



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CONTRIBUCIÓN DE REGISTROS ESPECTRO COMPATIBLES PARA  
DISEÑO DE EDIFICACIONES UBICADAS SOBRE SUELOS BLANDOS  
EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE MACHALA**

**DAVILA GUZMAN ALVARO ALEXANDER  
INGENIERO CIVIL**

**MACHALA  
2023**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CONTRIBUCIÓN DE REGISTROS ESPECTRO COMPATIBLES  
PARA DISEÑO DE EDIFICACIONES UBICADAS SOBRE  
SUELOS BLANDOS EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE  
MACHALA**

**DAVILA GUZMAN ALVARO ALEXANDER  
INGENIERO CIVIL**

**MACHALA  
2023**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROYECTOS TÉCNICOS**

**CONTRIBUCIÓN DE REGISTROS ESPECTRO COMPATIBLES  
PARA DISEÑO DE EDIFICACIONES UBICADAS SOBRE  
SUELOS BLANDOS EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD  
DE MACHALA**

**DAVILA GUZMAN ALVARO ALEXANDER  
INGENIERO CIVIL**

**ORDOÑEZ FERNANDEZ JOSE LUIS**

**MACHALA  
2023**

# ALVARO DAVILA

*por* Alvaro DAVILA

---

**Fecha de entrega:** 12-oct-2023 10:19a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2193588906

**Nombre del archivo:** Davila\_Alvaro.pdf (5.66M)

**Total de palabras:** 20012

**Total de caracteres:** 104902

# ALVARO DAVILA

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

10%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

---

ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

---

< 1%

★ earth-planets-space.springeropen.com

Fuente de Internet

---

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado

## **CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL**

El que suscribe, DAVILA GUZMAN ALVARO ALEXANDER, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado CONTRIBUCIÓN DE REGISTROS ESPECTRO COMPATIBLES PARA DISEÑO DE EDIFICACIONES UBICADAS SOBRE SUELOS BLANDOS EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE MACHALA, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



---

DAVILA GUZMAN ALVARO ALEXANDER

0706825023

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Fanny y Victor, por estar cada momento apoyándome y enseñándome la importancia de la perseverancia en la búsqueda de mis metas.

A todas las personas quienes estuvieron a mi lado durante este proceso.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres y a mi familia, por apoyarme en cada paso y ayudarme a cumplir mis objetivos. También quiero extender mi gratitud al Ing. José Luis Ordoñez Fernández por compartir sus conocimientos y experiencia, lo que ha enriquecido mi desarrollo académico.

## RESUMEN

Este proyecto describe la metodología y los criterios utilizados para la búsqueda y selección de acelerogramas en diversas bases de datos, como el PEER (Centro De Investigación De Ingeniería Sísmica Del Pacífico), IGEPN (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional), Centro de Observación para la Ingeniería sísmica del CISMID y el CSN (Centro sísmológico Nacional de la Universidad de Chile). El objetivo principal es lograr que el espectro de respuesta de estos acelerogramas se asemeje al espectro de diseño elástico para ciudad de Machala, es decir, para un periodo de retorno de 475 años.

Para este propósito, a partir de una base de setenta y siete registros se seleccionaron de manera rigurosa trece pares de acelerogramas que representan las componentes horizontales de los registros. Estos acelerogramas provienen de terremotos registrados por estaciones acelerográficas en países como Ecuador, Perú y Chile; los registros cumplen con criterios de selección establecidos por la ASCE-7 (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles) y la FEMA 450 (Agencia Federal para la Gestión de Emergencias). Los criterios incluyen consideraciones como el mecanismo de fuente, la magnitud del terremoto y las condiciones del suelo del sitio de estudio, las cuales se clasificaron en función de la máxima amplitud de Fourier de cada acelerograma para determinar su periodo dominante en base a su frecuencia.

Se aplicó un proceso de filtrado y corrección a los acelerogramas para realizar el ajuste espectral, el cual se llevó a cabo en el rango de periodos que abarca desde 0.08 hasta 3.3 segundos en donde el contenido espectral de los acelerogramas se modificó de manera que el promedio de los espectros en la dirección máxima no caiga por encima ni por debajo del espectro objetivo en un 10%. Este ajuste se verificó mediante el método SRSS (Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados).

**Palabras clave:** Escalado de amplitud, Ajuste espectral, Registros sísmicos, SRSS.

## ABSTRACT

This project describes the methodology and criteria used for the search and selection of accelerograms in various databases, such as PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center), IGEPN (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional), CISMID (Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica), and CSN (Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile). The main objective is to make the response spectrum of these accelerograms resemble the elastic design spectrum for the city of Machala, which corresponds to a return period of 475 years.

For this purpose, rigorously selected thirteen pairs of accelerograms representing the horizontal components of the records from a base of seventy-seven records. These accelerograms were taken from earthquakes recorded by accelerometer stations in countries such as Ecuador, Peru, and Chile. The selection criteria comply with the standards established by ASCE-7 (American Society of Civil Engineers) and FEMA 450 (Federal Emergency Management Agency). The criteria include considerations such as the source mechanism, earthquake magnitude, and site soil conditions, which were classified based on the Fourier amplitude of each accelerogram to determine its dominant period.

A filtering and correction process was applied to the accelerograms to perform spectral adjustment. This adjustment was carried out in the period range from 0.08 to 3.3 seconds. It aimed to modify the spectral content of the accelerograms so that the average of the spectra in the maximum direction does not deviate more than 10% above or below the target spectrum. This adjustment was verified using the Square Root of the Sum of the Squares (SRSS) method.

**Keywords:** Amplitude Scaling, Spectral matching, Seismic Records, SRSS.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
Importancia del tema.....	1
Actualidad de la problemática.....	1
Estructura de trabajo.....	2
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Línea base del proyecto.....	3
1.2. Descripción de la Situación problemática.....	4
1.3. Formulación del problema: preguntas científicas.....	5
1.4. Delimitación del objeto de estudio.....	5
1.5. Justificación.....	6
1.6. Objetivos: general y específicos.....	7
1.6.1. Objetivo general.....	7
1.6.2. Objetivos específicos.....	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Antecedentes contextuales.....	8
2.1.1. Catálogos sísmicos Ecuador.....	11
2.2. Antecedentes referenciales.....	12
2.3. Antecedentes Conceptuales.....	13
2.3.1. Peligrosidad sísmica.....	13
2.3.2. Coeficientes de amplificación para suelos C, D, E.....	14
2.3.3. Vulnerabilidad sísmica.....	15
2.3.4. Falla geológica.....	16
2.3.5. Tipos de perfiles de suelos.....	17
2.3.6. Propiedades dinámicas del suelo.....	18
2.3.7. Periodo elástico del suelo.....	18
2.3.8. Efectos de sitio.....	19
2.3.9. Velocidad de onda de corte.....	19
2.3.10. Ondas sísmicas.....	21
2.3.11. Catálogos sísmicos.....	23
2.3.12. Estaciones sísmicas.....	24
2.3.13. Acelerógrafo.....	26
2.3.14. Acelerograma.....	27
2.3.15. Registros artificiales.....	27

2.3.16.	Sismos de campo cercano.....	27
2.3.17.	Componente vertical de un sismo .....	28
2.3.18.	Espectro de respuesta .....	28
2.3.19.	Espectro de diseño .....	29
2.3.20.	Espectro elástico de diseño en aceleraciones según NEC. ....	29
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....		31
3.1	Modalidad básica de la investigación .....	31
3.2	Tipo de investigación .....	31
3.3	Objeto de estudio .....	31
3.4.	Descripción de la población y muestra.....	31
3.5.	Métodos teóricos con los materiales utilizados.....	32
3.5.1.	Normativas .....	32
3.6.	Métodos empíricos con los materiales utilizados.....	33
3.6.1.	Bases de datos.....	33
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		34
4.1.	Búsqueda y Selección de Registros.....	34
4.2.	Registros seleccionados .....	40
4.3.	Tratamiento de acelerogramas.....	44
4.3.1.	Filtrado y corrección de acelerogramas .....	44
4.4.	Duración significativa .....	46
4.5.	Periodos .....	47
4.6.	Escalado de amplitud.....	48
4.7.	Ajuste Espectral (Spectral Matching) .....	49
4.8.	Interpretación de datos .....	50
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		57
5.1.	Conclusiones.....	57
5.2.	Recomendaciones .....	58
Referencias Bibliográficas .....		60
ANEXOS .....		65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa Base del cantón Machala.....	6
Figura 2.1. Cinturón de fuego.....	8
Figura 2.2. Mapa de eventos sísmicos de Ecuador.....	12
Figura 2.3. Mapa de peligro sísmico del Ecuador.....	13
Figura 2.4. Tipos de Fallas Geológicas.....	17
Figura 2.5. Ondas Sísmicas .....	23
Figura 2.6. Distribución de estaciones de la red de geodesia para monitoreo de la deformación tectónica.....	26
Figura 2.7. Espectro de Diseño.....	29
Figura 2.8. Espectro de diseño para la ciudad de Machala.....	30
Figura 3.1. Metodología para Espectrocompatibilidad de señales.....	32
Figura 4.1. Búsqueda de Registros en sitio web del PEER.....	34
Figura 4.2 Fallas cercanas a la ciudad de Machala.....	35
Figura 4.3. Frecuencia estación ACH2-N. ....	40
Figura 4.4. Espectros de respuesta de estaciones ACH1, TCU0115, TCU051, BI016YL .	41
Figura 4.5 Estaciones seleccionadas y sismos registrados. ....	42
Figura 4.6. Estaciones seleccionadas y sismos registrados. ....	43
Figura 4.7. Corrección de línea Base de Aceleración, Velocidad y Desplazamiento .....	45
Figura 4.8. Duración Significativa.....	46
Figura 4.9. Tiempo en donde se alcanza la Intensidad Acumulada.....	47
Figura 4.10 Escalado de amplitud.....	49
Figura 4.11. Acelerograma Original y Escalado .....	50
Figura 4.12. Comparación entre Spectral Match y Escalado de amplitud .....	50
Figura 4.13. Acelerograma de estación GKYA ajustado espectralmente .....	51
Figura 4.14. Acelerograma de estación ACH1 ajustado espectralmente .....	51
Figura 4.15. Acelerograma de estación AC07 ajustado espectralmente .....	51
Figura 4.16. Acelerograma de estación ACH2 ajustado espectralmente .....	51
Figura 4.17. Acelerograma de estación ARNL ajustado espectralmente .....	52
Figura 4.18. Acelerograma de estación APLA ajustado espectralmente .....	52
Figura 4.19. Acelerograma de estación AGYE ajustado espectralmente .....	52
Figura 4.20. Acelerograma de estación APED ajustado espectralmente .....	52
Figura 4.21. Acelerograma de estación APO1 ajustado espectralmente .....	53

Figura 4.22. Acelerograma de estación ASDO ajustado espectralmente .....	53
Figura 4.23. Acelerograma de estación MATANZAS ajustado espectralmente .....	53
Figura 4.24. Acelerograma de estación VALLENAR ajustado espectralmente .....	53
Figura 4.25. Acelerograma de estación TAC002 ajustado espectralmente.....	54
Figura 4.26. Ajuste Espectral .....	55
Figura 4.27. Combinación direccional.....	54
Figura 4.28. SRSS.....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Geomorfología de la ciudad de Machala .....	3
Tabla 2.1. Terremotos más grandes registrados .....	9
Tabla 2.2. Terremotos más grandes registrados en los últimos años.....	9
Tabla 2.3. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.....	14
Tabla 2.4. Tipo de suelo y Factores de sitio Fa .....	14
Tabla 2.5. Tipo de suelo y Factores de sitio Fd .....	15
Tabla 2.6. Tipo de suelo y Factores de sitio Fa .....	15
Tabla 2.7. Perfiles de Suelo .....	17
Tabla 2.8. Red Nacional de Acelerógrafos .....	25
Tabla 4.1 Fallas cercanas a la ciudad de Machala.....	35
Tabla 4.2 Resumen de Registros obtenidos del PEER .....	36
Tabla 4.3. Resumen de Registros obtenidos en el IGEPN, CSN y CISMID.....	38
Tabla 4.4. Clasificación del suelo mediante el período dominante del sitio.....	40
Tabla 4.5. Registros escogidos en función del Período Dominante.....	41

## **INTRODUCCIÓN**

### **Importancia del tema**

Ecuador, es un país con un alto peligro sísmico, múltiples sismos se han registrado en los últimos 470 años los cuales han causado grandes daños a ciudades como Ambato, Riobamba, Ibarra, Esmeraldas, entre otras (Rivadeneira et al., 2007). A partir de esto se han realizado estudios de peligrosidad sísmica con el objetivo de construir edificaciones las cuales disminuyan este riesgo.

La vulnerabilidad es uno de los factores determinantes del riesgo sísmico, en la ciudad de Machala a causa de la elevada vulnerabilidad sísmica que recae en los proyectos y construcciones, se debe plantear acciones para fortalecer la capacidad de mitigación de la vulnerabilidad estructural ante el peligro sísmico. Entre estas acciones se puede mencionar el diseño de edificaciones que respondan a la realidad de la demanda sísmica en Machala, en donde se involucra la recolección de registros representativos de acciones sísmicas locales las cuales son esenciales para definir un evento sísmico determinado, ya que estos dependen de las condiciones geotécnicas de la ciudad en donde se recolectan (Siahkoohi et al., 2019). Por lo general un registro de un movimiento sísmico apropiado no solo debe describir la naturaleza no estacionaria y estocástica de los terremotos sino también debe tener aplicabilidad de ingeniería; es decir, debe usar un número apropiado de muestras representativas para análisis tipo historia tiempo utilizando aceleraciones según el tipo de terremoto (Xiong & Huang, 2019).

### **Actualidad de la problemática**

América Latina y parte de América central se constituyen como regiones con gran actividad sísmica presentando con cierta frecuencia sismos de elevadas magnitudes que han generado grandes devastaciones. En América latina la causa es el cinturón de fuego, el cual es un conjunto de fronteras de placas tectónicas donde las placas de la corteza terrestre acumulan grandes tensiones y las liberan en forma de sismos, esta zona incluye a países como Colombia, Ecuador, Perú, Chile, entre otros.

Una particularidad de Ecuador es su ubicación geográfica, como ya se mencionó se encuentra localizado en el cinturón de fuego del pacífico, cerca de la zona de subducción en donde convergen las placas Oceánica Nazca y Continental Sudamericana, provocando

de esta manera que el país registre una actividad sísmica considerable, llegando a registrar grandes movimientos telúricos entre los cuales se puede referir el ocurrido en 1906 de 8.8 Mw y el del 16 de abril del 2016 ocurrido en Pedernales con una magnitud de 7.8 Mw, produciendo daños importantes en obras civiles de las provincias de Esmeraldas y Manabí.

A diferencia de países como Chile el cual presenta una gran colección de registros sísmicos, Ecuador no cuenta con una colección de registros sísmicos verificados, la información es limitada y en algunos casos no se puede acceder a ella, además de que los tipos de suelo para cada ciudad presentan características geotécnicas diferentes, provocando que no se puede estimar con exactitud las máximas solicitaciones que se presentaran en dichas zonas.

### **Estructura de trabajo**

El primer capítulo corresponde al planteamiento del problema, en donde se aborda la línea base del proyecto, y se describe la problemática que motiva la investigación. Además, se plantean las preguntas científicas que se abordarán y se argumenta los objetivos del estudio.

El segundo capítulo se enfoca en el marco teórico, donde se realiza una revisión exhaustiva de la literatura científica y se recopila información de artículos científicos referentes documentación sísmica, que servirán de base para la construcción de los antecedentes contextuales, conceptuales y referenciales del proyecto.

En el tercer capítulo se detalla la metodología empleada en la investigación, en donde se seleccionó la modalidad de estudio, el tipo de investigación y el objeto de estudio. Se incluye una descripción de la población y muestra utilizada en la investigación, así como la presentación de los métodos tanto teóricos como empíricos que se aplicarán para el procesamiento de datos sísmicos.

Finalmente, en el cuarto capítulo se lleva a cabo el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos en donde se verifica la espectrocompatibilidad de las señales sísmicas utilizadas en el proyecto.

## CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Línea base del proyecto

En consideración a los riesgos presentes en la ciudad de Machala uno de los factores que se debe tener presente es la peligrosidad sísmica (PODT), ya que según la NEC-SE-DS la superficie total del cantón Machala se encuentra ubicada en una zona sísmica alta, con un factor  $Z=0.4$ , con predominio de suelos blandos y velocidades de onda de corte ( $V_{s30}$ ) bajas, por lo que se debe tener en consideración un diseño adecuado de las estructuras.

Machala cuenta con una extensión aproximada de 37,275.23 Ha y una población de aproximadamente de 289,141 habitantes, por lo que debería contar con un estudio de microzonificación, de acuerdo a lo establecido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción, en donde se menciona que ciudades con más de 100,000 habitantes deben contar con estudios de microzonificación sísmica y geotécnica en su territorio de manera que se pueda definir recomendaciones para el diseño y construcción de edificaciones sismorresistentes.

Geomorfológicamente en el cantón Machala, las geoformas predominantes son las llanuras aluviales las cuales ocupan el 82,83% de la superficie del cantón tal como se observa en la Tabla 1.1, en cuanto a su geología, existe un solo tipo de litología correspondiente a Arcillas marinas de estuario, del periodo Cuaternario.

Tabla 1.1. Geomorfología de la ciudad de Machala

Geomorfología	Área (Ha)	%
Llanuras aluviales de depositación	30.875,31	82,83
Nivel aluvial alto	442,09	1,19
Terraza baja	60,14	0,16
Terraza indiferenciada	424,36	1,14
Zonas urbanas	3.694,59	9,91
Cuerpos de agua	1.778,74	4,77
Total	37.275,23	100

Fuente: Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Cantón Machala

De acuerdo con el estudio Geotecnia enfocada a cimentaciones de edificaciones de 3 pisos en la ciudad de Machala se menciona que los suelos de la zona sureste de la ciudad al nivel de desplante presentan una tendencia de estar conformados por mezclas de arcillas de mediana y alta plasticidad con presencia de nivel freático desde el primer metro de sondeo. Además, se menciona que existe una elevada cantidad de edificios de hasta tres niveles para los cuales la respuesta de suelos es insuficiente para cimentaciones superficiales (Cabrera et al., 2020).

A causa del predominio de suelos blandos, la norma también establece que, para suelos tipo F, debe realizarse un espectro de respuesta elástico de aceleraciones específico al sitio, basándose en la geología, tectónica, sismología y características del suelo local.

## **1.2. Descripción de la Situación problemática**

El problema central gira en torno a la falta de información de registros sísmicos lo cual provoca limitaciones en el diseño de edificaciones en la zona urbana de la ciudad de Machala, es decir las estructuras carecen de diseños que utilicen procedimientos como es el denominado análisis paso a paso en el tiempo (tiempo historia). Entre los causantes del problema que se identifican se pueden mencionar las siguientes:

La inexistencia de una microzonificación para la ciudad de Machala por la falta de estudios geotécnicos, lo cual provoca que exista incertidumbre sobre la realidad geofísica de los suelos de la ciudad de Machala y a su vez la relativa falta de precisión al momento de evaluar el peligro sísmico.

Por otra parte, la ausencia de datos sísmicos a causa de la poca cobertura de instrumentos de monitoreo de señales sísmicas ocasiona que los datos de registros sísmicos a nivel nacional se tengan que estimar y las edificaciones tengan que ser diseñadas en función de un desplazamiento máximo el cual está controlado por una deriva inelástica, es decir los diseñadores se encuentran condicionados a realizar un análisis dinámico espectral.

Otro factor que a tener a consideración es la ausencia eventos que hayan generado registros históricos locales que sean de importancia, por lo que los catálogos sísmicos se encuentran incompletos y se debe recurrir al uso de registros artificiales o foráneos para caracterizar la demanda sísmica.

### **1.3. Formulación del problema: preguntas científicas.**

Para realizar un análisis dinámico de una estructura se debe caracterizar un evento sísmico utilizando un grupo de acelerogramas con propiedades dinámicas representativas de los ambientes tectónicos, geológicos y geotécnicos del sitio, debido a la ausencia de señales sísmicas relevantes en la ciudad de Machala se plantea lo siguiente: ¿Existen registros sísmicos que se adapten a la realidad geofísica para suelos de la ciudad de Machala?

La Norma Ecuatoriana de la Construcción propone que, para poblaciones con más de 100,000 habitantes deben disponer de estudios de microzonificación sísmica y geotécnica en su territorio, entonces ¿Machala cuenta con estudios de microzonificación que caractericen sísmicamente los suelos predominantes en la ciudad?

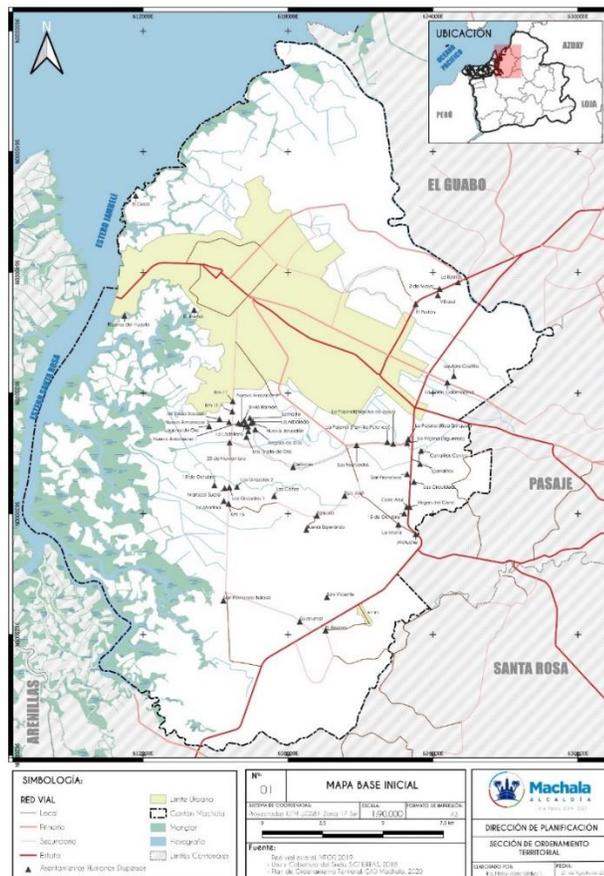
El IG-EPN cuenta con dos equipos acelerógrafos en el Oro, con lo cual se plantea la siguiente pregunta ¿Existen registros de eventos sísmicos para la ciudad de Machala?

Existen varios métodos para transformar un espectro de respuesta a un espectro de diseño y además la NEC establece criterios mínimos para la selección de estos, por lo que se formula la siguiente pregunta ¿Cuáles son los tipos de tratamientos de acelerogramas y cuáles son los requisitos mínimos que establece la norma para su elección?

### **1.4. Delimitación del objeto de estudio**

El objeto de estudio del presente proyecto se enfoca en el tratamiento de registros sísmicos y la verificación de la espectrocompatibilidad de los mismos para la ciudad de Machala para la cual se establecieron los siguientes límites territoriales al Norte con el cantón el Guabo, al Sur con el cantón Santa Rosa, al Este con el cantón Pasaje y al Oeste con el archipiélago de Jambelí (Santa Rosa) y el Océano Pacífico.

Figura 1.1. Mapa Base del cantón Machala



Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado de Machala, 2019)

## 1.5. Justificación

El presente trabajo se va a sustentar en la bibliografía fijada por la Norma Ecuatoriana de la Construcción la cual establece que al momento de diseñar una estructura se plantean tres tipos de análisis: análisis estático, análisis dinámico y análisis dinámico paso a paso en el tiempo, para este último, los acelerogramas a emplearse deben ser representativos de los terremotos reales esperados en la zona, lo cual implica obtener un espectro del sitio compatible con el respectivo de la norma, dicho espectro debe ser generado a partir de registros sísmicos, sin embargo, la ciudad de Machala actualmente no cuenta con mencionados registros sísmicos, por lo que dentro de la misma norma en los métodos de análisis para el DBF se menciona que se puede utilizar las dos componentes horizontales de registros de acelerogramas apropiadamente seleccionados, escalados, ajustados a partir de no menos de tres eventos sísmicos, aunque, normativas externas (ASCE-7) mencionan que el número de registros requeridos deben ser de once.

Como ya es de conocimiento la determinación de un espectro de diseño se hace de acuerdo con las características geotécnicas del lugar de emplazamiento de una estructura, es decir como consecuencia de las características de los suelos, las solicitaciones que se transmiten a las estructuras son muy diferentes, en dependencia del comportamiento del terreno ante las cargas actuantes que incluso varían dependiendo de los estratos de suelo, Machala al presentar tendencia a suelos blandos, las ondas sísmicas se amplifican al atravesar este tipo de suelos, siendo esto causante de grandes daños estructurales y no estructurales al momento de presentarse un sismo diseño, aspecto que a menudo en Machala no se tiene en cuenta al momento de analizar y diseñar una estructura.

Por lo tanto, se plantea la elaboración de registros espectro compatibles para diseño de edificaciones ubicadas sobre suelos blandos en la zona urbana de ciudad de Machala, los cuales posteriormente pueden ser ampliados para más zonas sísmicas, perfiles de suelos o usando otras metodologías.

## **1.6. Objetivos: general y específicos**

### **1.6.1. Objetivo general**

Realizar el ajuste espectral de acelerogramas a partir de registros sísmicos provenientes de ambientes tectónicos, geológicos y geotécnicos representativos de la de zona de estudio, para su uso en el diseño de edificaciones ubicadas sobre suelos blandos de la ciudad de Machala.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

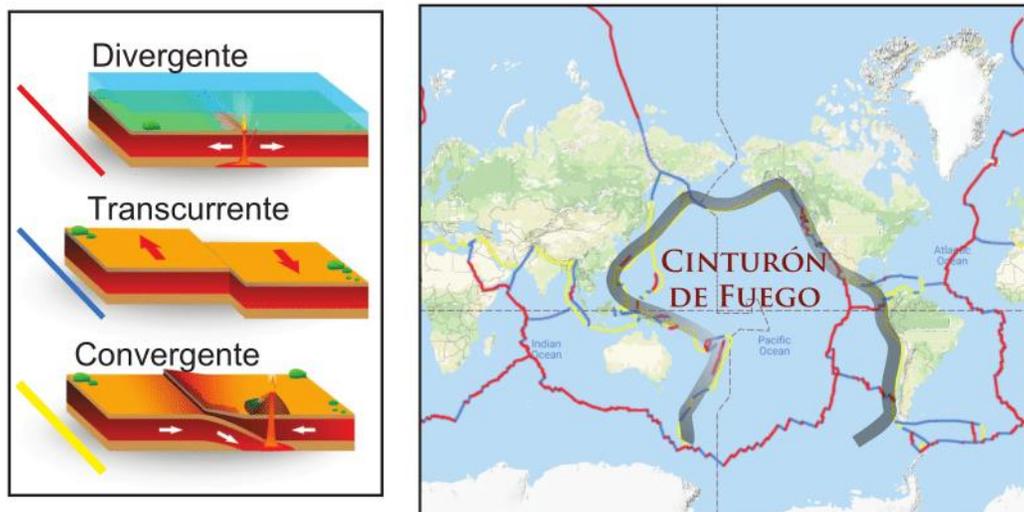
- Analizar la realidad geofísica de los tipos de suelos con énfasis en suelos blandos de la ciudad Machala.
- Recopilar informes y registros de eventos sísmicos con características relacionadas con suelos identificados para la ciudad de Machala.
- Proceder al tratamiento de los registros acelerográficos individualmente hasta cumplir la mínima cantidad requerida en la norma.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes contextuales

A nivel global cada año se registran una gran cantidad de sismos por los observatorios sísmicos de cada país, si observamos un mapa de la distribución de las placas tectónicas como se muestra en la Figura 2.1 podemos identificar las principales zonas sísmicas a nivel mundial, de las cuales podemos destacar el círculo sísmico circumpacífico también llamado cinturón de fuego o anillo de fuego, en donde cada año más del 80% del total de energía sísmica es liberada aquí, a nivel mundial las costas de América del sur presentan la mayor actividad sísmica (Tavera, 2012).

Figura 2.1. Cinturón de fuego



Fuente: (González Huizar, 2019)

En términos generales, las zonas con los valores más altos de peligro sísmico en el mundo suelen encontrarse en áreas que han experimentado terremotos en los límites de las placas tectónicas más grandes. Las áreas con los mayores valores de peligro se encuentran a lo largo de los límites de la placa de subducción (Shedlock, 2002). La Tabla 2.1 enumera los diez terremotos más grandes del siglo 20 (por ejemplo, los terremotos más grandes registrados instrumentalmente), mientras que la Tabla 2.2 enumera los últimos terremotos más grandes registrados.

Tabla 2.1. Terremotos más grandes registrados

<b>Evento</b>	<b>Año</b>	<b>Mw</b>
Chile	1960	9.5
Alaska	1964	9.2
Aleutiana	1957	9.1
Kamchatka	1952	9
Ecuador	1906	8.8
Aleutiana	1965	8.7
Assam	1950	8.6
Islas Kuriles	1963	8.5
Chile	1922	8.5
Mar de Banda	1938	8.5

Fuente: (Shedlock, 2002)

Tabla 2.2. Terremotos más grandes registrados en los últimos años

<b>Evento</b>	<b>Año</b>	<b>Mw</b>
(Valdivia) Chile	1960	9.5
Alaska	1964	9.2
Andamán	2004	9.1
Japón	2011	9
Kamchatka (Rusia)	1952	9
Maule (Chile)	2010	8.8
Ecuador	1906	8.8
Alaska	1965	8.7
Sumatra Septentrional	2005	8.6

Fuente: Elaborada por Autor

(Tena-Colunga, 2021) menciona que México dispone de suelos muy blandos debido a que en la época colonial se inició el proceso de drenar y secar una cuenca cerrada que contenía a cinco lagos, para resolver un problema de inundaciones y de paso ganar terrenos para la construcción urbana, además la demanda sísmica se concentra en el margen occidental del continente a causa de la interacción que existe entre la placa Norteamericana con la placa del Pacífico y en el noroeste a la subducción entre las placas Rivera y Cocos por debajo de la placa Norteamericana en el Sur.

En América Central resulta muy difícil la estimación de la demanda sísmica porque en la zona interactúan cinco placas tectónicas: Norteamérica, Caribe, Cocos, Nazca y Sudamericana y la microplaca de Panamá, sísmicamente es una región activa, en una zona de subducción, con presencia de fallas transformantes y puntos triples cercanos, su realidad tectónica es compleja (Arroyo, 2022).

En Latinoamérica a causa de las zonas de subducción, la región es propensa a megaterremotos destructivos que rompen la interfaz de la placa y producen daños junto con áreas amplias, a menudo asociadas con tsunamis devastadores (Gaidzik & Więsek, 2021).

Chile se encuentra entre los países con mayor actividad sísmica de la Tierra, aquí se han generado algunos de los terremotos de subducción más grandes. La zona de subducción del norte de Chile está formada por la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana. Grandes terremotos históricos en el norte de Chile ocurrieron en 1543, 1615, 1786 y 1877. El último megaterremoto, ocurrido el 9 de mayo de 1877, con una magnitud de Mw 8.5 causó una ruptura de 500 km de longitud y generó un tsunami que afectó la costa chilena (Pasten et al., 2022).

En el norte de Ecuador la zona de subducción ha acogido eventos de megacorrimento desde el siglo pasado, incluso desde la prehistoria, esto a causa de la heterogeneidad en el acoplamiento de placas y la subducción de la topografía del fondo marino, los cuales constituyen factores que controlan las ubicaciones de la actividad de megacorrimento y la agrupación de la sismicidad (Hoskins et al., 2021).

A nivel nacional Ecuador tiene una historia de terremotos tanto de origen volcánico como tectónico (Nikolaou et al., 2016), desde 1906 ha registrado importantes sismos como el terremoto ocurrido en Esmeraldas en 1906 con una magnitud de 8.8 Mw (Lanning et al., 2016), el cual es uno de los mayores terremotos de megacorrimento que han ocurrido en la interfaz de las placas de Nazca y América del Sur (Pulido et al., 2020), entre otros sismos representativos se pueden mencionar el ocurrido en Riobamba 1794 con una Mw 8.3, en 1949 en Ambato con Mw 6.8, Esmeraldas 1958 con Mw 8, reventador 1987 con Mw 6.9, Bahía de Caráquez 1998 con Mw 7.2, Pedernales en 2016 con Mw 7.8 (Rivadeneira et al., 2007) y en el Golfo de Guayaquil en 2023 con Mw 6.8.

La base sísmica del Ecuador se la ha organizado con información desde 1541, trabajo elaborado por el IG y por el CERECIS aproximadamente en la época del 90 (Rivadeneira

et al., 2007), en 1952 se publica el código nacional de la construcción, luego del sismo en Ambato el 5 de agosto de 1949 de Mw 6.8, el cual rigió las normas para construcciones sismo resistente, posteriormente en 1977 se publica el Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC-1977), luego de que en 1976 dos sismos ocurridos en esmeraldas y en Cotopaxi respectivamente produjeran daños significativos a las estructuras, el CEC-77 consideraba que toda la zona de Ecuador tenía una peligrosidad sísmica alta, pues el valor del factor de zona sísmica (Z) se encontraba en rangos de 0.5 a 1. Más tarde se comenzó a trabajar en una actualización: el Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC-2001) en respuesta a múltiples eventos sísmicos que azotaron a Ecuador, en donde ya se incorpora la zonificación sísmica, en donde los factores de zona sísmica (Z) se redujeron a valores entre 0.15g y 0.4g. Finalmente la última actualización de la normativa se oficializo el 10 de enero del 2015, la cual consiste del capítulo NEC-SE-DS de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015), en donde se desarrolla aún más el contenido, respaldado de las investigaciones de sismicidad por parte de la Escuela Politécnica Nacional, y basada en normas como el ASCE-10, FEMA 440, NEHRP, NSR10 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente). En esta última actualización, la zonificación sísmica es más actualizada. (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI, 2015).

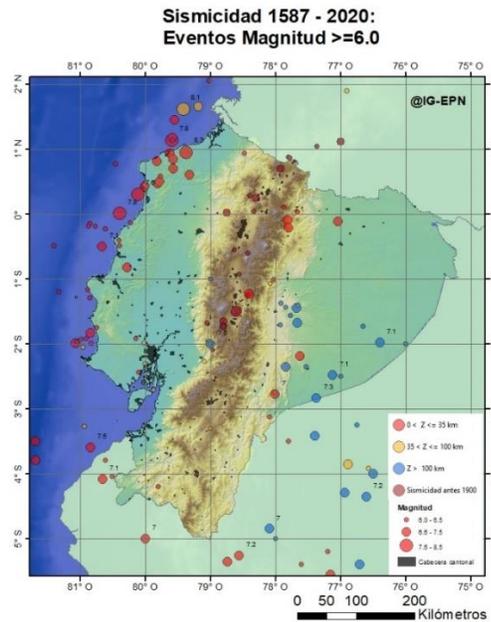
### **2.1.1. Catálogos sísmicos Ecuador**

En 1987, el Instituto Geofísico empezó con la operación continua de la red de sismógrafos: RENSIG con 11 estaciones de periodo corto, una red de transmisión de datos en tiempo real, y con la adquisición y procesamiento de datos. Actualmente cuenta con alrededor de 450 estaciones para el monitoreo continuo de la actividad volcánica y sísmica en Ecuador, incluida las islas Galápagos.

Según el IG-EPN Ecuador cuenta con un catálogo unificado con datos desde 1901 y 14 sismos históricos importantes que fueron localizados con métodos indirectos y ocurrieron entre 1587 y 1868.

En la Figura 2.2 el mapa muestra la sismicidad mayor o igual a 6 en magnitud desde 1587 al 2020. Aquí se aprecia que los eventos se localizan en la zona costera, relacionada a la zona de subducción y en la Sierra relacionado al sistema de fallas al interior del país.

Figura 2.2. Mapa de eventos sísmicos de Ecuador



Fuente: (IG-EPN)

## 2.2. Antecedentes referenciales

El ASCE-7 (The American Society of Civil Engineers) en el capítulo 16 correspondiente a “NONLINEAR RESPONSE HISTORY ANALYSIS” establece los requisitos mínimos para la selección de registros sísmicos al momento de realizar un análisis paso a paso en el tiempo, por otra parte el FEMA 450 (Federal Emergency Management Agency) NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures, en el capítulo 13, presenta el método de escalamiento de registros sísmicos en el tiempo, el proceso se detalla a continuación (ASCE 7, 2022; Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015).

Primero se recopilan registros semilla superior a la requerida para una etapa de calificación, lo cual implica reunir una base considerable de registros para luego señalar 13 registros representativos de la zona de estudio para realizar un filtrado y corrección de las series de tiempo de cada acelerograma, luego identificar según los periodos y frecuencias dominantes de la señal la tendencia a determinando tipo de suelo (blando, rígido), posteriormente se identifica el espectro de respuesta de aceleraciones de cada acelerograma y se evalúa la idoneidad del escalado de la señal. Dentro la espectrocompatibilidad se aplica la manipulación del contenido frecuencial para generar el ajuste con el espectro de la NEC (Norma Ecuatoriana de Construcción) y aplicar la

combinación direccional para cada registro en función del aporte de las dos componentes ortogonales.

Posteriormente se verifica la compatibilidad general del espectro alcanzado obtenido con el de la NEC para el tipo de suelo blando sujeto a estudio, y se promedia un espectro resultante de los espectros tratados previamente para lo cual se eligen 13 de los más idóneos posibles. Finalmente se verifican específicamente en función del periodo de la estructura (aislada o fija) el cumplimiento de la compatibilidad del espectro promedio.

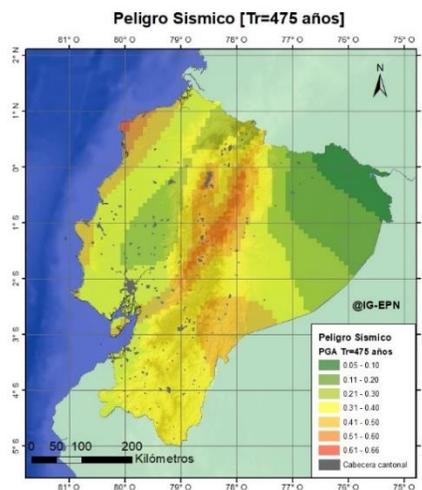
## 2.3. Antecedentes Conceptuales

### 2.3.1. Peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica se ha definido como la probabilidad de que se supere un determinado valor de la variable sísmica IM (La medida de la intensidad del movimiento del suelo) en un período de T años (Perepérez, 2014).

En Ecuador el mapa de zonificación sísmica para diseño proviene del resultado del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años es decir con un período de retorno 475 años (NEC-SE-DS, 2015).

Figura 2.3. Mapa de peligro sísmico del Ecuador



Fuente (IG-EPN)

En el mapa de la Figura 2.3 se muestra 3146 puntos en los que se calculó el peligro sísmico para un sitio genérico en roca ( $V_{S30}=760\text{m/s}$ ). Los resultados están para 8 periodos espectrales: PGA (0.0 segundos), y los valores en 0.07, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 y 2 segundos

(IG-EPN). En la Tabla 2.3 se detalla la caracterización del peligro sísmico según la zona sísmica.

Tabla 2.3. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.4	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedio	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

Se considera que el territorio de Ecuador posee un alto nivel de amenaza sísmica en general, aunque hay algunas excepciones. Por ejemplo, la región del nororiente presenta una amenaza sísmica de nivel intermedio, mientras que el litoral del país muestra un nivel de amenaza sísmica muy alto.

Adicionalmente la Norma Ecuatoriana de Construcción presenta los siguientes coeficientes para los perfiles del suelo.

### 2.3.2. Coeficientes de amplificación para suelos C, D, E.

#### 2.3.2.1. Fa: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto.

En la Tabla 2.4 se presentan los valores del coeficiente Fa que amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, tomando en cuenta los efectos de sitio.

Tabla 2.4. Tipo de suelo y Factores de sitio Fa

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I 0.15	II 0.25	III 0.30	IV 0.35	V 0.4	VI ≥ 0.50
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	0.85
F	Requiere estudios de sitio					

Fuente: Modificado desde (NEC-SE-DS, 2015)

#### 2.3.2.2. Fd: amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca

En la Tabla 2.5 se presentan los valores del coeficiente  $F_d$  que amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

Tabla 2.5. Tipo de suelo y Factores de sitio  $F_d$

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	<b>0.15</b>	<b>0.25</b>	<b>0.30</b>	<b>0.35</b>	<b>0.4</b>	<b>≥ 0.50</b>
<b>C</b>	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
<b>D</b>	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
<b>E</b>	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
<b>F</b>	Requiere estudios de sitio					

Fuente: Modificado desde (NEC-SE-DS, 2015)

### 2.3.2.3. $F_s$ : comportamiento no lineal de los suelos

En la Tabla 2.6 se presentan los valores del coeficiente  $F_s$ , que consideran el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos.

Tabla 2.6. Tipo de suelo y Factores de sitio  $F_a$

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.4	≥ 0.50
<b>C</b>	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
<b>D</b>	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
<b>E</b>	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
<b>F</b>	Requiere estudios de sitio					

Fuente: Modificado desde (NEC-SE-DS, 2015)

### 2.3.3. Vulnerabilidad sísmica

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica es un tema de investigación precursor en cuanto a ingeniería sísmica. La vulnerabilidad sísmica tiene un papel importante en el diseño estructural ya que los fuertes movimientos del suelo causan daños estructurales en diferentes grados, a causa de la variación de la carga sísmica. Especialmente, se ha

observado que el daño sísmico es más prominente en los movimientos de tierra cercanos a la falla o campo (Poreddy et al., 2022).

El tiempo de inactividad de los edificios después de un terremoto provoca una interrupción de la generación de ingresos en edificios de oficinas e industriales. Los edificios que se mantienen funcionales posterior a un terremoto son económicamente atractivos. En el caso de edificios, como de hospitales los cuales desempeñan un papel esencial en la respuesta de emergencia, se espera una funcionalidad continua incluso bajo eventos sísmicos fuertes (Kitayama et al., 2023).

#### **2.3.4. Falla geológica**

Una falla es una fractura en las rocas de la corteza terrestre que se origina por el deslizamiento de un bloque con respecto al otro. Esta zona de ruptura tiene una superficie generalmente bien definida llamada "plano de falla" que separa dos bloques de corteza. Las fallas geológicas suelen estar asociadas a los bordes de las placas tectónicas y a su interacción entre sí (Instituto Geográfico Militar, 2016).

Las fallas se clasifican en cuatro tipos en función de los esfuerzos que las originan y de los movimientos relativos de los bloques:

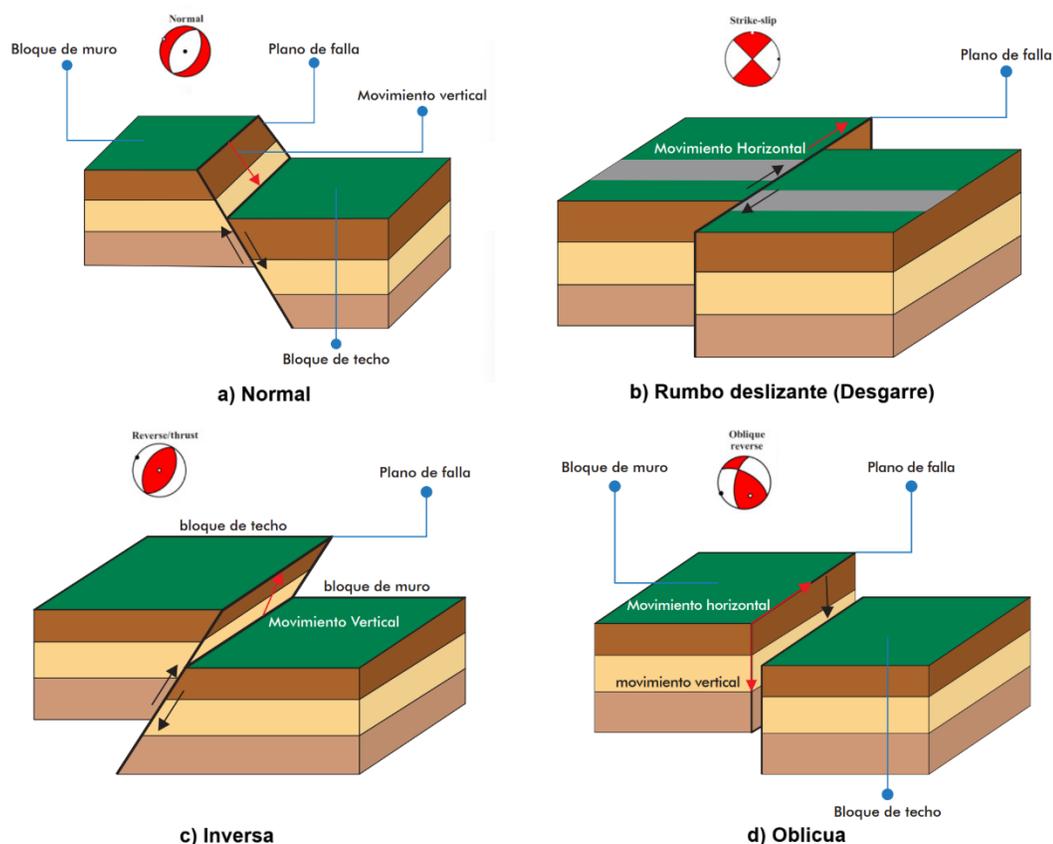
**a. Fallas Normales:** Estas fallas se producen en regiones donde las capas de roca están siendo separadas. Son causadas por la fricción y se caracterizan por un movimiento descendente del bloque superior a lo largo del plano de falla.

**b. Fallas de Rumbo Deslizante (Desgarre):** Estas fallas se originan cuando los movimientos son predominantemente horizontales o laterales. Si el movimiento es en sentido contrario a las agujas del reloj, se llaman "sinestrales", y si es en sentido horario, se denominan "dextral".

**c. Fallas Inversas:** Estas fallas se desarrollan en regiones donde las rocas están sometidas a fuerzas de compresión. El bloque superior se desplaza hacia arriba a lo largo del plano de falla.

**d. Fallas Oblicuas:** Estas fallas involucran una combinación de movimientos tanto horizontales como verticales. Son el resultado de movimientos laterales junto con movimientos hacia abajo o hacia arriba a lo largo del plano de falla.

Figura 2.4. Tipos de Fallas Geológicas



Fuente: Modificado desde Atlas sismo Ecuador 16 abril 2016

### 2.3.5. Tipos de perfiles de suelos

La NEC define seis tipos de perfil de suelo los cuales se presentan en la Tabla 2.7, los parámetros utilizados corresponden a los 30 metros superiores del perfil para perfiles A, B, C, D Y E mientras que el perfil tipo F se deben realizar investigaciones geotécnicas específicas de suelo, las cuales permitan conocer y modelar su comportamiento dinámico (NEC-SE-DS, 2015).

Tabla 2.7. Perfiles de Suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
<b>C</b>	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100 \text{ kPa}$

<b>D</b>	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$ $50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$
<b>E</b>	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180 \text{ m/s}$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas.	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50 \text{ kPa}$
<b>F</b>	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan 6 subclases F1, F2, F3, F4, F5, F6.	

*Fuente: Modificado desde (NEC-SE-DS, 2015)*

### 2.3.6. Propiedades dinámicas del suelo

El análisis de vibraciones de cimentaciones y la investigación de problemas geotécnicos de ingeniería sísmica en ingeniería civil requieren caracterizar las propiedades dinámicas mediante el empleo de métodos geofísicos. Las propiedades dinámicas del suelo son importantes en el análisis estructural dinámico de una estructura, estas incluyen la caracterización del sitio, análisis de riesgo sísmico, análisis de asentamiento, análisis de respuesta del sitio, aplicación de diseño e interacción suelo-estructura. (Basri et al., 2021)

Los métodos sísmicos (refracción sísmica y MASW) son herramientas poderosas para determinar el módulo elástico del suelo en función de los valores de sus velocidades de onda y corte. Las velocidades de onda de compresión y de corte obtenidas de SR y MASW se utilizan para determinar las propiedades dinámicas del suelo y la capacidad de carga para cada capa delineada. Después de estimar las velocidades, se pueden calcular las propiedades dinámicas del subsuelo. Las propiedades dinámicas asociadas incluyen la relación de Poisson, la densidad aparente, el módulo de Young, el módulo de corte y el módulo aparente (Salleh et al., 2021).

### 2.3.7. Periodo elástico del suelo

El período elástico del suelo es un factor fundamental para evaluar la respuesta sísmica de las edificaciones y garantizar su seguridad ante terremotos u otras fuerzas sísmicas. El período fundamental del suelo ( $T_s$ ) es un indicador ampliamente utilizado a nivel mundial para evaluar los efectos locales del suelo ante la acción de las fuerzas sísmicas. En varias

ocasiones, estos efectos han sido relacionados con los daños en estructuras observados después de terremotos, principalmente debido al fenómeno de resonancia en el cual el suelo y la estructura vibran en forma sincronizada, generando mayores esfuerzos y desplazamientos en la estructura, los cuales pueden provocar su colapso (Bermúdez et al., 2002).

### **2.3.8. Efectos de sitio**

Los llamados efectos sísmicos de sitio deben ser tomados en cuenta para la estimación de efectos sobre estructuras. En la hipótesis de una capa uniforme de suelo elástico lineal isotrópico que recubre un lecho rocoso rígido, la amplificación del suelo de un movimiento horizontal armónico del lecho rocoso sísmico es una función del espesor de la capa de suelo y la velocidad de propagación de las ondas de corte,  $V_s$ . En casos reales, la complejidad del modelo geológico del subsuelo produce una propagación de ondas sísmicas más complicada. Como consecuencia, se requiere un análisis de respuesta del sitio para caracterizar la dinámica del suelo. Sin embargo, para los casos en los que no se pueden realizar tales análisis, se propuso un parámetro simplificado para tener en cuenta la respuesta del sitio, es decir, la velocidad de onda de corte promedio de los 30 m superiores (Mori et al., 2020).

(Tena-Colunga, 2021) menciona que los sitios que se encuentran cercanos a playas o a márgenes de ríos, lagos o lagunas no componen suelos totalmente firmes, se suelen tratar de suelos blandos los cuales presentan condiciones que amplifican notablemente las demandas de aceleración y de desplazamientos.

Las cimentaciones de las edificaciones al estar apoyadas en el suelo se constituyen como bases flexibles. Sin embargo, para la evaluación de un edificio se asume que la base del edificio es rígida (fija), lo cual es una suposición demasiado general ya que, en realidad, la condición del suelo local tiene un efecto importante en la respuesta de la estructura. (Wani et al., 2022).

### **2.3.9. Velocidad de onda de corte**

El movimiento del suelo se rige por la velocidad de la onda de corte: cuanto mayor sea la velocidad, menos temblor en el suelo se producirá. La velocidad está determinada por el tipo de suelo y es mayor en suelo blando que en suelo duro o roca. Las estimaciones de la

velocidad promedio de la onda de corte en los 30 metros superiores del suelo se basan en el tipo y las propiedades de ingeniería como A, B, C, D, E o F (Khan, 2013).

Para determinar la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) se debe recurrir a ensayos geofísicos para encontrar los valores mediante algún método indirecto o geofísico, cuando no se pueden obtener estos ensayos geofísicos se suele recurrir a otras ecuaciones empíricas para la determinación de la velocidad de corte ( $V_s$ ) como por ejemplo la a partir de la resistencia a la penetración estándar (N) la cual dependerá mucho de la los equipos y metodología con la que se realice, por lo que se debe tener mucha cautela al realizarse, pero este es un método directo, dentro de los métodos indirectos se suele recurrir erróneamente a la determinación del velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) a partir de la velocidad de onda de compresión (VP) cuando no se conoce la relación Poisson ( $\mu$ ) de los estratos de suelo, ya que la onda de compresión (VP) viaja mucho más rápido que la onda de corte ( $V_s$ ), entre un 70% y 140% más rápido. Además, se debe tener en cuenta el nivel freático, en el caso de existir, no se puede detectar estratos de suelo sumergidos cuya la velocidad de onda de compresión sea menor a 1,480 m/s ya que es la velocidad de onda a la compresión en el agua. Otra cosa más que se debe mencionar es que la velocidad de propagación de las ondas cortante ( $V_s$ ) o de compresión (VP) deben incrementarse con la profundidad, ya que se puede dar el caso de que los parámetros obtenidos no fuesen totalmente correlacionables con la geología del sitio (Lazcano, 2012).

Hay que tener en cuenta que la velocidad de onda de corte no es suficiente para clasificar el suelo, después del terremoto del 16 de abril del 2016 con una magnitud de 7.8, se realizaron estudios utilizando métodos indirectos, para poder diagnosticar la vulnerabilidad sísmica, y los resultados arrojados fueron que la mayoría de suelos eran resistentes (de un total de 17 análisis, 13 suelos clasificaron como tipo "C" y 4 como tipo "D"), según la Norma Ecuatoriana de construcción estos perfiles pertenecen a suelos muy densos y suelos rígidos, Aguiar et al., (2018) concluyen que la clasificación de suelos según la NEC basada en la velocidad de corte ( $V_s$ ) debería ser complementada con el periodo de vibración del suelo o con la amplitud máxima del espectro de Fourier (Aguiar et al., 2018).

(Uyanık, 2019) menciona que el comportamiento de los suelos arcillosos está influenciado por algunas propiedades del suelo, entre las cuales se puede incluir la velocidad de la onda de corte, el módulo de corte, la relación de Poisson y la porosidad. Siendo la porosidad del suelo una de las propiedades físicas más importantes para determinar la permeabilidad en

la base de cualquier construcción. La presencia de una capa de suelo blando influye en la propagación de la onda entrante desde el lecho rocoso, de tal manera que modifica los movimientos del suelo y el comportamiento dinámico del suelo. (Sun et al., 2019), También se puede mencionar que cuando ocurre la licuefacción, la vibración periódica del suelo se alarga y la frecuencia dominante cambia (Kamura et al., 2021).

### **2.3.10. Ondas sísmicas**

Las ondas sísmicas a menudo se denominan ondas elásticas, que pueden describirse como la energía causada por una ruptura repentina de roca dentro de la tierra, como los terremotos, o explosiones, como las fuentes en los estudios sísmicos. Pueden viajar en el aire y en materiales sólidos o líquidos, por ejemplo, a través del interior de la tierra o dentro de los océanos (Dondurur, 2018).

Las ondas sísmicas se dividen en dos grupos, las de cuerpo, que viajan en el interior de un medio elástico, y las de superficie, que se propagan a lo largo del límite entre dos medios sólidos diferentes. Las ondas de cuerpo se subdividen a su vez en ondas de compresión o primarias (VP) y de corte o secundarias (VS). A su vez, las ondas de superficie se subdividen en Love y Rayleigh (Lazcano, 2012).

#### **2.3.10.1. Ondas de cuerpo**

##### **Ondas P**

Las ondas P son más rápidas que las ondas S y llegan primero a los sismómetros, seguidas de las ondas S, durante un terremoto. Es por eso por lo que son llamadas ondas primarias y secundarias, respectivamente. Las ondas P expresan compresión (por lo tanto, también se conocen como ondas de compresión), estas pueden viajar en sólidos como rocas y sedimentos del subsuelo, líquidos como la columna de agua de los océanos y gases. Las partículas afectadas por las ondas P se mueven en la misma dirección, paralelas a la trayectoria del rayo en la que se propaga la onda tal como se muestra en la Figura 2.5. (Dondurur, 2018)

##### **Ondas S**

Las ondas S crean cizallamiento (por lo tanto, también se conocen como ondas de corte) a través de las partículas durante el paso de la onda. Se propagan solo en sólidos, y las

partículas afectadas por las ondas S se mueven en una dirección perpendicular a la trayectoria del rayo a lo largo de la cual se propaga la onda. Esto puede ser en dos direcciones: hacia arriba y hacia abajo o vibración transversal vertical (que es el cizallamiento vertical u onda SV), o vibración transversal de lado a lado u horizontal (que es el cizallamiento horizontal u onda SH). Los movimientos de las partículas afectadas por las ondas S se muestran esquemáticamente en la Figura 2.5.

(Zhang et al., 2021) menciona que los terremotos tectónicos tienen ondas P y S bien desarrolladas, una amplitud de ondas S notablemente mayor que de ondas P, además de componentes de alta frecuencia desarrollados y una amplia banda de frecuencia principal.

Las ondas P son el principal tipo de onda sísmica utilizada en la exploración sísmica tanto en la adquisición sísmica terrestre como marina. la velocidad de onda S depende del módulo de rigidez y de la densidad del medio de propagación. Dado que la rigidez es cero en los líquidos, las ondas S no se propagan en el agua y, por lo tanto, las exploraciones por ondas S no son comunes en la sísmica marina (Dondurur, 2018).

### **2.3.10.2. Ondas superficiales**

#### **Ondas de Rayleigh**

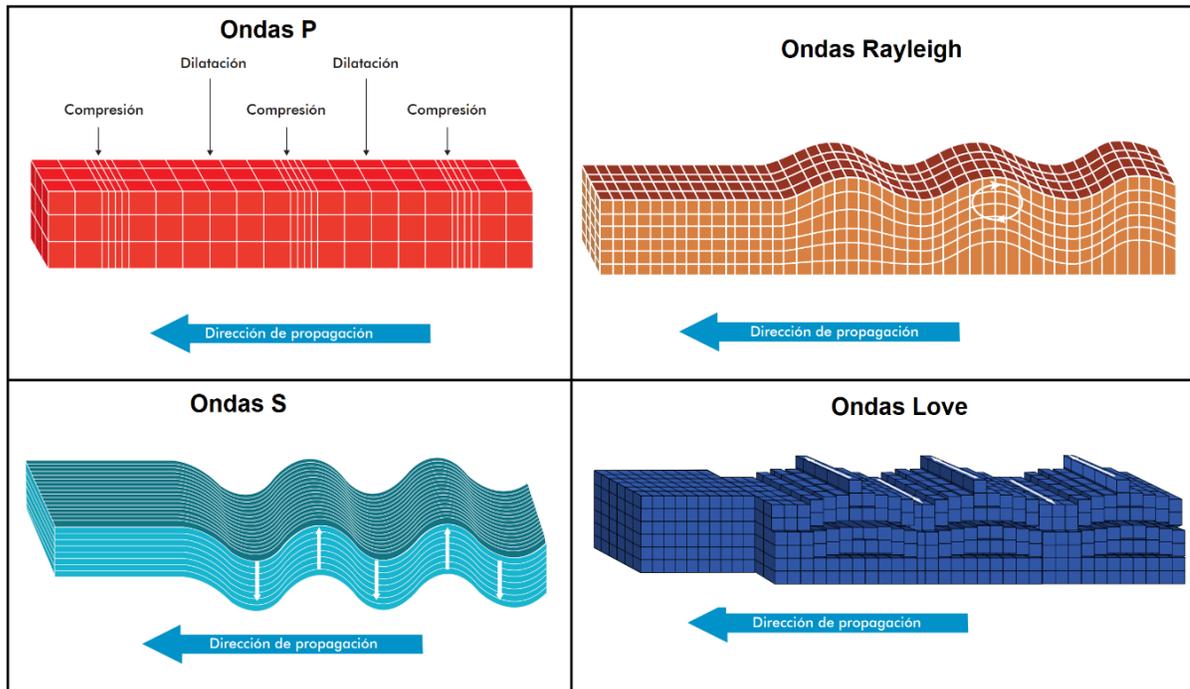
Las ondas de Rayleigh exhiben un movimiento de partículas elípticas retrógradas cerca de la superficie, que mueve la partícula hacia arriba y hacia abajo y de lado a lado en la misma dirección paralela a la trayectoria del rayo en la que se propaga, obsérvese Figura 2.5. Producen un tipo de ruido bien conocido, denominado balanceo del suelo en sísmica terrestre (Dondurur, 2018). Se forman cuando el movimiento de las partículas es una combinación de vibración longitudinal y transversal que da lugar a un movimiento retrógrado elíptico en el plano vertical a lo largo de la dirección de desplazamiento (Haldar, 2018).

(Yu & Zhou, 2023) menciona que la onda de Rayleigh es una onda superficial que resulta de la interferencia de las ondas de compresión y de corte en la superficie del suelo. Estas ondas transportan la mayor parte de la energía sísmica en el campo lejano y decaen más lentamente con la distancia a diferencia de las ondas de compresión y de corte. Por lo tanto, las ondas de Rayleigh son una preocupación principal en el diseño de estructuras de ingeniería.

## Ondas Love

El movimiento de las partículas de las ondas de Love es similar a las ondas SH, que muestran una polarización completamente horizontal (Dondurur, 2018). La inversión de forma de onda completa (FWI) de onda superficial que tiene como objetivo obtener estimaciones detalladas de las propiedades del subsuelo a partir de datos sísmicos, cada vez se ha vuelto más popular para la exploración sísmica superficial ya que el FWI de ondas Love es más sencillo y tiene una mayor precisión y resolución en comparación con las ondas Rayleigh (Guan et al., 2022). Sin embargo, según (Gualtieri et al., 2020) para microsismos secundarios el mecanismo de generación no puede explicar la presencia de ondas Love en los componentes horizontales de los registros micro sísmicos.

Figura 2.5. Ondas Sísmicas



Fuente: Atlas Sismo Ecuador, abril 2016

### 2.3.11. Catálogos sísmicos

Un catálogo sísmico es una recopilación de registros sísmicos que incluyen todos los parámetros que definen un sismo, los cuales se utilizan para llevar a cabo cualquier tipo de investigación sismológica.

Los datos sísmicos recuperados del campo están severamente contaminados por varios tipos de ruidos aleatorios. La eliminación temprana de estos ruidos mejora el rendimiento de varios pasos de procesamiento como corrección estática y análisis de velocidad (Sharma et al., 2022).

Para la evaluación del comportamiento sísmico de las estructuras (es decir, la ingeniería sísmica basada en desempeño) a menudo se basan en análisis dinámicos no lineales. Por tal razón, la selección de registros de movimiento del suelo es de suma importancia, debido a la variabilidad de registro a registro de la respuesta estructural (Paolacci et al., 2023).

(Li et al., 2017) mencionan que para reducir el tiempo de cómputo, pero sin sacrificar significativamente la precisión en la estimación de la demanda de diseño sísmico, varios códigos de diseño sísmico prescriben pautas generales para seleccionar un número limitado de registros de movimiento del suelo requeridos para realizar el análisis tiempo historia, sin embargo, la evaluación de las estadísticas del nivel de diseño sísmico mediante el uso de un pequeño número de componentes de registro y la evaluación de la probabilidad de falla de las estructuras diseñadas de esa manera no están disponibles (Li et al., 2017).

### **2.3.12. Estaciones sísmicas**

Los acelerómetros registran la aceleración con la que se mueve el suelo, poseen tres sensores ortogonales: componente vertical, norte-sur y este-oeste. Los registros de los eventos obtenidos son procesados y analizados, determinando los valores de aceleración máxima y puede determinarse la escala de intensidad, estos datos son útiles para entender el comportamiento al que puede ser sometida las estructuras durante un sismo o un terremoto destructivo.

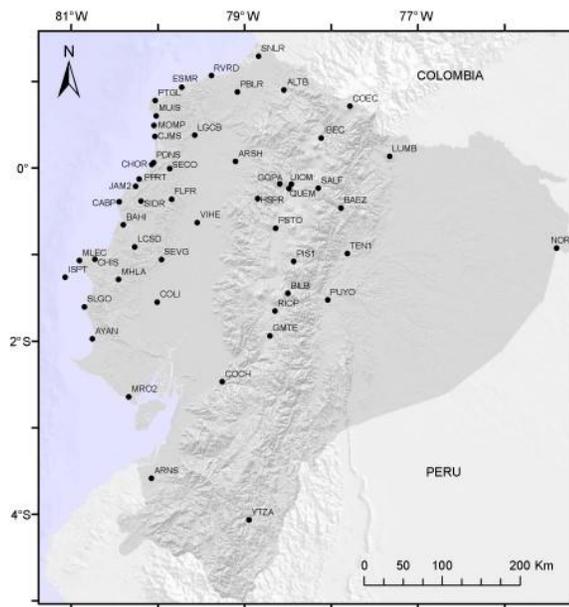
En Ecuador el primer acelerómetro se lo instala en la Escuela Politécnica Nacional, posteriormente se amplía la cobertura en todo el Distrito Metropolitano de Quito, posteriormente, con la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) se cubre la costa, sierra y oriente en las principales ciudades. Esta red permite la recopilación de valiosa información para el estudio del movimiento del suelo y el cálculo de aceleraciones. La Figura 2.6 y la Tabla 2.8 presentan la distribución y ubicación de la Red Nacional de Acelerógrafos.

Tabla 2.8. Red Nacional de Acelerógrafos

<b>Código</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Código</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
ALTB	<b>0.9</b>	<b>-78.55</b>	<b>ALTB</b>	<b>0.9</b>	<b>-78.55</b>
ARNS	-3.58	-80.08	ARNS	-3.58	-80.08
ARSH	0.08	-79.11	ARSH	0.08	-79.11
AYAN	-1.97	-80.76	AYAN	-1.97	-80.76
BAEZ	-0.46	-77.89	BAEZ	-0.46	-77.89
BAHI	-0.65	-80.4	BAHI	-0.65	-80.4
BILB	-1.45	-78.5	BILB	-1.45	-78.5
CHIS	-1.05	-80.73	CHIS	-1.05	-80.73
CHOR	0.04	-80.07	CHOR	0.04	-80.07
CJMS	0.37	-80.03	CJMS	0.37	-80.03
COCH	-2.47	-79.26	COCH	-2.47	-79.26
COLI	-1.55	-80.01	COLI	-1.55	-80.01
COEC	0.72	-77.79	COEC	0.72	-77.79
LUMB	0.14	-77.33	LUMB	0.14	-77.33
ESMR	0.94	-79.72	ESMR	0.94	-79.72
GGPA	-0.18	-78.59	GGPA	-0.18	-78.59
GMTE	-1.94	-78.71	GMTE	-1.94	-78.71
IBEC	0.35	-78.12	IBEC	0.35	-78.12
JAM2	-0.21	-80.26	JAM2	-0.21	-80.26
MHLA	-1.29	-80.45	MHLA	-1.29	-80.45
MLEC	-1.07	-80.91	MLEC	-1.07	-80.91
MOMP	0.49	-80.05	MOMP	0.49	-80.05
MRO2	-2.64	-80.34	MRO2	-2.64	-80.34
MUIS	0.6	-80.02	MUIS	0.6	-80.02
NORE	-0.92	-75.4	NORE	-0.92	-75.4
PBLR	0.88	-79.08	PBLR	0.88	-79.08

Fuente: IG-EPN

Figura 2.6. Distribución de estaciones de la red de geodesia para monitoreo de la deformación tectónica



Fuente: IG-EPN

Para localizar un terremoto, es necesario tener lecturas correctas del tiempo de llegada de las ondas P y S en varias estaciones sísmicas. La precisión de la ubicación depende del número de estaciones y su distribución en el espacio en relación con el hipocentro. Por lo general, la incertidumbre de la ubicación de los epicentros es del orden de unos cientos de metros si la cobertura de datos es buena, pero la incertidumbre de la ubicación de la profundidad suele ser mayor (Flóvenz et al., 2012).

### 2.3.13. Acelerógrafo

Es un dispositivo que mide la velocidad de los movimientos del suelo en relación con el tiempo y se activa cuando se alcanza cierto nivel de movimiento, como cuando la aceleración vertical del suelo supera un valor establecido como umbral de disparo (Aranda & Enriquez, 2019).

Los acelerógrafos son capaces de captar una amplia gama de frecuencias que engloban los períodos más relevantes de las estructuras y elementos de construcción de interés en el ámbito de la Ingeniería Civil. Muchas de estas frecuencias no pueden ser detectadas por los sismógrafos tradicionales o se pierden en el campo lejano. En términos generales, un acelerógrafo se compone de tres sensores que detectan el movimiento en dos

componentes horizontales (generalmente en las direcciones N-S y E-W) y uno vertical (Aranda & Enriquez, 2019).

#### **2.3.14. Acelerograma**

Un acelerograma es una representación gráfica que muestra la aceleración experimentada por el suelo en un punto específico durante un terremoto. Se utiliza un instrumento llamado acelerógrafo para registrar la aceleración en tres direcciones: dos horizontales y una vertical. Dado que la aceleración varía considerablemente con el tiempo, se requiere una frecuencia de muestreo muy alta, típicamente en el rango de 0.01 a 0.02 segundos, para capturar los datos de manera precisa (Aranda & Enriquez, 2019).

#### **2.3.15. Registros artificiales**

La creación de acelerogramas artificiales es un recurso sumamente valioso y relevante en la planificación de estructuras diseñadas para resistir sismos, especialmente cuando estas presentan comportamientos no lineales. Como los registros de sismos reales son limitados, se generan registros artificiales que se asemejan a los reales en cuanto a sus dos componentes horizontales. Los sismos artificiales se elaboran a partir de los registros obtenidos para este propósito.

#### **2.3.16. Sismos de campo cercano**

Los terremotos de campo cercano se originan a una distancia menor de 20 km del lugar de interés y su movimiento es influenciado por los desplazamientos generados durante la ruptura de la fuente. Estos desplazamientos son directamente proporcionales al área de la ruptura, la cual, a su vez, es proporcional a la energía o al momento sísmico de la ruptura, los cuales dependen del desplazamiento y la caída de esfuerzos liberados en el momento de la ruptura (Rodríguez, 2020).

(Brune & Thatcher, 2002) menciona que los registros sísmicos de campo cercano (aquellos obtenidos dentro de unas pocas dimensiones de falla) de terremotos tan grandes como Mw 7 permiten estimaciones de velocidades y aceleraciones del suelo que pueden relacionarse con estimaciones locales de la duración del deslizamiento y los cambios de tensión que ocurren durante el deslizamiento en la falla, por otra parte (Simos et al., 2018) menciona que los terremotos de campo lejano son mucho más destructivos que sus contrapartes de campo cercano.

### **2.3.17. Componente vertical de un sismo**

(Rinaldin et al., 2019) mencionan que, durante un evento sísmico, las variaciones en la carga axial causan un cambio en la capacidad de resistencia lateral de los paneles de mampostería. Además, la tensión axial puede ser modificada a causa del componente vertical de la entrada sísmica durante un evento, lo cual puede amplificar las variaciones de fuerza, en especial si hay una excitación cercana a la falla. Por lo general, la componente vertical se descuida en un diseño tradicional, además (Vilera et al., 2008) mencionan que el efecto de la componente vertical en la respuesta dinámica de estas estructuras depende principalmente de la cercanía a la fuente y de la relación entre la aceleración máxima vertical y la horizontal.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) establece que en presencia de volados o en edificaciones esenciales o de ocupación especial ubicadas en el campo cercano a una falla geológica, las cargas sísmicas horizontales y verticales deben combinarse. También se indica que la componente vertical del sismo puede ser determinada mediante el escalamiento de la componente horizontal de la aceleración por un factor mínimo de  $2/3$ . Sin embargo, en el caso de estructuras esenciales o especiales ubicadas en el campo cercano (0 - 10 km) de una falla superficial, es necesario evaluar la componente vertical del sismo a través del estudio de la respuesta de sitio. Además, se requiere la inclusión de la componente vertical del sismo para elementos que sobrepasan los límites de las plantas de los pisos (NEC-SE-DS, 2015).

### **2.3.18. Espectro de respuesta**

El espectro de respuesta es una herramienta que permite resumir de manera conveniente la respuesta máxima de todos los sistemas lineales posibles de un grado de libertad a una componente específica del movimiento del terreno.

La principal utilidad del espectro de respuesta radica en su capacidad como herramienta de análisis para evaluar la solidez y resistencia de las infraestructuras. Esto permite medir cómo diferentes equipos y estructuras mantienen su integridad durante terremotos u otras fuerzas similares. Los ingenieros comparan los espectros de respuesta de una región sísmica particular con la frecuencia natural de una estructura, o la velocidad a la que vibra el edificio cuando se mueve.

El espectro de respuesta es una representación gráfica que muestra el valor máximo de respuesta, ya sea desplazamiento, velocidad o aceleración, de un conjunto de sistemas de un grado de libertad en relación con un parámetro del sistema, generalmente  $w$ ,  $f$  o  $T$ . La gráfica suele ser una curva que muestra el espectro de respuesta de aceleración normalizado por la aceleración máxima del terreno para una sollicitación particular (Aranda & Enriquez, 2019).

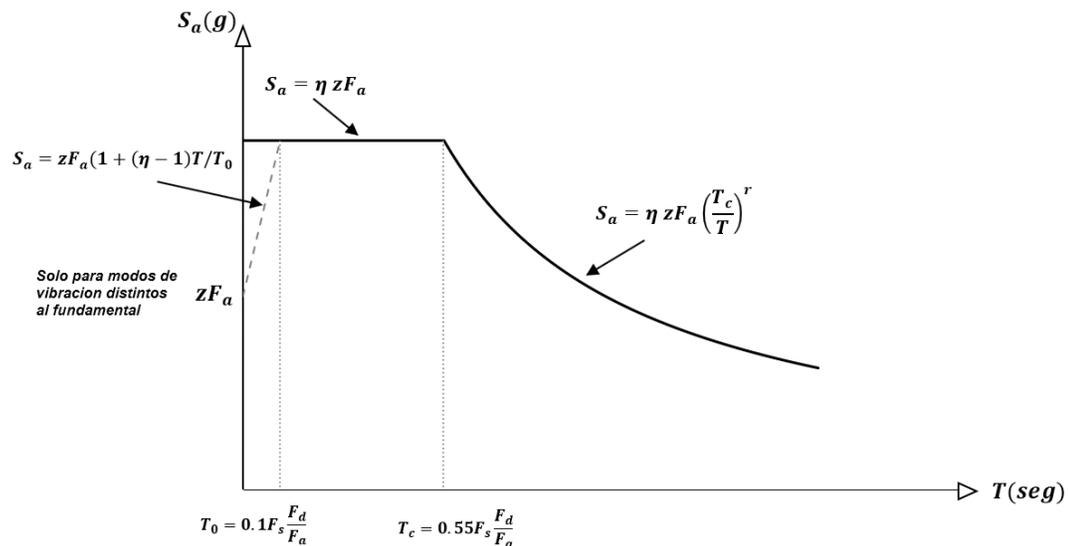
### 2.3.19. Espectro de diseño

En el análisis sísmico de construcciones, el espectro de diseño se refiere a una representación gráfica que ilustra las variaciones sísmicas que pueden afectar a una estructura en función de su diseño y las características del terreno donde se ubica, usualmente se muestra en términos de aceleración o desplazamiento.

### 2.3.20. Espectro elástico de diseño en aceleraciones según NEC.

El espectro elástico en aceleraciones de la norma estudiada (NEC–15, 2015) se muestra en la Figura 2.7 y se expresa en términos de la aceleración de la gravedad para el nivel del sismo de diseño, obedeciendo a una fracción de amortiguamiento respecto al crítico de 5%.

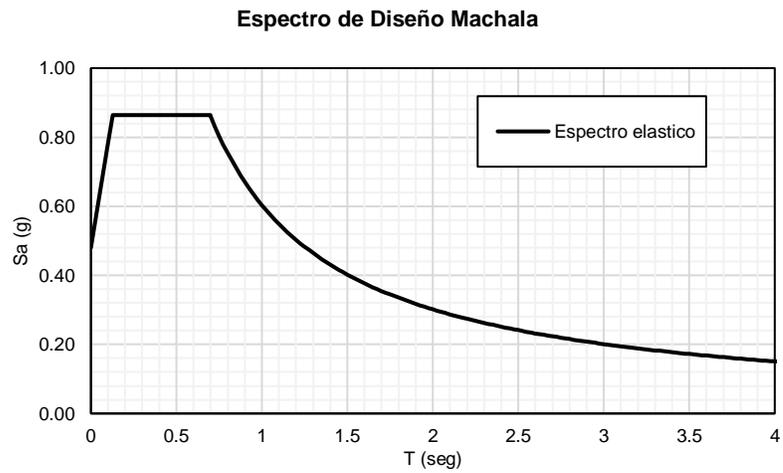
Figura 2.7. Espectro de Diseño



Fuente: (NEC-SE-DS, 2015)

En la Figura 2.8 se presenta el espectro de diseño (periodo de retorno de 475 años) para suelo tipo D en la ciudad de Machala, elaborado en función de los parámetros establecidos por la Norma Ecuatoriana de Construcción.

Figura 2.8. Espectro de diseño para la ciudad de Machala



Fuente: Elaborada por Autor

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

### **3.1 Modalidad básica de la investigación**

En el marco de esta investigación, se adoptará un enfoque cuantitativo para abordar el tratamiento de señales sísmicas. Este enfoque se basa en la aplicación de procesos matemáticos para analizar los registros sísmicos recopilados, para alcanzar este objetivo, se implementarán procesos de filtrado y suavizado de los datos mediante el uso de software. A su vez, se procederá a identificar las frecuencias y amplitudes de los eventos sísmicos mediante análisis espectrales, y se realizará un ajuste espectral donde se empleará el método SRSS (Square Root of the Sum of Squares) para combinar las respuestas sísmicas de las direcciones horizontales.

### **3.2 Tipo de investigación**

El presente trabajo de titulación se enmarca principalmente en dos tipos de investigación: bibliográfica y descriptiva. En cuanto al enfoque bibliográfico, se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la literatura existente relacionada con el tratamiento de señales sísmicas, abarcando fuentes como artículos científicos, normativas y documentos relacionadas con el procesamiento de datos sísmicos.

En paralelo, el enfoque descriptivo se aplicará en el análisis detallado de los registros sísmicos recolectados, en donde, se describirán minuciosamente las características de las señales sísmicas, incluyendo su origen, mecanismo de falla, magnitud y frecuencia.

### **3.3 Objeto de estudio**

El objeto de estudio del presente proyecto se enfoca en el tratamiento de registros sísmicos y su espectrocompatibilidad para la ciudad de Machala con un enfoque particular en el suelo tipo D.

### **3.4. Descripción de la población y muestra**

La población de interés para esta investigación se encuentra en la ciudad de Machala, Ecuador. Machala se encuentra ubicada en una región geográficamente activa en términos sísmicos, proporciona un contexto relevante para el estudio de señales sísmicas. La población objetivo incluye los registros sísmicos históricos disponibles en bases de datos nacionales e internacionales.

En cuanto a la muestra, se seleccionarán registros sísmicos representativos que abarquen una diversidad de fuentes sísmicas y escenarios, que incluyan terremotos previos y otros eventos sísmicos registrados en Machala y sus alrededores. La muestra incluirá una selección estratégica de señales sísmicas que representen diferentes niveles de amplitud, frecuencia y duración, permitiendo un análisis robusto de las características sísmicas de la zona.

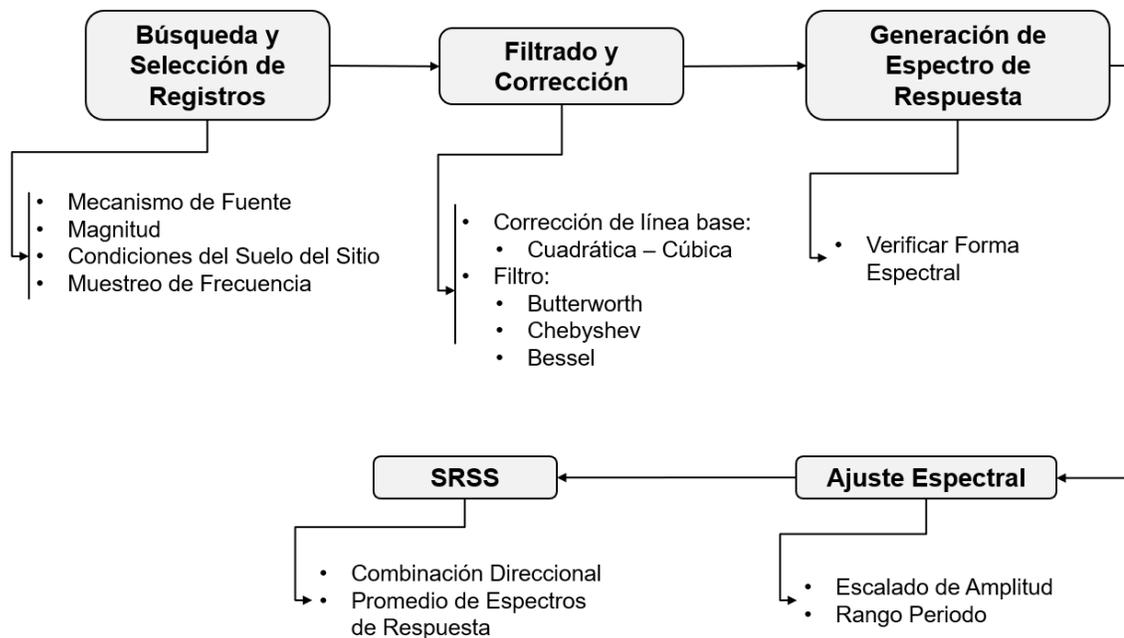
### 3.5. Métodos teóricos con los materiales utilizados

#### 3.5.1. Normativas

Se realiza un análisis del Capítulo 16 del ASCE 7, que se refiere al "Análisis de Historias de Respuesta No Lineal", además del Capítulo 13 del FEMA 450, que aborda los "Requisitos de Diseño para Estructuras con Aislamiento Sísmico", así como la revisión del capítulo de la NEC correspondiente a Peligro Sísmico Diseño Sismorresistente.

A partir del análisis de las normativas mencionadas se obtiene la metodología mostrada en la Figura 3.1.

Figura 3.1. Metodología para Espectrocompatibilidad de señales



Fuente: Elaborada por Autor

### **3.6. Métodos empíricos con los materiales utilizados**

#### **3.6.1. Bases de datos**

Las bases de datos utilizadas a nivel nacional en Ecuador incluyen los registros sísmicos históricos disponibles en las bases de datos proporcionadas por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. Además, se incorporan registros sísmicos generados por eventos sísmicos ocurridos fuera de la región de estudio, pero con características representativas para el área de interés. Estos registros se recopilan a partir de diversas fuentes de datos sísmicos, que incluyen el Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID/FIC/UNI, el Centro Sismológico Nacional (CSN) de la Universidad de Chile y el PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center)

Todos los registros obtenidos deben someterse a un segundo filtro, que implica una revisión de sus contenidos de frecuencia. Este proceso se realiza siguiendo la metodología propuesta por Zhao et al, que permite reevaluar la clasificación del tipo de suelo en el sitio donde se registró el sismo. El objetivo es determinar si el suelo es representativo de las condiciones sísmicas en la ciudad de Machala.

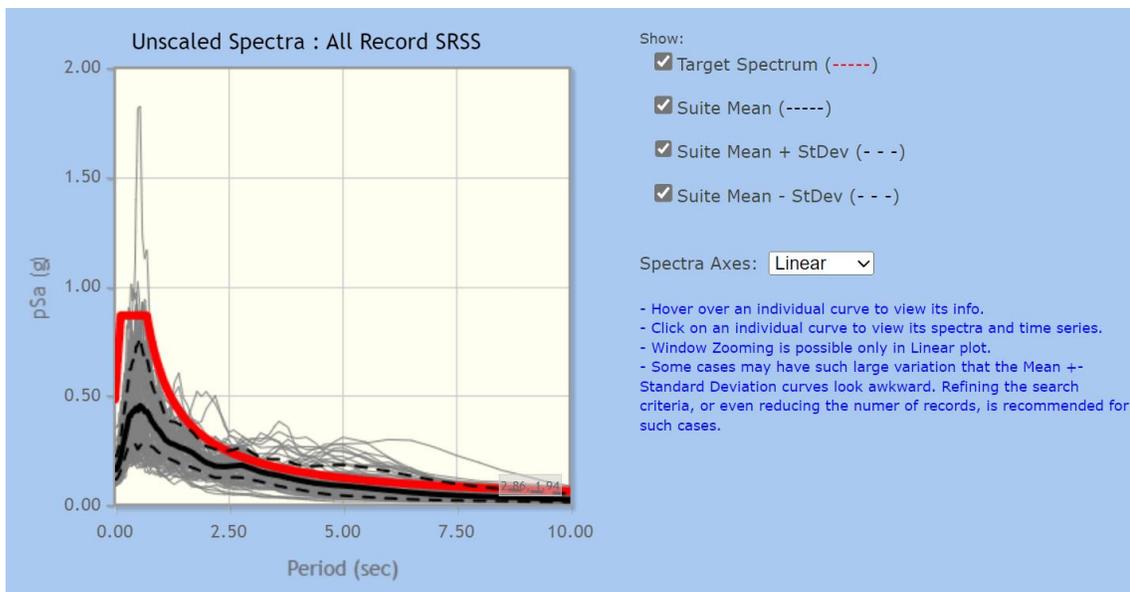
## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Búsqueda y Selección de Registros

La edición 2022 de la ASCE-7 en el Capítulo 16, Sección 16.2.2 establece que se debe seleccionar una serie de al menos 11 registros sísmicos para cada espectro de respuesta objetivo, y además los registros sísmicos seleccionados deben constar de pares de componentes horizontales de movimiento sísmico que son ortogonales entre sí. También se debe tener en cuenta que, si se consideran los efectos sísmicos verticales en el análisis, debe seleccionarse un componente vertical de movimiento sísmico. La NEC menciona que cuando los elementos que sobresalen más allá de los límites de las plantas, como voladizos horizontales, es necesario tomar en cuenta los efectos generados por la componente vertical de los sismos. Para el caso de estudio solo se tendrán en cuenta las componentes de aceleración horizontal.

Para la selección de los registros sísmicos, en primera instancia se llevó a cabo una búsqueda en el sitio web del PEER (por sus siglas en inglés, Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico), utilizando criterios que se relacionan con las fallas geológicas cercanas a la ciudad de Machala, la Figura 4.1 muestra los espectros de respuesta de registros sísmicos basados en el espectro de diseño para suelo tipo D en la ciudad de Machala.

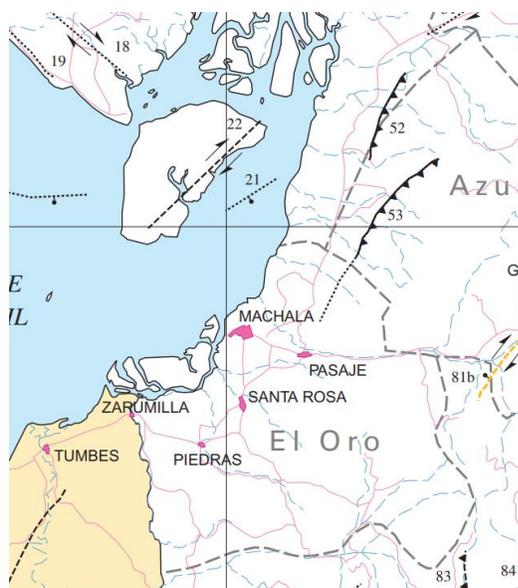
Figura 4.1. Búsqueda de Registros en sitio web del PEER



Fuente: Sitio web del PEER

Los criterios anteriormente mencionados incluyeron la identificación de las fallas de Naranjal y Ponce Enríquez, que se caracterizan como fallas inversas, así como la evaluación de las fallas de Posorja y Jambelí que corresponden a fallas normales, mientras que la falla de Puna se trata de una falla dextral, tal como se muestra en la Figura 4.2. y se detalla en la Tabla 4.1.

Figura 4.2 Fallas cercanas a la ciudad de Machala.



Fuente: U.S. Geological Survey

Tabla 4.1 Fallas cercanas a la ciudad de Machala.

Número	Falla	Sentido de movimiento	Edad del último movimiento
21	Jambelí	Normal	<1.6 Ma
22	Puna	Dextral	<1.6 Ma
52	Naranjal	Inversa	<1.6 Ma
53	Ponce Enríquez	Inversa	<1.6 Ma

Fuente: Elaborada por Autor

También se consideraron eventos sísmicos con una magnitud igual o superior a 6 Mw y una velocidad de onda de corte entre 180 y 360 m/s, que es representativa del tipo de suelo clasificado como tipo D en el área de estudio. Además, se tuvo en cuenta la duración significativa (D5-95), que abarcó el intervalo de tiempo comprendido entre 5 y 100 segundos. En la Tabla 4.2 se muestran los registros que se ajustan a los criterios ya mencionados.

Tabla 4.2 Resumen de Registros obtenidos del PEER

Estación	Año	Magnitud [Mw]	Mecanismo	Frecuencia [Hz]	
SMART1 O02	1986	7.3	Inversa	N	1.16
				E	3.16
CHICHI CHY025	1999	7.62	Inversa	N	1.51
				E	1.04
CHICHI CHY036	1999	7.62	Inversa	N	1.5
				E	1.25
CHICHI CHY101	1999	7.62	Inversa	N	1.11
				E	1.19
CHICHI TCU 038	1999	7.62	Inversa	N	2.58
				E	2.08
CHICHI TCU 051	1999	7.62	Inversa	N	1.46
				E	2
CHICHI TCU 055	1999	7.62	Inversa	N	1.25
				E	1.14
CHICHI TCU 065	1999	8.62	Inversa	N	1.33
				E	1.17
SMART1 C00	1986	7.3	Inversa	N	1.43
				E	1.38
SMART1 E01	1986	7.3	Inversa	N	0.99
				E	2.37
SMART1 I07	1986	7.3	Inversa	N	1.21
				E	1.38
SMART1 M01	1986	7.3	Inversa	N	1.25
				E	1.17
SMART1 M07	1986	7.3	Inversa	N	1.21
				E	1.18
SMART1 O01	1986	7.3	Inversa	N	1.62
				E	1.33
SMART1 O02	1986	7.3	Inversa	N	1.45
				E	3.16
SMART1 O04	1986	7.3	Inversa	N	1.06
				E	1.56
SMART1 O06	1986	7.3	Inversa	N	1.22
				E	1.38
SMART1 O07	1986	7.3	Inversa	N	1.6
				E	1.62
SMART1 O08	1986	7.3	Inversa	N	1.25
				E	1.18
SMART1 O12	1986	7.3	Inversa	N	1.38
				E	0.96
SMART1 O10	1986	7.3	Inversa	N	1.55
				E	1.62
CHY004	1999	7.62	Inversa	N	2.76
				E	2.44
CHY014	1999	7.62	Inversa	N	2.01
				E	1.83

Continuación de tabla 4.2

Estación	Año	Magnitud [Mw]	Mecanismo	Frecuencia [Hz]	
CHY015	1999	7.62	Inversa	N	1.8
				E	1.53
CHY016	1999	7.62	Inversa	N	1.45
				E	1.05
CHY039	1999	7.62	Inversa	N	1.75
				E	1.46
CHY082	1999	7.62	Inversa	N	1.45
				E	1.65
HWA013	1999	7.62	Inversa	N	1.59
				E	1.04
ILA042	1999	7.62	Inversa	N	1.56
				E	1.51
ILA055	1999	7.62	Inversa	N	1.62
				E	1.49
TCU038	1999	7.62	Inversa	N	2.58
				E	2.08
TCU051	1999	7.62	Inversa	N	1.46
				E	1.91
TCU0113	1999	7.62	Inversa	N	3.11
				E	2.35
TCU0115	1999	7.62	Inversa	N	2.14
				E	2.1
TCU0118	1999	7.62	Inversa	N	2.39
				E	1.5
TCU145	1999	7.62	Inversa	N	2.49
				E	1
SMART M05	1986	7.3	Inversa	N	1.05
				E	1.92
SMART O03	1986	7.3	Inversa	N	2.31
				E	1.43
SMART O09	1986	7.3	Inversa	N	1.54
				E	2.37
SMART O11	1986	7.3	Inversa	N	1.73
				E	1.62
AQUILA_EK007YL	2009	6.3	Normal	N	1.22
				E	1.29
L-AQUILA_BI016YL	2009	6.3	Normal	N	1.97
				E	1.33
BORAH.MS_CPPBSOU	1983	6.8	Normal	N	6.25
				E	3.96
AQABA_EIL	1984	7.2	Dextral	N	2.37
				E	2.19

Fuente: Elaborada por Autor

Los registros sísmicos deben provenir de eventos dentro del mismo régimen tectónico general así que se consideró el régimen de subducción, y adicionalmente se consideraron las siguientes fuentes para la obtención de registros sísmicos:

Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (CSN), Chile.

Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID/FIC/UNI.

Tabla 4.3. Resumen de Registros obtenidos en el IGEPN, CSN y CISMID.

Estación	Año	Magnitud [Mw]	Duración Significativa [s]	Frecuencia [Hz]
ACH-1	2016	7.8	56.74	E 0.604
			59.23	N 0.69
ACHN	2016	7.8	32	E 0.748
			25.71	N 0.674
AES2	2016	7.8	70.05	E 0.699
			78.29	N 0.662
AGYE	2016	7.8	38.67	E 2.289
			40.79	N 12.695
ALIB	2016	7.8	46.97	E 0.525
			45.34	N 0.873
ALOR	2016	7.8	123.59	E 0.574
			100.43	N 0.415
AMIL	2016	7.8	99.87	E 0.287
			124.02	N 0.922
AMNT	2016	7.8	17.43	E 0.378
			16.49	N 1.465
APED	2016	7.8	28.79	E 1.556
			29.97	N 2.045
APO1	2016	7.8	20.5	E 2.637
			19.98	N 2.087
ASDO	2016	7.8	36.719	E 2.051
			46.03	N 1.978
VALLENAR	2010	8.8	41.29	E 1.453
			45.1	N 1.648
CURICO	2010	8.8	50.19	N 0.693
			51.57	E 2.402
CONSTITUCIÓN	2010	8.8	59.79	E 3.833
			65.225	N 2.991

Continuación de Tabla 4.3

Estación	Año	Magnitud [Mw]	Duración Significativa [s]	Frecuencia [Hz]
MATANZAS	2010	8.8	34.01	E 1.904
			34.965	N 2.118
B01I	2019	6.8	69.18	E 2.24
			65.99	N 2.185
V15A-E	2015	8.3	31.93	E 2.759
			33.6	N 3.638
AC07	2023	6.8	19.72	N 2.005
			18.63	E 2.158
GYKA	2023	6.8	36.81	N 1.294
			30.31	E 1.755
ACH1	2023	6.8	5.84	N 0.943
			11.38	E 0.876
ACH2	2023	6.8	8.36	N 2.292
			10.87	E 6.281
ARNL	2023	6.8	18.74	N 2.859
			7.9	E 2.322
APLA	2023	6.8	6.03	N 6.528
			15.4	E 6.534
ACUE	2023	6.8	38.8	N 0.925
			28.83	E 0.766
ALJ1	2023	6.8	31.22	N 0.76
			31.89	E 0.455
ORGA	2019	MG 8	100.54	N 2.136
			99.63	E 2.355
SECH	2019	MG 8	157.27	N 1.229
			165.4	E 1.233
SCPIU	2017	MG 6.2	70.01	N 1.825
			40.95	E 2.587
UNP	18/3/2018	MG 6.7	85.03	N 2.508
			74.85	E 2.514
UNF	18/3/2018	MG 6.7	51.06	N 1.232
			58.985	E 1.379
SCHI	18/3/2018	MG 6.7	74.505	N 1.739
			76.8	E 1.3732
UNIPE	18/3/2018	MG 6.7	56.1	N 1.5319
			52.3	E 1.239
TAC002	1/4/2014	MG 8.2	55.63	N 1.647
			54.75	E 1.587

Fuente: Elaborada por Autor

## 4.2. Registros seleccionados

Como se mencionó en el capítulo 2, en la sección 2.3.9, la velocidad de onda de corte no es suficiente para caracterizar el tipo de suelo, por lo que, se utilizó la metodología de Zhao et al. que se muestra en la Tabla 4.4, la cual permitió realizar una nueva clasificación de suelo, en donde se requiere obtener el periodo dominante a partir las frecuencias obtenidas.

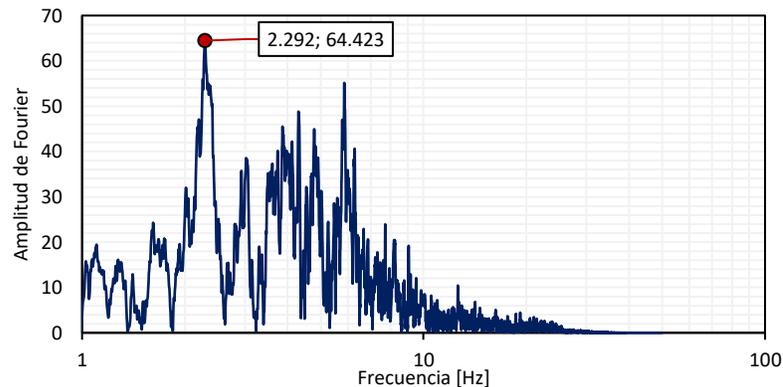
Tabla 4.4. Clasificación del suelo mediante el período dominante del sitio.

Clases de Sitios	Período Natural del Sitio (s)	Clase NEHRP
SC I: Roca/suelo rígido	$TG < 0.2$ s	A + B
SC II: Suelo duro	$0.2 = TG < 0.4$ s	C
SC III: Suelo medio	$0.4 = TG < 0.6$ s	D
SC IV: Suelo blando	$TG = 0.6$ s	E

Fuente: Adaptada de Metodología de Zhao et al, (Zhao, 2006)

En la Figura 4.3 se muestra la frecuencia de la señal registrada por la estación ACH2-N, se observa que la máxima amplitud de Fourier ocurre cuando la frecuencia es de 2.292 Hz, por lo que se puede determinar el periodo dominante en 0.44 segundos, que según la metodología de Zhao et al, se clasifica como un suelo tipo D.

Figura 4.3. Frecuencia estación ACH2-N.

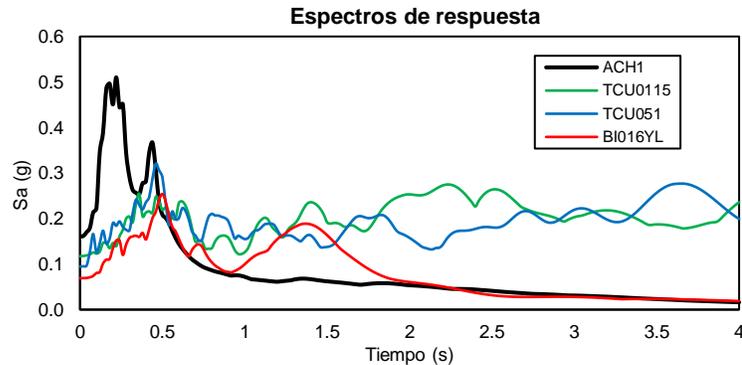


Fuente: Elaborada por Autor

Una consideración de gran importancia es la forma del espectro de respuesta. Se observó que algunos registros presentaban formas inusuales en sus espectros, lo que sugiere la necesidad de descartarlos. El objetivo es seleccionar registros cuyos espectros de respuesta se asemejen, al menos en términos generales, al espectro de diseño para evitar inconsistencias. Por ejemplo, los registros TCU0115, TCU051 y BI016YL exhibieron formas no representativas en sus espectros de respuesta, como se puede apreciar en la Figura

4.4. Para ilustrar este punto, se comparó el espectro de ACH1, el cual muestra una mejor concordancia con el espectro objetivo en comparación con los otros registros.

Figura 4.4. Espectros de respuesta de estaciones ACH1, TCU0115, TCU051, BI016YL



Fuente: Elaborada por Autor

Se realizó el mismo proceso con los registros previamente seleccionados, de los cuales se escogieron para la zona de estudio, los mostrados en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Registros escogidos en función del Período Dominante

Estación	Fecha	Magnitud [Mw]	Distancia epicentral [km]	Profundidad [km]	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]
AC07	18/3/2023	6.8	73.80	63.1	N 117.4 E 118.5
GYKA	18/3/2023	6.8	62.49	63.1	N 155.72 E 194.47
ACH1	18/3/2023	6.8	53.15	63.1	N 317.52 E 185.38
ACH2	18/3/2023	6.8	53.61	63.1	N 148,5 E 89.14
ARNL	18/3/2023	6.8	81.68	63.1	N 172.05 E 33.22
APLA	18/3/2023	6.8	48.99	63.1	N 162.95 E 98.19
AGYE	16/4/2016	7.8	269.91	20	N 23.04 E 18.32
APED	16/4/2016	7.8	36.15	20	N 812.69 E 1380.49
ASDO	16/4/2016	7.8	115.01	20	N 108.83 E 202.22
APO1	16/4/2016	7.8	167.16	20	N 373.07 E 311.62
VALLENAR	27/2/2010	8.8	805.44	35	N 18.14 E 19.43

Continuación de Tabla 4.5

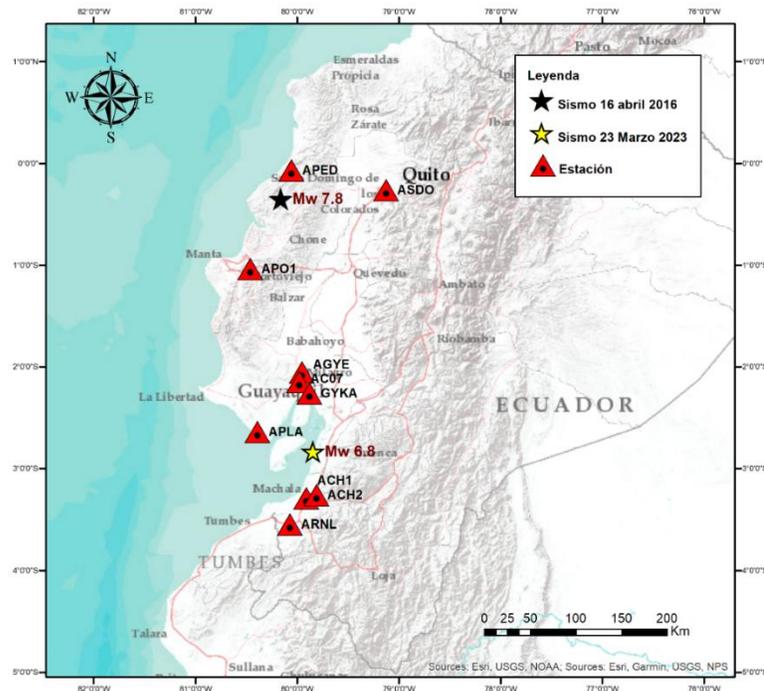
Estación	Fecha	Magnitud [Mw]	Distancia epicentral [km]	Profundidad [km]	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]
MATANZAS	27/2/2010	8.8	218.97	35	N 337.54 E 234.6
TAC002	1/4/2014	8.2	188.51	38.9	N 65.27 E 71.29

Fuente: Elaborada por Autor

Las aceleraciones mostradas en la tabla corresponden a las siguientes bases de datos y sismos especificados a continuación:

En la base de datos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), se tomó en consideración el sismo del 16 de abril del 2016, el cual fue resultado de la subducción de la placa de Nazca (placa oceánica) que se sumerge bajo la Sudamericana (placa continental) y el sismo del 18 de marzo del 2023 que ocurrió a una profundidad intermedia de aproximadamente 60 kilómetros, y tuvo lugar en la parte superior de la placa oceánica que está siendo subducida bajo el continente. En la Figura 4.5 se muestra las estaciones escogidas y el sismo que registraron (Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional, 2023).

Figura 4.5 Estaciones seleccionadas y sismos registrados.

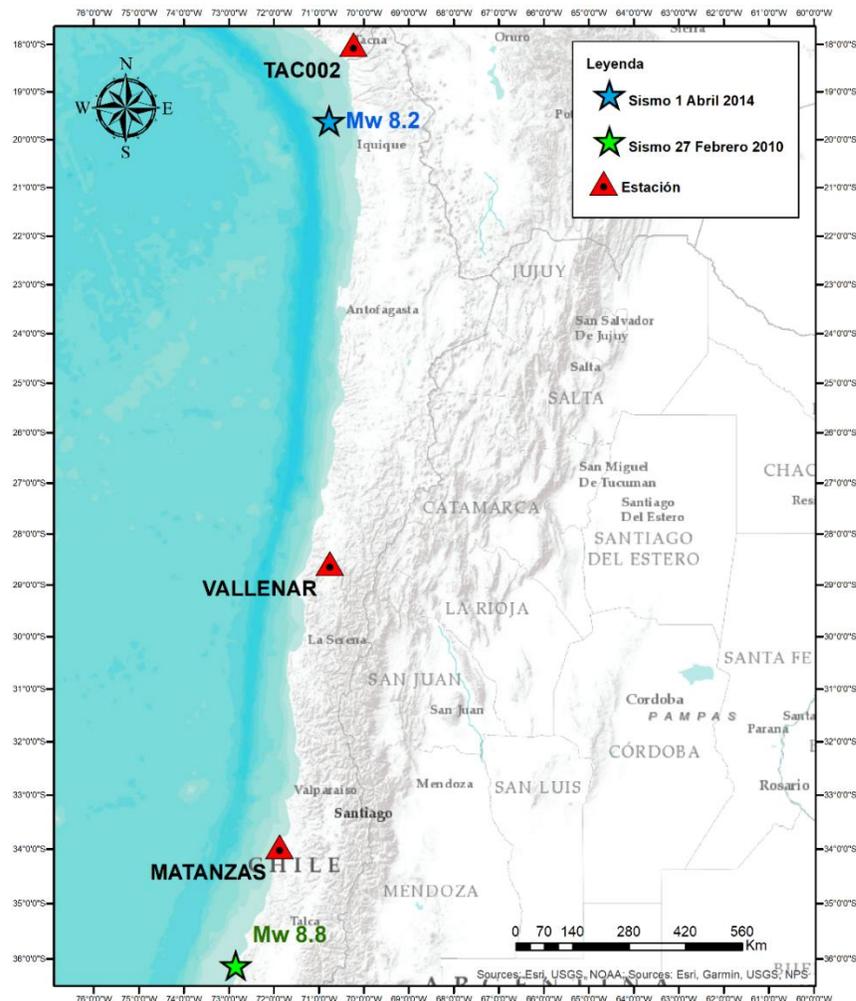


Fuente: Elaborada por Autor

Por otra parte, del Centro Sismológico Nacional (CSN) de la Universidad de Chile, se hizo énfasis en el terremoto del 27 de febrero de 2010, el cual fue causado por la activación de un segmento de la zona de subducción en la interfaz entre las placas de Nazca y Sudamericana (Barrientos, 2010)

Además, del Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID/FIC/UNI, se tuvo principal consideración en el sismo registrado el 1 de abril del 2014 en Chile, el cual se produjo a lo largo de la zona de subducción (CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL UNIVERSIDAD DE CHILE, 2014). En la Figura 4.6 se muestra las estaciones escogidas y el sismo que registraron.

Figura 4.6. Estaciones seleccionadas y sismos registrados.



Fuente: Elaborada por Autor

### 4.3. Tratamiento de acelerogramas

Dado que los acelerogramas obtenidos están influenciados por diversas condiciones de campo, como el suelo sobre el cual se registró la información y las características inherentes de los acelerómetros utilizados, es común que las señales medidas exhiban niveles de ruido de fondo y desfases en relación con la línea base. Por consiguiente, es necesario llevar a cabo un proceso de tratamiento de los acelerogramas con el propósito de obtener valores depurados y ajustados que reflejen con mayor precisión las condiciones reales.

#### 4.3.1. Filtrado y corrección de acelerogramas

Los acelerogramas generalmente tienen un error de desplazamiento de línea base el cual es causado principalmente por la inclinación, la rotación del suelo y los ruidos ambientales durante el período del sismo (Tu et al., 2017). La relación entre el acelerograma  $a(t)$ , la señal sísmica  $s(t)$ , y el ruido  $r(t)$  se expresa mediante la siguiente ecuación:

*Ecuación 1. Aceleración:*

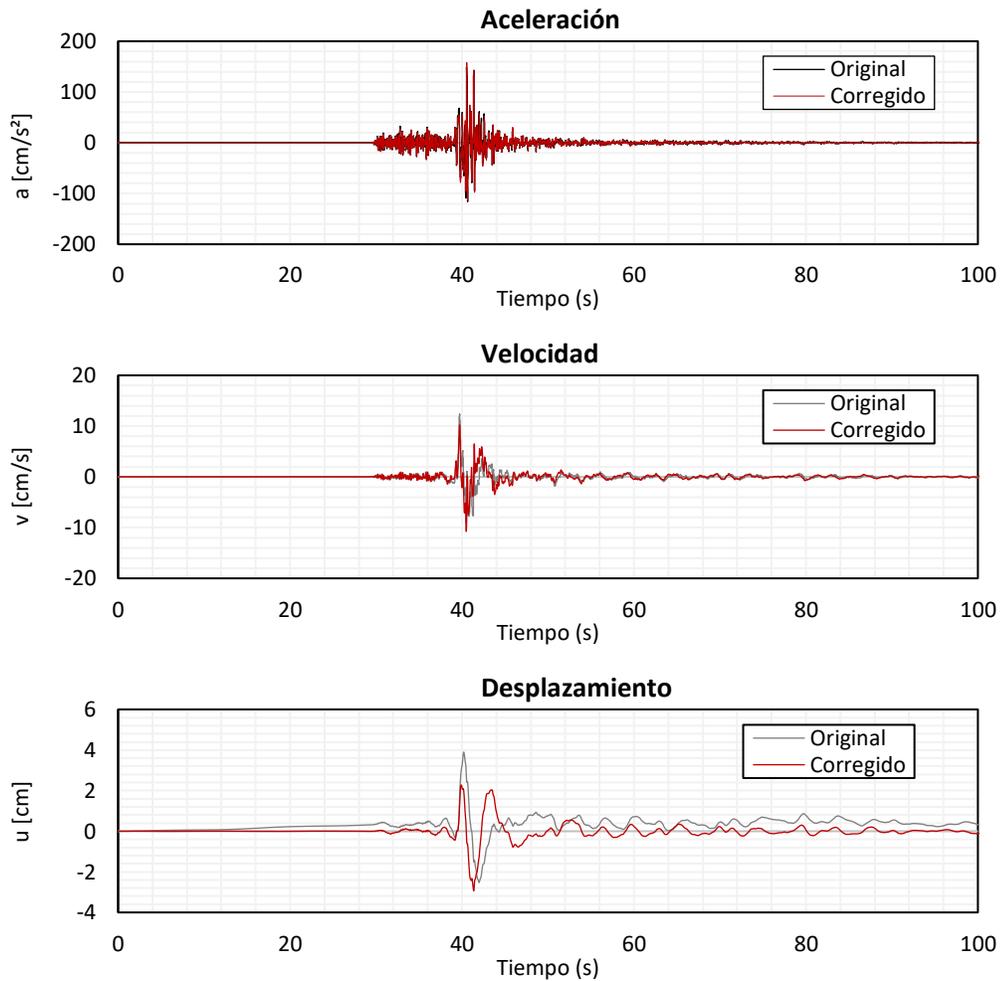
$$a(t) = s(t) + r(t)$$

En esta ecuación, se establece que el acelerograma  $a(t)$  es la combinación de la señal sísmica  $s(t)$  y el ruido  $r(t)$ .

Si el acelerograma no ha sido sometido a una corrección adecuada de línea base, las integrales posteriores para calcular la velocidad y el desplazamiento no reflejarán con precisión el comportamiento dinámico real del objeto en movimiento. Por lo tanto, es esencial garantizar la corrección adecuada de la línea base en el acelerograma para obtener resultados precisos en términos de velocidad y desplazamiento en análisis sísmicos y de movimiento vibratorio.

La Figura 4.7 muestra la señal original y corregida de la estación ACH2-N, cuyo valor de aceleración registrado es de casi el 50% del valor de la gravedad lo cual sugiere un efecto de amplificación de las ondas sísmicas en las cercanías de la ciudad de Machala.

Figura 4.7. Corrección de línea Base de Aceleración, Velocidad y Desplazamiento



Fuente: Elaborada por Autor

A simple vista, el gráfico de aceleración puede mostrar una similitud aparente entre el acelerograma original y el corregido, sin embargo, al examinar el gráfico de velocidad y desplazamiento, se hace evidente un desfase en la línea base. Esto sugiere que las operaciones de filtrado y corrección aplicadas al acelerograma original evidencian un impacto significativo en los resultados de velocidad y desplazamiento calculados.

En cuanto a los valores usados para el filtrado y corrección de la línea base se consideró un enfoque similar al del IGEPN, en el cual se aplicó el filtro Butterworth del tipo Bandpass en un rango de frecuencia de 0.025 a 40.0 Hz a la señal de aceleración. Además, se llevó a cabo un proceso de preprocesamiento básico que implicó la eliminación de tendencias y la corrección de la línea base.

#### 4.4. Duración significativa

La integral de Arias se utiliza para cuantificar la cantidad total de movimiento sísmico experimentado durante un terremoto.

Ecuación 2. Integral de Arias:

$$IA = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} \ddot{u}(t)^2 dt$$

En función de esta podemos definir la Ecuación 3. Intensidad Acumulada:

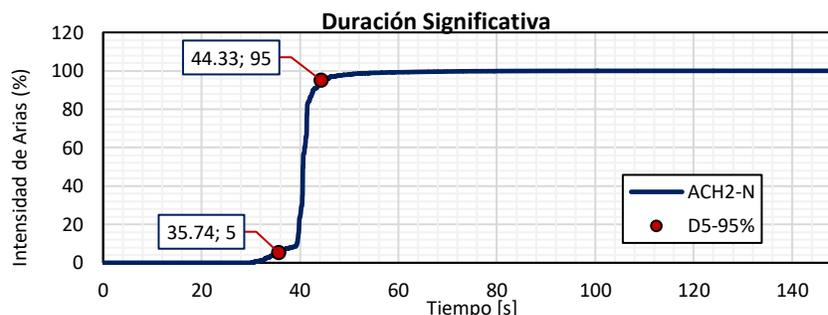
$$I_{acumulada}[\%] = \frac{1}{IA} \sum_{i=1}^1 \left( \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_i} \ddot{u}(t_i)^2 dt \right)$$

Donde  $\ddot{u}(t)$  es la aceleración y  $g$  el valor de la gravedad.

La duración significativa se calcula típicamente como el período de tiempo que comprende un porcentaje específico de la energía total del terremoto. Por lo general, se utiliza el rango del 5% al 95% de la energía total para definir la duración significativa, es decir, el tiempo que abarca desde que comienza a acumularse el 5% de la energía hasta que se ha acumulado el 95%.

La Figura 4.8 ilustra la aplicación de la Integral de Arias acumulada en porcentaje para el acelerograma ACH2-N. En este gráfico, podemos observar que el 5% de la intensidad acumulada se alcanza a los 35.74 segundos, mientras que el 95% de la intensidad acumulada se alcanza a los 44.33 segundos. Esto significa que los pulsos sísmicos que se encuentran fuera de este rango de tiempo ya no contribuyen significativamente a la intensidad total del terremoto.

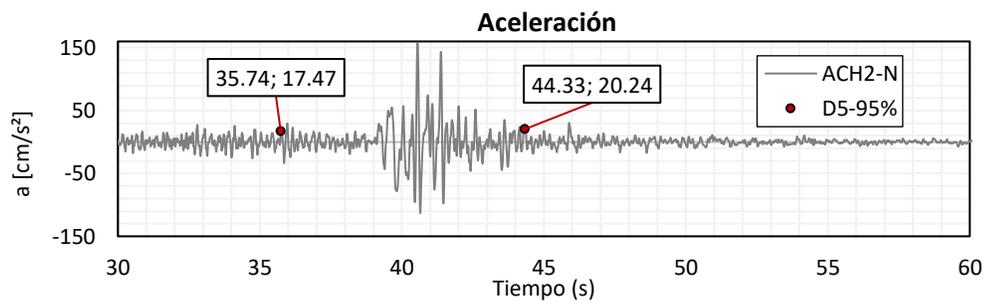
Figura 4.8. Duración Significativa.



Fuente: Elaborada por Autor

En consecuencia, es posible considerar recortar el acelerograma en los puntos en los que se alcanza el 5% y el 95% de la intensidad acumulada, esto puede ser beneficioso para reducir la demanda computacional en análisis posteriores. En la Figura 4.9 se observa el intervalo de tiempo de la duración significativa en la serie de aceleración.

Figura 4.9. Tiempo en donde se alcanza la Intensidad Acumulada



Fuente: Elaborada por Autor

#### 4.5. Periodos

En cuanto a los periodos de escalamiento, la ASCE-7 en la sección 16.2.3.1 establece que el límite superior del rango de periodos debe ser igual o mayor que el doble del periodo de modo fundamental más grande en las direcciones horizontales principales de respuesta, mientras que el límite inferior del periodo no debe superar el 20% del periodo del modo fundamental más pequeño para las dos direcciones horizontales principales de respuesta y en casos que consideren la respuesta vertical, el límite inferior del periodo para modificar las componentes del movimiento vertical se elige como el valor más grande entre 0.1 segundos o el periodo más bajo en el cual ocurre una participación de masa vertical significativa.

Por otra parte, el FEMA 450 en la sección 13.2.3.2 sugiere que para cada par de movimientos se debe escalar de manera que, para cada período entre  $0.5T_D$  y  $1.25T_M$  (donde  $T_D$  es Período efectivo en el desplazamiento de diseño y  $T_M$  Período efectivo en el máxima desplazamiento), el promedio de los espectros SRSS de todos los pares de componentes horizontales no caiga por debajo del 1.3 veces la ordenada correspondiente del espectro de respuesta de diseño, en más del 10 por ciento. Mientras que, la NEC 2015 recomienda que los acelerogramas deben ser escalados de tal forma que el valor promedio de SRSS de todos los espectros de los registros, no se encuentre por debajo del espectro de aceleraciones amortiguado al 5% del sismo de diseño para periodos entre  $0.2 T$  y  $1.5 T$ , dichos periodos corresponden a ediciones anteriores del ASCE 2016.

Para esta investigación, enfocada en la ciudad de Machala y considerando la influencia de suelos de tipo D, se optó por utilizar el rango de periodos que va desde 0.08 a 3.2 segundos, de tal manera que, al realizar el ajuste espectral, el espectro compatibilizado cubra la parte principal del espectro de diseño.

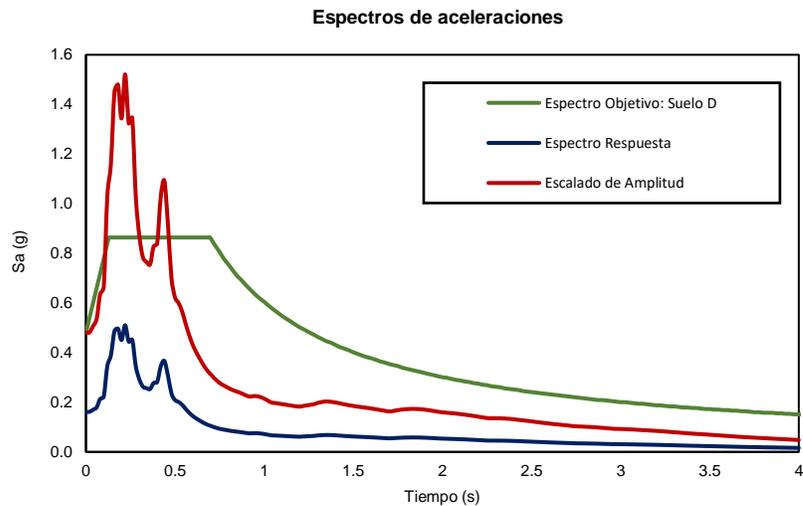
(Grant & Diaferia, 2013) menciona que aumentar el rango de periodos es beneficioso para reducir la dispersión en los resultados. Además, señala que no existen criterios objetivos ni cuantitativos disponibles para determinar si una señal sísmica ha sido manipulada de manera excesiva mediante el ajuste espectral, y si dicha alteración significativa podría introducir sesgos. Esto indica que es posible permitir modificaciones sustanciales siempre y cuando se tenga precaución en la selección inicial de las señales de partida.

#### **4.6. Escalado de amplitud**

En la sección 16.2.3.2 del ASCE-7 recomienda que cada uno de los movimientos sísmicos se ajusta o escala mediante un factor de escala idéntico que se aplica a ambas componentes horizontales. El objetivo del escalado es que el espectro máximo de respuesta promedio de todos los movimientos sísmicos coincida o supere generalmente el espectro de respuesta objetivo en el rango de períodos especificado. El promedio de los espectros en la dirección máxima de todos los movimientos sísmicos no debe caer por debajo del 90% del espectro de respuesta objetivo para ningún periodo dentro del mismo rango de periodos, además si se considera la respuesta vertical en el análisis, la componente vertical de cada movimiento sísmico también se escala para abarcar el espectro de respuesta vertical objetivo en el rango de periodos especificado, pero como ya se mencionó en la sección tal no se considerará la componente de aceleración vertical.

Para el caso de estudio, no resulta adecuado realizar este procedimiento debido a que pueden surgir posibles inconsistencias, es decir, algunos movimientos sísmicos individuales que se escalan en amplitud exceden significativamente la respuesta requerida en el espectro objetivo en ciertos períodos, lo que puede sobrestimar la importancia de la respuesta de los modos superiores en algunas estructuras, ya que el sismo se vuelve demasiado intenso. En la Figura 4.10 se observa que al escalar el valor del PGA registrado por la estación ACH2, se alcanza un pico de aceleración de 1.5g lo cual excede en alrededor del 75% el valor de aceleración en la meseta del espectro de diseño seleccionado, por lo que se tomó en consideración realizar un ajuste espectral o Spectral Matching.

Figura 4.10 Escalado de amplitud



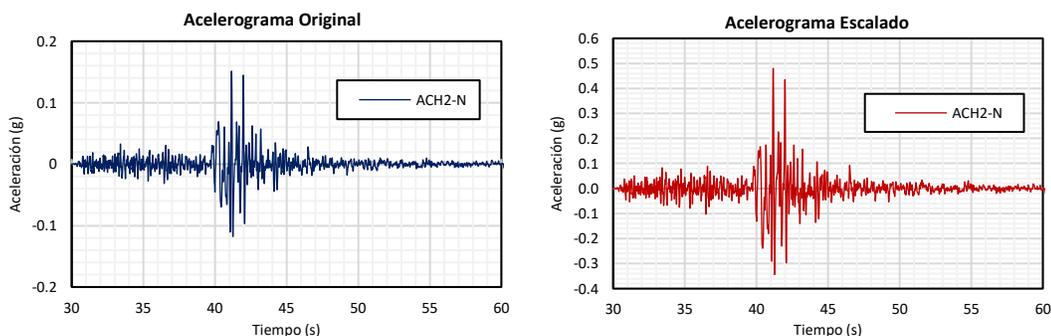
Fuente: Elaborada por Autor

#### 4.7. Ajuste Espectral (Spectral Matching)

En este procedimiento, las amplitudes de las oscilaciones se modifican en diferentes cantidades y en diferentes períodos del movimiento sísmico. En algunos casos, se agregan o restan energía en forma de componentes adicionales para que el espectro de respuesta del movimiento modificado se asemeje estrechamente al espectro de diseño. Algunas técnicas de ajuste espectral no pueden preservar características importantes de los pulsos de velocidad en los movimientos y, por lo tanto, no deben usarse en sitios cercanos a la falla donde estos efectos son importantes.

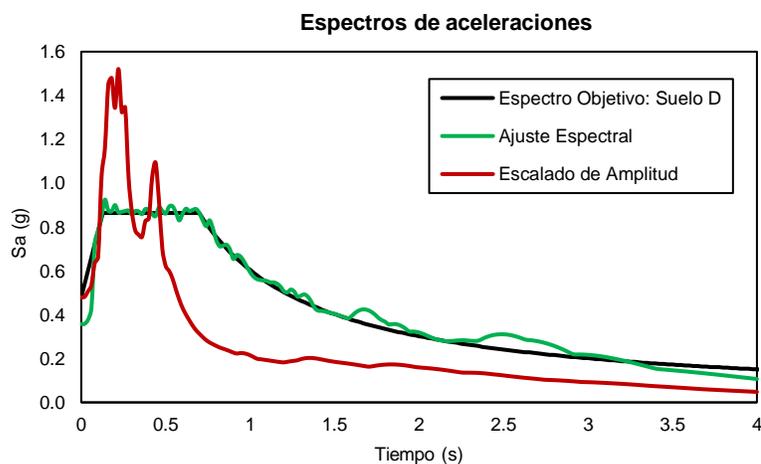
Para cada señal se realizó un escalado lineal en la amplitud del PGA (Peak Ground Acceleration), con el objetivo, según lo propuesto por (Flores López & Ayez Zamudio, 2018) de evitar un ajuste espectral exagerado. Posteriormente las señales se someten a un proceso de compatibilidad espectral en el que se modifican las características espectrales de las señales para que concuerden con el espectro de diseño. En la Figura 4.11 se muestra el escalado de amplitud realizado al acelerograma de la estación ACH2-N, mientras que en la Figura 4.12, se puede apreciar la diferencia entre el escalado de amplitud y el escalado con el ajuste espectral (Spectral Matching). Se destaca una diferencia significativa, ya que el ajuste espectral se adapta de manera más precisa al espectro de diseño.

Figura 4.11. Acelerograma Original y Escalado



Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.12. Comparación entre Spectral Match y Escalado de amplitud



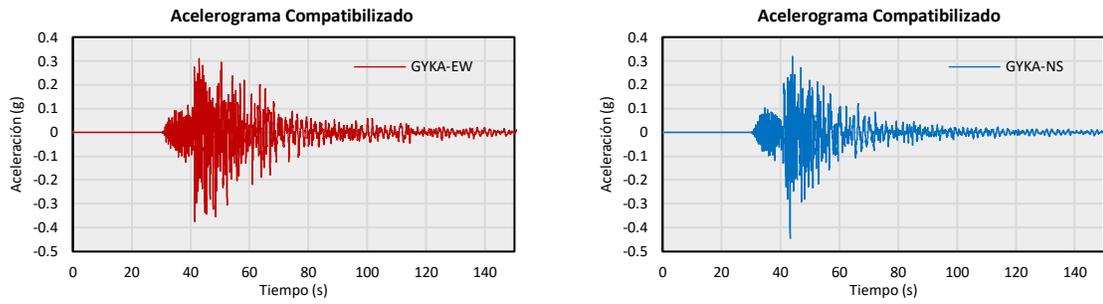
Fuente: Elaborada por Autor

#### 4.8. Interpretación de datos

Luego de aplicar el ajuste espectral, los 13 pares de acelerogramas compatibles con el espectro objetivo presentaron una concordancia también en términos de contenido de frecuencia y energía en comparación con los registros originales. Los registros originales se encuentran en la sección de anexos.

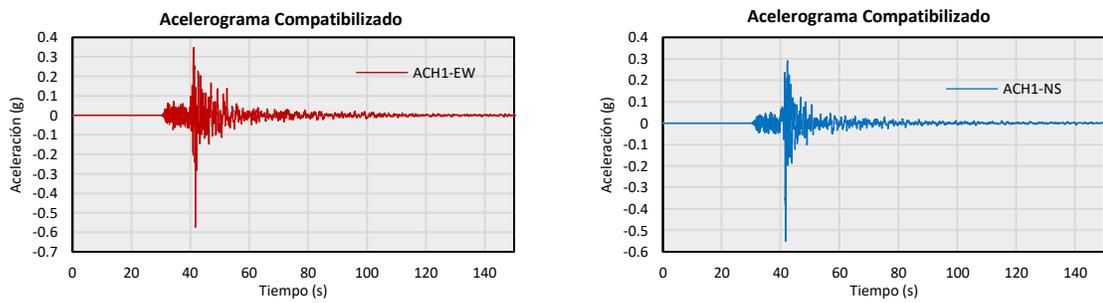
A continuación, se presentan los 13 pares de acelerogramas compatibilizados los cuales corresponden a los registrados por las estaciones AC07, GYKA, ACH1, ACH2, ARNL, APLA, AGYE, APED, ASDO, APO1, VALLENAR, MATANZAS y TAC002.

Figura 4.13. Acelerograma de estación GKYA ajustado espectralmente



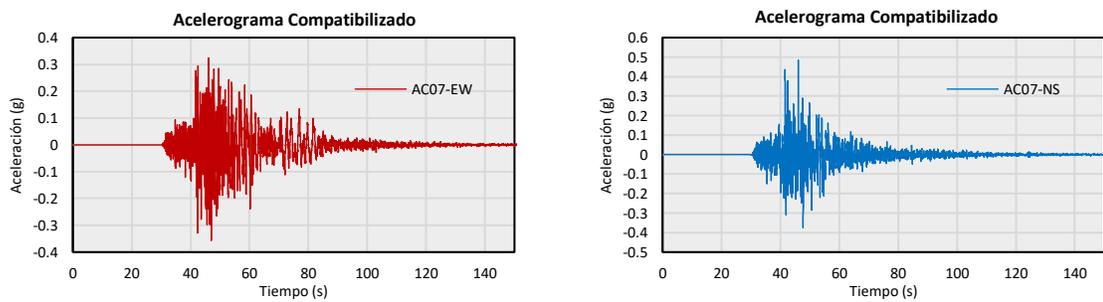
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.14. Acelerograma de estación ACH1 ajustado espectralmente



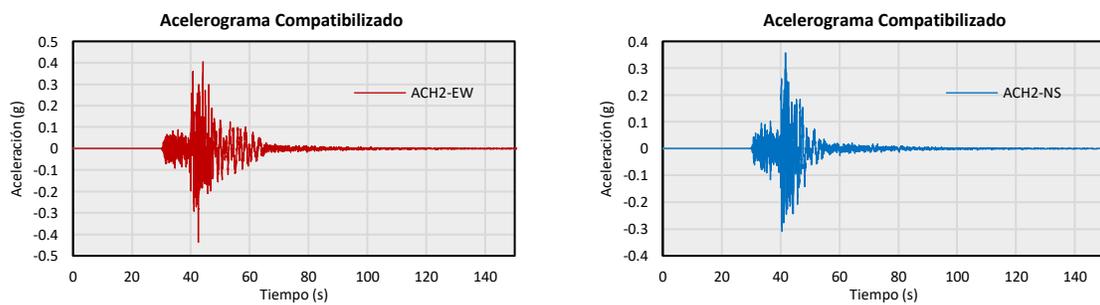
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.15. Acelerograma de estación AC07 ajustado espectralmente



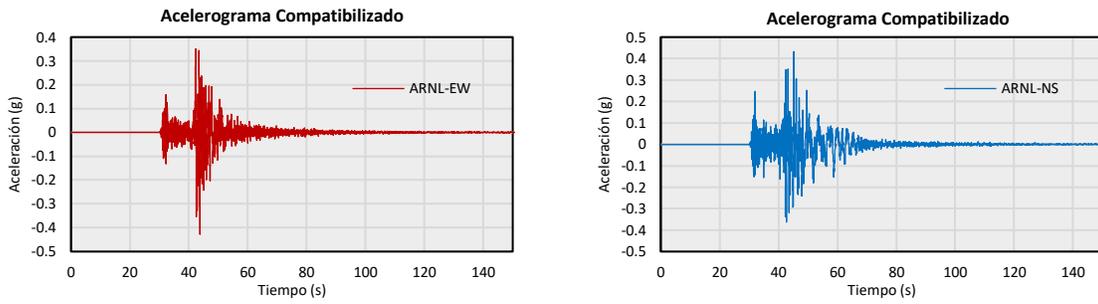
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.16. Acelerograma de estación ACH2 ajustado espectralmente



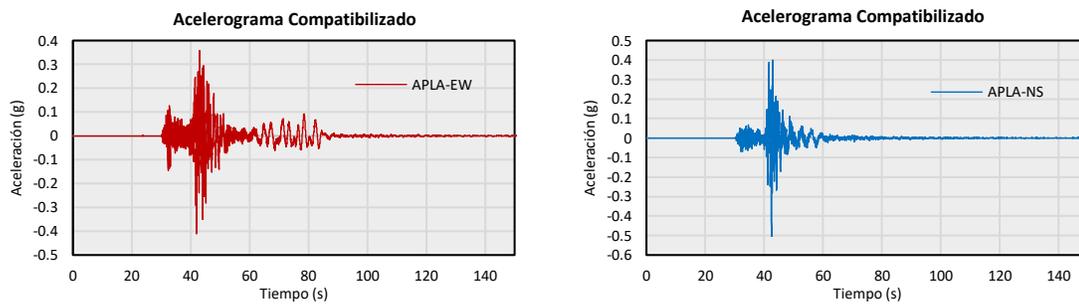
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.17. Acelerograma de estación ARNL ajustado espectralmente



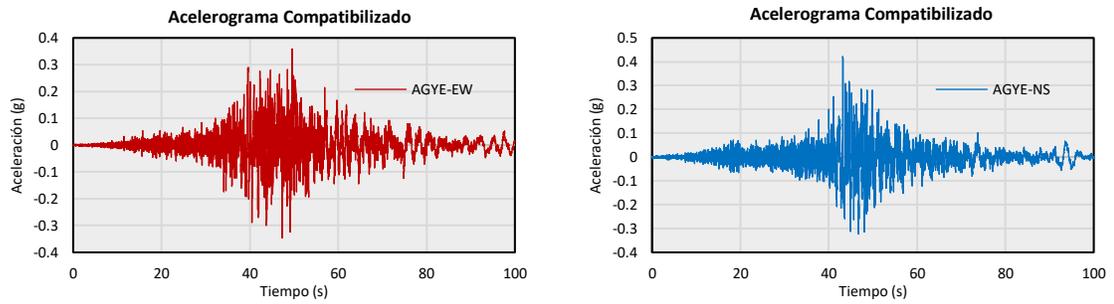
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.18. Acelerograma de estación APLA ajustado espectralmente



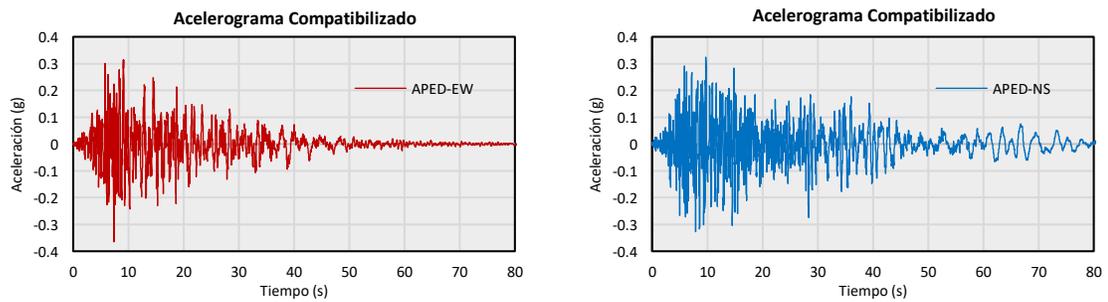
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.19. Acelerograma de estación AGYE ajustado espectralmente



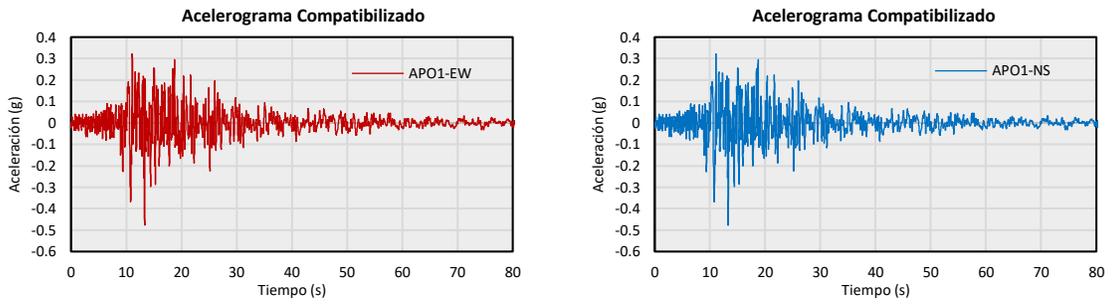
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.20. Acelerograma de estación APED ajustado espectralmente



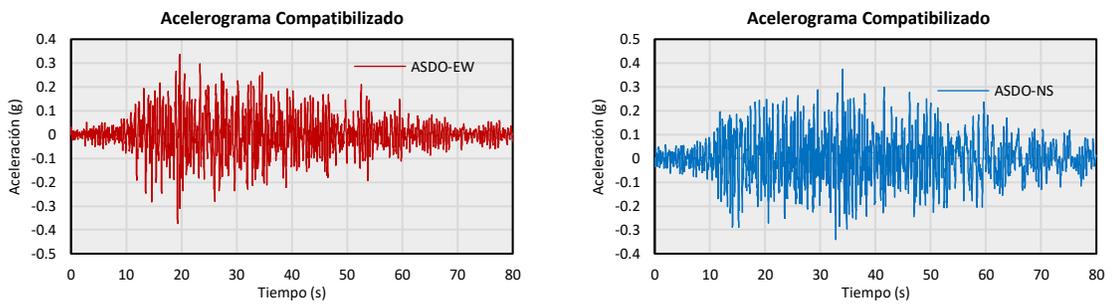
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.21. Acelerograma de estación APO1 ajustado espectralmente



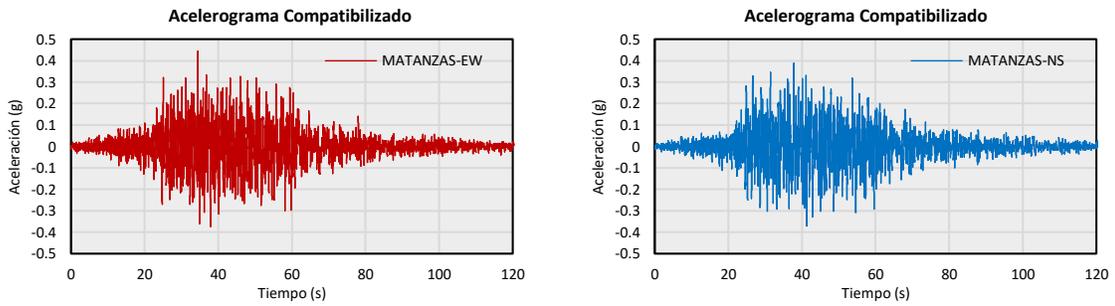
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.22. Acelerograma de estación ASDO ajustado espectralmente



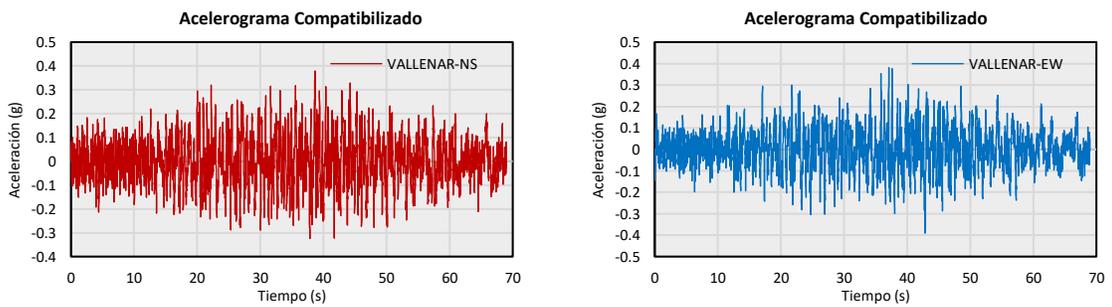
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.23. Acelerograma de estación MATANZAS ajustado espectralmente



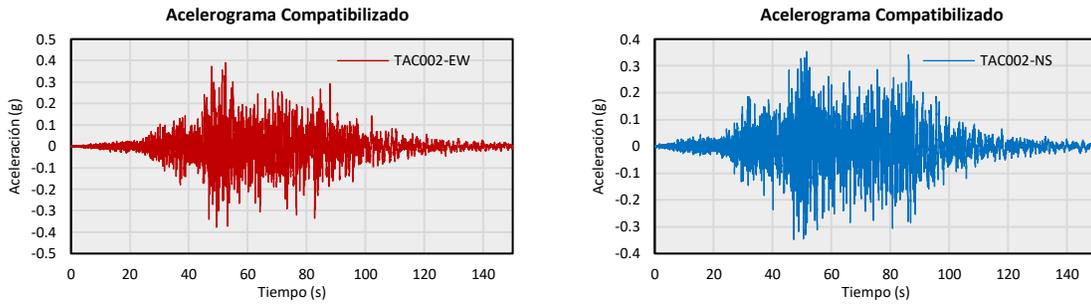
Fuente: Elaborada por Autor

Figura 4.24. Acelerograma de estación VALLENAR ajustado espectralmente



Fuente: Elaborada por Autor

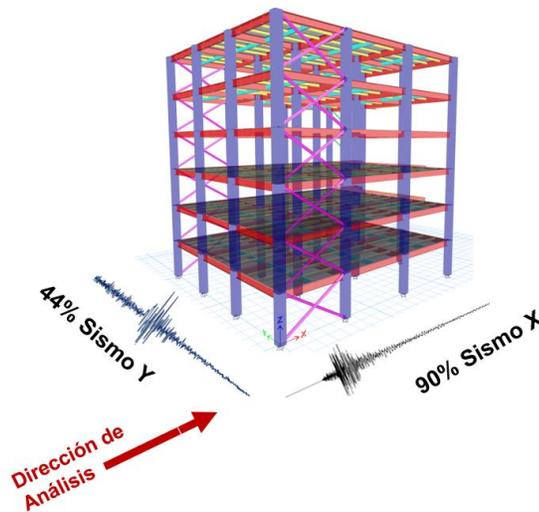
Figura 4.25. Acelerograma de estación TAC002 ajustado espectralmente



Fuente: Elaborada por Autor

Si bien para el análisis del espectro de respuesta modal, se consideran los efectos del 100% de las fuerzas sísmicas en una dirección principal y se combinan con el 30% de las fuerzas en la dirección perpendicular (Newmark, 1971). En el caso del análisis tiempo historia, cuando se utilizan señales compatibles con el espectro de diseño, se establece como requisito fundamental que no se utilice menos del 90% de las fuerzas sísmicas en la dirección de análisis, lo cual implicó que cada par de registros se modificara de tal manera que el promedio de los espectros no caiga por encima ni por debajo del espectro objetivo en un 10%. En la dirección de análisis se aplicó el 90% de la componente más grande, y en la dirección ortogonal el 44% de la componente más pequeña, de tal manera que al realizar el método de combinación de respuesta elástica SRSS resulta en el 100% de cada par de registros sísmicos, la combinación usada se muestra en la Figura 4.26.

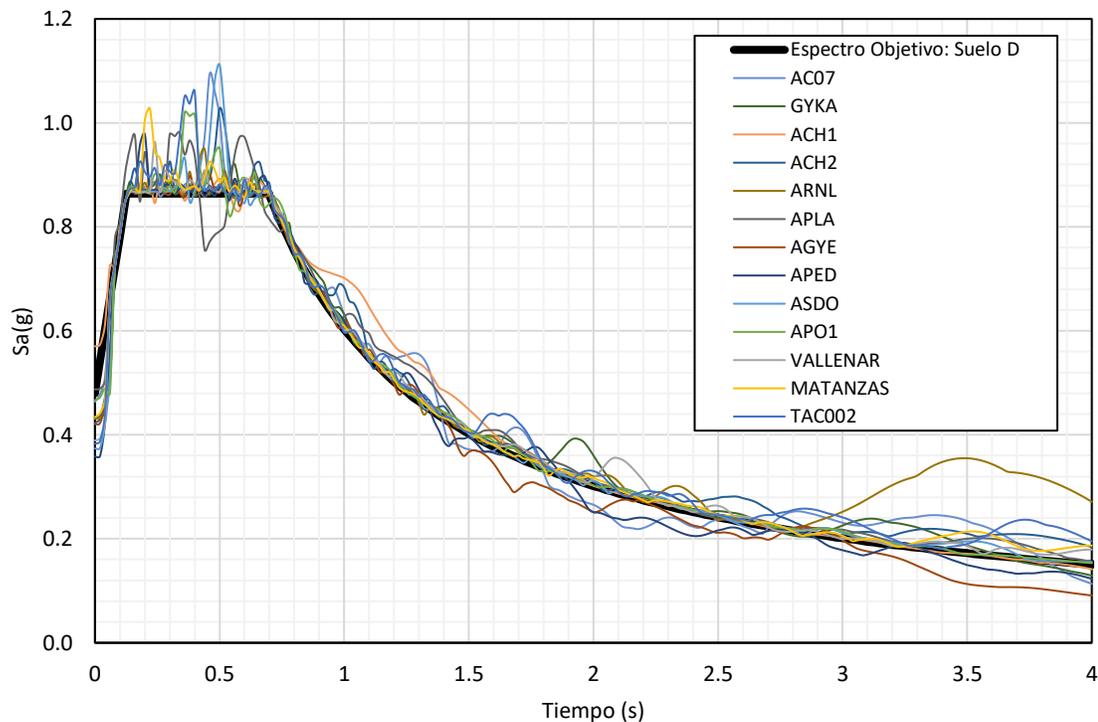
Figura 4.26. Combinación direccional



Fuente: Elaborada por Autor

En la Figura 4.27 se observa que, en el rango de periodos cortos del espectro de diseño (periodo de retorno de 475 años), los valores de los SRSS de los espectros de respuesta son inferiores a los valores del espectro de diseño. Según Chaparro en su estudio “Selección y procesamiento de acelerogramas para el análisis dinámico de la presa teatinos”, se destaca que los espectros de respuesta tienden a mostrar una mayor similitud en el tramo de períodos cortos cuando se trata de sismos generados por fuentes cercanas (Chaparro, 2017), sin embargo, en este caso, no se cuentan con registros de sismos de campo cercano, lo que sugiere que la coincidencia en los espectros se producirá en los tramos de períodos posteriores, esto se hace evidente en la Figura 4.28.

Figura 4.27. Ajuste Espectral

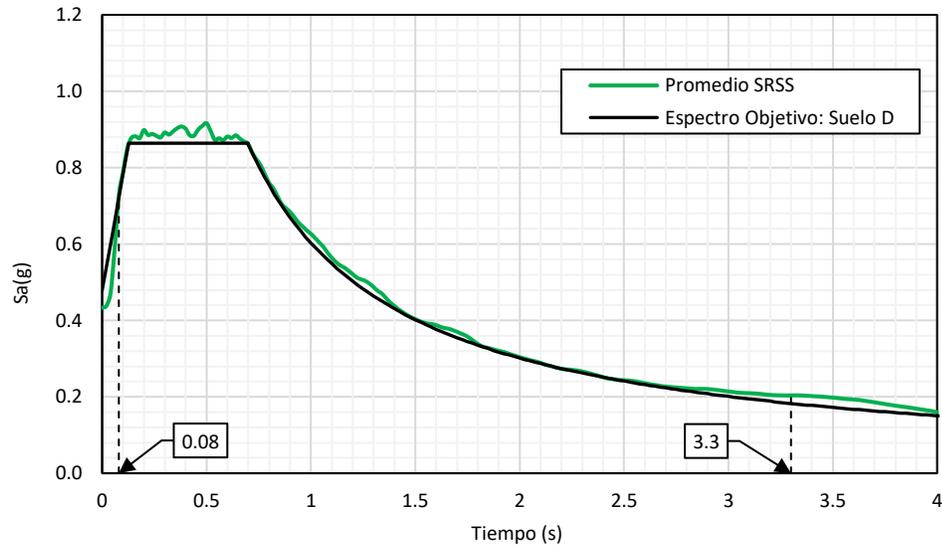


Fuente: Elaborada por Autor

Una vez realizado el SRSS de cada señal ajustada espectralmente, tal como se muestra en la Figura 4.27, se realizó el promedio de los espectros obtenidos, en donde se debe tener en cuenta las consideraciones de la sección 16.2.3.3 de la ACSE-7 la cual menciona que, cada par de componentes horizontales del movimiento del suelo debe aplicarse al edificio en orientaciones ortogonales, de modo que el promedio (o la media) del espectro de respuesta de las componentes para los registros aplicados en cada dirección esté dentro

del  $\pm 10\%$  de la media de los espectros de respuesta de las componentes de todos los registros aplicados en el rango de períodos especificado. Esto se ilustra en Figura 4.28.

Figura 4.28. SRSS



Fuente: Elaborada por Autor

En la Figura 4.28, en el rango de períodos que va desde 0.08 hasta 3.3 segundos, el promedio del espectro de respuesta del SRSS de los acelerogramas seleccionados se mantiene dentro de un rango de  $\pm 10\%$  del espectro objetivo, por lo tanto, se puede afirmar que los registros que han sido espectro compatibilizados son adecuados para llevar a cabo el análisis de estructuras cuyos períodos naturales se encuentren dentro de ese rango de períodos.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Conclusiones**

Mediante la revisión bibliográfica, se determinó la caracterización de los suelos en la ciudad de Machala, la cual se encuentra situada en una región sísmica alta. Además, se identificó la presencia predominante de suelos blandos en esta zona, los cuales exhiben velocidades de onda de corte relativamente bajas y se caracterizan por ser una mezcla de arcillas con propiedades de plasticidad moderada a alta, siendo la litología predominante arcillas marinas de estuario, además, en función de la frecuencia de las señales registradas por las estaciones locales, se consideró en base a la metodología de Zhao que el periodo dominante corresponde a un suelo tipo D.

Inicialmente se recopiló una gran cantidad de registros acelerográficos (alrededor de 77) que se ajustaban a características como la velocidad de onda de corte, magnitud, mecanismo de falla o duración significativa. Sin embargo, se llevó a cabo un proceso de filtrado adicional que consideró como parámetro principal la forma del espectro de respuesta, la cual debe ser consistente con el espectro de diseño de manera general, ya que al no existir esta similitud el ajuste espectral no sería apropiado y no se lograría una adecuada compatibilidad espectral, este fenómeno se ilustró en la sección 4.2.

Un parámetro adicional que se incluyó en el análisis fue la caracterización del tipo de suelo utilizando la metodología de Zhao, basada en las propiedades del periodo de vibración del suelo. Esta caracterización se derivó de las amplitudes máximas observadas en los espectros de Fourier obtenidos de cada acelerograma. La inclusión de este parámetro se justificó a raíz del sismo ocurrido el 16 de abril de 2016. En ese evento, se había realizado una clasificación inicial de las zonas como suelo tipo C utilizando métodos indirectos para estimar la velocidad de onda de corte, sin embargo, esta clasificación no reflejó con precisión las propiedades geofísicas reales de los suelos analizados. Por lo tanto, se concluyó que la estimación de la velocidad de onda de corte por sí sola no era suficiente para una clasificación precisa del tipo de suelo.

Se identificaron 13 registros que se consideraron los más adecuados para representar la realidad geofísica de la ciudad de Machala. Entre estos se incluyeron los registrados por las estaciones AC07, GYKA, ACH1, ACH2, ARNL, APLA, AGYE, APED, ASDO, APO1, VALLENAR, MATANZAS y TAC002. Los cuales se consideraron en esta investigación

como una base confiable para proponer un espectro de respuesta compatibilizado con el espectro de diseño para suelos D en la ciudad de Machala.

Luego de realizar el ajuste espectral, se observó una mejor coincidencia al ampliar el rango de periodos utilizados para el emparejamiento espectral. Para periodos inferiores a 0.08 segundos, la coincidencia espectral no se dio debido a la falta de registros de campo cercano en el estudio. Sin embargo, para los propósitos de esta investigación, se determinó que se logra un buen ajuste espectral (Spectral Match) en el rango de periodos de 0.08 a 3.3 segundos. Este intervalo se eligió basándose en el análisis del promedio de la Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS) de los 13 registros acelerográficos ajustados espectralmente en cada dirección. En este rango, el promedio del espectro del SRSS no cae por encima o por debajo del espectro de diseño en más del 10%.

## **5.2. Recomendaciones**

Se sugiere la recopilación de información de acelerógrafos locales, como las estaciones ACH1 y ACH2, para hacer más representativa la base de datos de registros acelerográficos, Esto permitiría obtener datos mucho más representativos del área de estudio, especialmente en relación con los sismos ocurridos en Machala el 23 de julio y 21 de agosto del 2023, con el objetivo de obtener registros de campo cercano.

La elección del tipo de suelo se basó en la bibliografía y en el análisis de la señal sísmica local ACH1 utilizando la clasificación de Zhao. Sin embargo, es importante tener en cuenta que en Machala predominan los suelos blandos, los cuales pueden ser más desfavorables que la categoría D. Por lo tanto, se recomienda llevar a cabo estudios de microzonificación al seleccionar el tipo de suelo objetivo en la ciudad de Machala. Esto es especialmente relevante debido a que, de acuerdo con lo establecido en la NEC, las ciudades con una población superior a 100,000 habitantes deben contar con estos estudios.

Al momento de seleccionar los registros se puede tener en consideración lo siguiente:

Como se ha destacado anteriormente, las condiciones del suelo en el sitio (tipo de suelo), desempeñan un papel significativo en los movimientos sísmicos. Sin embargo, a pesar de esta influencia, la ASCE establece que los límites no deben ser excesivamente restrictivos para evitar una reducción innecesaria en la cantidad de movimientos que puedan ser considerados como candidatos.

Es esencial garantizar que la tasa de muestreo sea lo suficientemente alta para capturar todas las características significativas de cada movimiento. Generalmente, las tasas de muestreo oscilan entre 0.001 y 0.02 segundos. Se recomienda mantener tasas de muestreo similares para evitar posibles errores en el procesamiento de los datos.

El factor de escala es un parámetro crítico en la selección de movimientos, y se debe elegir movimientos de manera que el factor de escala requerido esté dentro de un rango limitado. Normalmente, se establece un límite permitido para el factor de escala en el rango de aproximadamente 0.25 a 4.0, lo cual es una práctica común.

## Referencias Bibliográficas

- Aguiar, R., Espinosa, A., Carrión, J., & Zambrano, V. (2018). LA VELOCIDAD DE LA ONDA DE CORTE NO ES SUFICIENTE PARA CLASIFICAR EL SUELO. *Ciencia*, 20(1). <https://doi.org/10.24133/ciencia.v20i1.553>
- Aranda, R., & Enriquez, E. (2019). *Sismología y dinámica de suelos aplicado a la ingeniería sismorresistente*.
- Arroyo, M. (2022). *ANÁLISIS Y PROPUESTA DE RELACIONES EMPÍRICAS DE ESCALAMIENTO DE MAGNITUDES PARA EL POTENCIAL SÍSMICO DE FALLAS EN AMÉRICA CENTRAL*. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA.
- ASCE 7. (2022). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. In *ANSI/ASCE Standard*.
- Barrientos, S. (2010). Terremoto (M=8.8) del 27 de febrero de 2010 en Chile. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, 67(3), 412–420.
- Basri, K., Zainorabidin, A., Mohamad, H. M., & Musta, B. (2021). Determining the peat soil dynamic properties using geophysical methods. *Magazine of Civil Engineering*, 105(5). <https://doi.org/10.34910/MCE.105.8>
- Brune, J. N., & Thatcher, W. (2002). Strength and Energetics of Active Fault Zones. *International Geophysics*, 81(PART A), 569-cp1. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(02\)80238-8](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80238-8)
- Cabrera, P., Ordoñez, J., Carrión, L., & Lima, R. (2020). Geotecnia enfocada a cimentaciones de edificaciones de 3 pisos en la ciudad de Machala. *Conference Proceedings (Machala)*, 4(1), 94–111. <https://doi.org/10.48190/cp.v4n1a6>
- CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL UNIVERSIDAD DE CHILE. (2014). *Terremoto de Iquique, Mw=8.2*.
- Chaparro, A. (2017). Selección y procesamiento de acelerogramas para el análisis dinámico de la presa teatinos. *Ingenio Magno*, 8(2), 108–124.
- Dondurur, D. (2018). Introduction. *Acquisition and Processing of Marine Seismic Data*, 1–35. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811490-2.00001-3>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2015). NEHRP Recommended seismic provisions for new buildings and other structures, Report No. FEMA P-1050-1. In *Building Seismic Safety Council*.
- Flores López, F. A., & Ayez Zamudio, J. C. (2018). Generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de Wavelets, orientados a aplicaciones geotécnico-estructurales. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 98, 1. <https://doi.org/10.18867/ris.98.480>

- Flóvenz, O., Hersir, G. P., Sæmundsson, K., Ármannsson, H., & Friethriksson, T. (2012). Geothermal Energy Exploration Techniques. *Comprehensive Renewable Energy*, 7, 51–95. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00705-8>
- Gaidzik, K., & Więsek, M. (2021). Seismo-lineaments and potentially seismogenic faults in the overriding plate of the Nazca-South American subduction zone (S Peru). *Journal of South American Earth Sciences*, 109, 103303. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2021.103303>
- Gobierno Autónomo Decentralizado de Machala. (2019). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Machala 2019. In *PDOT-Machala*.
- González Huizar, H. (2019). La Olimpiada XXIV de Ciencias de la Tierra: Los Grandes Terremotos en México. *División de Ciencias de La Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California, México*, 39(1).
- Grant, D. N., & Diaferia, R. (2013). Assessing adequacy of spectrum-matched ground motions for response history analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(9), 1265–1280. <https://doi.org/10.1002/eqe.2270>
- Gualtieri, L., Bachmann, E., Simons, F. J., Tromp, J., & Romanowicz, B. A. (2020). *The origin of secondary microseism Love waves*. 117, 29504–29511. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013806117/-/DCSupplemental.y>
- Guan, J., Li, Y., Ji, R., Liu, G., & Yan, Y. (2022). Love wave full-waveform inversion for archaeogeophysics: From synthesis tests to a field case. *Journal of Applied Geophysics*, 202, 104653. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2022.104653>
- Haldar, S. K. (2018). Exploration Geophysics. *Mineral Exploration*, 103–122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814022-2.00006-X>
- Hoskins, M. C., Meltzer, A., Font, Y., Agurto-Detzel, H., Vaca, S., Rolandone, F., Nocquet, J. M., Soto-Cordero, L., Stachnik, J. C., Beck, S., Lynner, C., Ruiz, M., Alvarado, A., Hernandez, S., Charvis, P., Regnier, M., Leon-Rios, S., & Rietbrock, A. (2021). Triggered crustal earthquake swarm across subduction segment boundary after the 2016 Pedernales, Ecuador megathrust earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 553, 116620. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2020.116620>
- IG-EPN. (2023). *Instituto Geofísico*.
- Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional. (2023). *INFORME SÍSMICO ESPECIAL NO. 2023-003*.
- Instituto Geográfico Militar. (2016). *Atlas del Sismo Ecuador 16 Abril 2016*.
- Kamura, A., Kurihara, G., Mori, T., Kazama, M., Kwon, Y., Kim, J., & Han, J. T. (2021). Exploring the possibility of assessing the damage degree of liquefaction based only on seismic records by artificial neural networks. *Soils and Foundations*, 61(3), 658–674. <https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2021.01.014>

- Khan, M. A. (2013). Seismic Design for Buildings. *Earthquake-Resistant Structures*, 283–315. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-501-2.00010-9>
- Kitayama, S., Morales Moncayo, E. A., & Athanasiou, A. (2023). Inspection and repair considerations for downtime assessment of seismically isolated buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, 107618. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2022.107618>
- Lanning, F., Haro, A. G., Liu, M. K., Monzón, A., Monzón-Despang, H., Schultz, A., & Tola, A. (2016). EERI Earthquake Reconnaissance Team Report: M7.8 Muisne, Ecuador Earthquake on April 16, 2016. In *Earthquake Engineering Research Institute* (Issue October).
- Lazcano, S. (2012). Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal. *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.
- Li, Y. G., Fan, F., & Hong, H. P. (2017). Reliability of lattice dome with and without the effect of using small number of ground motion records in seismic design. *Engineering Structures*, 151, 381–390. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.07.038>
- Luisa Bermúdez, M., Enrique Franco, L., & Enrique Martínez, S. (2002). *Cálculo del período fundamental del suelo como herramienta para la microzonificación sísmica: casos colombianos*.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción: Peligro Sísmico, Diseño Sismo Resistente. In 122. *MIDUVI. Quito-Ecuador*. 149.
- Mori, F., Mendicelli, A., Moscatelli, M., Romagnoli, G., Peronace, E., & Naso, G. (2020). A new Vs30 map for Italy based on the seismic microzonation dataset. *Engineering Geology*, 275, 105745. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2020.105745>
- NEC-SE-DS. (2015). NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN - NEC NEC-SE-DS CARGAS SÍSMICAS DISEÑO SISMO RESISTENTE. In *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*.
- Newmark, N. M. , and E. Rosenblueth. (1971). *Fundamentals of earthquake engineering. Englewood Cliffs, NJ: Prentice*.
- Nikolaou, S., Vera-Grunauer, X., & Gilsanz, R. (2016). GEER-ATC earthquake reconnaissance April 16th 2016, Muisne, Ecuador. *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association Report GEER-049*.
- Paolacci, F., Giannini, R., Nam, P. H., Corritore, D., & Quinci, G. (2023). Scores: an algorithm for records selection to employ in seismic risk and resilience analysis. *Procedia Structural Integrity*, 44, 307–314. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2023.01.040>

- Pasten, D., Saravia, G., Vogel, E. E., & Posadas, A. (2022). Information theory and earthquakes: Depth propagation seismicity in northern Chile. *Chaos, Solitons & Fractals*, 165, 112874. <https://doi.org/10.1016/J.CHAOS.2022.112874>
- Perepérez, B. (2014). La peligrosidad sísmica y el factor de riesgo. *Informes de La Construcción*, 66(534). <https://doi.org/10.3989/ic.13.018>
- Poreddy, L. R., Pathapadu, M. K., Navyatha, C., Vemuri, J., & Chenna, R. (2022). Correlation analysis between ground motion parameters and seismic damage of buildings for near-field ground motions. *Natural Hazards Research*, 2(3), 202–209. <https://doi.org/10.1016/J.NHRES.2022.08.002>
- Pulido, N., Yoshimoto, M., & Sarabia, A. M. (2020). Broadband wavelength slip model of the 1906 Ecuador-Colombia megathrust-earthquake based on seismic intensity and tsunami data. *Tectonophysics*, 774, 228226. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2019.228226>
- Rinaldin, G., Fasan, M., Noé, S., & Amadio, C. (2019). The influence of earthquake vertical component on the seismic response of masonry structures. *Engineering Structures*, 185, 184–193. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.01.138>
- Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). Breves fundamentos terremotos Ecuador. In *Quito: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional*.
- Rodríguez, J. (2020). CARACTERIZACIÓN DE SISMOS DE CAMPO CERCANO. *Revista Internacional de Desastres Naturales*, 19, 24–54.
- Salleh, A. N., Muztaza, N. M., Sa'ad, R., Zakaria, M. T., Mahmud, N., Rosli, F. N., & Samsudin, N. (2021). Application of geophysical methods to evaluate soil dynamic properties in Penang Island, Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 207, 104659. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2020.104659>
- Sharma, K., Manral, D. S., & Rao, G. V. J. (2022). Effective attenuation of coherent and random noises in land seismic data: A case study from Upper Assam Basin. *Innovative Exploration Methods for Minerals, Oil, Gas, and Groundwater for Sustainable Development*, 421–429. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823998-8.00026-0>
- Shedlock, K. M. (2002). Global Seismic Hazards. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 825–832. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00295-7>
- Siahkoohi, A., Louboutin, M., & Herrmann, F. J. (2019). The importance of transfer learning in seismic modeling and imaging. *Geophysics*, 84(6). <https://doi.org/10.1190/geo2019-0056.1>
- Simos, N., Manos, G. C., & Kozikopoulos, E. (2018). Near- and far-field earthquake damage study of the Konitsa stone arch bridge. *Engineering Structures*, 177, 256–267. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.09.072>

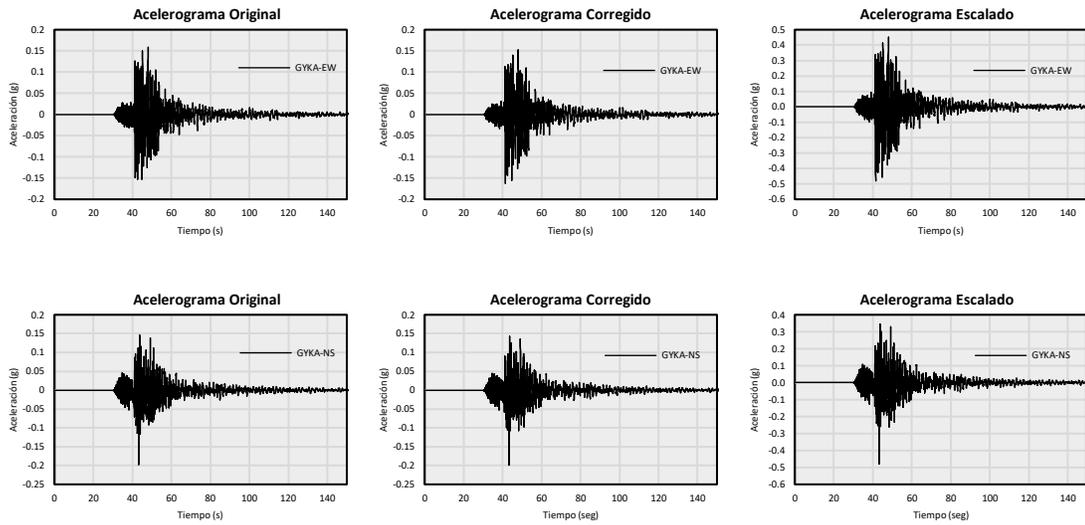
- Sun, Q., Dias, D., & Ribeiro e Sousa, L. (2019). Impact of an underlying soft soil layer on tunnel lining in seismic conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, 293–308. <https://doi.org/10.1016/J.TUST.2019.05.011>
- Tavera, H. (2012). La sismicidad en el mundo. *Geofísica*, 66.
- Tena-Colunga, A. (2021). Aspects to Consider in the Assessment of Effective Stiffness for Reinforced Concrete Beams. *Journal of Architectural Engineering*, 27(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ae.1943-5568.0000451](https://doi.org/10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000451)
- Tu, R., Zhang, P., Zhang, R., Liu, J., & Lu, X. (2017). The study of baseline shift error in strong-motion and ground tilting during co-seismic period with collocated GPS and strong-motion observations. *Advances in Space Research*, 59(1), 24–32. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2016.08.035>
- Uyanik, O. (2019). Estimation of the porosity of clay soils using seismic P- and S-wave velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103832. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2019.103832>
- Vilera, L., Rivero, P. Y., & Lobo, W. (2008). Efectos sísmicos de la componente vertical en edificios aporticados de acero Vertical ground motion seismic effects on steel building frames. In *Revista Ciencia e Ingeniería* (Vol. 29, Issue 1).
- Wani, F. M., Vemuri, J., Rajaram, C., & Babu R, D. v. (2022). Effect of soil structure interaction on the dynamic response of reinforced concrete structures. *Natural Hazards Research*, 2(4), 304–315. <https://doi.org/10.1016/J.NHRES.2022.11.002>
- Xiong, M., & Huang, Y. (2019). Novel perspective of seismic performance-based evaluation and design for resilient and sustainable slope engineering. In *Engineering Geology* (Vol. 262). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105356>
- Yu, W., & Zhou, L. (2023). Seismic metamaterial surface for broadband Rayleigh waves attenuation. *Materials & Design*, 225, 111509. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2022.111509>
- Zhang, Y., Wang, T., Bian, Y., & Yang, Q. (2021). Features of different types of seismic events in China's Capital Region. *Earthquake Science*, 34(6), 489–506. <https://doi.org/10.29382/EQS-2021-0035>
- Zhao, J. X. (2006). An Empirical Site-Classification Method for Strong-Motion Stations in Japan Using H/V Response Spectral Ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 914–925. <https://doi.org/10.1785/0120050124>

## ANEXOS

A continuación, se presentan los 13 pares de señales sísmicas originales, corregidas y escaladas.

### Señal GYKA

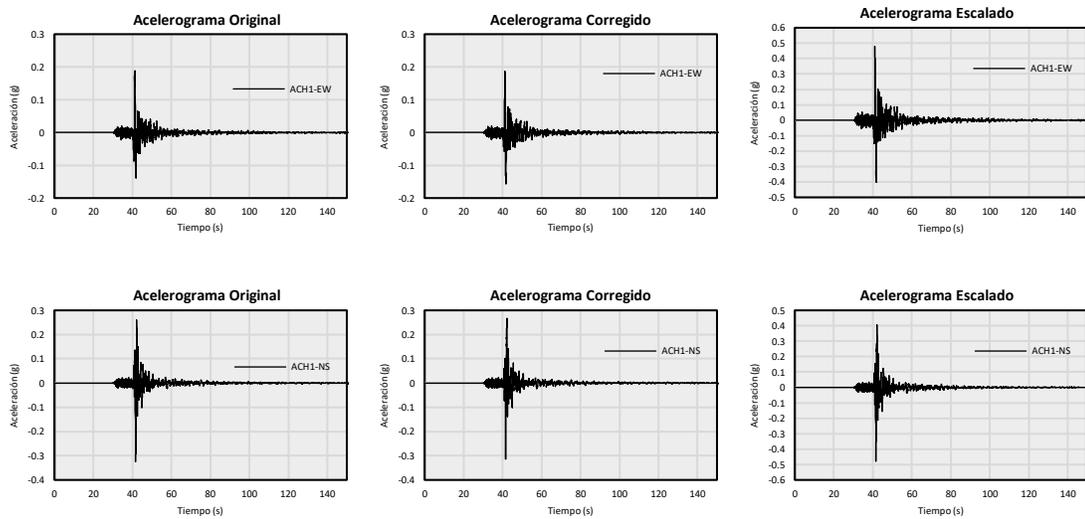
Anexo 1. Acelerograma GYKA original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

### Señal ACH1

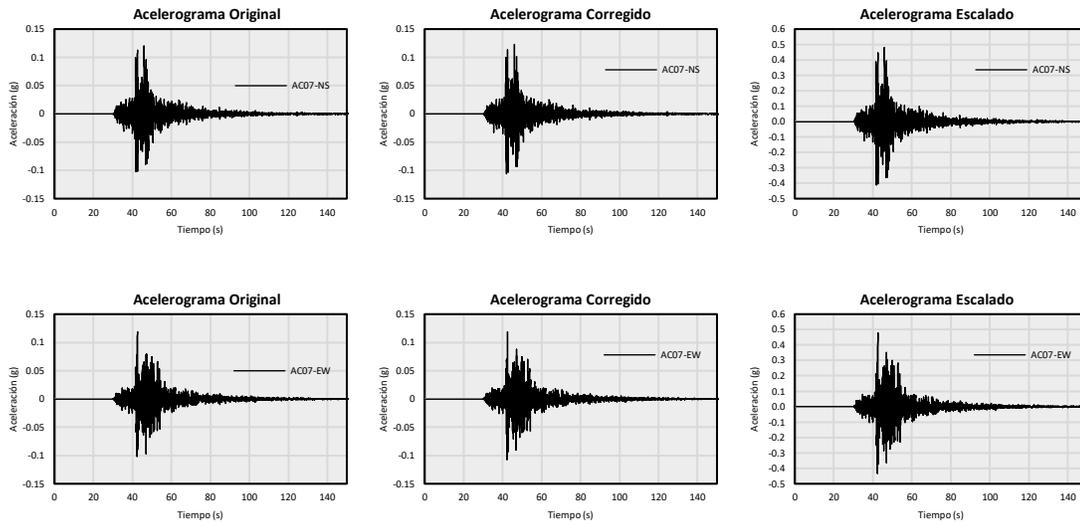
Anexo 2. Acelerograma ACH1 original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal AC07

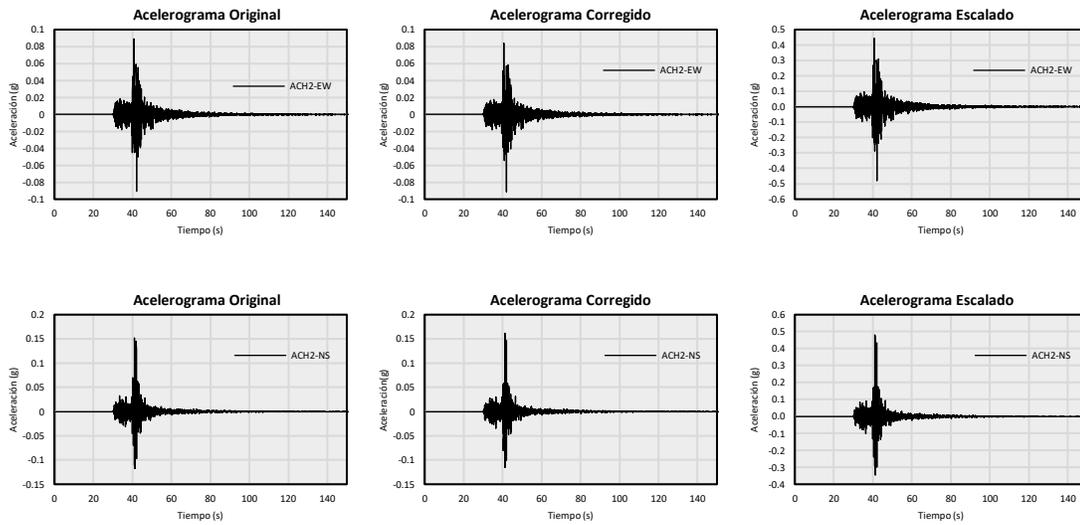
### Anexo 3. Acelerograma AC07 original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal ACH2

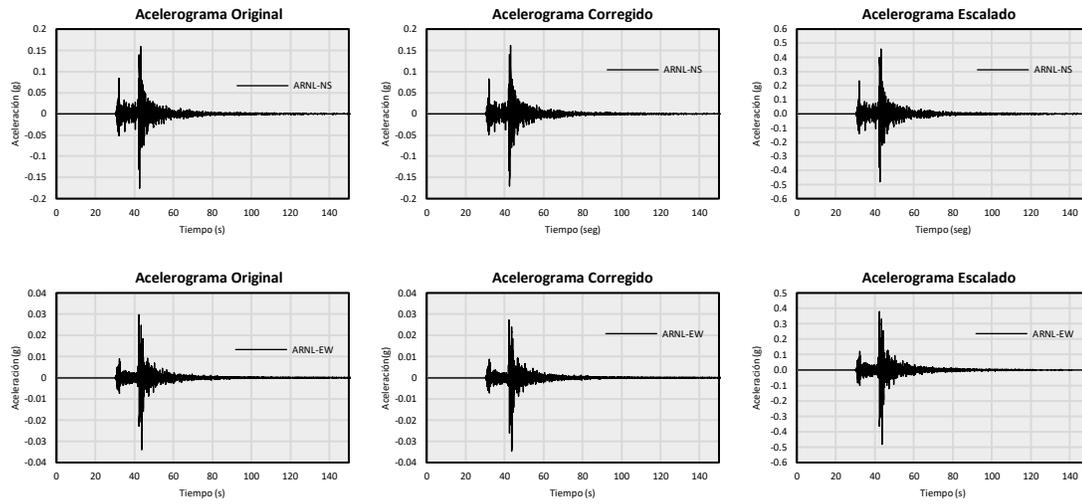
### Anexo 4. Acelerograma ACH2 original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal ARNL

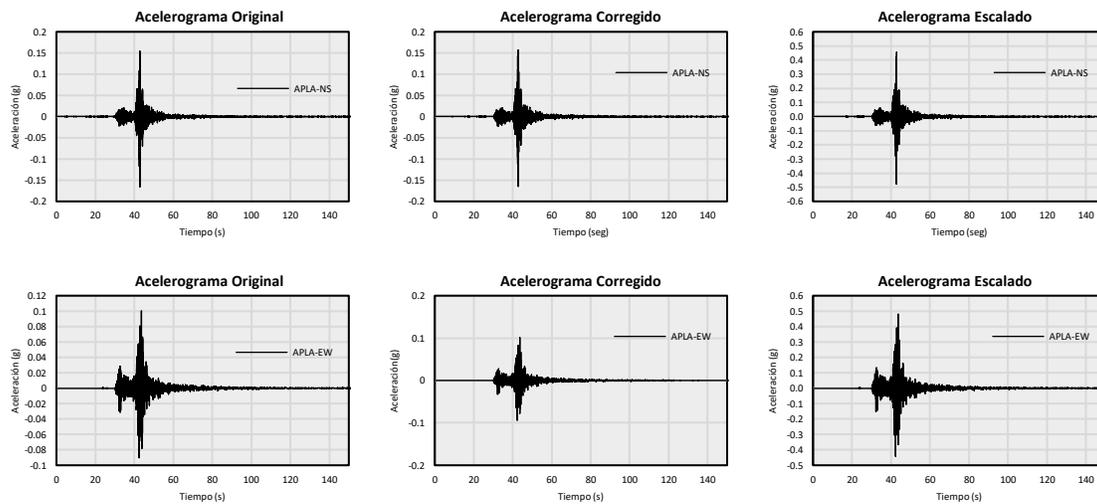
Anexo 5. Acelerograma ARNL original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal APLA

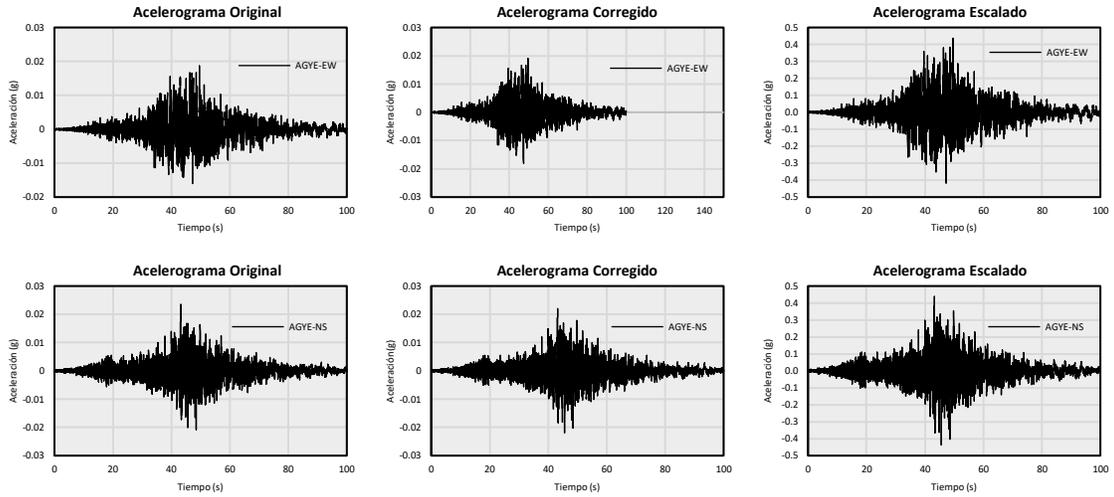
Anexo 6. Acelerograma APLA original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal AGYE

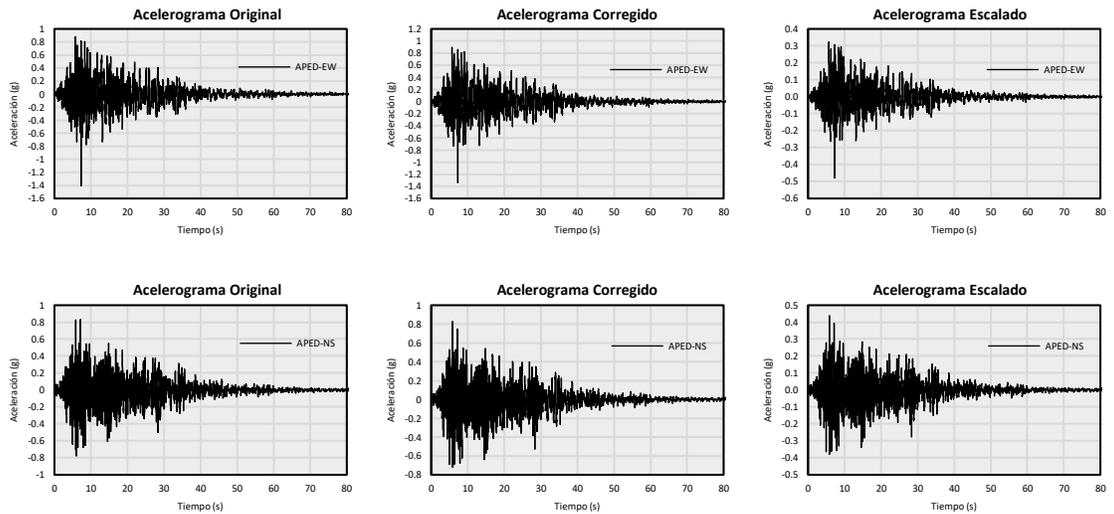
### Anexo 7. Acelerograma AGYE original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal APED

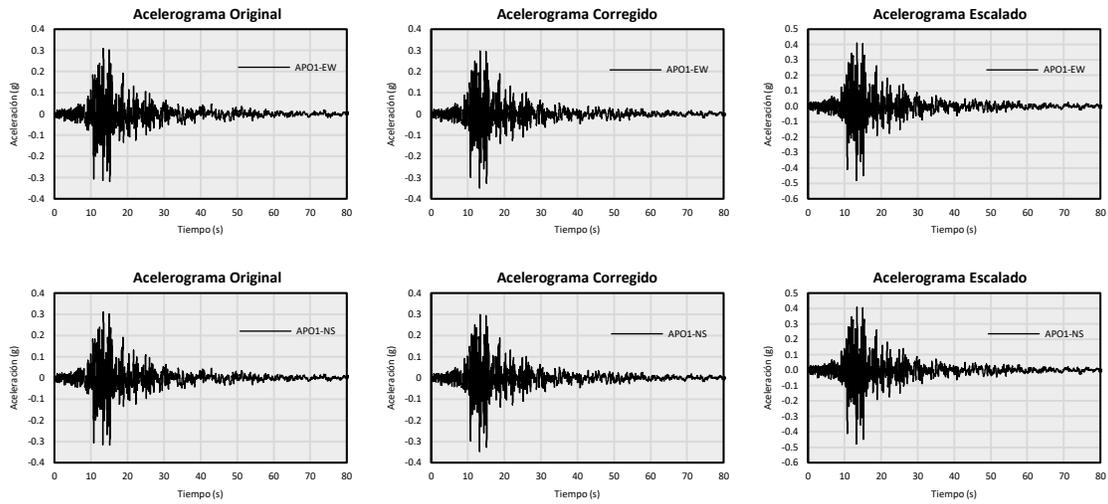
### Anexo 8. Acelerograma APED original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal APO1

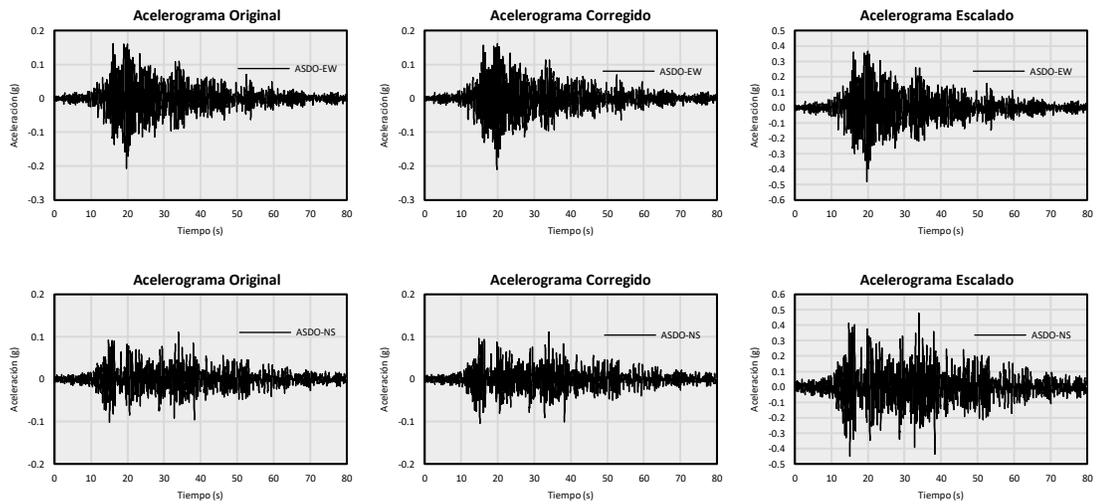
### Anexo 9. Acelerograma APO1 original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal ASDO

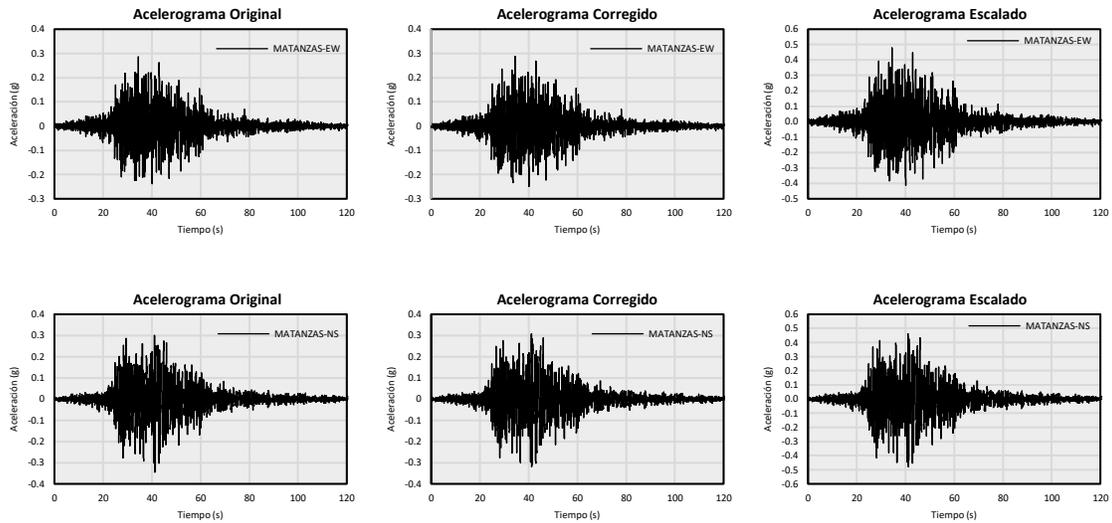
### Anexo 10. Acelerograma ASDO original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal MATANZAS

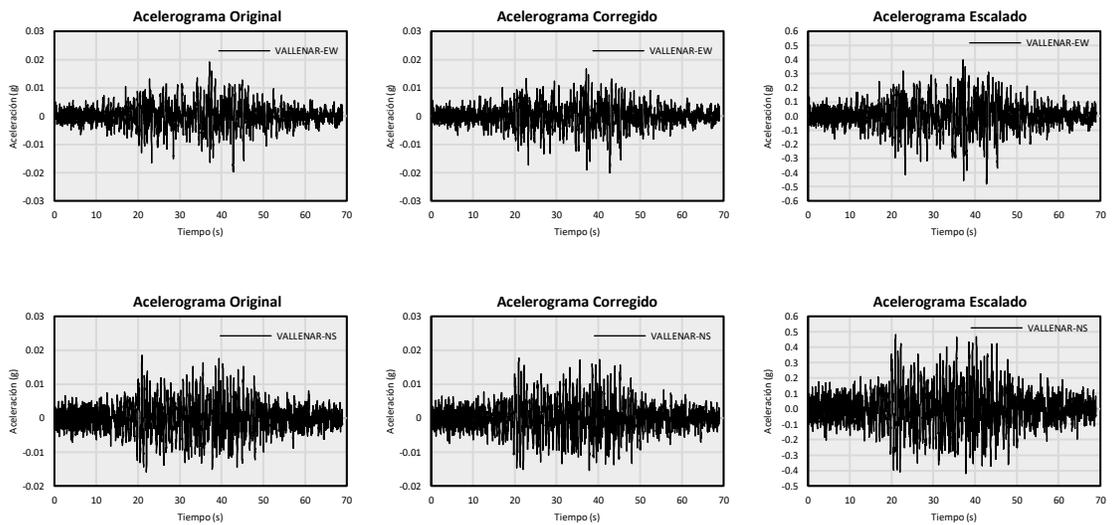
Anexo 11. Acelerograma MATANZAS original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

## Señal VALLENAR

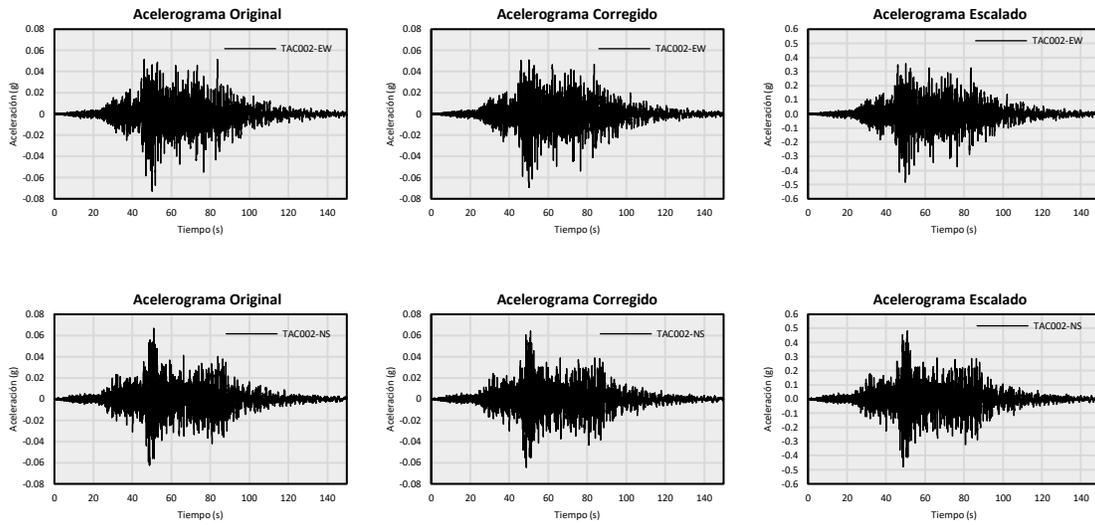
Anexo 12. Acelerograma VALLENAR original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor

# Señal TAC002

Anexo 13. Acelerograma TAC002 original, corregido y escalado



Fuente: Elaborado por Autor