilidades de las leyes de atenuación, Gutenberg-Richter y distancias focales.

**Figura 12**

*Proceso de análisis de peligro sísmico probabilístico*



*Nota. Tomado de Kramer (1996)*

El procedimiento para realizar un PSHA cumple con lo siguiente:

1. Encontrar las fuentes que provocan un terremoto en el sitio, en congruencia a su geometría y distribución de probabilidad hacia el punto

donde se producirá la ruptura. (Páiz Hernández & Bendaña Salinas, 2016)

2. Caracterización de la sismicidad de las fuentes seleccionadas (Ley de Gutenberg y Richter), de acuerdo con el registro histórico de eventos dados según la geometría antes determinada. La sismicidad se desarrollará por efecto de una curva de recurrencia de magnitudes, lo cual es puntual para cada fuente. (Páiz Hernández & Bendaña Salinas, 2016)
3. Designación de las Leyes de Atenuación que permitan definir la amenaza en el sitio. De acuerdo con el análisis al que se quiera llegar se deberá tener la caracterización de atenuación de aceleración, velocidad, desplazamiento, componentes espectrales de los anteriores parámetros, duración, etc. Como función de la distancia hipocentral y la magnitud se modelará la incertidumbre vinculada a la estimación de los anteriores parámetros. (Páiz Hernández & Bendaña Salinas, 2016)
4. Se modelará la función de probabilidad de distancias hipocentrales.
5. Para llegar al final, se combinarán estas incertidumbres relacionadas a la localización, tamaño y atenuación y así se obtendrá la curva de amenaza sísmica, la cual caracterizará la probabilidad de que una intensidad sea excedida o igualada en un periodo de tiempo determinado. (Páiz Hernández & Bendaña Salinas, 2016)

#### **2.4.5. Categorías de Riesgo.**

En ASCE 7-22 menciona que los edificios y otras estructuras se clasifican en función del riesgo para la vida, la salud y el bienestar de las personas, esto asociado a sus daños provocados por la naturaleza de su ocupación o uso. Esto se hace de acuerdo con la tabla 1.5-1 del ASCE 7-22, según los efectos asociados a inundaciones, vientos, tornados, nieve, terremotos y hielo. (ASCE, 2022)



A cada edificio u otra estructura se le asignará la categoría o categorías de riesgo aplicables más altas. Además, las cargas mínimas de diseño para las estructuras incorporan factores de importancia aplicables dados en la *tabla 1.5-2*, según como sea requerido en otras secciones de la norma. (ASCE, 2022)

Se permitirá la asignación de una edificación u otra estructura a múltiples categorías de riesgo con base al tipo de condición de carga que se esté evaluando. Cuando la norma o alguna otra norma especifique una categoría de ocupación para un fenómeno natural, la categoría de riesgo no se tomará inferior a la categoría de ocupación especificada por otro fenómeno natural. (ASCE, 2022)

### 2.4.5.1. *Categoría de Riesgo Múltiple.*

El ASCE 7-22, declara que cuando los edificios u otras estructuras estén divididos en partes con sistemas estructurales que sean independientes de cada uno, se permitirá que la clasificación para el diseño de cada parte independiente se clasifique independientemente de las otras partes. Además, que si algún sistema de edificio, tales como evacuación, la climatización o la energía eléctrica dependa de otros sistemas estructurales y este en un nivel de categoría inferior, dichas partes se asignarán a la categoría superior. (ASCE, 2022)

### *Figura 13*

#### *Categoría de Riesgo de Construcciones y edificios del ASCE 7-22*

**Table 1.5-1. Risk Category of Buildings and Other Structures for Flood, Wind, Tornado, Snow, Earthquake, and Ice Loads.**

Use or Occupancy of Buildings and Structures	Risk Category
Buildings and other structures that represent low risk to human life in the event of failure	I
All buildings and other structures except those listed in Risk Categories I, III, and IV	II
Buildings and other structures, the failure of which could pose a substantial risk to human life	III
Buildings and other structures not included in Risk Category IV, with potential to cause a substantial economic impact and/or mass disruption of day-to-day civilian life in the event of failure	
Buildings and other structures not included in Risk Category IV (including, but not limited to, facilities that manufacture, process, handle, store, use, or dispose of such substances as hazardous fuels, hazardous chemicals, hazardous waste, or explosives) containing toxic or explosive substances where the quantity of the material exceeds a threshold quantity established by the Authority Having Jurisdiction and is sufficient to pose a threat to the public if released*	
Buildings and other structures designated as Essential Facilities	IV
Buildings and other structures, the failure of which could pose a substantial hazard to the community	
Buildings and other structures (including, but not limited to, facilities that manufacture, process, handle, store, use, or dispose of such substances as hazardous fuels, hazardous chemicals, or hazardous waste) containing sufficient quantities of highly toxic substances where the quantity of the material exceeds a threshold quantity established by the Authority Having Jurisdiction and is sufficient to pose a threat to the public if released*	
Buildings and other structures required to maintain the functionality of other Risk Category IV structures	

\*Buildings and other structures containing toxic, highly toxic, or explosive substances shall be eligible for classification to a lower risk category if it can be demonstrated to the satisfaction of the Authority Having Jurisdiction by a hazard assessment as described in Section 1.5.3 that a release of the substances is commensurate with the risk associated with that risk category.

*Nota. Tomado del ASCE (2022)*

## 2.5. ESPECTROS DE DISEÑO DE LA NORMA ECUATORIANA NEC-SE-DS-2015

Los espectros de la normativa NEC-SE-DS-2015 se elaboran en base a categorización regional por zonas sísmicas y curvas de peligro sísmico, usando un factor  $Z$ .

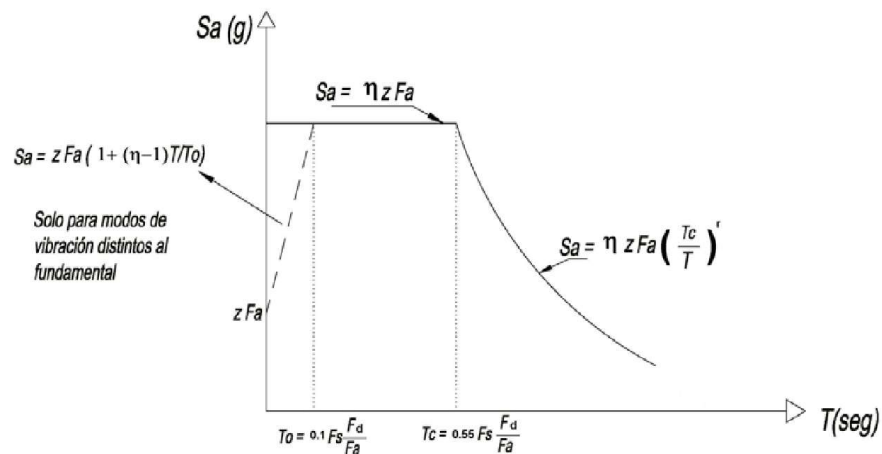
- a) Si se selecciona  $Z$  en base a la zonificación sísmica se usará el mapa y tabla de la sección 3.1.1 de la norma.
- b) Si se selecciona  $Z$  mediante las curvas de peligro sísmico para el diseño de estructuras de ocupación especial, se deben usar las gráficas de la sección 10.2 según corresponda, eligiendo en las ordenadas la tasa anual de excedencia, la cual se puede hallar calculando el inverso del período de retorno, la convergencia de la ordenada con la curva resultará en el valor de aceleración probable.

### 2.5.1. Construcción de Espectros de Diseño.

Los Espectros de Diseño elásticos se elaborarán de la siguiente manera:

#### Figura 14

Parámetros y fórmulas de diseño de un espectro elástico de dos períodos



Nota. Tomado de NEC (2015)

Donde:

$\eta$  = Razón entre la aceleración espectral  $S_a$  ( $T=0.1$  s) y el PGA para el período de retorno seleccionado donde:

$\eta = 1.8$ , para provincias de la costa (Excepto Esmeraldas).

$\eta = 2.48$ , para provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos.

$\eta = 2.60$ , para provincias del oriente.

$F_a$  = Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto.

$F_d$  = Coeficiente de amplificación de suelo considerando efectos de sitio.

$F_s$  = Coeficiente de amplificación de suelo considerando el efecto no lineal del suelo.

$S_a$  = Ordenadas de la respuesta espectral, en términos de aceleración en función de la gravedad, esta es dependiente del período fundamental.

$T$  = Período fundamental de vibración de la estructura.

$T_0$  = Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones.

$T_C$  = Período límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones.

$Z$  = Aceleración máxima en roca, expresada en función de la gravedad.

$r$  = Factor para el diseño elástico dependiente de la ubicación geográfica del proyecto, donde será igual a 1 para todos los suelos con excepción del tipo E, y 1.5 para los del tipo E.

Las tablas 3, 4 y 5 del *capítulo 3.2.2* de la norma para obtener los factores y coeficientes  $F_a$ ,  $F_d$  y  $F_s$  estarán disponibles en la sección 1 de anexos. (NEC, 2015)

### **2.5.2. Tipos de Suelo.**

En la *sección 3.2.1* de NEC-SE-DS-2015 se definen 6 tipos de suelos para el Ecuador. Se dice que las características usadas en la parametrización de los tipos de suelo son las correspondientes a los 30 m superiores del perfil del suelo, ya sea tipo A, B, C, D y E (véase anexo 2). Si dentro de los 30 m se tienen perfiles con estratigrafías diferenciables deben subdividirse, dando un subíndice  $i$  que va desde  $n$  en la parte inferior de los 30 m superiores del perfil hasta 1 en la superficie.

Para suelos Tipo F se aplicarán otros criterios expuestos en la *sección 10.5.4* y la respuesta no deberá calcularse más allá de los 30 m superiores del perfil de suelo, aun cuando dicho perfil sea de espesor más significativo. (NEC, 2015)

## **2.6. ESPECTROS DE DISEÑO DEL ASCE 7-16**

### **2.6.1. Generalidades.**

En la norma de ASCE 7-16 se establecen Espectros de Diseño de 2 periodos, donde su construcción será definida a partir de los parámetros del  $MCE_R$ . Los espectros tendrán diferentes características para las distintas clases de sitio y sismicidad. (ASCE, 2016)

**MCE:** Es el Máximo Terremoto Considerado. En la sección 11.2 del ASCE 7-16 se hace referencia a que el MCE se define con los conceptos propuestos en dicha sección de la norma. (ASCE, 2016).

**MCE<sub>R</sub>:** Es el *Máximo Terremoto Considerado según Riesgo-Objetivo* asociado a la respuesta para la aceleración del movimiento del suelo. Alude a los efectos más severos del terremoto considerado, determinados para la mayor respuesta a los movimientos de tierra horizontales y con ajuste por *riesgo-objetivo*. Cuando se requiera un espectro de respuesta  $MCE_R$ , se lo determinará multiplicando el espectro de respuesta de dos períodos por 1.5. (ASCE, 2016)

**MCE<sub>G</sub>:** Es la *Media Geométrica del Máximo Terremoto Considerado*. Son los efectos más severos producidos por el Terremoto Máximo Considerado, que se determinan a partir de la media geométrica de la aceleración máxima ( $PG_M$ ) sin ajuste por riesgo objetivo. (ASCE, 2016)

**PG<sub>M</sub>:** Es la *Aceleración Máxima del Suelo* ajustada por efectos de sitio y usada para la evaluación de licuación, propagación lateral de ondas, asentamientos sísmicos, y otros efectos relacionados con el suelo. (ASCE, 2016).

## 2.6.2. Tipos de suelo (ASCE 7-16).

La clasificación de suelos del ASCE 7-16, es la siguiente:

### Figura 15

#### Clasificación de suelos del ASCE 7-16

**Table 20.3-1 Site Classification**

Site Class	$V_s$	$\bar{N}$ or $\bar{N}_{60}$	$\bar{s}_u$
A. Hard rock	>5,000 ft/s	NA	NA
B. Rock	2,500 to 5,000 ft/s	NA	NA
C. Very dense soil and soft rock	1,200 to 2,500 ft/s	>50 blows/ft	>2,000 lb/ft <sup>2</sup>
D. Stiff soil	600 to 1,200 ft/s	15 to 50 blows/ft	1,000 to 2,000 lb/ft <sup>2</sup>
E. Soft clay soil	<600 ft/s	<15 blows/ft	<1,000 lb/ft <sup>2</sup>
	Any profile with more than 10 ft of soil that has the following characteristics:		
	— Plasticity index $PI > 20$ ,		
	— Moisture content $w \geq 40\%$ ,		
	— Undrained shear strength $\bar{s}_u < 500$ lb/ft <sup>2</sup>		
F. Soils requiring site response analysis in accordance with Section 21.1	See Section 20.3.1		

*Note:* For SI: 1 ft=0.3048 m; 1 ft/s=0.3048 m/s; 1 lb/ft<sup>2</sup>=0.0479 kN/m<sup>2</sup>.

*Nota. Tomado del ASCE (2016)*

Donde tiene que los suelos:

- a) **Clase A y B:** Corresponden a Roca.
- b) **Clase C:** Suelos muy densos y roca blanda.
- c) **Clase D:** Suelos Rígidos.
- d) **Clase E:** Arcilla blanda, cuando un sitio no reúna los criterios para la clase de suelo F y exista un espesor total de arcilla blanda superior a 3 m y su  $S_u < 500$  psf,  $w > 40\%$ , y  $IP > 20$  se clasificará como clase E. (ASCE, 2016)
- e) **Clase F:** Cuando ninguna de las características de la *Figura 15* se cumpla se podrá clasificar como F y corresponde a un estudio específico del sitio. (ASCE, 2016)

### 2.6.3. Parámetros de construcción del espectro elástico para suelos A, B, C, D y E. (ASCE 7-16).

**S<sub>MS</sub>**: Parámetro de aceleración de respuesta espectral amortiguada al 5% en períodos cortos, ajustado para efectos del sitio según lo determinado de acuerdo con la *Sección 11.4.3*.

**S<sub>M1</sub>**: Parámetro de aceleración de respuesta espectral amortiguada al 5% en un período de 1 segundo, ajustado para efectos del sitio según lo determinado de acuerdo con la *Sección 11.4.3*.

**S<sub>DS</sub>**: Parámetro de aceleración de respuesta espectral de diseño en períodos cortos.

**S<sub>D1</sub>**: Parámetro de aceleración de respuesta espectral de diseño en un período de 1 segundo.

### 2.6.4. Construcción espectro de diseño de 2 periodos. (ASCE 7-16).

El ASCE 7-16 menciona que, para determinar un espectro de diseño, será necesario conocer los coeficientes de sitio y riesgo objetivo de los parámetros de aceleración del Espectro de respuesta del terremoto máximo considerado ( $MCE_R$ ), estos parámetros de aceleración para periodos cortos ( $S_{MS}$ ) y a 1s ( $S_{M1}$ ), están ajustados por efectos de sitio, y podrán ser determinados por las siguientes ecuaciones. (ASCE, 2016)

$$S_{MS} = F_a * S_s \quad (11.4-1)$$

$$S_{M1} = F_v * S_1 \quad (11.4-2)$$

Donde:

- a) **S<sub>s</sub>**: Obtenido de los mapas de zonificación del capítulo 22.
- b) **S<sub>1</sub>**: Obtenido de los mapas de zonificación del capítulo 22.

ASCE 7-16 menciona que los coeficientes de sitio  $F_a$  y  $F_v$  son definidos en la *tabla 11.4-1* y *11.4-2*, que se adjuntan en el *anexo 3*. Cuando se selecciona la clase de sitio tipo D por defecto con la *sección 11.4.3*, el valor de  $F_a$  no será inferior a 1.2, cuando se utilice el procedimiento de cálculo simplificado en la *sección 12.14*, el valor de  $F_a$  se determinará de acuerdo con la *sección 12.14.8.1* y no será necesario determinar los valores de  $F_v$ ,  $S_{MS}$  y  $S_{M1}$ . (ASCE, 2016)

Los parámetros de aceleración del espectro de diseño para el terremoto de diseño a periodos cortos,  $S_{DS}$  y a 1 periodo  $S_{D1}$ , estarán determinados por las ecuaciones *11.4-3* y *11.4-4* respectivamente. (ASCE, 2016)

$$S_{MS} = 1.5 * S_{DS} \quad (11.4-3)$$

$$S_{M1} = 1.5 * S_{D1} \quad (11.4-4)$$

Cuando un espectro de diseño es requerido por esta norma y no se usen los procedimientos de la *sección 11.4.8* para la realización de un espectro de diseño desarrollado específicamente para el sitio, el espectro de respuesta de diseño será el indicado por la *figura 16* y se obtiene con los siguientes pasos:

1. Para periodos menores que  $T_0$ , el espectro de respuesta de diseño,  $S_a$ , se tomara con la *ecuación 11.4-5*.

$$S_a = S_{DS}(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0}) \quad (11.4-5)$$

2. Para periodos mayor o igual a  $T_0$  y menor o igual que  $T_s$ , la aceleración del Espectro de respuesta de diseño,  $S_a$ , será determinado igual a  $S_{DS}$ .
3. Para periodos más grande que  $T_s$  y menor o igual que  $T_L$ , la aceleración del Espectro de respuesta de diseño  $S_a$ , se determinará con la *ecuación 11.4-6*.

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (11.4-6)$$

4. Para periodos mayores que  $T_L$ ,  $S_a$  será determinado por la *ecuación 11.4-7*.

$$S_a = \frac{S_{D1} \cdot T_L}{T^2} \quad (11.4-7)$$

Donde:

**T:** Es el periodo fundamental de la estructura (s).

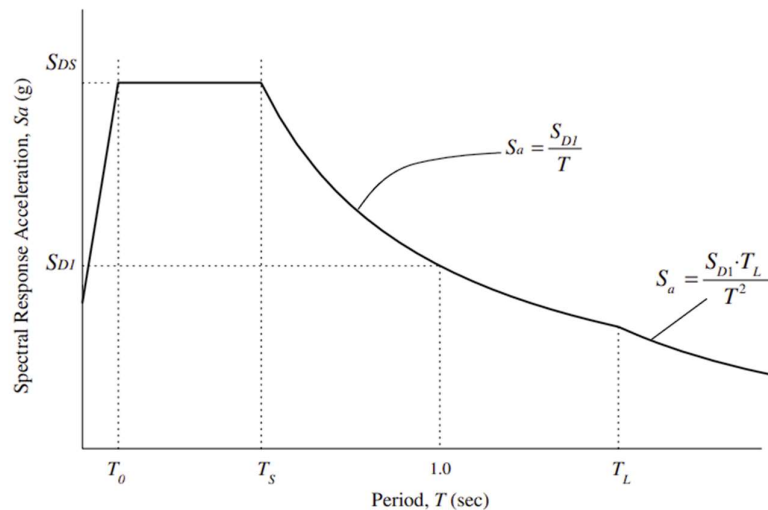
**To:** Es igual a la fórmula  $0.2(S_{D1}/S_{DS})$ .

**Ts:** Es igual a  $S_{D1}/S_{DS}$ .

**TL:** Es la transición del periodo largo periodos.

### Figura 16

Construcción del Espectro de diseño de 2 periodos



Nota. Tomado del ASCE (2016)

## 2.7. ESPECTROS DE DISEÑO DEL ASCE 7-22

### 2.7.1. Espectros de diseño de dos períodos (ASCE 7-22).

El método de construcción de los espectros de 2 períodos en el ASCE 7-22 se mantiene con respecto a su versión anterior, especificado en la *sección 2.6.4* de este documento, con la diferencia de que ya no se usarán los factores  $F_a$ ,  $F_v$ , y  $S_s S_1$  para obtener  $S_{MS}$  y  $S_{M1}$ , sino más bien mapas de zonificación para hallarlos por locación o también usando el aplicativo ASCE 7 Hazard Tool para obtener el  $S_{MS}$ ,  $S_{M1}$  y  $PG_{AM}$ . (ASCE, 2022)



Una importante diferencia entre ASCE 7-16 y ASCE 7-22, es que en ASCE 7-16 el valor de  $S_{M1}$  corresponde a  $T=1$  seg y el valor de  $S_{MS}$  corresponde a  $T= 0.2$  seg, mientras que en ASCE 7-22 el 90% del valor de la aceleración espectral máxima ( $S_a$ ) calculada dentro de los rangos 0.2 a 5 segundos corresponderá al  $S_{DS}$ , y para  $S_{D1}$  se tomara el valor máximo del producto  $(T)(S_a)$ , para periodos desde 1 a 2 seg para sitios con  $V_s > 442$  m/s y con periodos de 1 a 5 seg para sitios con  $V_s < 442$  m/s, donde  $S_{MS}$  y  $S_{M1}$  se tomaran como  $1.5(S_{DS})$  y  $1.5(S_{D1})$ . (ASCE, 2022)

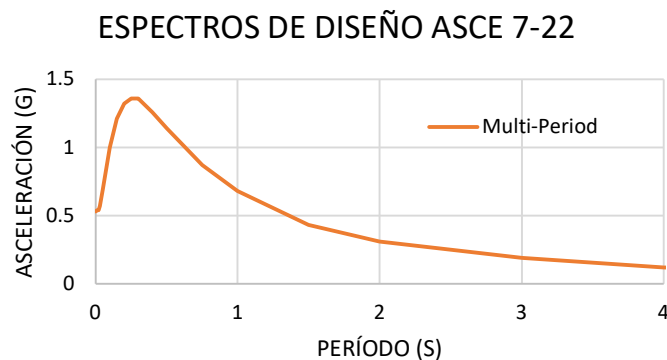
Esta diferencia entre los términos  $S_{MS}$  y  $S_{M1}$  serán trascendentes porque permite una mejor correspondencia o ajuste entre el espectro de dos periodos y el de multi-periodos calculados conforme ASCE 7-22.

### 2.7.2. Espectros de Diseño Multi-período (ASCE 7-22).

Los Espectros de Diseño sísmico multi-período permiten modelar con riesgo sísmico uniforme la respuesta sísmica de una estructura y proporcionan información de las amplitudes de las aceleraciones máximas, calculadas para 22 periodos de vibración. Estas mejoras permiten definir una respuesta espectral mucho más uniforme para diferentes condiciones de sitio sobre un rango amplio de periodos. Con la aparición de este espectro de diseño multi-período en el ASCE 7-22, se define al  $MCE_R$  con mayor detalle matemático a partir de 22 periodos diferentes (desde el  $PGA_M$  hasta 10 s) según el tipo de suelo en el sitio de interés. (Sismica Institute, 2023)

**Figura 17**

*Forma general de los Espectros de diseño multi-período*



### **2.7.2.1 Parámetros de diseño del espectro sísmico multi-período. (ASCE 7-22).**

En la *sección 11.2* se indica que los parámetros de diseño sísmico  $S_S$ ,  $S_I$ ,  $S_{MS}$ ,  $S_{MI}$  y  $PGA_M$  de multi-período, con un 5% de amortiguamiento de un espectro de respuesta para un *Máximo Terremoto Considerado como Riesgo-Objetivo* ( $MCE_R$ ), son obtenidos de Mapas o de la Geodatabase de la USGS mediante la plataforma ASCE 7 Hazard Tool, y ya no mediante los factores  $F_a$ ,  $F_v$ , y las aceleraciones  $S_S$  y  $S_I$ ; que en ASCE 7-22 son invisibles por ser calculados según el tipo de suelo y sitio. (ASCE, 2022)

Posteriormente, en los requisitos para el diseño de la respuesta espectral, en la *sección 11.4.5* en el apartado de *excepciones* se indica que:

- a) Cuando se realiza un análisis de la respuesta del suelo para un sitio específico de acuerdo con la *sección 11.4.7*, relativa a los procedimientos para modelar la respuesta dinámica para suelos de tipo F, los espectros de respuesta serán basados en parámetros de aceleración máxima  $PGA_M$ , y se determinarán de acuerdo con la *sección 21.3*, donde se indica que los valores  $S_a$  están directamente relacionados a los valores  $S_{MS}$  obtenidos de la Geodatabase de la USGS.
- b) Cuando no se tienen valores de la Geodatabase de la USGS, entonces el espectro de respuesta de diseño se realizará con el método clásico, es decir, un espectro de respuesta de 2 períodos.

La *sección 11.4.5* proporciona las características de los Espectros de Diseño multi-período:

- a) En valores discretos de período  $T$ , igual a 0.0s, 0.01s, 0.02s, 0.03s, 0.05s, 0.075s, 0.1s, 0.15s, 0.2s, 0.25s, 0.3s, 0.4s, 0.5s, 0.75s, 1.0s, 1.5s, 2.0s, 3.0s, 4.0s, 5.0s, 7.5s, y 10s, la respuesta espectral de diseño amortiguada al 5%, el parámetro de aceleración  $S_a$ , se tomará como 2/3 del espectro de respuesta  $MCE_R$  amortiguado al 5%, de varios periodos de

Geodatabase de diseño sísmico de la USGS para la clase de sitio específico.

- b) En cada período de respuesta  $T$ , de menos de 10s y no igual a uno de los valores discretos del período  $T$  enumerados en el punto anterior,  $S_a$  se determinará por interpolación lineal entre los valores de  $S_a$  del punto anterior.
- c) En cada período de respuesta  $T$  superior a 10s,  $S_a$  será tomado como el valor de  $S_a$  en el período a los 10s del ítem anterior, factorizado por  $10/T$ , donde el valor de  $T$  es menor o igual a la del período de transición de período largo  $T_L$ , y se tomará como el valor de  $S_a$  al período del 10s factorizado por  $10T_L/T^2$ , donde el valor de  $T$  es mayor que la del período de transición de largo plazo  $T_L$ .

### 2.7.2.2 Tipos de suelo (ASCE 7-22).

Los suelos del ASCE 7-22 se especifican a continuación:

#### Figura 18

#### Clasificación de los suelos del ASCE 7-22

Table 20.2-1. Site Classification.

Site Class	$V_s$ Calculated Using Measured or Estimated Shear Wave Velocity Profile (ft/s)
A. Hard rock	>5,000
B. Medium hard rock	>3,000 to 5,000
BC. Soft rock	>2,100 to 3,000
C. Very dense sand or hard clay	>1,450 to 2,100
CD. Dense sand or very stiff clay	>1,000 to 1,450
D. Medium dense sand or stiff clay	>700 to 1,000
DE. Loose sand or medium stiff clay	>500 to 700
E. Very loose sand or soft clay	≥500
F. Soils requiring site response analysis in accordance with Section 21.1	See Section 20.2.1

Note: For SI: 1 ft = 0.3048 m; 1 ft/s = 0.3048 m/s.

Nota. Tomado del ASCE (2022)

- a) **Suelos A, B y BC:** Roca rígida, medianamente rígida y blanda.
- b) **Suelo C:** Arena muy densa o arcilla rígida.

- c) **Suelo CD:** Arena densa o arcilla muy rígida.
- d) **Suelo D:** Arena media densa o arcilla rígida.
- e) **Suelo DE:** Arena suelta o arcilla media rígida.
- f) **Suelo E:** Arena muy suelta o arcilla blanda.
- g) **Suelo F:** Suelos que tienen un estudio específico de sitio según *sección 21.1.*

Los tipos de suelos están definidos fundamentalmente en términos de rango de la velocidad de onda de corte, incluidos los 6 suelos de ASCE 7-16 (A, B, C, D, E y F), añadiendo 3 nuevos suelos (BC, CD y DE), que proporcionarían una mejor resolución del  $V_{s30}$  en el sitio y la amplificación de la intensidad asociada.

En la *sección 11.4.2*, se señala que cuando no se conocen con suficiente detalle el  $MCE_R$ , la definición “por defecto” del tipo de suelo se debe basar en los valores espectrales más críticos de los períodos pertenecientes a los sitios de clase C, CD y D, a menos que una autoridad local dictamine que la clase de suelo presente es tipo CD, E o F.

### ***2.7.2.3 Comparación de cambios Normativos entre ASCE 7-22 y ASCE 7-16 para Espectros de Diseño del $MCE_R$ .***

La edición 7-22, contiene cambios significativos con respecto a la versión del ASCE 7-16, sobre todo por la aparición del aplicativo ASCE 7 Hazard Tool que cuenta con un modelamiento racional autoadaptable, que afecta principalmente a los siguientes apartados del documento:

- a) Los criterios de diseño sísmico contemplados en capítulo 11.
- b) Los requerimientos de clasificación de suelo del capítulo 20.

- c) Los procedimientos de análisis para obtener espectros específicos de sitio del capítulo 21.
- d) Los mapas de movimientos sísmicos del terreno del capítulo 22.
- e) Adición de aplicativo en línea para obtención de espectros de dos períodos y multi-períodos.

Entre los cambios significativos del capítulo 21 se encuentra la adición del siguiente concepto:

**PGA<sub>G</sub>:** Que es el límite inferior de la aceleración máxima en el suelo calculada con la media geométrica del *Terremoto Máximo Considerado* por el método determinístico, y estará dado como un valor mínimo para cada periodo en cada tipo de suelo especificado según se denota en la figura 19, que muestra la *tabla 21.2-1* del ASCE 7-22.

**Figura 19**

*Valores de aceleración mínimas para los espectros construidos por métodos determinísticos, considerando el Máximo Terremoto según un riesgo-objetivo*

**Table 21.2-1. Deterministic Lower Limit Values of MCE<sub>R</sub> Response Spectra and PGA<sub>G</sub> (g).**

Period T(s)	Site Class							
	A	B	BC	C	CD	D	DE	E
0.00	0.50	0.57	0.66	0.73	0.74	0.69	0.61	0.55
0.01	0.50	0.57	0.66	0.73	0.75	0.70	0.62	0.55
0.02	0.52	0.58	0.68	0.74	0.75	0.70	0.62	0.55
0.03	0.60	0.66	0.75	0.79	0.78	0.70	0.62	0.55
0.05	0.81	0.89	0.95	0.96	0.89	0.76	0.62	0.55
0.075	1.04	1.14	1.21	1.19	1.08	0.90	0.71	0.62
0.10	1.12	1.25	1.37	1.37	1.24	1.04	0.82	0.72
0.15	1.12	1.29	1.53	1.61	1.50	1.27	1.00	0.87
0.20	1.01	1.19	1.50	1.71	1.66	1.44	1.15	1.01
0.25	0.90	1.07	1.40	1.71	1.77	1.58	1.30	1.15
0.30	0.81	0.98	1.30	1.66	1.83	1.71	1.44	1.30
0.40	0.69	0.83	1.14	1.53	1.82	1.80	1.61	1.48
0.50	0.60	0.72	1.01	1.38	1.73	1.80	1.68	1.60
0.75	0.46	0.54	0.76	1.07	1.41	1.57	1.60	1.59
1.0	0.37	0.42	0.60	0.86	1.17	1.39	1.51	1.58
1.5	0.26	0.29	0.41	0.60	0.84	1.09	1.35	1.54
2.0	0.21	0.23	0.31	0.45	0.64	0.88	1.19	1.46
3.0	0.15	0.17	0.21	0.31	0.45	0.63	0.89	1.11
4.0	0.12	0.13	0.16	0.24	0.34	0.47	0.66	0.81
5.0	0.10	0.11	0.13	0.19	0.26	0.36	0.49	0.61
7.5	0.063	0.068	0.080	0.11	0.15	0.19	0.26	0.31
10	0.042	0.045	0.052	0.069	0.089	0.11	0.14	0.17
PGA <sub>G</sub>	0.37	0.43	0.50	0.55	0.56	0.53	0.46	0.42

*Nota: Tomado del ASCE (2022)*

En ASCE 7-22 se eliminan los criterios en este capítulo acerca de las estructuras aisladas sísmicamente y estructuras con amortiguamiento con un valor de  $S_1$  igual o mayor a 0.6, y estructuras con tipos de suelo en donde se condicionan los valores de  $S_1$ .

Las categorías de riesgo sísmico mencionados en la *sección 11.6* se mantienen, sin embargo, el *apartado 11.8.3* añade criterios con requerimientos específicamente para categorías de diseño sísmico D a F, que presentan problemas de suelos con potencial de licuación.

En la *sección 11.9*, las fórmulas propuestas para el diseño de movimiento de suelo vertical son corregidas, modificando constantes y añadiendo un coeficiente  $F_{md}$ , el cual es un factor para convertir la ordenada espectral de la media geométrica a una ordenada espectral de dirección máxima.

#### ***2.7.2.4 Mapas de zonificación para valores $S_{MS}$ y $S_{M1}$ (ASCE 7-22).***

Los mapas de zonificación sísmica del capítulo 22 han sido reemplazados en ASCE 7-22 para mostrar los valores  $S_{MS}$  y  $S_{M1}$ , en vez de los anteriores  $S_S$  y  $S_1$  del ASCE 7-16, mostrando relación y coherencia con los datos que se pueden obtener de la Geodatabase de la USGS mediante la plataforma ASCE 7 Hazard Tool.

## **2.8. CRITERIOS DE HOMOLOGACIÓN DE ESPECTROS SÍSMICOS**

Para determinar si un espectro de diseño sísmico obtenido de cualquier fuente es válido para ser homologado en un sitio diferente, es importante definir si los parámetros intrínsecos de los modelos a comparar son lo suficientemente semejantes para precisar su coincidencia espectral.

Parte de estos parámetros pueden ser:

- a) Rango de períodos ( $T$ )
- b) Ordenadas espectrales ( $S_a$ )
- c) Rango de Magnitud de Momento Sísmico ( $M_w$ )
- d) Distancia aproximada de sitio-falla ( $R$ )
- e) Velocidad de propagación de ondas S en función del suelo ( $V_{s30}$ )
- f) Período de retorno ( $Tr$ )
- g) Máxima aceleración en roca (PGA)

Hallar una convergencia entre todos estos factores en conjunto puede complicarse debido a la complejidad y disponibilidad de datos. Los criterios detallados a continuación, ayudarán a encontrar con eficiencia un Espectro de Diseño de referencia (como los del ASCE 7-22), lo suficientemente coincidente en sus ordenadas, con otro definido como objeto de homologación (NEC-15 en Ecuador).

### **2.8.1. Criterios de selección de sitio.**

Aquib et al. (2022), propone en su estudio aplicar al menos uno de los 3 criterios de selección de sitio para la elección de registros sísmicos, que son:

- a) Selección basada en características sismológicas y del sitio.
- b) Selección basada en valores espectrales.
- c) Selección basada en parámetros causales y forma espectral.

Para hallar estos Espectros de referencia, se podrán usar al menos los siguientes en base a los datos disponibles:

- a) Búsqueda por zonificación sísmica (valores espectrales) y tipo de suelo.
- b) Búsqueda por parámetros causales sismológicos.

La búsqueda por zonificación sísmica se basa en encontrar lugares que tengan un valor de aceleración máxima espectral lo más parecido posible al sitio o ciudad objetivo, esto mediante los mapas de zonificación sísmica realizados por las instituciones competentes, y para reducir la cantidad de candidatos a considerarse

como Espectros de referencia, se clasifican los sitios potenciales por clases de suelo, para de esta manera tener la menor cantidad de espectros a comparar.

La búsqueda por parámetros causales puede ser más difícil por la escasez de información y a la vez más contundente, debido a que involucra parámetros tales como, magnitud de momento probable ( $M_w$ ), distancia más cercana al plano de ruptura ( $R_{rup}$ ) y el valor de la velocidad de onda de corte a los primeros 30 metros de profundidad ( $V_{s30}$ ).

Estos parámetros en el Ecuador rara vez son disponibles para un sitio, debido a que demandan estudios previos especializados, que pueden no haberse hecho en la zona de estudio.

### **2.8.2. Criterio de emparejamiento de las ordenadas espectrales.**

Ambraseys et al. (2004), señalan que es posible encontrar registros tiempo-historia y Espectros de Diseño de referencia que coincidan con un espectro de diseño para un sitio específico en su forma, como el obtenido de un código de construcción.

Ambraseys aclara que, hasta el momento de su investigación, no existía una guía clara o normalizada de cómo realizar la coincidencia espectral, por tanto, propone una. Debido a que ningún espectro de respuesta observado coincidirá exactamente con un espectro requerido, se puede emplear aquellos cuyos valores coincidan en un grado específico usando el emparejamiento espectral propuesto por Boomer y Acevedo (2004).

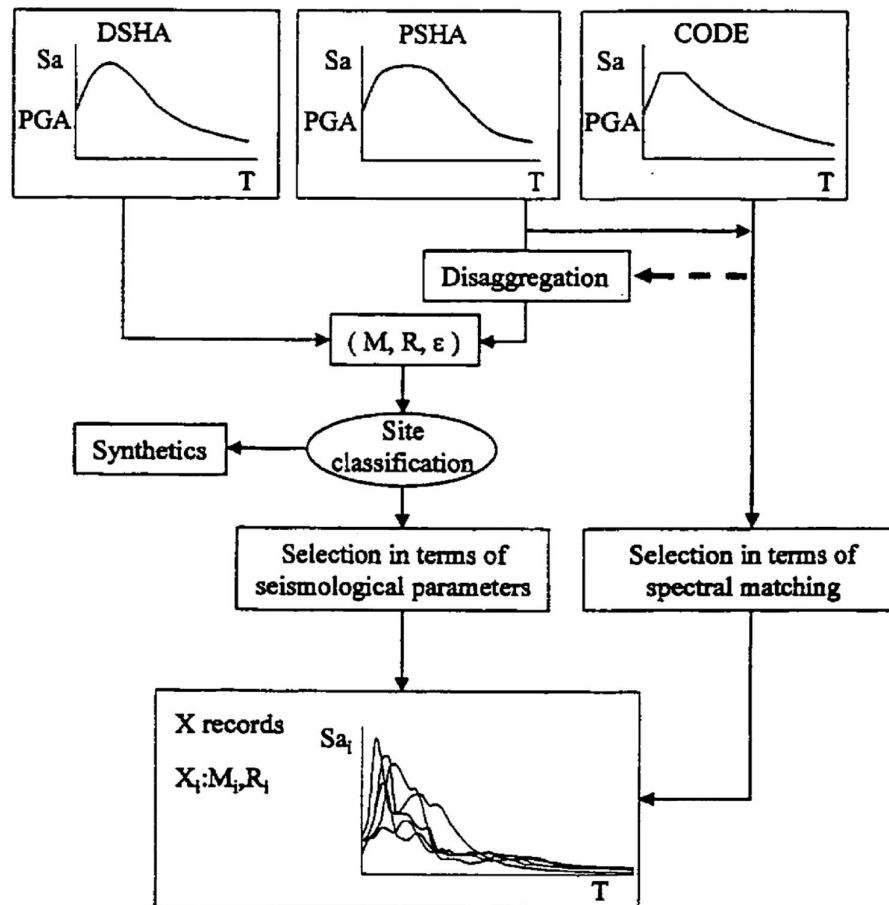
Este criterio contempla algunos métodos para ajustar la coincidencia espectral entre un modelo obtenido, ya sea de un análisis probabilístico, determinístico o de un código de construcción, con respecto a un conjunto de registros de acelerogramas o espectros de respuesta escogidos sistemáticamente.



Propone la selección de registros usando tanto Espectros de Diseño dados por códigos de construcción como los realizados por análisis probabilísticos (PSHA) y determinísticos (DSHA), en base al emparejamiento espectral, en el caso de los DSHA y PSHA con los parámetros sismológicos, mientras que los dados por un código o normativa por grado de coincidencia en los valores espectrales, usando un filtro preliminar efectivo, que garantiza una media estable de los resultados para excluir registros que impongan demandas excepcionalmente altas, eliminando picos y valles pronunciados que exceden de sobremanera la forma espectral objetivo.

**Figura 20**

*Opciones disponibles para la selección de espectros sísmicos*



*Nota. Tomado de Boomer y Acevedo (2004)*

Este filtro es el cálculo del factor  $D_{rms}$ , que no es más que la desviación cuadrática media del espectro observado con respecto al espectro de diseño objetivo:

**Fórmula 2**

*Fórmula estadística del factor  $D_{rms}$*

$$D_{rms} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{SA_o(T_i)}{PGA_o} - \frac{SA_s(T_i)}{PGA_s} \right)^2}$$

*Nota. Tomada de Boomer y Acevedo (2004)*

Donde:

**$D_{rms}$** : Desviación cuadrática media de los espectros evaluados.

**$N$** : Número de períodos evaluados.

**$SA_o(T_i)$** : Son los valores de aceleración espectral del modelo del registro, para cada período correspondiente de la muestra.

**$SA_s(T_i)$** : Son los valores de aceleración espectral del modelo objetivo, para cada período correspondiente de la muestra.

**$PGA_o$** : Aceleración máxima del suelo del modelo del registro.

**$PGA_s$** : Aceleración máxima del suelo del modelo objetivo.

Se señala que, para obtener mejores resultados, es conveniente analizar los valores espectrales por intervalos de períodos. Cuanto menor sea el valor de  $D_{rms}$ , más estrecha será la coincidencia entre la forma espectral del modelo de registro y el catalogado como objetivo.

Ahora, es importante denotar límites para los valores de  $D_{rms}$  para clasificar la validez y no validez de un modelo de respuesta espectral escogido, Boomer y Acevedo (2004) declaran que, bajo reiteradas pruebas de selección, los parámetros óptimos para este proceso deben ser:

a) Valores  $D_{rms}$  iguales o menores a 0.15 para las ordenadas en un rango de períodos de 0.4 a 0.8 segundos.

b) Valores  $D_{rms}$  iguales o menores a 0.07-0.06 para las ordenadas en un rango de períodos de 0.1 a 0.3 segundos.

Aunque Ambraseys, en su estudio sugiere que un valor máximo de  $D_{rms}=0.2$  es idóneo para estimar una coincidencia espectral eficiente, en cualquier intervalo de períodos del modelo.

Este trabajo de investigación podría usar los criterios antes mencionados para garantizar la coincidencia de la forma espectral en el proceso de homologación entre los Espectros de Diseño dados por la normativa local NEC-15 y las parejas espectrales de dos períodos y multi-período del ASCE 7 Hazard Tool.

## 2.9. REGISTROS TIEMPO-HISTORIA

Los registros tiempo-historia son los acelerogramas del suelo durante un terremoto o sismo, estos registros se obtienen de acelerógrafos. Si un acelerograma se integra contra el tiempo, se obtiene el registro de velocidades que describió durante el sismo, y si se integra nuevamente se determina los desplazamientos del terreno. (Aragadovay, 2016)

Para la determinación lo más aproximada posible a los valores de aceleración espectral que se han producido durante un terremoto en el sitio, es necesario hacer un cuidadoso tratamiento de los registros sísmicos obtenidos. (Hoyos et al., 2021). Por esto se presenta tomar en cuenta tres criterios de selección:

- a) Cercanía de las estaciones al lugar de estudio
- b) Tipo de suelo donde se encuentra las estaciones
- c) Localización y fecha de los registros.

Aragadovay (2016), menciona que el uso de registros tiempo-historia nos brinda la oportunidad de examinar la respuesta dinámica de una estructura en cada momento

específico del tiempo, con base en un acelerograma particular. Existen dos tipos de análisis tiempo-historia:

- a) Análisis lineal tiempo-historia
- b) Análisis no lineal tiempo-historia.

### **2.9.1. Análisis lineal tiempo-historia.**

El análisis dinámico lineal puede ser realizado con mayor eficiencia si se determinan previamente las frecuencias naturales y modos de vibración de las estructuras analizadas. Luego pueden integrarse las ecuaciones diferenciales desacopladas de cada modo, en función del tiempo para el registro de un sismo específico. (Aragadovay, 2016)

Aragadovay (2016), menciona que, con base en estos resultados, se podrán identificar otros efectos tales como las fuerzas cortantes en los pisos y en la base, los momentos flectores en los elementos, las deformaciones laterales, las deflexiones, aceleraciones y desplazamientos de respuesta de cada período natural.

### **2.9.2. Análisis no lineal tiempo-historia.**

Flores (2017), menciona que este tipo de análisis se realiza a partir de las condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad. Además, nos informa que, en cada paso del análisis, las propiedades estructurales se mantienen constantes y solo cambian en el paso siguiente. Por lo tanto, el análisis no lineal paso a paso es una combinación de varios análisis lineales, uno para cada paso de tiempo de un sistema en constante cambio. (Flores, 2017)

Cuanto más cortos sean los intervalos de tiempo, más preciso y detallado será el análisis. En el caso de sistemas con más de un grado de libertad, las ecuaciones escalares se convierten en matrices para poder resolverlas. (Flores, 2017)

## CAPITULO III: METODOLOGÍA

### 3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1.1. Tipo.

Esta investigación según sus objetivos se puede clasificar de tipo *aplicada* (Castillero Mimenza, 2017). Se aplican normas sísmicas estandarizadas por ASCE 7-22 para obtener Espectros de Diseño Sísmico multi-período aplicables para cualquier zona del Ecuador.

#### 3.1.2. Nivel.

Esta investigación es de nivel *descriptivo* (Castillero Mimenza, 2017), en este nivel se pretende únicamente establecer una descripción lo más detallada y completa posible de un fenómeno.

Los Espectros de Diseño AISC 7-22 son una estandarización del riesgo sísmico uniforme para la caracterización de la amenaza sísmica y constituyen herramientas cuantitativas usadas en el diseño de obras civiles con desempeño sismorresistente.

### 3.2. MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.2.1. Método.

Se aplicará un método *deductivo indirecto* (Canaan, 2020). La investigación usará la premisa general de que los Espectros de Diseño del ASCE 7-22, pueden ser homologados para su uso en Ecuador conforme NEC-15, si cumplen ciertos requisitos paramétricos, y en base a eso, la metodología de homologación propuesta por esta investigación puede ser replicable.

### **3.2.2. Enfoque.**

El enfoque de este estudio es *cuantitativo y objetivo* (Dzul Escamilla, 2020). Se usan una cantidad definida de datos para probar una hipótesis mediante una metodología matemática y física para homologar Espectros de Diseño.

### **3.2.3. Diseño.**

El diseño de la investigación será de tipo *correlacional* (Muguira, 2023). Ya que se busca establecer la relación entre dos normas, el ASCE 7-22 y la NEC-15, mediante un procedimiento de homologación.

## **3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO**

### **3.3.1. Población.**

La población beneficiaria serán todas las estructuras del Ecuador que se diseñarán con los Espectros de Diseño propuestos en esta investigación.

### **3.3.2. Muestra.**

Son las 3 ciudades que se seleccionaron para el desarrollar la metodología de homologación de los Espectros de Diseño multi-período del ASCE 7-22.

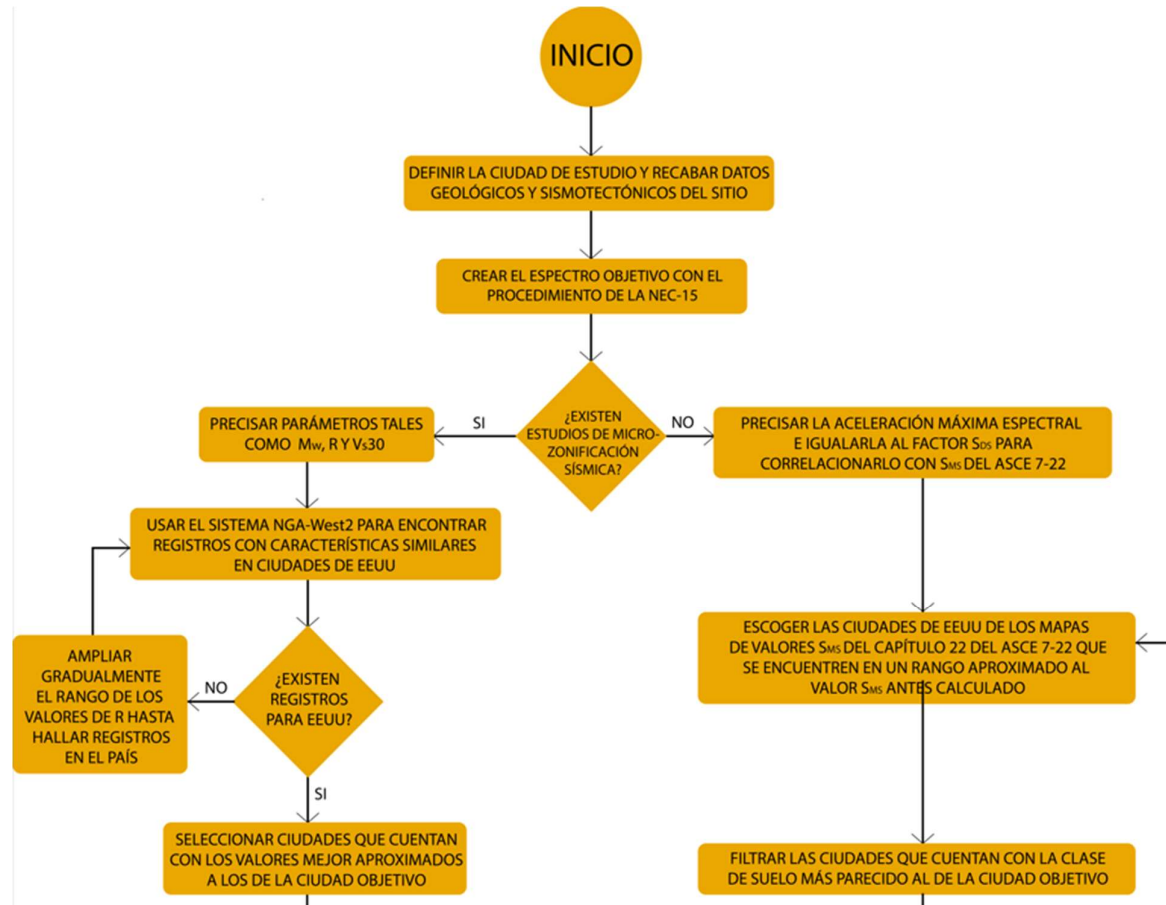
### **3.3.3. Muestreo.**

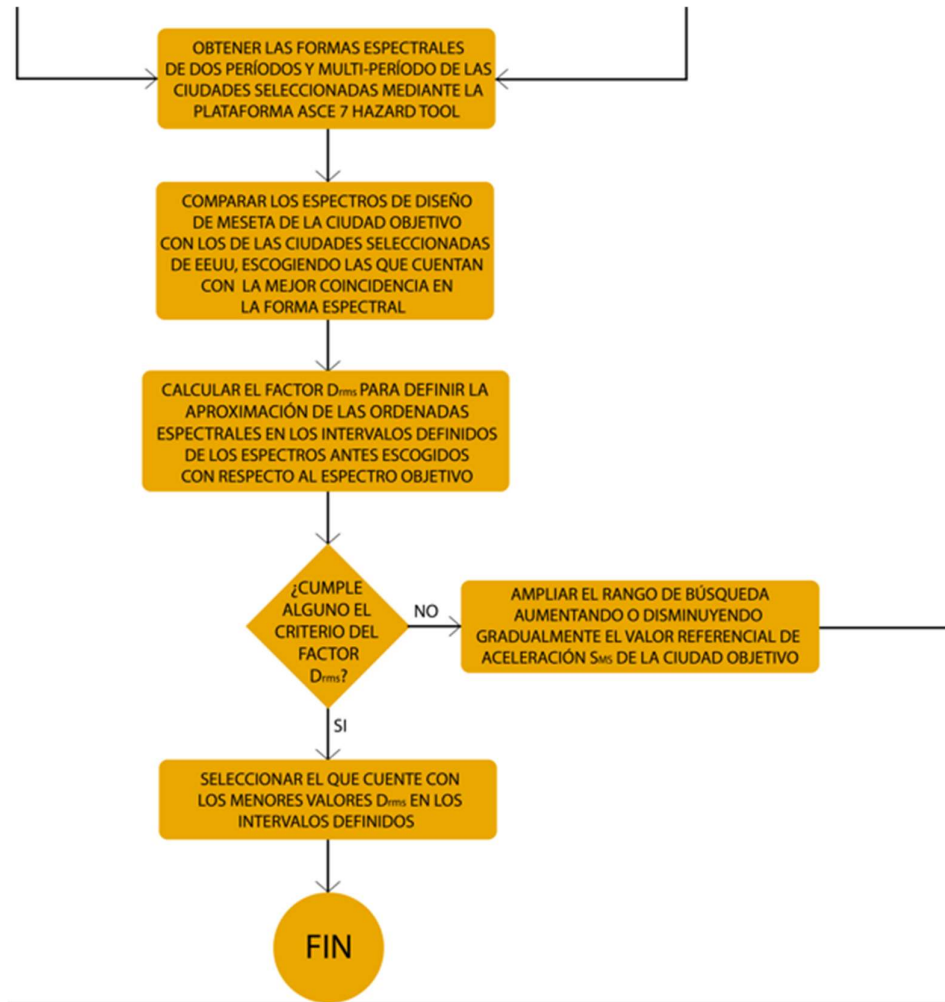
El procedimiento de muestreo se basa en la selección de las tres (3) ciudades de la Provincia de Santa Elena tomadas como muestra para desarrollar la metodología, misma que luego se aplica a otras 20 ciudades del Ecuador seleccionadas por su importancia demográfica nacional.

### 3.4. ESQUEMA DEL PROCESO DE HOMOLOGACIÓN

Figura 21

Esquema del proceso de homologación





### 3.5. UBICACIÓN DE LOS SECTORES DE ESTUDIO

#### 3.5.1. Área y ubicación de estudio.

Para desarrollar el método de homologación, se seleccionan 3 ciudades de la provincia costera de Santa Elena, por su diversidad geológica y peligrosidad sísmica. La provincia cuenta con ciudades importantes demográficamente, entre ellas: Salinas, balneario de gran demanda turística; La Libertad, núcleo económico de la zona; y Santa Elena, ciudad capital de la provincia. No obstante, se seleccionarán 3 localidades que cuenten con un tipo de suelo diferente para obtener Espectros de Diseño para cada tipo de suelo disponible en el territorio.



**Figura 22**

*Mapa de la provincia de Santa Elena*



*Nota: Tomado de NordNordWest (2008)*

### 3.5.2. Características Geológicas del sitio.

**Figura 23**

*Mapa Geológico de Santa Elena*

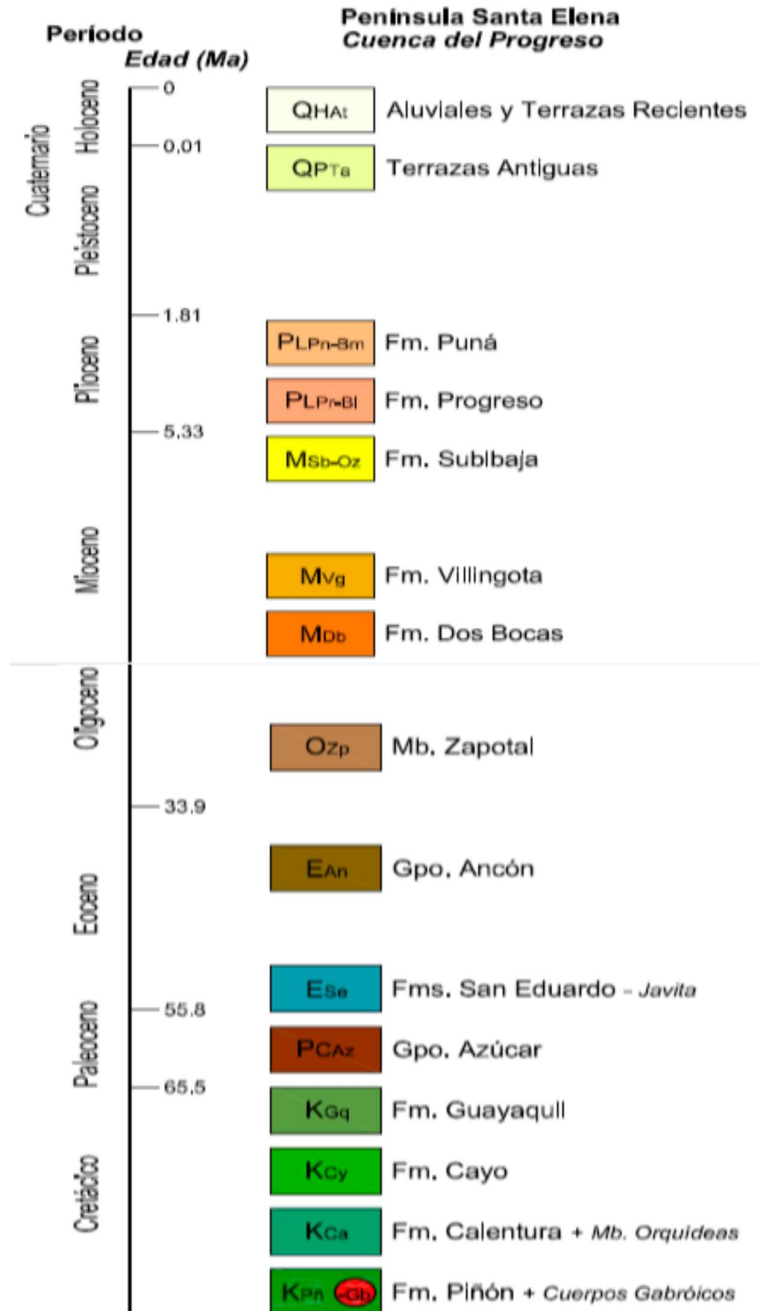


*Nota: Extraído de Reyes et al. (2012)*

Mediante el mapa geológico regional de la provincia y el marco estratigráfico se puede establecer los tipos de suelo presentes en la zona. (Macías Guaranda, 2020) Las descripciones litológicas se anexan a continuación:

**Figura 24**

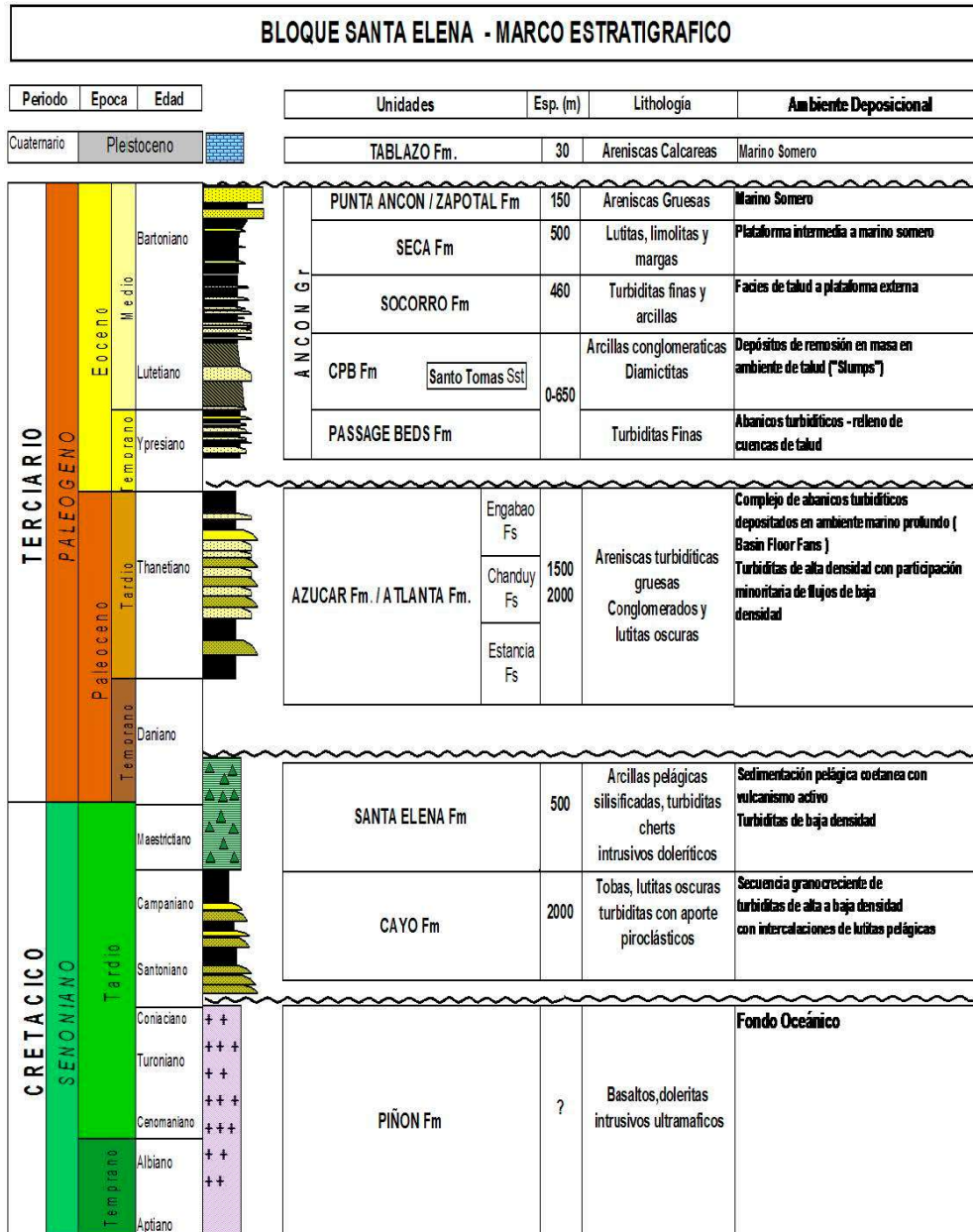
*Descripciones de los depósitos de suelo de Santa Elena*



Nota: Tomado de Reyes et al. (2012)

**Figura 25**

*Marco estratigráfico de los suelos de la provincia de Santa Elena*



*Nota: Tomado de Reyes et al. (2012)*

Se observa que hay presencia de al menos tres tipos de suelo importantes en la zona:

**Tipo C:** Complejo de abanicos turbídicos depositados en ambiente marino profundo, que cuenta con areniscas turbídicas gruesas, conglomerados y lutitas oscuras de alta densidad. Se presenta en la formación Azúcar, que comprende ciudades y comunas tales como Chanduy, Engabao, Estancia. (Macías Guaranda, 2020)

**Tipo D:** Suelos profundos de arenisca calcárea de textura variable, que cuentan con gran cantidad de sal, además de un régimen de humedad arídico notable. Se le clasifica de manera taxonómica como Salorthid y según la clasificación actual de la USDA son del orden de los aridisoles. Se encuentran en la ciudad de Salinas, y según su Gobierno Municipal, forman lo que se conoce como área de tablazo, que es en su mayoría arenosa, correspondiente al cuaternario inferior y compuesta por sedimentos génicos con matriz calcítica, pulvurenta, lumaquela y arcillas, formando una capa de 20 a 30 metros de profundidad con compacidad relativa moderada. (Salinas, 2015).

**Tipo E:** Perteneciente al Maestriciano, la formación Santa Elena (color verde, véase *figura 25*) es de al menos 500 metros de profundidad, y contiene arcillas pelágicas silisificadas, turbiditas de cherts intrusivos doleríticos de baja densidad que presenta consistencia blanda. (Macías Guaranda, 2020)

Por tanto, las ciudades de estudio serán las siguientes:

**Tabla 1**

*Datos de las ciudades a usar en el marco metodológico de estudio.*

<b>DATOS DE LAS CIUDADES DE ESTUDIO</b>			
<b>CIUDAD</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>		<b>ESPESOR DE CAPA (m)</b>
	<b>NEC-15</b>	<b>ASCE 7-22</b>	
CHANDUY	C	C o CD	1500 - 2000
SALINAS	D	D	30
SANTA ELENA	E	D o DE	500

*Nota: Datos inferidos.*

### 3.5.3. Características sismotectónicas del sitio.

Según los datos del Instituto Geofísico de la EPN del Ecuador, la sismicidad en la zona está relacionada a las siguientes fuentes:

- a) Los procesos de subducción de la placa Nazca bajo la placa continental Sudamericana originan lo que se conoce como la Zona de Benioff, que se inclina hacia el continente y donde la profundidad de los sismos se incrementa en el sentido de la inclinación, pudiendo alcanzar más de 200 km. (CIDHMA, 2020)

**Figura 26**

*Proceso de subducción de la Placa Nazca*



*Nota. Tomado de CIDHMA (2020)*

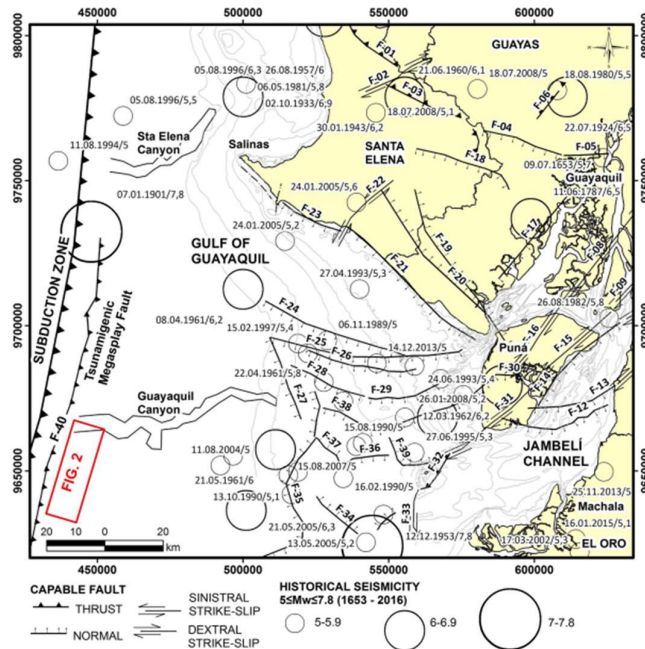
- b) Otra fuente adicional, se refiere a los desplazamientos tectónicos que suceden en las fracturas geológicas, donde las fuerzas compresivas producidas por el proceso de subducción crean fallas regionales, zonales o locales, ya sea inversas o de desplazamiento horizontal (Parra Cárdenas et al., 2017). Cuando se acumulan grandes tensiones, se produce una liberación repentina de energía, lo que resulta en un terremoto. (CIDHMA, 2020)

Aparte de la convergencia tectónica en la zona de subducción, el sistema principal de falla *Dextral* en la zona, es el que atraviesa la parte del Golfo de Guayaquil hacia el sector noreste (F-24). La investigación de Chunga et al (2019), indica las diversas fallas alrededor de la península como se aprecia en la *figura 27*.

No obstante, la fuente principal que provocaría sismos de mayor intensidad siempre será la zona de subducción continental, la cual tiene una inmersión estructural de entre 4 a 5°, y las profundidades focales recurrentes se sitúan entre 40 a 70 km de profundidad, a la cual se le atribuyen valores potenciales de  $M_w$  entre 7.2 y 8.2 para la península de Santa Elena. (Chunga et al., 2021)

**Figura 27**

*Mapa sismotectónico del golfo de Guayaquil, y segmento continental de Santa Elena*



*Nota: Tomado de Chunga et al. (2019)*

Baque y Lema (2013), plantearon una distancia epicentral de 100 km desde la comuna Monteverde hasta la zona de subducción más crítica (véase *anexo 2*), basados en los estudios del Dr. Chunga (Baque Domínguez & Lema Cefla, 2013). Por tanto, se intuye una distancia de 65-67 km desde Salinas, 68-70 km desde Santa Elena y 76-78 km desde Chanduy.

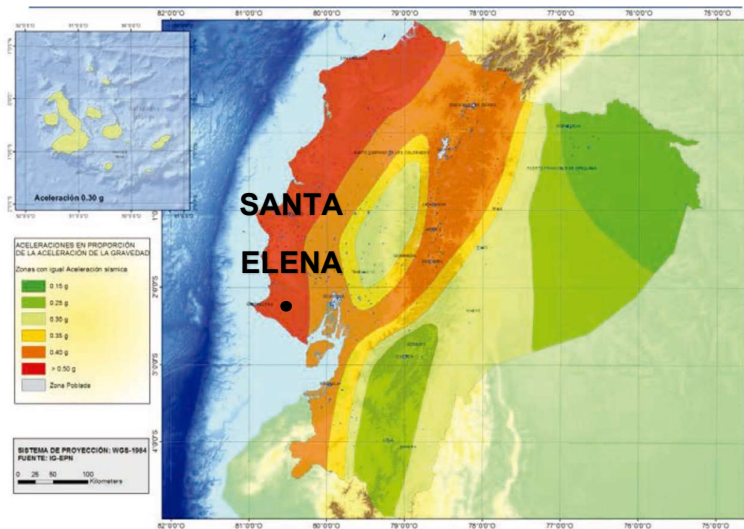


### 3.5.4. Peligrosidad Sísmica.

Ahora bien, la Norma Ecuatoriana de la construcción con el soporte de un análisis probabilístico (PSHA), coloca a Santa Elena dentro de los sitios con mayor peligrosidad sísmica:

**Figura 28**

*Zonificación Sísmica del Ecuador*



*Nota: Tomado de NEC (2015)*

**Tabla 2**

*Valor Z y Caracterización del peligro Sísmico.*

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
<b>Factor Z</b>	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
<b>Caracterización del Peligro Sísmico</b>	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

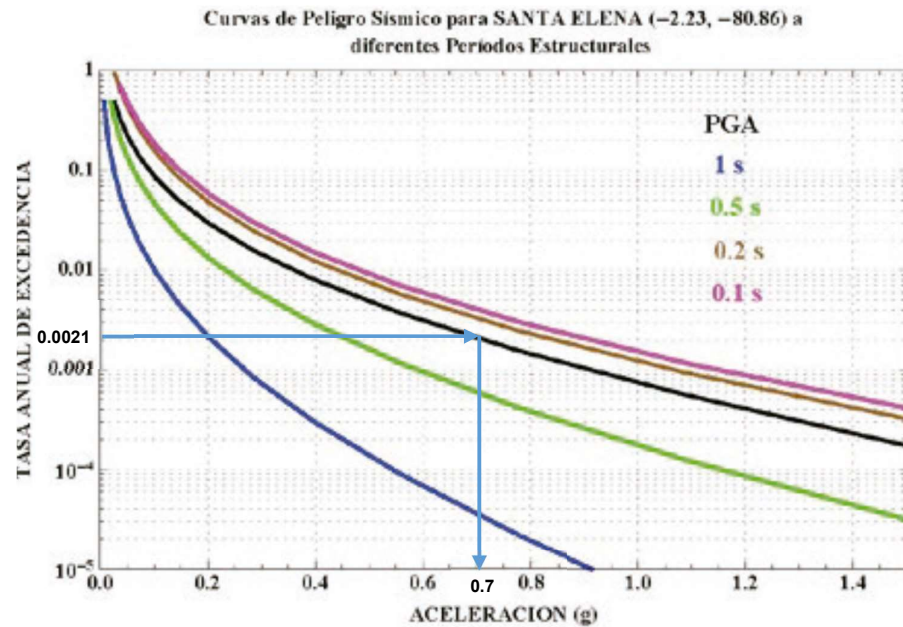
*Nota: Tomado de NEC (2015)*

El mapa de la *figura 28* proviene del resultado de un estudio Probabilístico del Peligro Sísmico realizado para un 10% de tasa de excedencia en 50 años, es decir, un período de retorno de 475 años, dándole un valor igual o mayor a 0.5 g de aceleración en roca al litoral ecuatoriano. Por tanto, la norma clasifica a Santa Elena como Zona Sísmica VI, con muy alta peligrosidad sísmica.

El factor  $Z$  que se usará en esta investigación se lo hallará mediante la curva de peligro sísmico de Santa Elena presente en la *sección 10.2* de NEC-15, para una tasa anual de excedencia de 0.0021053 o 0.2153%, proveniente del inverso del período de retorno (475 años).

### Figura 29

Curva de peligrosidad sísmica para Santa Elena



Nota: Tomado de NEC (2015)

Resultando un valor de 0.7 de aceleración en roca (PGA), que se tomará como factor  $Z$ , que luego se corregirá con el factor de amplificación ( $F_a$ ) para cada tipo de suelo.

## 3.6. ELABORACIÓN DEL ESPECTRO OBJETIVO

### 3.6.1. Espectro de diseño elástico.

Se elaborarán a partir del proceso especificado en la *sección 2.5.1*. Por tanto, los parámetros para la construcción de los Espectros de Diseño elástico para las ciudades de estudio serán:



**Tabla 3**

*Datos de los coeficientes obtenidos para las ciudades de estudio*

<b>DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO ELÁSTICO BAJO LA NORMA NEC-15</b>						
<b>CIUDAD</b>	<b>Z</b>	<b>Fa</b>	<b>Fd</b>	<b>Fs</b>	<b>r</b>	<b><math>\eta</math></b>
CHANDUY	0.7	1.18	1.06	1.23	1	1.8
SALINAS	0.7	1.12	1.11	1.4	1	1.8
SANTA ELENA	0.7	0.85	1.5	2	1.5	1.8

Los valores espectrales, así como sus gráficos estarán disponibles en la *sección 4.1*.

### **3.7. OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DE REFERENCIA**

El objetivo de este trabajo será obtener un espectro de diseño de dos períodos ya procesado que sirva de puente para homologar su pareja espectral de múltiples períodos. La plataforma del ASCE, denominada ASCE 7 Hazard Tool, es una herramienta que permite obtener Espectros de Diseño normalizados con base en la data sísmica del USGS, siendo esta gratuita y disponible para cualquier usuario. (Sismica Institute, 2023)

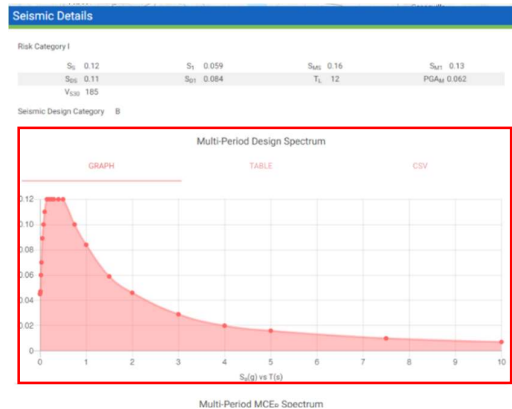
Este aplicativo cuenta con Espectros de Diseño Sísmico de 2 períodos y multi-período para diferentes ubicaciones de y solo Estados Unidos, por tanto, se usará para encontrar formas espectrales de diseño coincidentes con el *Espectro Objetivo* antes elaborado. Los datos a saber más importantes para la obtención de estos espectros son los siguientes:

- a) Dirección y/o nombre (Ciudad y Estado), o ubicación (latitud y longitud).
- b) Categoría de Riesgo de Estructuras (I, II, III, IV).
- c) Clase de suelo (A, B, BC, C, D, DE, E).

(Véase la *figura 31*)

**Figura 30**

Datos disponibles en el aplicativo ASCE 7 Hazard Tool



Nota: Tomado de plataforma ASCE 7 Hazard Tool

**Figura 31**

Parámetros de búsqueda del ASCE 7 Hazard Tool

The screenshot shows the search interface of the ASCE 7 Hazard Tool. It is divided into two main sections: '1 Enter Structure Information' and '2 Requested Data'. In the '1 Enter Structure Information' section, there is a 'Enter Location' field with a 'Snap to Address' checkbox. Below this are three tabs: 'ADDRESS', 'LAT/LONG', and 'FIND ON MAP'. The 'ADDRESS' tab is active, showing a search box with 'Dallas, Texas' and a 'SEARCH' button. In the '2 Requested Data' section, there are several dropdown menus: 'Standard Version' (set to 'ASCE/SEI 7-22'), 'Risk Category' (set to 'I'), and 'Site Soil Class' (set to 'DE'). Below these are 'Measurements' options: 'Customary' (selected) and 'SI'. Under 'Load Types', there are checkboxes for 'Wind', 'Ice', 'Rain', 'Tsunami', 'Seismic' (checked), 'Snow', 'Flood', and 'Tornado'. A 'VIEW RESULTS' button is at the bottom.

Nota. Tomado de la plataforma ASCE 7 Hazard Tool

Se podrán obtener los espectros de meseta y multi-período para períodos de retorno de 475 y 2475 años, pero los necesarios para el proceso serán:

- a) Espectro de diseño multi-período para un período de retorno de 475 años.
- b) Espectro de diseño de 2 períodos para un período de retorno de 475 años.

Este último se usará para emparejarlo con el *Espectro Objetivo*, aplicando los criterios de homologación y a su vez utilizar su pareja de múltiples períodos como Espectro de Diseño final.

A continuación, se postularán dos métodos para la búsqueda y selección de ciudades estadounidenses que cuenten con un espectro de diseño de meseta con valores espectrales lo más parecidos a los de los espectros creados a partir de la NEC-15 de las ciudades ecuatorianas antes escogidas, estos serán:

- a) Selección por zonificación sísmica y tipo de suelo
- b) Selección por parámetros causales sismológicos

### **3.7.1. Selección por zonificación sísmica y tipo de suelo.**

Es el método más accesible, ya que solo requerirá datos tales como la aceleración máxima del espectro de diseño creado en base a la normativa local, y el tipo de suelo presente en la ciudad objetivo.

#### ***3.7.1.1. Por Zonificación Sísmica.***

Se utilizará el mapa de valores  $S_{MS}$  (con período de retorno de 2475 años) del capítulo 22 del ASCE 7-22, también disponible en el portal de la USGS con mejor detalle, para hallar espectros de dos períodos de ciudades estadounidenses cuyas aceleraciones máximas se encuentren en los rangos detallados en los mapas, no sin antes establecer las siguientes condiciones:

- a) El valor máximo  $S_{DS}$  debe ser igual al valor  $S_{a\ max}$  del espectro NEC-15 (para un período de retorno de 475 años) entonces, si:

$$S_{a \max} \cong S_{DS} \quad ; \quad S_{DS} \cong \eta Z F_a$$

Por tanto, si se tiene que:

$$(1.5)S_{DS} \cong S_{MS} \quad \text{y por ende} \quad S_{DS} \cong \frac{S_{MS}}{1.5}$$

Entonces:

$$\frac{S_{MS}}{1.5} \cong \eta Z F_a$$

$$S_{MS} \cong (1.5)\eta Z F_a$$

b) El valor  $S_{MS}$  se lo multiplicará por 100 para correlacionarlo con los mapas.

Para las ciudades antes escogidas como objetivo, los valores  $S_{MS}$  se muestran a continuación:

**Tabla 4**

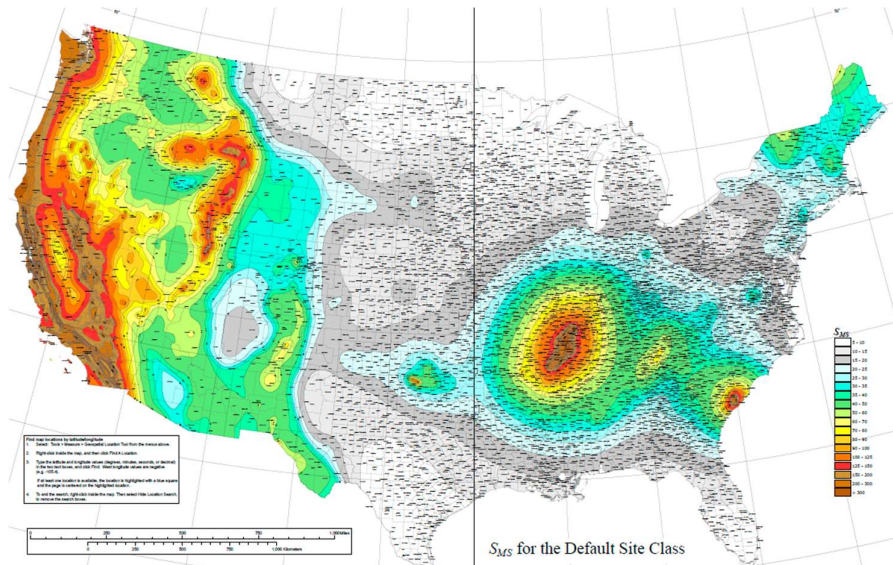
*Valores de aceleración máxima de los espectros de las ciudades.*

<b>ORDENADAS ESPECTERALES MÁXIMAS</b>		
	<b>NEC-15</b>	<b>ASCE 7-22</b>
<b>CIUDAD</b>	<b>Tr=475 años</b>	<b>Tr=2475 años</b>
	<b><math>S_{a \max} = \eta Z F_a</math></b>	<b><math>S_{MS} = (1.5) S_{a \max}</math></b>
CHANDUY	1.49	2.23
SALINAS	1.41	2.11
SANTA ELENA	1.07	1.61

En las *figuras 32 y 33*, se muestra el mapa de zonificación sísmica elaborado a partir del factor  $S_{MS}$ . Los valores varían desde 10% hasta 300% y las regiones con peligrosidad diferente están divididos por colores en orden de intensidad.

**Figura 32**

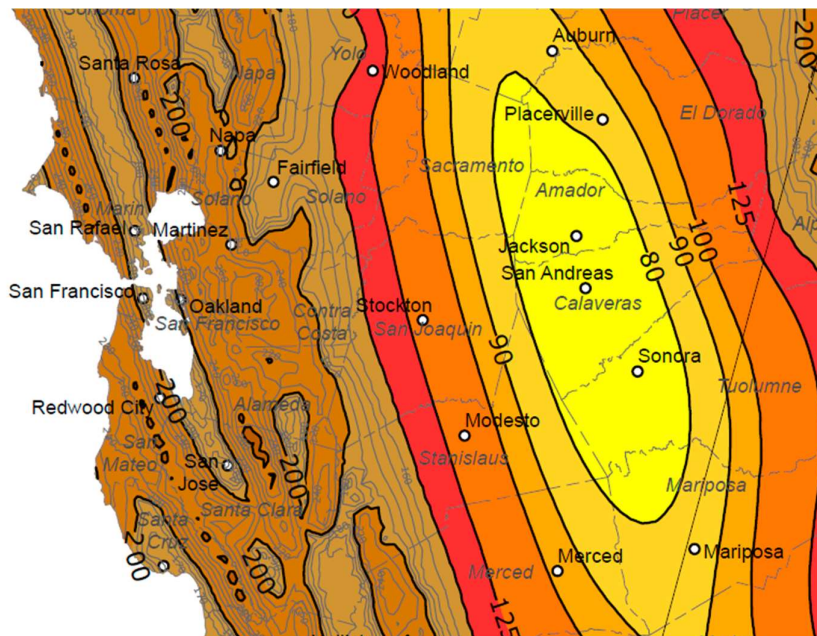
*Mapa de Zonificación sísmica ( $S_{MS}$ ) de EE. UU.*



*Nota. Tomado del ASCE 7-22*

**Figura 33**

*Mapa de Zonificación sísmica amplificado a la zona costera de California*



*Nota. Tomado del ASCE (2022)*

### 3.7.1.2. Por tipo y compacidad del suelo.

Una vez que se cuenta con la lista de ciudades con aproximación en el valor  $S_{MS}$ , se puede utilizar las siguientes herramientas para hallar coincidencias en los tipos de suelo y aminorar la cantidad de ciudades candidatas:

- a) La herramienta MapView del “*The National Geologic Map Database*” del portal web asociado del AASG y el USGS. (USGS, 2023).
- b) Base de datos gubernamentales, tales como los registros de la *USDA* (2023), la *State Soil Geographic* (2023) o *Alabama Maps* (1950).

No sin antes definir una equivalencia de los suelos de NEC-15 con los del ASCE 7-22 para saber a qué tipo de suelo pertenecerían los de la norma estadounidense con respecto a la ecuatoriana, por tanto, se lo hará mediante los rangos de velocidad de onda de corte dadas para las clasificaciones de suelo, que son:

**Tabla 5**

*Equivalencia entre los tipos de suelos dados por el ASCE 7-22 y NEC-15*

TIPO ASCE 7-22	DESCRIPCIÓN	$V_{s30}$ (m/s)		TIPO NEC	$V_{s30}$ (m/s)	
A	ROCA DURA	>1525		A	>1500	
B	ROCA SEMIDURA	915	1525	B	760	1500
BC	ROCA SUAVE	640	915			
C	ARENA MUY DENSA Y ARCILLA RÍGIDA	440	640	C	360	760
CD	ARENA DENSA Y ARCILLA MUY DURA	300	440			
D	ARENA MEDIANAMENTE DENSA Y ARCILLA DURA	215	300	D	180	360
DE	ARENA SUELTA Y ARCILLA MEDIA DURA	150	215			
E	ARENA MUY SUELTA Y ARCILLA BLANDA	<150		E	<180	
F	SUELOS COLAPSABLES			F	SUELOS COLAPSABLES	

*Nota: Datos homologados*

Por tanto, los suelos B y BC del ASCE 7-22 equivaldrían como suelos de tipo B en NEC-15, lo mismo pasaría con los suelos C y CD, serían suelos C para Ecuador, y por último D y DE como suelos tipo D.

Ahora bien, los resultados de esta búsqueda, consistentemente corroborados con bibliografía son los siguientes:

**Tabla 6**

*Ciudades que cuentan con coincidencia en los valores  $S_{MS}$  y tipo de suelo.*

CIUDAD OBJETIVO	CIUDAD DE REFERENCIA	ESTADO	SUELO	LOCALIZACIÓN	
				LATITUD	LONGITUD
CHANDUY	UKIAH	CALIFORNIA	CD, D	39.150169	-123.207787
	SANTA ROSA	CALIFORNIA	C	38.444660	122.720306
	NAPA	CALIFORNIA	CD, D	38.297539	-122.286865
	MARTINEZ	CALIFORNIA	C, D	37.997417	-122.133598
	EL CENTRO	CALIFORNIA	CD	32.792000	-115.563051
SALINAS	REDWOOD CITY	CALIFORNIA	D, E	37.487846	-122.236115
	SALINAS	CALIFORNIA	D	36.677738	-121.655502
	VIRGINIA CITY	NEVADA	E	39.309514	-119.649979
	RENO	NEVADA	DE, E	39.530895	-119.814972
	NAPA	CALIFORNIA	CD, D	38.297539	-122.286865
SANTA ELENA	SAN RAFAEL	CALIFORNIA	D	37.986076	-122.534752
	SAN DIEGO	CALIFORNIA	DE	32.715736	-117.161087
	QUINCY	CALIFORNIA	D, DE	39.935200	-120.942200
	WAVERVILLE	CALIFORNIA	C, DE	40.730978	-122.941971
	OAKLAND	CALIFORNIA	DE	37.803410	-122.274666

*Nota. Datos extraídos de la USGS (2023)*

### 3.7.2. Selección por parámetros causales sísmológicos.

El método de búsqueda alternativo por parámetros causales es el más usado en el marco de registros de acelerogramas, ya que los Espectros de Diseño están basados en los espectros de respuesta procesados, sin embargo, es importante recalcar que los parámetros necesarios para este proceso pueden no estar disponibles en la localidad de estudio, debido a que son obtenidos a partir de estudios especializados que pueden no haberse realizado en la zona.

En el caso de la provincia de Santa Elena, los datos que se disponen para hallar registros de sismos con efecto de sitio parecidos son aproximados y serán lo suficientemente convenientes para esta búsqueda y análisis.

La herramienta *NGA-West2* del *Peer Ground Motion Database* del *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (University of California, 2013) permite acceder a una base de datos de registros de movimiento de suelo que ha sido recopilada y revisada por expertos en Ingeniería Sísmica y Geotecnia. Estos registros de movimiento de suelo se han obtenido a partir de terremotos reales que han ocurrido en todo el mundo utilizando instrumentos especializados, a fin de procesar los datos para facilitar su uso en análisis de ingeniería.

La plataforma *PEER* permite a los usuarios buscar y descargar registros que se ajusten a sus necesidades específicas, los usuarios pueden seleccionar registros de terremotos específicos, ajustar las características del terremoto y el sitio, y elegir el formato de archivo deseado para la descarga. Para lo anterior se debe definir al menos los siguientes elementos y parámetros de búsqueda:

- a)  **$M_w$  (min – max):** Rango de magnitud de momento probable del terremoto.
- b)  **$R_{rup}$  (min – max):** Rango de distancia mínima de sitio a plano de falla.
- c)  **$V_{s30}$ (min – max):** Rango de velocidad promedio de onda de corte (S) a los primeros 30 metros de profundidad.
- d) **Espectro definido por el usuario (*User Defined Spectrum*):** Tener el Espectro objetivo antes realizado en formato de coordenadas espectrales en archivo *CSV*.

### **3.7.2.1. Rango de magnitud de momento probable ( $M_w$ ).**

Mediante estudios de microzonificación sísmica y correlaciones con fórmulas tales como las de Well & Coppersmith (1994), se pueden obtener los valores probables de magnitud de momento  $M_w$ . A continuación, se tabulan los valores probables de  $M_w$  detallados en la *sección 3.5.3*, cabe recalcar que estos valores propuestos por Chunga (2021), pertenecen a un análisis geológico de magnitudes máximas obtenido de un análisis DSHA y por ende no vinculado a un período de retorno para los eventos. No obstante, resultan útiles para la aplicación práctica del método de búsqueda dentro del aplicativo *PEER*.



**Tabla 7***Datos de magnitud probable para las ciudades de estudio*

<b>M<sub>w</sub> CORRESPONDIENTE A LA PENÍNSULA DE SANTA ELENA</b>		
<b>FUENTE SÍSMICA</b>	<b>M<sub>w</sub></b>	
	<b>MÍNIMO</b>	<b>MÁXIMO</b>
ZONA DE SUBDUCCIÓN CONTINENTAL ENTRE PLACA NAZCA-SUDAMERICANA	7.2	8.2

**3.7.2.2. Distancia más cercana al plano de falla ( $R_{rup}$ ).**

El aplicativo permite ingresar tanto la distancia computada desde la superficie de proyección de la falla propuesta por Joyner-Boore ( $R_{JB}$ ), como la distancia más cercana al plano de ruptura ( $R_{rup}$ ), como parámetros de cercanía a la falla.

Pero al no tener a disposición ninguno de los dos valores en la literatura publicada, se asumirá que la posición del sitio y el plano de falla se asemejan al segundo caso de la *figura 6* de la *sección 2.1.5*, por tanto, la distancia hipocentral ( $R_H$ ) será aproximada a la distancia más cercana al plano de falla ( $R_{rup}$ ), la cual se hallará con cálculos trigonométricos usando la distancia epicentral, la profundidad focal y la inclinación del plano de falla, por tanto:

**Tabla 8***Datos de cercanía a falla de las ciudades de estudio*

<b>DISTANCIA MÁS CERCANA AL PLANO DE FALLA (SUBDUCCIÓN)</b>						
<b>CIUDAD</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>		<b>R<sub>x</sub> (Km)</b>		<b>R<sub>rup</sub> (Km)</b>	
	<b>(Km)</b>		<b>MIN.</b>	<b>MAX.</b>	<b>MIN.</b>	<b>MAX.</b>
	<b>MIN.</b>	<b>MAX.</b>				
CHANDUY			76	78	86	105
SALINAS	40	70	65	67	76	97
SANTA ELENA			68	70	79	99

**3.7.2.3. Rango de velocidad de onda de corte promedio ( $V_{s30}$ ).**

Se obtiene mediante algunos ensayos, como se indicó en la *sección 2.1.7*. No obstante, al no tener el dato a disposición es posible correlacionarlo con

el tipo de suelo presente en la ciudad de estudio, mediante la *figura 18* de la *sección 2.7.2.2*.

Esto con la finalidad de establecer dentro de la plataforma, similitud en los efectos de sitio producidos por el tipo de suelo disponible, por tanto, para las ciudades estudiadas serán:

**Tabla 9**

*Velocidades de ondas de corte de los suelos de las ciudades de estudio*

DATOS DE LAS CIUDADES DE ESTUDIO			
CIUDAD	TIPO DE SUELO ASCE 7-22	V <sub>s30</sub> (m/s)	
		MIN.	MAX.
CHANDUY	CD	300	440
SALINAS	D	215	300
SANTA ELENA	DE, E	150	215

#### 3.7.2.4. *Búsqueda de Ciudades usando el NGA-West2.*

Al entrar al portal NGA-West2 se selecciona el modelo “*User Defined Spectrum*”, en la parte inferior se sube el archivo CSV con los valores tabulados del *Espectro objetivo* de 2 períodos elaborado con la norma NEC-15, como se muestra en la *figura 34*.

**Figura 34**

*Portal de ingreso del Espectro objetivo*

Target Spectrum

Select Spectrum Model

Select models to generate target spectrum

User Defined Spectrum

User-Defined Spectrum

As shown in the sample file, start spectra data at row 4 of input file. Spectra data consists of rows of T,pSa comma-separated values.

Filename: 2+PERIODOS+-+CHANDUY.csv Upload

File

Download Example file(.csv)

*Nota. Tomado del portal NGAWest-2*

Una vez ingresado el modelo, se ingresa en los campos vacíos los valores antes obtenidos, eligiendo al menos un rango máximo de 50 resultados, según se muestra en la *figura 35*.

**Figura 35**

*Ingreso de parámetros sismológicos recabados*

The screenshot shows a search interface with the following sections:

- Search:**
  - Record Characteristics: RSN(s), Event Name, Station Name.
  - Search Parameters: Fault Type (All Types), Magnitude (72.8.2), R\_JB(km), R\_rup(km) (86,105), Vs30(m/s) (300,440), D5-95(sec), Pulse (Any Record).
  - Additional Characteristics: Max No. Records (100), Initial ScaleFactor (1,2).
- Suite:**
  - Spectral Ordinate: SRSS
  - Damping Ratio: 5%
  - Suite Average: Arithmetic
- Scaling:**
  - Scaling Method: No Scaling

*Nota. Tomado del portal NGA West-2*

Consiguiendo así ciudades de los Estados Unidos que cuentan con un suelo que tiene valores de respuesta espectral similares al sitio ecuatoriano o ciudad objetivo.

**Figura 36**

*Ciudad(es) con parámetros sismológicos similares.*

	Result ID	Spectral Ordinate	Record Seq. #	MSE	Scale Factor	Tp(s)	D5-75(s)	D5-95(s)	Arias Intensity (m/s)	Event	Year	Station	Mag
<input type="checkbox"/>	1	SRSS	2112	5.5712	1.0	-	20.8	36.3	0.0	Denali, Alaska	2002	TAPS Pump Station #08	7.9

*Nota. Tomado del portal NGA West-2*

Si con los parámetros ingresados, no hay coincidencias, se puede aumentar el rango de  $R_{rup}$  o el rango de  $M_w$  paulatinamente hasta conseguir las. Las ciudades obtenidas con este método son las siguientes:

**Tabla 10**

*Ciudades con parámetros sísmológicos similares a las ciudades objetivo*

CIUDAD OBJETIVO	CIUDAD DE REFERENCIA	ESTADO	SUELO	UBICACIÓN	
				LATITUD	LONGITUD
CHANDUY	SALCHA	ALASKA	B	64.561098	-46.951585
SALINAS	BORON	CALIFORNIA	DE	34.9994202	-117.649782
	SAN BERNARDINO		D	34.108345	-117.289765
SANTA ELENA	NILAND		D, DE	33.23793	-115.514809

*Nota: Datos extraídos de la USGS (2023)*

Luego se ingresa al portal ASCE 7 Hazard Tool repitiendo el proceso de la sección 3.7.1 para obtener los Espectros de Diseño requeridos de las ciudades de referencia.

### 3.8. EVALUACIÓN DE COINCIDENCIA ESPECTRAL

#### 3.8.1. Coincidencia en la forma espectral.

La evaluación se centrará en la coincidencia tanto de la forma como de las ordenadas de los espectros. En la sección 4.2.1, se presentan los Espectros de Diseño del ASCE 7-22 que cuentan el mejor ajuste en la forma con respecto a los Espectros de NEC-15 de las 3 ciudades de Santa Elena.

Una vez elegidos los de mayor similitud, se procede a evaluar la proximidad de los valores espectrales de manera analítica con el factor  $D_{rms}$ .

### **3.8.2. Método de cálculo de proximidad espectral con el Factor $D_{rms}$ .**

Aplicando la fórmula de la *sección 2.8.2*, se podrá observar la proximidad en términos de desviación cuadrática media en los intervalos determinados de los modelos espectrales de las 3 ciudades antes referidas. En las *tablas 16, 17 y 18* de la *sección 4.2.2* se presentarán los resultados cuantitativos.

En caso de que el valor  $D_{rms}$  esté fuera del rango establecido en la *sección 2.8.2*, es imperativo ampliar los rangos de búsqueda para obtener mejores resultados, y en última instancia será permitido según Ambraseys (2004), tener un valor máximo  $D_{rms}$  de 0.2 en los intervalos señalados.

### **3.9. OBTENCIÓN DE REGISTROS TIEMPO-HISTORIA A PARTIR DEL ESPECTRO MULTI-PERÍODO.**

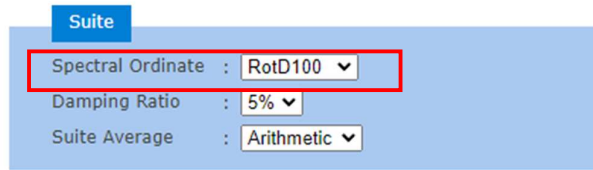
Usando el método de búsqueda de ciudades planteado en la *sección 3.7.2*, también se podrá acceder al *PEER* y descargar espectros de respuesta de eventos con parámetros similares al espectro multi-período homologado. (Sismica Institute, 2023)

Primero se tabularán las coordenadas del espectro multi-período en un archivo CSV, y se lo ingresará en la opción “*User Defined Spectrum*”, tal como en la *figura 34*. Ahora se colocarán los mismos datos de búsqueda de la *figura 35* para obtener resultados sin escalar, con un amortiguamiento del 5%, con la excepción de que se cambiará la opción de ordenadas espectrales al tipo *RotDI00* (véase la *figura 37*) (Sismica Institute, 2023).

Esta representa una medida de la aceleración que puede ocurrir en la dirección máxima de rotación del terremoto, esto con la finalidad de encontrar mejores resultados. (Shahi & Baker, 2020)

**Figura 37**

*Parámetros de búsqueda para las ordenadas espectrales*



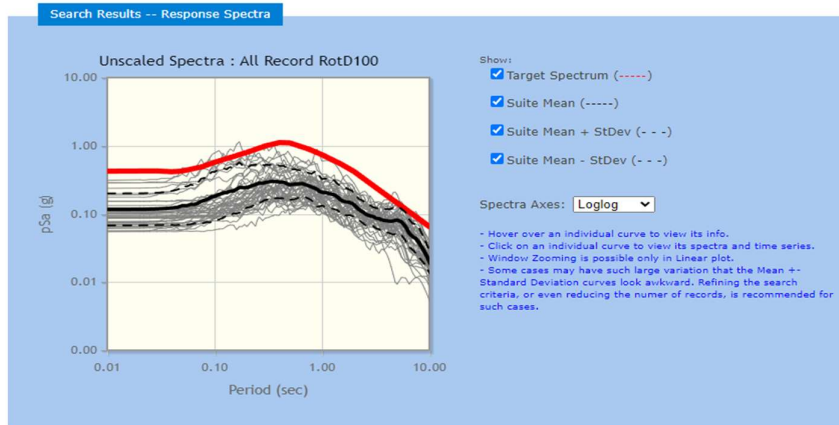
The image shows a software interface for search parameters. It has a blue header with the word "Suite". Below it, there are three rows of settings, each with a label, a value, and a dropdown arrow. The first row is "Spectral Ordinate : RotD100", the second is "Damping Ratio : 5%", and the third is "Suite Average : Arithmetic". A red rectangular box highlights the "Spectral Ordinate" setting.

*Nota. Tomado del portal NGAWest-2*

Se reitera la condición de que de no existir resultados lo suficientemente satisfactorios en un primer análisis, lo recomendable es aumentar el rango del valor  $R_{rup}$ . Como se muestra en la *figura 38*, se obtendrán espectros de respuesta basados en acelerogramas de sismos reales, que por su consistencia y similitud con el espectro multi-período seleccionado, puedan luego ser usados como sismos característicos para el análisis estructural tiempo-historia.

**Figura 38**

*Espectros de respuesta sísmicos del registro comparados con el de diseño*

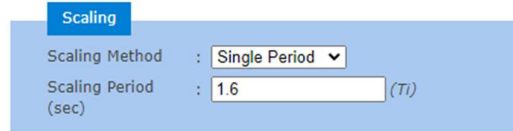


*Nota. Tomado del portal NGAWest-2*

De alejarse la media de los registros de manera significativa con respecto al Espectro de Diseño multi-período, de debe escalar la media de los registros, obteniendo espectros de respuesta mejor coincidentes al Espectro ASCE 7-22 homologado para el sitio o ciudad. Mediante un factor en la sección de *Scaling*, obtenido mediante prueba y error hasta encontrar la mejor convergencia.

### Figura 39

Método de escalado en el NGA-West2



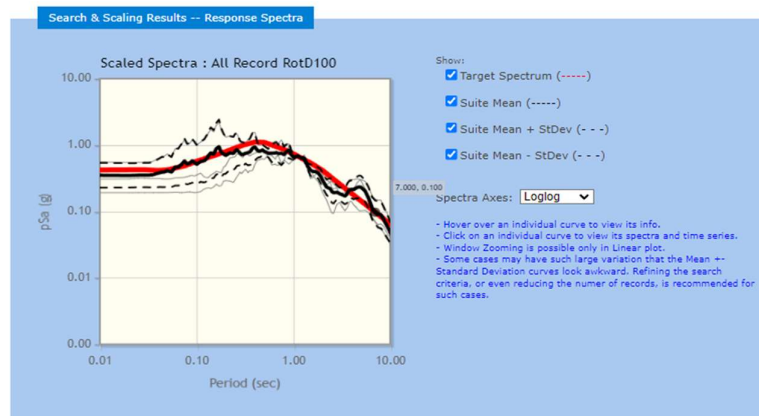
Scaling  
Scaling Method : Single Period  
Scaling Period : 1.6 (Ti)  
(sec)

Nota. Tomado del portal NGAWest-2

El número de resultados disminuye a los convergentes con mejor ajuste a la media escalada, como se muestra en la figura 40:

### Figura 40

Espectros coincidentes con la media escalada hacia el espectro Multi-Período de Diseño



Nota. Tomado del portal NGAWest-2

Se podrá seleccionar la historia-tiempo promedio (“Suite Mean”) o el registro que tiene el mejor ajuste escalado, para descargar los datos de los acelerogramas en los 3 componentes espaciales, tanto escalados como sin escalar. En la sección 4.3 se presenta para las 3 Ciudades de la provincia de Santa Elena los acelerogramas de los eventos más coincidentes con los Espectros multi-período homologados.

### 3.10. FLUJO OPERATIVO DE LAS VARIABLES

**Tabla 11**

*Flujo operativo de las variables independientes*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA	
<b>Independiente</b>	Formas espectrales genéricas normalizadas	Espectros de diseño contruidos en base a códigos de construcción	Espectros diseñados a partir de la norma NEC-15, usando valores parametrizados por regiones.	Factor Z	Mapas de Zonificación Sísmica	g
				Tipos de suelo NEC-15	Ensayo SPT V <sub>S30</sub>	N de Golpes m/s
				Período de Retorno	Tasa anual de excedencia	%
<b>Independiente</b>	Espectros de Diseño Homologados	Formales espectrales importadas que son similares a las genéricas en diversos factores.	Espectros de Diseño obtenidos del aplicativo ASCE 7 Hazard Tool	Valor S <sub>MS</sub>	Mapas de Zonificación Sísmica	%
				Ubicación	Mapas Geográficos	Latitud y Longitud
				Tipos de suelo del ASCE 7-22	V <sub>S30</sub>	m/s



**Tabla 12**

*Flujo operativo de las variables dependientes*

VARIABLES		DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA
<b>Dependiente</b>	Tipos de suelo de NEC-15 y ASCE 7-22	Clasificación de suelos en base a su comportamiento dinámico	En NEC-15 son A, B, C, D, E y F	Velocidad de Onda de Corte a 30 m de profundidad ( $V_{S30}$ )	Ensayos SPT o CPT o de Refracción o Tomografía Sísmica	m/s
			En ASCE 7-22 son A, B, BC, C, CD, D, DE, E y F			
<b>Dependiente</b>	Aceleración máxima en roca (PGA)	Es la máxima aceleración que el suelo que puede llegar tener durante un sismo.	En NEC-15 se tiene que el $PGA=zFa$ o $S_a(T=0)$	Aceleración sísmica inicial del suelo	Sismogramas o Acelerogramas procesados	g
			En ASCE 7-22, se tiene que el $PGA=0.4S_{Ds}$			
<b>Dependiente</b>	Aceleraciones máximas de Espectros de Diseño	Son las máximas ordenadas espectrales de las curvas que conforman un Espectro de Diseño	EN NEC-15 se conoce a la aceleración máxima como $S_{a\ max}$ y equivale a $\eta ZFa$	Aceleración máxima que puede experimentar una estructura	Análisis DSHA o PSHA	g
			En ASCE 7-22 se conoce a tal aceleración como $S_{Ds}$			

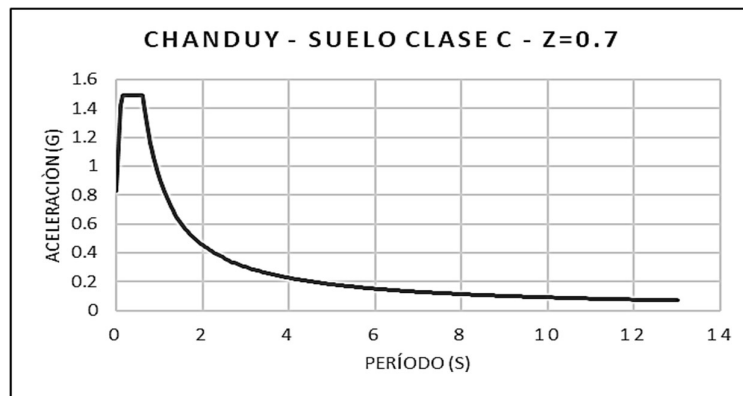
# CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

## 4.1. ESPECTROS OBJETIVO PARA LAS 3 CIUDADES DE LA PROVINCIA DE SANTA ELENA

A continuación, se muestra tanto los gráficos como los datos tabulados de los Espectros de Diseño para las tres ciudades escogidas de Santa Elena, elaborados mediante el procedimiento de la norma NEC-15.

**Figura 41**

*Espectro de Diseño NEC-15 para Chanduy*



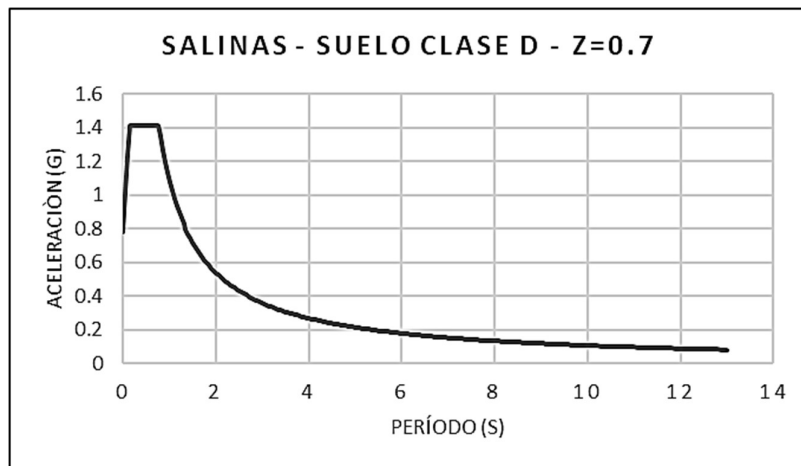
**Tabla 13**

*Ordenadas del Espectro de Diseño de Chanduy*

<b>VALORES ESPECTRALES</b>			
<b>T (s)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>T (s)</b>	<b>Sa (g)</b>
0	0.826	2.75	0.329
0.25	1.487	3	0.301
0.5	1.487	3.25	0.278
0.75	1.205	3.5	0.258
1	0.904	3.75	0.241
1.25	0.723	4	0.226
1.5	0.602	4.25	0.213
1.75	0.516	4.5	0.201
2	0.452	4.75	0.190
2.25	0.402	5	0.181
2.5	0.361	5.25	0.172

**Figura 42**

*Espectro de Diseño NEC-15 para Salinas*



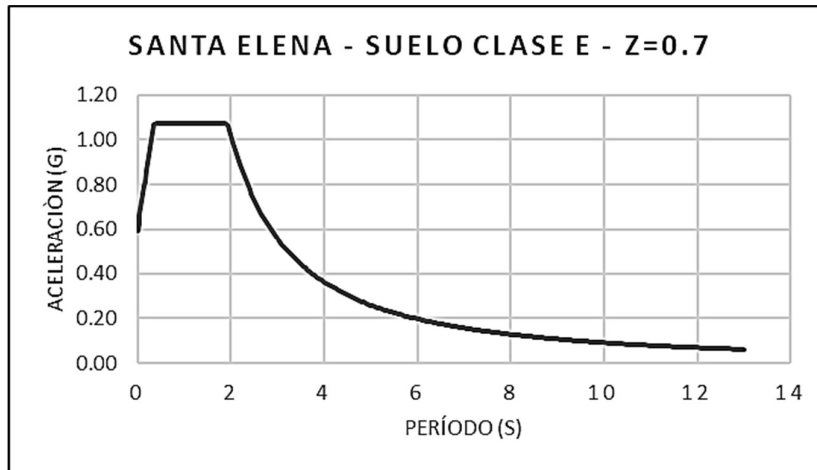
**Tabla 14**

*Ordenadas del Espectro de Diseño de Salinas*

VALORES ESPECTRALES			
T (s)	Sa (g)	T (s)	Sa (g)
0	0.784	2.75	0.392
0.25	1.411	3	0.359
0.5	1.411	3.25	0.331
0.75	1.411	3.5	0.308
1	1.077	3.75	0.287
1.25	0.862	4	0.269
1.5	0.718	4.25	0.253
1.75	0.615	4.5	0.239
2	0.538	4.75	0.227
2.25	0.479	5	0.215
2.5	0.431	5.25	0.205

**Figura 43**

*Espectro de Diseño NEC-15 para Santa Elena*



**Tabla 15**

*Ordenadas del Espectro de Diseño de Santa Elena*

VALORES ESPECTRALES			
T (s)	Sa (g)	T (s)	Sa (g)
0	0.784	2.75	0.392
0.25	1.411	3	0.359
0.5	1.411	3.25	0.331
0.75	1.411	3.5	0.308
1	1.077	3.75	0.287
1.25	0.862	4	0.269
1.5	0.718	4.25	0.253
1.75	0.615	4.5	0.239
2	0.538	4.75	0.227
2.25	0.479	5	0.215
2.5	0.431	5.25	0.205

## 4.2. ESPECTROS DE REFERENCIA

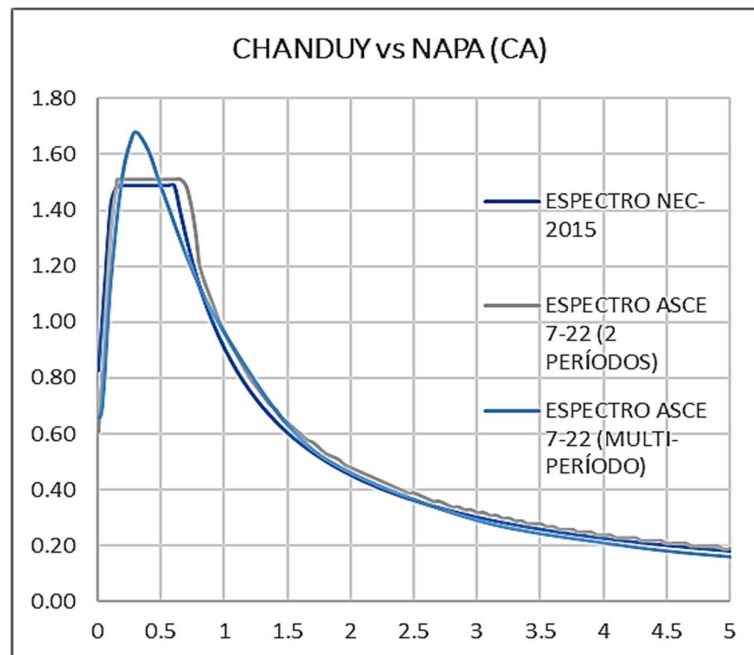
### 4.2.1. Espectros de Diseño coincidentes en la forma y tipo de suelo.

En la comparativa gráfica se incluye:

- a) *Espectro Objetivo* de dos períodos de las ciudades de Santa Elena, elaborado con la normativa NEC-15.
- b) El *Espectro de Referencia* de dos períodos de la ciudad candidata obtenido del ASCE 7 Hazard Tool.
- c) El *Espectro de Referencia* multi-período de la ciudad candidata obtenido del ASCE 7 Hazard Tool.

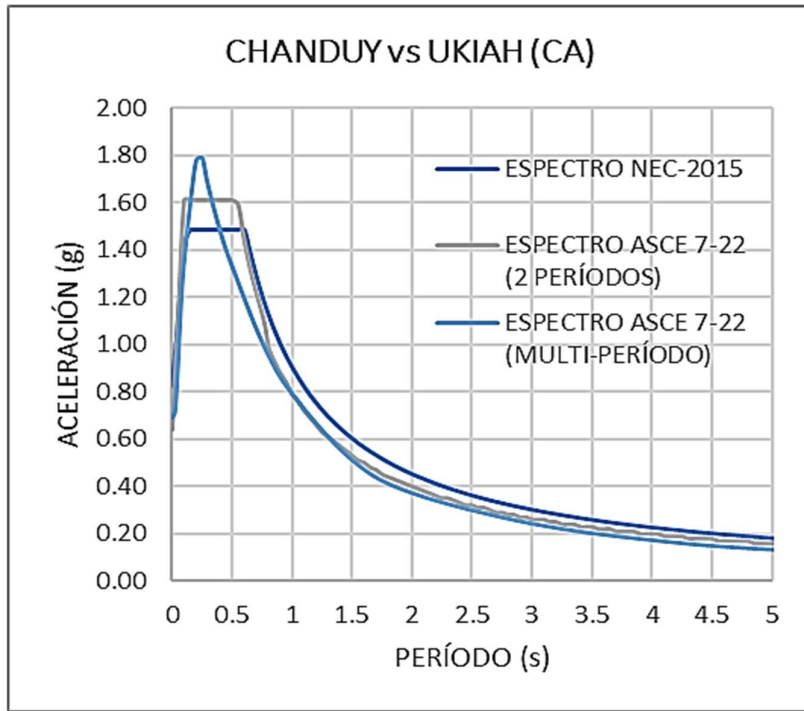
**Figura 44**

*Comparación de Espectros de Diseño de Chanduy vs Napa (Suelo CD)*



**Figura 45**

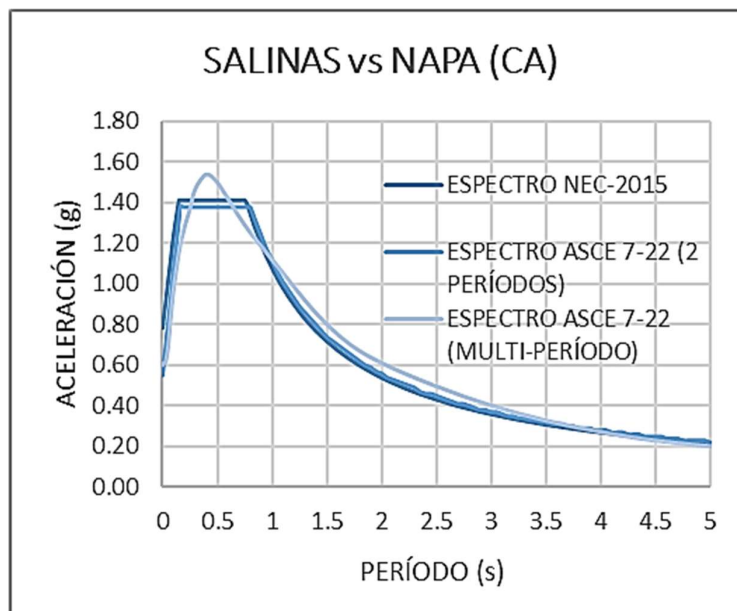
*Comparación de Espectros de Diseño de Chanduy vs Ukiah (Suelo CD)*



Se observa que la mejor aproximación gráfica para Chanduy la tiene el espectro de la ciudad de Napa en California para un tipo de suelo CD.

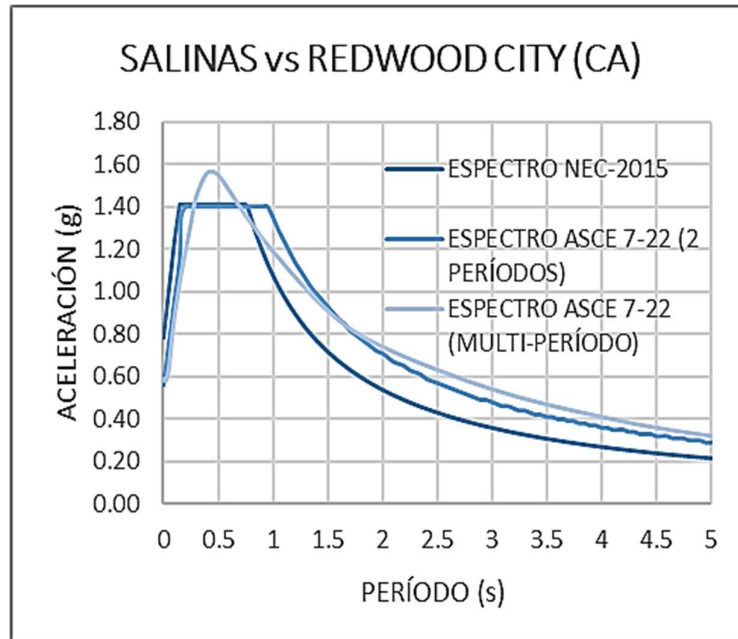
**Figura 46**

*Comparación de Espectros de Diseño de Salinas vs Napa (Suelo D)*



**Figura 47**

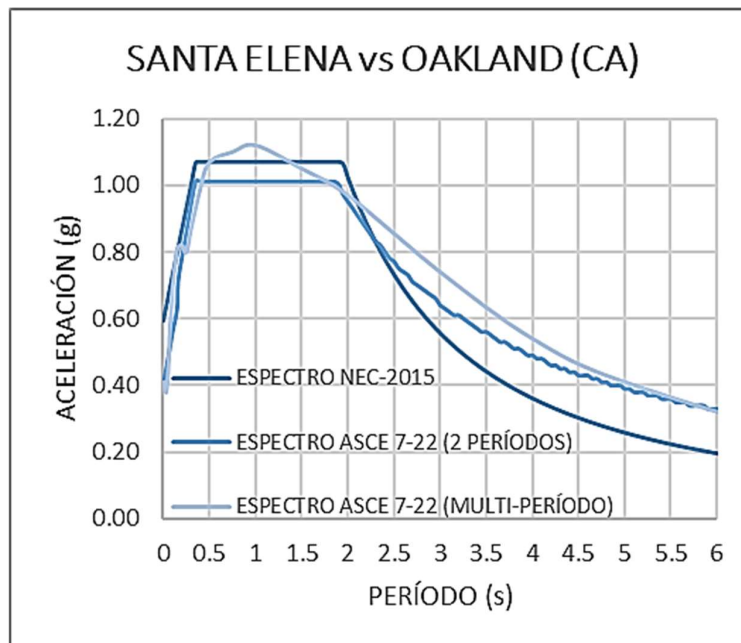
*Comparación de Espectros de Salinas vs Redwood City (Suelo D)*



Para Salinas, la ciudad de Napa que también cuenta con un suelo tipo D presenta la mejor aproximación en su forma espectral.

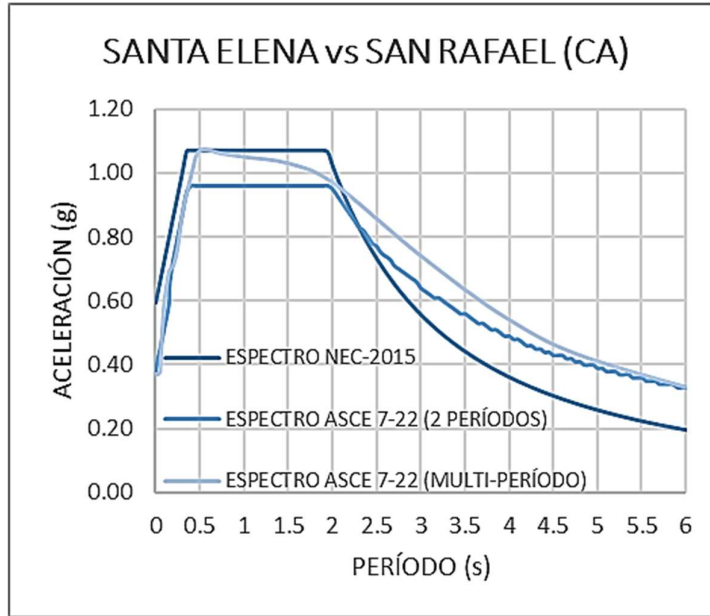
**Figura 48**

*Comparación de Espectros de Santa Elena vs Oakland (Suelo DE)*



**Figura 49**

*Comparación de Espectros de Diseño de Santa Elena vs San Rafael (Suelo DE)*



Para el caso de Santa Elena evaluando un tipo de suelo clase DE, la ciudad costera de Oakland presenta la mejor aproximación gráfica a diferencia de San Rafael.

En general la coincidencia en la forma esperada en las ciudades evaluadas es adecuada, denotando así que el proceso de selección ha sido satisfactoriamente eficiente, luego se revisará de manera analítica si la aproximación en las ordenadas de los espectros comparados está dentro de los criterios propuestos mediante la evaluación del factor  $D_{rms}$ .



#### 4.2.2. Valores $D_{rms}$ de los intervalos de los espectros de respuesta.

A continuación, los valores  $D_{rms}$  de las dos ciudades antes mencionadas:

**Tabla 16**

*Evaluación espectral Chanduy vs Napa (CA) – Tipo de suelo CD*

EVALUACIÓN DE COINCIDENCIA ESPECTRAL - CHANDUY vs NAPA (CA)				
RANGOS (T) COMPARATIVOS	TAMAÑO DE MUESTRA	SUMATORIA	$D_{rms}$	CONDICIÓN
0.1 a 0.3	6	0.6614	0.1355	CUMPLE
0.4-0.8	10	0.5399	0.0735	CUMPLE

**Tabla 17**

*Evaluación espectral Salinas vs Napa (CA) – Tipo de suelo D*

EVALUACIÓN DE COINCIDENCIA ESPECTRAL - SALINAS vs NAPA (CA)				
RANGOS (T) COMPARATIVOS	TAMAÑO DE MUESTRA	SUMATORIA	$D_{rms}$	CONDICIÓN
0.1 a 0.3	6	0.03044	0.0920	CUMPLE
0.4-0.8	10	0.02722	0.0522	CUMPLE

**Tabla 18**

*Evaluación espectral Santa Elena vs Oakland (CA) – Tipo de suelo DE*

EVALUACIÓN DE COINCIDENCIA ESPECTRAL – ST. ELENA vs OAKLAND (CA)				
RANGOS (T) COMPARATIVOS	TAMAÑO DE MUESTRA	SUMATORIA	$D_{rms}$	CONDICIÓN
0.1 a 0.3	6	0.1433	0.063	CUMPLE
0.4-0.8	10	0.7484	0.086	CUMPLE

Para el análisis, el tamaño de la muestra es la cantidad de valores de aceleración ( $S_a$ ) evaluadas en la fórmula conforme al rango de intervalos escogidos según la *sección 2.8.2*.

Como se observa, la aproximación en los espectros de la ciudad de *Napa* para los suelos CD y D pertenecientes a Chanduy y Salinas de manera correspondiente, es satisfactoriamente estrecha, aunque el primer rango (0.1s a

0.3s) en ambos casos, no llega a estar dentro del criterio inicial propuesto, debido a la diferencia pronunciada en el PGA de ambas ciudades, pero cumple con el criterio de Ambraseys que declara que valores menores o iguales a 0.2 son igualmente idóneos. En el caso de Santa Elena, el factor  $D_{rms}$  se encuentra dentro del rango del criterio inicial en sus dos intervalos de evaluación.

En general, es preciso afirmar que las parejas espectrales multi-período de las ciudades estudiadas son idóneas para ser homologadas.

### 4.2.3. Espectros Multi-Período de Diseño y $MCE_R$ .

A continuación, se presentan los espectros para un período de retorno de 475 años (diseño) y para un terremoto máximo considerado como riesgo-objetivo con un período de retorno de 2475 años ( $MCE_R$ ) homologados para las ciudades objetivo propuestas:

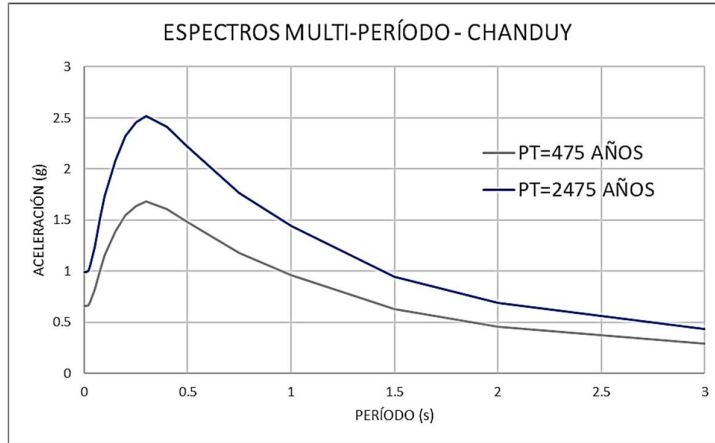
**Tabla 19**

*Valores espectrales de los modelos homologados*

ESPECTROS MULTI-PERÍODO HOMOLOGADOS								
CHANDUY - SUELO			SALINAS - SUELO			SANTA ELENA - SUELO		
TIPO CD			TIPO D			TIPO DE		
T (s)	Tr (años)		T (s)	Tr (años)		T (s)	Tr (años)	
	475	2475		475	2475		475	2475
0	0.66	0.99	0	0.6	0.9	0	0.4	0.6
0.01	0.66	0.99	0.01	0.61	0.915	0.01	0.41	0.615
0.02	0.67	1.01	0.02	0.61	0.915	0.02	0.39	0.585
0.03	0.7	1.05	0.03	0.62	0.93	0.03	0.38	0.57
0.05	0.82	1.23	0.05	0.69	1.035	0.05	0.43	0.645
0.075	1.01	1.52	0.075	0.84	1.26	0.075	0.58	0.87
0.1	1.16	1.74	0.1	0.97	1.455	0.1	0.69	1.035
0.15	1.39	2.09	0.15	1.16	1.74	0.15	0.81	1.215
0.2	1.55	2.33	0.2	1.28	1.92	0.2	0.82	1.23
0.25	1.64	2.46	0.25	1.37	2.055	0.25	0.8	1.2
0.3	1.68	2.52	0.3	1.47	2.205	0.3	0.87	1.305
0.4	1.61	2.42	0.4	1.54	2.31	0.4	0.99	1.485
0.5	1.48	2.22	0.5	1.5	2.25	0.5	1.07	1.605
0.75	1.18	1.77	0.75	1.29	1.935	0.75	1.1	1.65
1	0.96	1.44	1	1.12	1.68	1	1.12	1.68
1.5	0.63	0.95	1.5	0.8	1.2	1.5	1.05	1.575
2	0.46	0.69	2	0.61	0.915	2	0.97	1.455
3	0.29	0.44	3	0.4	0.6	3	0.74	1.11
4	0.21	0.32	4	0.27	0.405	4	0.54	0.81
5	0.16	0.24	5	0.2	0.3	5	0.41	0.615
7.5	0.09	0.14	7.5	0.11	0.165	7.5	0.21	0.315
10	0.06	0.09	10	0.074	0.111	10	0.12	0.18

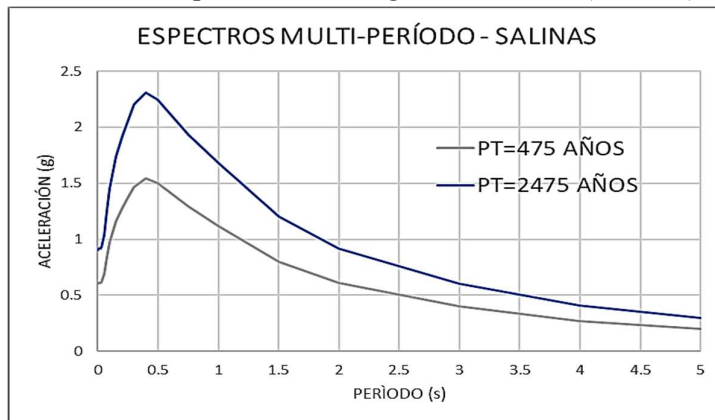
**Figura 50**

*Espectros de Diseño multi-período homologados – Chanduy (Suelo CD)*



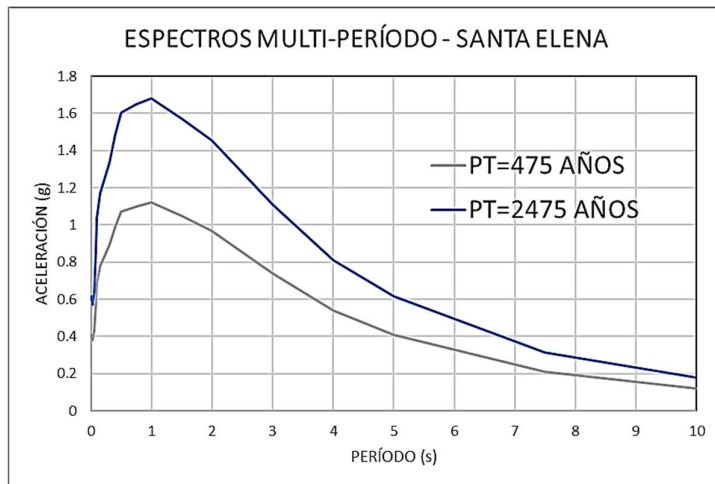
**Figura 51**

*Espectros de Diseño multi-período homologados – Salinas (Suelo D).*



**Figura 52**

*Espectros de Diseño multi-período homologados – Santa Elena (Suelo DE)*



### 4.3. REGISTROS TIEMPO-HISTORIA

Los eventos con mejor coincidencia y que se encuentran dentro del límite de la desviación estándar de la media con respecto al Espectro Objetivo multi-período de cada ciudad evaluada serán:

**Tabla 20**

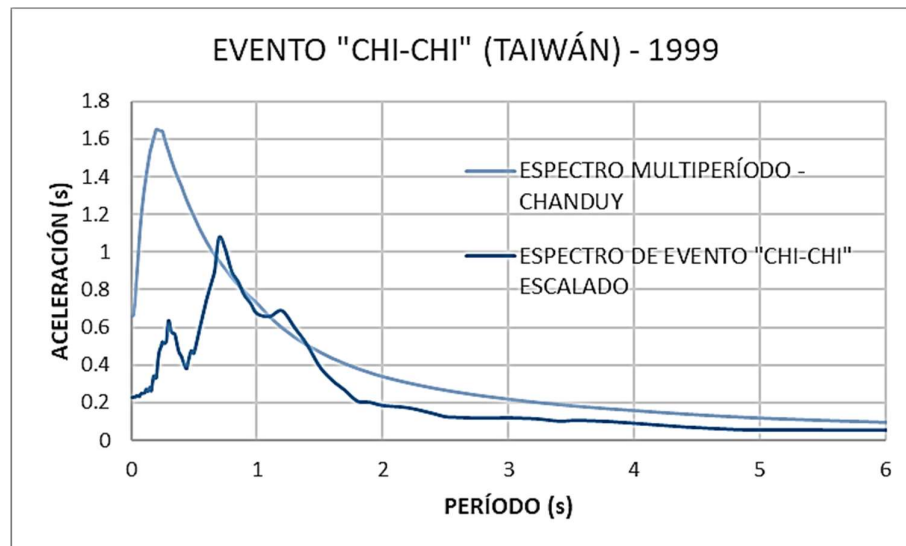
*Registros tiempo-historia asociados a los espectros multi-período homologados*

ESPECTRO MULTI- PERÍODO	REGISTRO TIEMPO-HISTORIA							
	PAÍS	EVENTO	AÑO	ESTACIÓN	M <sub>w</sub>	R <sub>rup</sub>	V <sub>s30</sub>	FACTOR
CHANDUY	TAIWÁN	CHI-CHI	1999	TAP032	7.62	94.84	308.88	1.8
SALINAS	IRÁN	MANJIL	1990	TONEKABUN	7.37	93.3	249.69	2
SANTA ELENA	TAIWÁN	CHI-CHI	1999	ILA013	7.62	84.12	199.48	1.6

A continuación, se muestran los gráficos de los espectros de respuesta escalados con respecto a los espectros multi-período tomados como objetivos:

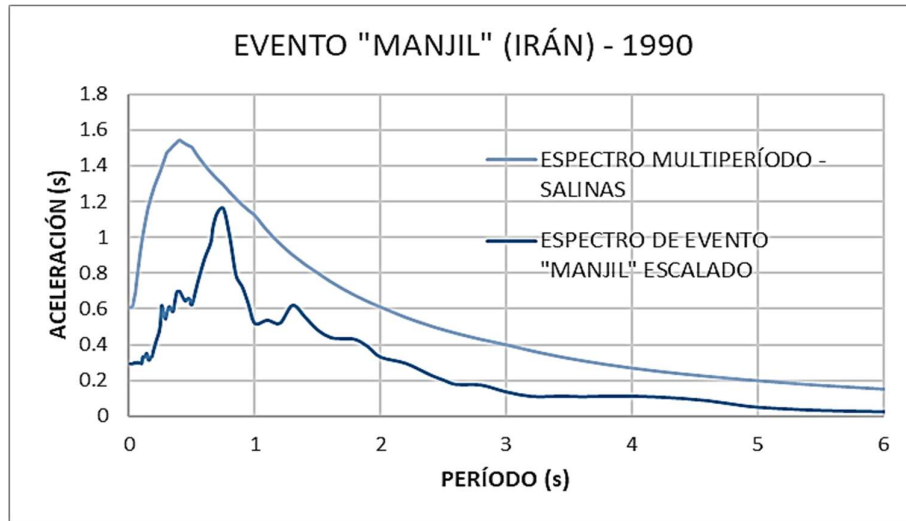
**Figura 53**

*Espectro de respuesta obtenido para la ciudad de Chanduy*



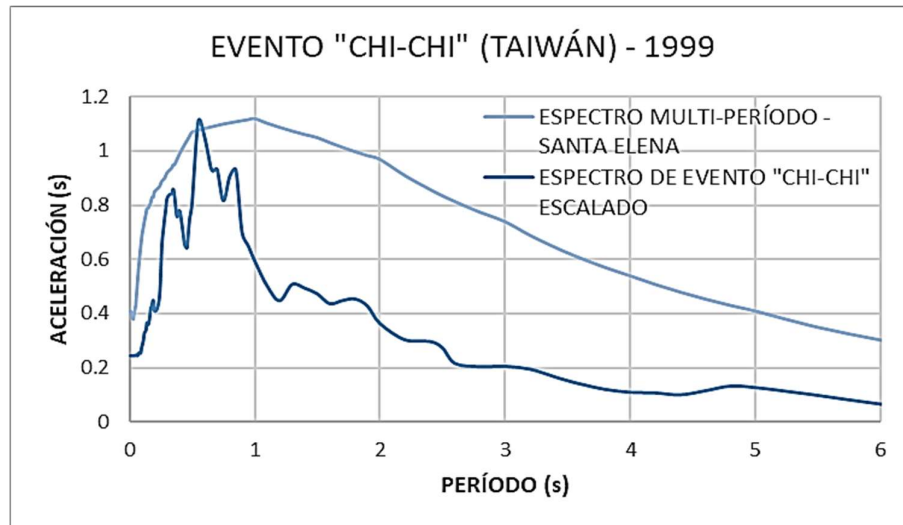
**Figura 54**

*Espectro de respuesta obtenido para la ciudad de Salinas*



**Figura 55**

*Espectro de respuesta obtenido para la ciudad de Santa Elena*



En cuanto a la búsqueda de registros tiempo-historia con los Espectros de Diseño multi-período homologados, la data del NGA-West2 llega a ser escasa en muchos de los casos, los resultados dependen bastante de la variabilidad de los datos ingresados al PEER, tales como la magnitud de momento  $M_w$  o la cercanía a la falla  $R_{rup}$ , mientras más aislados o poco comunes son entre ellos, menos registros se pueden obtener de la plataforma.

#### 4.4. ESPECTROS DE DISEÑO MULTI-PERÍODO HOMOLOGADOS PARA LAS CIUDADES DEMOGRÁFICAMENTE MÁS IMPORTANTES DEL PAÍS

Se tomarán las ciudades capitales de las principales provincias del Ecuador que superen o se aproximen a los 100 mil habitantes:

**Tabla 21**

*Ciudades escogidas para la homologación de los Espectros de Diseño multi-período*

CIUDAD	CANTÓN	PROVINCIA	POBLACIÓN (HAB)
QUITO	QUITO	PICHINCHA	1,763,275
AMBATO	AMBATO	TUNGURAHUA	370,664
AZOGUES	AZOGUES	CAÑAR	35,763
CUENCA	CUENCA	AZUAY	361,524
IBARRA	IBARRA	IMBABURA	157,941
LATACUNGA	LATACUNGA	COTOPAXI	77,267
LOJA	LOJA	LOJA	203,496
MANTA	MANTA	MANABÍ	258,697
MILAGRO	MILAGRO	GUAYAS	159,970
SANTO DOMINGO	SANTO DOMINGO	SANTO DOMINGO	334,826
BABAHOYO	BABAHOYO	LOS RÍOS	98,251
DURÁN	DURÁN	GUAYAS	295,211
ESMERALDAS	ESMERALDAS	ESMERALDAS	155,487
GUAYAQUIL	GUAYAQUIL	GUAYAS	2,650,288
MACHALA	MACHALA	EL ORO	288,072
PORTOVIEJO	PORTOVIEJO	MANABÍ	244,129
QUEVEDO	QUEVEDO	LOS RÍOS	177,792
RIOBAMBA	RIOBAMBA	CHIMBORAZO	177,213
TENA	TENA	NAPO	29,724
TULCÁN	TULCÁN	CARCHI	56,719

*Nota. Datos extraídos de Wikipedia (2023)*

Las fichas con los datos técnicos de los Espectros de Diseño homologados para las ciudades escogidas de la *tabla 21*, se adjuntarán en el *Anexo 5*.

# CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1. CONCLUSIONES

El análisis de los cambios normativos del ASCE 7-22 con respecto a su versión anterior (ASCE 7-16), permite entender los nuevos conceptos propuestos tales como el  $PGA_G$  y  $PGA_M$  que se usan en la fórmula estadística de emparejamiento espectral propuesta en este trabajo, así como el uso correcto del aplicativo ASCE 7 Hazard Tool con los nuevos tipos de suelo BC, CD y DE.

En base a los resultados obtenidos para la homologación de los Espectros de Diseño ASCE7-22 y NEC-15 se puede concluir lo siguiente:

- a) El igualar las máximas aceleraciones ( $S_{MS}$ ) de los Espectros de Diseño tanto de NEC-15 como de ASCE 7-22 para un período de retorno de 2475 años, permite de manera satisfactoria encontrar ciudades con similitud en el marco del Riesgo Sísmico en los mapas de zonificación del ASCE 7-22.
- b) La comprobación visual de la similitud de los Espectros de Diseño comparados en su forma cartesiana permite descartar los Espectros de Diseño de ciudades que no cuenten con una aproximación evidente en sus ordenadas.
- c) El análisis de aproximación espectral mediante el uso del factor  $D_{rms}$  precisa la cercanía de las ordenadas en intervalos periódicos definidos de forma matemática y reafirma la similitud espectral planteada.
- d) La aplicación del método de homologación es eficiente en ciudades con tipos de suelo A, B, C y D, pero para las que cuentan con un suelo tipo E en general, la variación en las abscisas (períodos) resulta muy evidente, por

tanto, la similitud en la forma de ambos Espectros de Diseño puede no llegar a ser del todo satisfactoria.

El uso de los Espectros de Diseño multi-período como modelo de búsqueda dentro de la plataforma *PEER*, no garantiza el hallazgo de historias tiempo con:

- a) Registros con alguna similitud para cualquier sitio y suelo en general.
- b) Registros con buen ajuste en la forma espectral con respecto al modelo, aún con un factor de escala aplicado.
- c) Registros que pertenezcan al mismo tipo de fuente sísmica.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Durante el proceso de selección de ciudades mediante los mapas de zonificación sísmica del ASCE 7-22, es posible encontrar Espectros de Diseño para tipos de suelo específicos que cumplen satisfactoriamente la similitud de sus formas espectrales, aunque no cumplen el criterio estadístico de aproximación por pocas centésimas. Por tanto, se recomienda usar el Espectro de Diseño que cuente con el mejor ajuste del factor  $D_{rms}$ , aún si no cumple con el rango comparativo propuesto.
- ✓ Es posible encontrar que durante la búsqueda de Espectros de Diseño de ciudades antes escogidas en base al valor  $S_{MS}$ , la plataforma ASCE 7 Hazard Tool no arroje resultados, debido a que la ciudad seleccionada no cuenta con el tipo de suelo elegido, por tanto, se recomienda la previa clasificación de las ciudades por el tipo de suelo deseado, para de esta manera descartar de antemano las opciones que serán inviables.
- ✓ De no tener disponible la distancia mínima al plano de falla ( $R_{rup}$ ) como parámetro de búsqueda de los registros tiempo-historia en el *PEER*, es recomendable usar la distancia hipocentral ( $R_H$ ) como la mejor distancia de referencia disponible, calculada geoméricamente a partir de la profundidad focal, la distancia epicentral ( $R_e$ ) y el ángulo de inclinación del plano de falla.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alabama Maps. (1950). *Historical Soil Survey. Alabama, Estados Unidos*.  
<http://alabamamaps.ua.edu/historicalmaps/soilsurvey/index.html>
- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sigbjornson, R., Thierry, C. B., Suhadolc, P., Costa, G., & Smit, P. M. (2004). 13th World Conference on Earthquake Engineering. *Dissemination of European Strong-Motion data, Volume 2*. Vancouver.
- Ancco, E. (2018). *Influencia de Espectros Determinísticos y Probabilísticos para la evaluación del Peligro Sísmico en las estructuras de la región de Tacna*.
- Aquib, T. A., Sivasubramonian, J., & Mai, P. M. (2022). Analysis of Ground Motion Intensity Measures and Selection Techniques for Estimating Building Respon. *Applied Sciences*, 12(12089), 6-10.  
<https://doi.org/10.3390/app122312089>
- Aragadovay, L. X. (2016). *Análisis comparativo utilizando el método Tiempo-Historia con el Espectrograma del Sismo "El Centro" y la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015*. Ambato.
- Armas, C. (Junio de 2021). *Espectros Sísmicos*.  
<https://idoc.pub/documents/espectros-sismicos-1430m7j19g4j>
- ASCE. (2016). *Minimum Designs Loads y Associated Criteria for Buildings and other Structures*.
- ASCE. (2022). Site Class Definitions. En ASCE, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (p. 225).
- Astroza Eulufi, R. (2007). *Estudio de la respuesta sísmica de edificios mediante la dinámica de propagación de ondas*.
- Astroza, M., Ruiz, S., Astroza, R., & Molina, J. (2012). *Intensidades Sísmicas*.

- Baque Domínguez, E. J., & Lema Cefla, J. C. (2013). *Plan de Gestión de Riesgos Geológicos y de Infraestructuras para la población de Monteverde desde el Análisis Estructural del complejo de gas de Monteverde*. 126. La Libertad, Santa Elena, Ecuador. UPSE.
- Barrientos Guzmán, C. W. (24 de Septiembre de 2021). *Peligro sísmico en la subcuenca del Cusco- 2019*. <https://hdl.handle.net/20.500.12557/4718>
- Bastias, N. E. (2016). *Modelo Predictivo Para Intensidades Sísmicas Superficiales en Chile*. Concepcion.
- Bermudez, M., Franco, L., Martínez, S., & Gálvez, P. (2002). *Mediciones Sísmicas e Investigación*. <https://geofisicasismospgf.blogspot.com/p/periodo-fundamental-del-suelo-ts.html>
- Boomer, J. J., & Acevedo, A. B. (2004). The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(S1), 43-91. <https://doi.org/10.1080/13632460409350521>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils 14th ed.* Pearson Prentice Hall.
- CAJEME, B. D. (2012). *Bomberos de Cajeme*.
- Campbell, K., & Bozorgnia, Y. (2003). "Relaciones empíricas de atenuación de la fuente cercana para los componentes horizontales y verticales de la aceleración máxima del suelo, la velocidad máxima del suelo y los espectros de respuesta de aceleración pseudo-absoluta". *Cartas de investigación sismológica*(68), 154-179. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.154>
- Canaan, R. (2020). *Jimcontent.com. Los 9 Tipos de Métodos de Investigación Más Habituales:*  
<https://s9329b2fc3e54355a.jimcontent.com/download/version/1545154528/module/9548090969/name/Los%209%20Tipos%20de%20M%C3%A9todos%20de%20Investigaci%C3%B3n%20M%C3%A1s%20Habituales.pdf>
- Carvajal, A., & Araya, P. (2014). *Espectro de respuesta*.

- Castillero Mimenza, Ó. (3 de Abril de 2017). *Psicología y Mente*. Los 15 tipos de investigación (y características): <https://psicologiaymente.com/miscelanea/tipos-de-investigacion>
- Cesen , I. (2022). *Estudio del Peligro Sísmico Determinista para las Estructuras de Ambato, sector San Vicente de Pishilata, entre las calles Benjamin Franklin, Ramón y Cajal, Thomas Edison y Albert Einstein. Ambato, Latacunga, Ecuador.*
- Chávez-García, F. J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos*(16). <https://doi.org/10.4067/S0718-28132014000200001>
- Chopra, A. (2014). *Dianmica de estructuras* (4ta Edicion ed.).
- Chunga, K. (2010). *Shallow crustal earthquakes and seismic zonation for Ecuador through the integration og geological , seismological and morphostructural data.*
- Chunga, K. (2013). *Riesgo en el Golfo de Guayaquil: Revisión de Datos Sismológicos y de Fallas Activas.*
- Chunga, K., Martillo, C., Pazmiño, N., Quiñonez, M. F., & Huaman, F. (2021). *Estimación de máximos niveles de sismicidad para el Litoral Ecuatoriano a través de la integración de datos geológicos y sismotectónicos.* UPSE, ESPOL, INOCAR.
- Chunga, K., Ochoa-Cornejo, F., Mulas, M., Toulkeridis, T., & Menéndez, E. (2019). Characterization of seismogenic crustal faults in the Gulf of Guayaquil, Ecuador. *Andean Geology*, 46(1). <https://doi.org/10.5027/andgeoV46n1-2991>
- CIDHMA. (2020). *CIDHMA*. <https://www.cidhma.edu.pe/como-se-produce-un-sismo-en-una-zona-de-subduccion-de-placas-tectonicas/>
- Clough, R. W., & Penzien, J. (1993). En *Dynamics of Structures. Computers & Structures.*

- Collot, V. S. (2009). *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos*. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Collot, J.-Y., M. B. (2004). Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the northern Ecuador-southwest Colombia margin. *Journal of Geophysical Research*.
- Contreras Gómez, M. B., Matamoros Correa, M. C., & Reyes Perero, F. X. (2015). *Estudio de Riesgo Sísmico Para Las Zonas Sensibles de la Infraestructuras de la Refinería la Libertad*.  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/30877>
- Data Basin. (2023). State Soil Geographic. Brawley, California, Estados Unidos.  
<https://databasin.org/maps/new/#datasets=1ff4328039f948529c33e7e71bb9b5fc>
- Data Basin. (2023). State Soil Geographic. Merced, California, Estados Unidos.  
<https://databasin.org/maps/new/#datasets=1ff4328039f948529c33e7e71bb9b5fc>
- Data Basin. (2023). State Soil Geographic. San Joaquin, California, Estados Unidos.  
<https://databasin.org/maps/new/#datasets=1ff4328039f948529c33e7e71bb9b5fc>
- Data Basin. (2023). State Soil Geographic. Imperial, California, Estados Unidos.  
<https://databasin.org/maps/new/#datasets=1ff4328039f948529c33e7e71bb9b5fc>
- Desena, D. (2016). *Metodología para la obtención de Espectros Sísmicos de piso*. Ecuador.
- Dlubal. (2020). *RF-DYNAM Pro*. <https://www.dlubal.com/es/soluciones/servicios-en-linea/glosario/000134>
- Dzul Escamilla, M. (2020). *Universidad Autónoma del estado de Hidalgo*. Los enfoques en la investigación científica:  
[https://www.uaeh.edu.mx/docencia/VI\\_Presentaciones/licenciatura\\_en\\_mecadotecnia/fundamentos\\_de\\_metodologia\\_investigacion/PRES39.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/docencia/VI_Presentaciones/licenciatura_en_mecadotecnia/fundamentos_de_metodologia_investigacion/PRES39.pdf)

- Fahjan, Y. M. (2008). Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms to Fit the Turkish Design Spectra. *Teknik Dergi*, 19, 1231-1250.
- Flores, M. (2017). Evaluación dinámica de una estructura ubicada en Pedernales mediante un Análisis del sismo equivalente y un análisis Tiempo-Historia. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Ganadería, M. d. (1978). *Inventario Cartográfico de la Costa Ecuatoriana*. Orstom.
- Gutierrez , A., Torres, J., & Contreras, M. (2020). Caracterización de sitio empleando prospección geofísica y geotécnica. Caso de estudio via principal Troncal Central del Norte ( Ruta Nacional 55) a la altura Km68+500 en el Municipio de Pamplona , norte de Santander, Colombia. Santander, Colombia.
- hmong.es. (2023). *Aceleración máxima del suelo, Geofísica y Riesgo sísmico e ingeniería*. [https://hmong.es/wiki/Peak\\_ground\\_acceleration](https://hmong.es/wiki/Peak_ground_acceleration)
- Hoyos, D., Zamudio, Y., & Huaco, G. (2021). *Análisis Tiempo-Historia considerando Interacción Suelo-Estructura de una edificación de 10 niveles y 3 sótano con un anacatilado de 50 m*.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*.
- Lindao Baque, J. V., & Polonio Briones, L. M. (2014). Evvaluación del potencial de licuefacción de suelos en la zona de Chipipe del Cantón Salinas. La Libertad, Santa Elena, Ecuador.
- López Menjivar, M. A., Hernández De Paz, J., & Hasbun, J. C. (2021). *Modernización de las provisiones que rigen el Diseño Sísmico*.
- López, J. L. (2022). *Diccionario de términos edafológicos: Tomo II*. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino de España.
- Lopez, M. A., Hernandez De Paz, J., & Hasbun, J. C. (2021). *Modernización de las provisiones que rigen el diseño sísmico* .
- López, P. (2004). *SciELO*. Población, Muestra y Muestreo: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-02762004000100012](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012)

- Macías Guaranda, S. D. (2020). *Estudio de la evaluación del potencial de licuefacción de los suelos en el área rural de la Comuna San Pablo - Cantón Santa Elena - Provincia de Santa Elena.*
- Maraboto, L. E. (2018). *Peligro , vulenrabilidad y riesgo sismico .*
- Monge, J. (2022). *Determinacion y correlacion de parametros elasticos de las capas del subsuelo aplicando metodos geofisicos y geotecnicos.*
- Muguira, A. (2023). *QuestionPro.* Diseño de investigación. Elementos y características: <https://www.questionpro.com/blog/es/diseno-de-investigacion/>
- Muñoz, A. (2002). *Ingenieria Simoresistente.*
- Muñoz, A., Alvarado, F., Zavala, G., & Zegarra, J. (2013). Espectros de Diseño para Edificaciones Peruanas. *Pontificia Universidad Católica del Perú*, 1-2.
- NEC. (2015). *Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente.* Dirección de Comunicación Social.
- NordNordWest. (9 de Diciembre de 2008). *Wikipedia.* [https://es.wikipedia.org/wiki/Salinas\\_\(Ecuador\)#/media/Archivo:Ecuador\\_location\\_map.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Salinas_(Ecuador)#/media/Archivo:Ecuador_location_map.svg)
- Nuñez, A., Calvache, M., Alvarado, C., Arcila, M., Dimate , C., Alvarado, A., & Daza, R. (2005). *Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali.*
- Páiz Hernández, E. J., & Bendaña Salinas, R. A. (21 de Enero de 2016). *Análisis de amenaza sísmica y respuesta de sitio considerando el potencial del fallamiento superficial en el Campus del Recinto Universitario “Rubén Darío” (RURD) de la UNAN-Managua.* <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/1275>
- Parra Cárdenas, H. A., Benito Oterino, M. B., Fernández Lorenzo, A., Luna Ludeña, M. P., & Molina Simbaña, X. P. (2017). *Estimación de la Peligrosidad Sísmica en Ecuador Continental.* <https://doi.org/978-9942-765-07-9>

- Parraga, J. (2020). *Análisis del Espectro de Fourier de Registros Sísmicos en función del ángulo de orientación del sensor.*
- Portillo, G. (2023). *Meteorología en Red.*  
<https://www.meteorologiaenred.com/sismograma.html>
- Properati. (2022). <https://blog.properati.com.ec/>.  
<https://blog.properati.com.ec/guia-de-ciudades/salinas/>
- Quinatoa Martínez, J. (2022). Evolución histórica de las normativas de Diseño Sismorresistente en América Latina. Casos de estudio: Colombia, Ecuador, Perú y Chile. Riobamba, Chimborazo, Ecuador.  
<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/9160/1/EVOLUCI%C3%93N%20HIST%C3%93RICA%20DE%20LAS%20NORMATIVAS%20DE%20DISE%C3%91O%20SISMO%20RESISTENTE%20EN%20AM%C3%89RICA%20LATINA.%20CASOS%20DE%20ESTUDIO%20COLOMBIA%20Y%20CHILE.pdf>
- Quiroga, A. (2020). Distancia a las Asperidades como un mejoramiento en las ecuaciones predictivas de Intensidades Sísmicas. 26. Concepción.
- Reyes, C., Miranda, E., Ordaz, M., & Meli, R. (2002). Estimación de Espectros de aceleraciones correspondientes a diferentes períodos de retorno para las distintas zonas sísmicas de la Ciudad de México. México D.F, México.
- Rietbrock, A. (2007). *Listening to the cracks of subducting oceanic plates.*
- Rodríguez, Dominguez, Huerta, Aguilar, Sanchez, Cabrera, . . . Bojorquez. (2016). Comparación de los Espectros de sitio específicos obtenidos a partir de sismos reales y aplicando la normativa MOC-CFE2008 para la ciudad de Colima, México. Colima, México.
- Rodríguez Losada, J. A. (2019). *Mecanismo focal de un terremoto.*  
[https://jrlosada.webs.ull.es/losada/MECANISMO\\_FOCAL.pdf](https://jrlosada.webs.ull.es/losada/MECANISMO_FOCAL.pdf)
- Salas Mendoza, M. D. (24 de Noviembre de 2021). *Comparación de la respuesta estructural de una edificación utilizando espectros de diseño probabilísticos y espectros de la normativa vigente para la ciudad de Cajamarca.* <http://hdl.handle.net/20.500.14074/4523>

- Salinas, G. A. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón salinas*.
- Schmidt, V. (2012). *Determinacion del parametro Vs30 usando los metodos FK y SPAC en la bahia de Cadiz*.
- Shahi, S. K., & Baker, J. W. (2020). *Directionality of ground motions in the NGA-West2 database*. Stanford University.
- Shearer, P. M. (2009). *Introduction to Seismology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/978-0-511-58010-9>
- Sismica Institute. (25 de Febrero de 2023). ASCE 7-22 (Amenaza Sísmica vs Espectro de Diseño). España.
- Tavera, H. (1993). *La tierra , Tectonica y sismicidad*. Peru.
- Universidad de Alicante. (2022). *Sismologia e Ingenieria Sísmica*.
- University of California. (2013). PEER Ground Motion Database. Berkeley, California, Estados Unidos. <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- USDA. (28 de Marzo de 2023). USDA Soils of Yolo. Davis, California, Estados Unidos. [https://yodata-yolo.opendata.arcgis.com/datasets/e879543f0ef44fbf943e86985193f843\\_0/explore?location=38.571346%2C-121.431400%2C12.75](https://yodata-yolo.opendata.arcgis.com/datasets/e879543f0ef44fbf943e86985193f843_0/explore?location=38.571346%2C-121.431400%2C12.75)
- USGS. (2023). The National Geologic Map Database. EEUU. [https://ngmdb.usgs.gov/ngmdb/ngmdb\\_home.html](https://ngmdb.usgs.gov/ngmdb/ngmdb_home.html)
- Villafañe, E., & Crisafulli, F. (Mayo de 2002). *Espectros de respuesta y diseño*. <https://www.slideshare.net/KevinRobertoGonzlezD/espectros-derespuestaydediseo>
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement . *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.



# ANEXOS

## Anexo 1

### Tablas de tipos de suelo de NEC-15

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500$ m/s $> V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760$ m/s $> V_s \geq 360$ m/s

Tipo de perfil	Descripción	Definición
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ kPa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360$ m/s $> V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100$ kPa $> S_u \geq 50$ kPa
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1—Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2—Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3—Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75)	
	F4—Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m)	
	F5—Suelos con contrastes de impedancia $\alpha$ ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
	F6—Rellenos colocados sin control ingenieril.	

Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo

## Anexo 2

### Tablas de coeficientes de sitio $F_a$ , $F_v$

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE <sub>R</sub> ) Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period					
	$S_g \leq 0.25$	$S_g = 0.5$	$S_g = 0.75$	$S_g = 1.0$	$S_g = 1.25$	$S_g \geq 1.5$
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	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8
F	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of  $S_g$ .

Site Class	Mapped Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake (MCE <sub>R</sub> ) Spectral Response Acceleration Parameter at 1-s Period					
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$
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 <sup>a</sup>	2.0 <sup>a</sup>	1.9 <sup>a</sup>	1.8 <sup>a</sup>	1.7 <sup>a</sup>
E	4.2	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8
F	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8	See Section 11.4.8

Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of  $S_1$ .  
<sup>a</sup>Also, see requirements for site-specific ground motions in Section 11.4.8.

## Anexo 3

### Tablas de NEC-15 para valores $F_a$ , $F_d$ y $F_s$ correspondientemente.

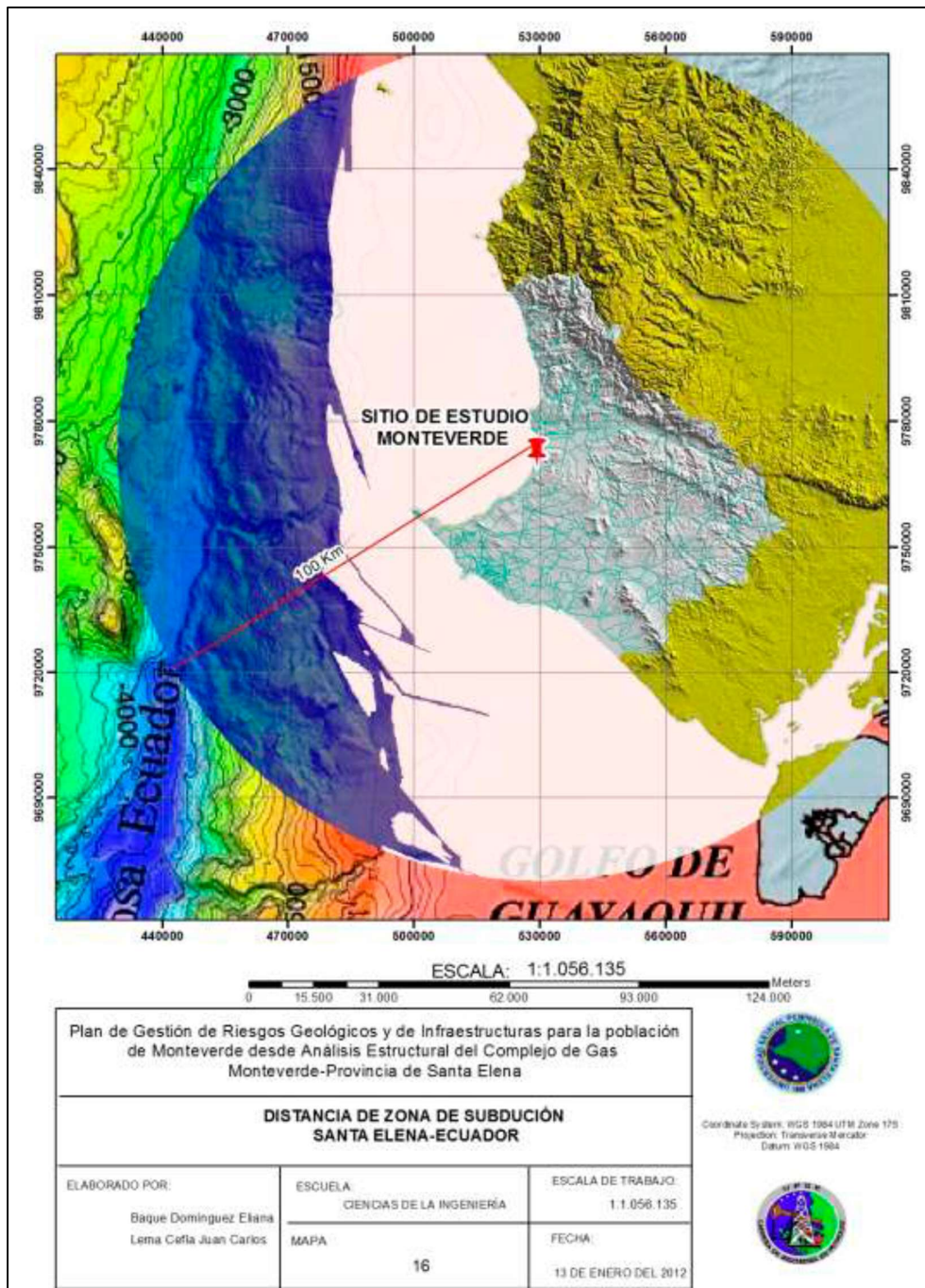
TIPO DE PERFIL DEL SUBSUELO	ZONA SISMICA Y FACTOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	$\geq 0.5$
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1	0.85

TIPO DE PERFIL DEL SUBSUELO	ZONA SISMICA Y FACTOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	$\geq 0.5$
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

TIPO DE PERFIL DEL SUBSUELO	ZONA SISMICA Y FACTOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	$\geq 0.5$
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

**Anexo 4**

*Proximidad de la comuna Monteverde a la zona más crítica de la falla de subducción.*



## Anexo 5

Fichas con los datos técnicos de los Espectros de Diseño homologados para las ciudades escogidas en la sección 4.4.

