



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS PARA ANÁLISIS  
DE ESTRUCTURAS CON EJEMPLOS PARA EL VALLE DE GUATEMALA**

**Alberto José Monzón Posadas**

Asesorado por el Dr. Héctor Monzón Despang

Guatemala, septiembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS PARA ANÁLISIS  
DE ESTRUCTURAS CON EJEMPLOS PARA EL VALLE DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ALBERTO JOSÉ MONZÓN POSADAS**  
ASESORADO POR EL DR. HÉCTOR MONZÓN DESPANG

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

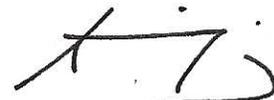
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Jeovany Rudaman Miranda Castañón
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS PARA ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON EJEMPLOS PARA EL VALLE DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha octubre de 2011.



**Alberto José Monzón Posadas**

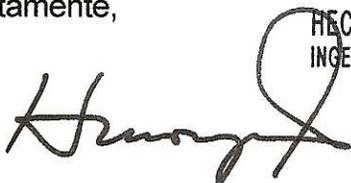
Guatemala 25 de marzo de 2013,

M.Sc. Ronald Estuardo Galindo Cabrera  
Jefe del Departamento de Estructuras  
Facultad de Ingeniería  
Universidad San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Galindo

Por este medio le informo que apruebo el trabajo de graduación titulado **“SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS PARA ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON EJEMPLOS PARA EL VALLE DE GUATEMALA”** del estudiante de Ingeniería Civil, **Alberto José Monzón Posadas**, quien se identifica con carné **2006-30142**. El trabajo se ha finalizado bajo mi asesoría.

Atentamente,



**HÉCTOR MONZÓN DESPANG**  
**INGENIERO CIVIL, COLEGIADO 932**  
**GUATEMALA**

Héctor Monzón Despang, Ph.D.  
Ingeniero Civil Colegiado 932



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
 Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,  
 12 de abril de 2013

Ingeniero  
 Hugo Leonel Montenegro Franco  
 Director Escuela Ingeniería Civil  
 Facultad de Ingeniería  
 Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS PARA ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON EJEMPLOS PARA EL VALLE DE GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Alberto José Monzón Posadas, quien contó con la asesoría del Ing. Héctor Monzón Despang.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA TODOS

  
 Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera  
 Jefe del Departamento de Estructuras



FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO  
 DE  
 ESTRUCTURAS  
 USAC

/bbdeb.

*Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua*





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Héctor Monzón Despang y del Jefe del Departamento de Estructuras, Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera, al trabajo de graduación del estudiante Alberto José Monzón Posadas, titulado **SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS PARA ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON EJEMPLOS PARA EL VALLE DE GUATEMALA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

*Hugo Leonel Montenegro Franco*  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, septiembre de 2013.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS PARA ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON EJEMPLOS PARA EL VALLE DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Alberto José Monzón Posadas**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, septiembre de 2013

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser la luz en mí camino y mi razón de ser.
<b>Mis padres</b>	Werner Monzón y Victoria de Monzón, por todo el amor y el apoyo en mi vida.
<b>Mis hermanos</b>	Mónica, Werner y Diana Monzón Posadas por el amor y cariño.
<b>Dr. Héctor Monzón Despang</b>	Mi mentor. Mi agradecimiento y mi admiración infinita por compartirme su conocimiento.
<b>A mis amigos</b>	Por estar siempre a mi lado y por crecer juntos con el sueño de ser mejores guatemaltecos.
<b>Familia Herrera Martínez</b>	A quienes quiero e infinitamente agradezco la ayuda brindada en mis primeros años de estudiante universitario.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**La Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Mi *alma mater*.

**Facultad de Ingeniería**

Por brindarme el conocimiento para ejercer mi carrera.

**Mis amigos**

Roberto Aguilar, José Ruiz, Carlos Moncada, Roberto Hernández, Isabel Paiz, Cecilia García y Vera Morales por el apoyo para terminar esta investigación.

**Ing. Mario Corzo**

Por las prácticas en el laboratorio de ingeniería y encaminarme en mis estudios dentro de la Facultad.

**Dr. Juan Pablo Ligorria**

Por su tiempo y orientación para realizar esta investigación.

**M.Sc. Manuel Archila**

Por proporcionarme las herramientas para realizar la parte práctica de la investigación.

**PEER y USGS**

Por proporcionar de manera gratuita los acelerogramas con fines académicos.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. EL ACELEROGRAMA.....	1
1.1. Descripción general.....	1
1.2. Parámetros de los acelerogramas.....	3
1.2.1. Duración .....	4
1.2.2. Parámetros de amplitud de movimiento del suelo ....	4
1.2.2.1. Aceleración pico del suelo (PGA) .....	5
1.2.2.2. Velocidad pico (PGV) .....	6
1.2.2.3. Desplazamiento máximo .....	7
1.2.2.4. Aceleración media cuadrática.....	7
1.2.2.5. Medias cuadráticas.....	7
1.2.3. Espectros sísmicos del contenido de frecuencia del sismo.....	8
1.2.3.1. Espectro de Fourier .....	8
1.2.3.2. Espectro de respuesta sísmico.....	9
1.2.3.3. Intensidad de Arias .....	11
1.2.3.4. Intensidad espectral.....	12

2.	FACTORES QUE AFECTAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ACELEROGRAMAS .....	13
2.1.	Fuente de vibración.....	13
2.1.1.	Magnitud del sismo .....	14
2.1.2.	Falla geológica .....	16
2.1.3.	Geometría de las fallas.....	17
2.1.4.	Desplazamientos de la fallas.....	18
2.1.4.1.	Deslizamiento divergente .....	18
2.1.4.2.	Deslizamientos convergentes.....	19
2.1.4.3.	Falla transcurrente .....	19
2.2.	Medio de transmisión .....	20
2.2.1.	Distancia de la falla al sitio de interés .....	20
2.2.2.	Profundidad focal .....	22
2.2.3.	Direccionalidad.....	22
2.3.	Estructura de la corteza .....	24
2.4.	Condiciones de sitio .....	24
3.	ATENUACIÓN .....	27
3.1.	Ecuación general de atenuación .....	27
3.2.	Incidencia de los parámetros en la atenuación .....	29
4.	PANORAMA SÍSMICO QUE AFECTA A LA CIUDAD DE GUATEMALA.....	33
4.1.	Marco tectónico del país .....	33
4.1.1.	Zona de subducción .....	35
4.1.2.	Límite entre placa de Norte América y Caribe.....	36
4.1.3.	Fallamientos secundarios superficiales.....	37
4.2.	Estudios de sismicidad en Guatemala .....	41
4.3.	Geología en el área de la ciudad de Guatemala .....	46

5.	SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS .....	51
5.1.	Tipos de estructuras que pueden estar sujetas al análisis .....	54
5.2.	Proceso de selección y adecuación .....	54
5.3.	Objetivo del análisis.....	56
5.3.1.	Normas para la selección y adecuación .....	58
5.4.	Número de acelerogramas a utilizar .....	58
5.5.	Bases de datos de registros de movimiento fuerte .....	60
5.6.	Determinar la amenaza sísmica .....	61
5.6.1.	Análisis sísmico de amenaza determinístico .....	62
5.6.2.	Análisis sísmico de amenaza probabilístico .....	64
5.7.	Selección de registros .....	68
5.8.	Adecuación.....	69
5.8.1.	Adecuación en base a parámetros del suelo .....	71
5.8.1.1.	Adecuación en base al PGA y PGV.....	71
5.8.1.2.	Intensidad de Arias y RMS .....	71
5.8.1.3.	Intensidad de espectro y el índice iv....	72
5.8.1.4.	Aceleración espectral .....	72
5.8.1.5.	En el tiempo.....	73
5.8.1.6.	Transformada de Fourier y Wavelets...	73
5.9.	Evaluación de la selección y escala .....	74
5.10.	Comentarios acerca de la selección y escala por medio del ASCE/SEI 7-10.....	75
6.	EJEMPLOS DE ACELEROGRAMAS APLICABLES AL VALLE DE GUATEMALA .....	79
6.1.	Determinación del objetivo de la investigación .....	80
6.1.1.	Antecedentes.....	80
6.1.2.	Justificación .....	82
6.2.	Número de acelerogramas .....	83

6.3.	Fuentes de registros.....	83
6.4.	Determinación del espectro genérico de diseño AGIES NSE2-2010.....	84
6.5.	Selección de acelerograma.....	88
6.5.1.	Parámetros de selección de acelerogramas .....	88
6.5.2.	Fuente de registros de acelerogramas.....	90
6.5.3.	Registros seleccionados.....	91
6.5.4.	Acelerogramas seleccionados para la adecuación.....	94
6.6.	Adecuación acelerogramas al parámetro PGA .....	102
6.7.	Resultados de la adecuación .....	104
6.8.	Acelerogramas adecuados.....	113
CONCLUSIONES.....		119
RECOMENDACIONES .....		121
BIBLIOGRAFÍA.....		123
APÉNDICE .....		127
ANEXOS.....		153

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Un acelerograma típico .....	1
2.	Parámetros de amplitud .....	5
3.	Espectro de Fourier.....	9
4.	Un espectro de respuesta lineal elástico del sismo El Centro 1940.....	10
5.	Intensidad de Arias con duración 5%-95%.....	11
6.	Comparación de magnitudes sísmicas.....	15
7.	Vectores, planos y ángulos de las fallas .....	18
8.	Esfuerzos principales en la falla normal .....	18
9.	Esfuerzos principales en la falla inversa .....	19
10.	Esfuerzos principales en una falla transcurrente.....	20
11.	Distancias del sitio a la zona de liberación de energía.....	21
12.	Pulsos derivados de la direccionalidad del sismo .....	23
13.	Valores sísmicos en el terremoto de San Francisco 1957 .....	25
14.	Daño a edificios por altura del suelo San Francisco 1957.....	26
15.	Regresión de aceleraciones del sismo Imperial Valley 1979 .....	30
16.	Relación de varios sismos de igual magnitud .....	31
17.	Relaciones de atenuación .....	32
18.	Mapa Tectónico de Guatemala .....	34
19.	Zona de subducción .....	35
20.	Fallas de límite entre la placa norteamericana y del Caribe.....	37
21.	Graben de la ciudad de Guatemala .....	40
22.	Morfología del valle de la ciudad de Guatemala .....	41

23.	Comparación de espectros de la Norma AGIES 2010 y el estudio RESIS II para la ciudad de Guatemala .....	45
24.	Distribución geotécnica en la ciudad de Guatemala .....	48
25.	Diagrama del proceso de selección y adecuación .....	56
26.	Espectro condicional medio .....	66
27.	Espectro condicional, medio y uniforme .....	68
28.	Comparación de acelerograma original y adecuado.....	70
29.	Selección y adecuación con base en ASCE/SEI 7-10 .....	77
30.	Espectros de diseño AGIES NSE2-10 para suelo tipo D .....	87
31.	Acelerogramas originales San Salvador 13 de enero 2001 .....	94
32.	Acelerogramas originales San Salvador 1986 Geotécnico .....	95
33.	Acelerogramas originales Managua 1972.....	95
34.	Acelerogramas originales Irpina 1980.....	96
35.	Acelerogramas originales Dinar 1995.....	96
36.	Acelerogramas originales Kocaeli 1999.....	97
37.	Acelerogramas originales Landers 1992.....	97
38.	Acelerogramas original Imperial Valley 1979.....	98
39.	Acelerogramas originales San Salvador 1986 Geográfico.....	98
40.	Comparación de espectros de respuesta promedio y espectro de NSE2-10 .....	99
41.	Comparación del espectro de respuesta promedio y AGIES .....	102
42.	Espectros adecuados al PGA de RESIS II y AGIES NSE2-2010 para 10% de probabilidad de excedencia en 50 años .....	104
43.	Espectros adecuados al PGA de RESIS II y AGIES NSE2-2010 para 5% de probabilidad de excedencia en 50 años .....	105
44.	Espectros adecuados al PGA de RESIS II y AGIES NSE2-2010 para 2% de probabilidad de excedencia en 50 años .....	105
45.	Espectro promedio adecuados a PGA de RESIS II y espectro NSE2-2010 10% de probabilidad de excedencia en 50 años .....	106

46.	Espectro promedio adecuados a PGA de RESIS II y espectro NSE2-2010 5% de probabilidad de excedencia en 50 años .....	107
47.	Espectro promedio adecuados a PGA de RESIS II y espectro NSE2-2010 2% de probabilidad de excedencia en 50 años .....	107
48.	Espectro de respuesta y Normas NSE2-2010 y NR-2000.....	111
49.	Espectro promedio y NSE2-2010 falla tipo B a 5 kilómetros .....	112
50.	Acelerogramas adecuado al PGA. San Salvador 2001 .....	114
51.	Acelerograma adecuado al PGA. San Salvador 1986 Instituto Geográfico.....	114
52.	Acelerograma adecuado al PGA. San Salvador 1986 Instituto Geotécnico .....	115
53.	Acelerograma adecuado al PGA. Managua 1972 .....	115
54.	Acelerograma adecuado al PGA. Irpina 1980 .....	116
55.	Acelerograma adecuado al PGA. Dinar 1995 .....	116
56.	Acelerograma adecuado al PGA. Kocaeli 99 .....	117
57.	Acelerograma adecuado al PGA. Landers 1992 .....	117
58.	Acelerograma adecuado al PGA. Imperial Valley 1979.....	118

## **TABLAS**

I.	Clasificación sísmica del suelo.....	26
II.	Zonas de actividad microsísmica significativa .....	39
III.	Aceleraciones máximas en el valle de Guatemala.....	43
IV.	Modelo de escenarios sísmicos en Guatemala.....	46
V.	Unidades geotécnicas para la ciudad de Guatemala .....	47
VI.	Factores de clase de sitio AGIES NSE2-10 períodos cortos.....	49
VII.	Factores de clase de sitio AGIES NSE2-10 períodos largos.....	49
VIII.	Sitios de registros de movimiento fuerte .....	61

IX.	Valores de los espectros genéricos de diseño AGIES NSE2 2010 para el valle de Guatemala .....	87
X.	Sismos de control para la selección de registros.....	90
XI.	Eventos seleccionados para ejemplos.....	92
XII.	Valores PGA de espectros de respuesta .....	101
XIII.	Factores para adecuar al PGA de AGIES NSE2-10 .....	103
XIV.	Comparación de aceleraciones espectrales entre 0,2 y 0,5 segundos .....	109

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad
<b>a(t)</b>	Aceleración en función del tiempo
<b>x(t)</b>	Desplazamiento en función del tiempo
<b><math>\sigma</math></b>	Desviación estándar
<b>r</b>	Distancia de la liberación de energía sísmica al sitio de interés.
<b>Rrup</b>	Distancia del plano de ruptura al sitio
<b>Rjb</b>	Distancia Joyner Boore definida como la distancia más corta del sitio de interés a la proyección superficial de la superficie de ruptura.
<b><math>\omega</math></b>	Frecuencia angular
<b>f</b>	Frecuencia de vibración
<b>MMI</b>	Intensidad Mercalli Modificada
<b>km</b>	Kilómetro
<b>log</b>	Logaritmo de base 10
<b>Ln</b>	Logaritmo Natural
<b>Mw</b>	Magnitud de momento
<b>Mb</b>	Magnitud de onda de cuerpo
<b>Ms</b>	Magnitud de onda de superficie
<b>MI</b>	Magnitud Local
<b>M</b>	Magnitud Richter
<b>m</b>	Metro
<b>T</b>	Período Natural de vibración de la estructura

**v(t)**

Velocidad de la estructura en función del tiempo

**t**

Tiempo

## GLOSARIO

<b>AGIES</b>	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
<b>Acelerógrafo</b>	Instrumento que registra la aceleración del suelo en función del tiempo durante un evento sísmico. Se calibran para registrar solamente los movimientos más severos.
<b>Acelerograma</b>	Registro de la aceleración del suelo en un sitio durante un evento sísmico en función del tiempo.
<b>Amenaza sísmica</b>	Parámetro que cuantifica la probabilidad de ocurrencia de futuros eventos sísmicos y las acciones sísmicas asociadas. Se expresa en términos de probabilidad de excedencia de determinado valor, por ejemplo la intensidad o aceleración, en un número de años dado.
<b>Atenuación sísmica</b>	Disminución de la amplitud de las ondas sísmicas por la transmisión a través del interior y la superficie de la tierra.
<b>ASCE</b>	American Society of Civil Engineers (Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles).

<b>AI</b>	Intensidad de Arias.
<b>CEPREDENAC</b>	Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central.
<b>CMS</b>	<i>Conditional Median Spectrum</i> (Mediana del espectro condicional).
<b>Corteza</b>	Parte exterior del globo rígida que está constituida por rocas cristalinas de composición basáltica y granítica con sus sedimentos asociados.
<b>CS</b>	<i>Conditional Spectrum</i> (Espectro condicional).
<b>Curva de atenuación</b>	Curva que relaciona la severidad del movimiento del terreno expresada en parámetros como aceleración, velocidad y desplazamiento.
<b>Epicentro</b>	Punto sobre la superficie terrestre situado directamente sobre el foco o hipocentro del sismo. La proyección vertical del foco sobre la superficie terrestre.
<b>Evento sísmico o sismo</b>	Evento físico causado por la liberación repentina de energía debido a una dislocación o desplazamiento en la corteza terrestre.

<b>Falla o falla geológica</b>	Zona de fractura en la corteza terrestre a lo largo de la cual dos bloques adyacentes sufren dislocaciones o desplazamientos relativos recurrentemente.
<b>Falla activa</b>	Falla geológica en la cual se han producido desplazamientos en la última etapa geológica del Cuaternario.
<b>Falla inactiva</b>	Falla geológica en la cual no se han detectado desplazamientos durante los últimos 10 000 a 40 000 años.
<b>Frecuencia de onda</b>	Número de veces que se repite un proceso cíclico por unidad de tiempo.
<b>Fuente sísmica</b>	Región tectónica o segmento de una falla donde en forma recurrente se generan sismos a causa de la ruptura de la roca.
<b>Fuente sismogénica</b>	Ver fuente sísmica
<b>Hipocentro</b>	Punto de la falla donde se origina la ruptura y en el que se genera el primer pulso de las ondas longitudinales P.
<b>IBC</b>	International Building Code. Documento utilizado actualmente como norma de diseño estructural y construcción en los Estados Unidos de América.

<b>Intensidad</b>	Medida cualitativa o cuantitativa de la severidad de la sacudida del terreno producida por un sismo en determinado lugar.
<b>FEMA</b>	Federal Emergency Management Agency (Agencia Federal de Manejo de Emergencias).
<b>Frecuencia</b>	Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.
<b>Licuefacción</b>	Transformación de suelos granulares saturados y poco consolidados, por ejemplo arena, en una masa con propiedades de un líquido o fluido debido a la vibración del terreno causada por un sismo.
<b>Magnitud</b>	Medida cuantitativa del tamaño de un sismo en su fuente, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura en la falla.
<b>Mercalli modificada</b>	Escala de intensidad que abarca de grado I a grado XII, que sirve para designar la intensidad de un sismo en un sitio dado.
<b>NEHRP</b>	Programa Nacional para la Reducción de Amenaza Sísmica.
<b>NOAA</b>	Agencia Nacional Oceánica y Atmosférica.

<b>NORAD</b>	Norwegian Agency for Development Cooperation.
<b>NSE</b>	Normas de Seguridad Estructural de la AGIES.
<b>Ondas sísmicas</b>	Vibración de la roca o partículas de terreno causada por un sismo.
<b>Período</b>	Intervalo de tiempo necesario para completar un ciclo.
<b>PGA</b>	<i>Peak Ground Acceleration</i> (aceleración pico del suelo).
<b>PGV</b>	<i>Peak Ground Velocity</i> (velocidad pico del suelo).
<b>PGD</b>	<i>Peak Ground Displacement</i> (desplazamiento pico del suelo).
<b>Placa tectónica</b>	Segmento relativamente grande y rígido de la litosfera que incluye la corteza rígida y la parte superior del manto.
<b>Probabilidad excedencia</b>	Probabilidad de determinado valor de aceleración o intensidad del movimiento del terreno, o que ciertos efectos o consecuencias económicas producidas por un sismo, sean excedidas durante un período de exposición dado.

<b>Probabilidad de ocurrencia</b>	Probabilidad de que un evento ocurra durante un intervalo de tiempo dado.
<b>Región asísmica</b>	Se aplica para designar zonas exentas de actividad sísmica.
<b>Riesgo sísmico</b>	Probabilidad de que en determinado sitio y durante un tiempo de exposición dado, las consecuencias económicas y sociales producidas por un evento sísmico excedan valores prefijados.
<b>Rigidez</b>	Propiedad física de un material; está dada por la razón entre un determinado esfuerzo (normal, o de corte) y el valor de la correspondiente deformación unitaria (axial o ángulo de distorsión) que se produce
<b>SI</b>	<i>Spectral Intensity</i> (intensidad de espectro).
<b>Sismicidad</b>	Parámetro que describe la actividad sísmica en un área geográfica dada, definido por la ocurrencia de sismos en tiempo y espacio.
<b>Sismo</b>	Ver evento sísmico, temblor y terremoto.
<b>Sismógrafo</b>	Instrumento para registrar el movimiento de la superficie de la Tierra producido por un sismo. Usualmente el registro es continuo.

<b>Sismograma</b>	Registro obtenido de un sismógrafo, que es una representación amplificada del movimiento del terreno en función del tiempo.
<b>Sismología</b>	Rama de las ciencias físicas que estudia los sismos, las fuentes sísmicas y la propagación de las ondas sísmicas a través del medio sólido o líquido de la tierra.
<b>Sismómetro</b>	Parte del sismógrafo; un sensor, generalmente un péndulo suspendido, que capta la señal del movimiento y la transmite por medios ópticos o impulsos eléctricos para ser amplificada y registrada.
<b>Sismorresistente</b>	Se dice de una edificación diseñada para resistir las sollicitaciones sísmicas. El término no implica que la edificación sea invulnerable a los sismos, sino solo resistente a estos.
<b>Subducción</b>	Ver zona de subducción.
<b>Temblor</b>	Evento sísmico percibido en la superficie como una vibración o sacudida del terreno, sin causar daño o destrucción.
<b>Terremoto</b>	Evento sísmico destructivo que causa daños severos y víctimas.

<b>UHS</b>	<i>Uniform Hazard Spectrum</i> (espectro sísmico de amenaza uniforme).
<b>USGS</b>	United States Geological Survey (Servicio Geológico Estadounidense).
<b>Vulnerabilidad</b>	Grado de daño o pérdida a que está potencialmente sujeta una edificación o un elemento de la misma a causa de un sismo de una magnitud e intensidad dada.
<b>WCEE</b>	World Conference on Earthquake Engineering.
<b>Zona de subducción</b>	Segmento de placa oceánica que desciende y se desliza bajo una placa continental u otra placa oceánica a lo largo de una fosa submarina; en la zona de contacto entre placas se sitúan los focos de sismos que definen una zona sísmica llamada Wadati-Benioff o zona de Benioff.
<b>Zona sísmica</b>	Para efectos de diseño y construcción, área geográfica delimitada dentro de una región sísmica, en la cual la amenaza y el riesgo sísmico son similares y los requerimientos para el diseño sismorresistente son iguales.

**Zonificación sísmica** Para efectos de diseño estructural y construcción. Proceso de determinación de la amenaza sísmica en varios sitios con el propósito de delimitar zonas sujetas a un grado similar de amenaza.



## RESUMEN

El trabajo muestra la metodología para poder seleccionar registros de acelerogramas sísmicos, para adecuarlos a la amenaza sísmica del lugar y poder usar el registro modificado para realizar el análisis de estructuras por el método de análisis dinámico paso a paso (*Response History*).

Los primeros capítulos se enfocan en describir los factores que afectan los acelerogramas, explicando de manera general los parámetros más importantes que sirven principalmente para evaluar los registros en el proceso de selección y adecuación. En esta parte se incluye una sección general acerca de atenuaciones sísmicas.

La segunda parte se refiere únicamente a la amenaza sísmica en Guatemala. En ella se describen las zonas sísmicas en todo el territorio nacional y se explica acerca de las diferentes amenazas sísmicas que existen en la república y de la ciudad de Guatemala.

En la parte final del estudio se explica todo el proceso general de selección y adecuación de acelerogramas. El último capítulo contiene los ejemplos de la adecuación de 9 acelerogramas seleccionados y adecuados al PGA del RESIS II y se evalúan esos espectros de respuesta promedios con los espectros genéricos de diseño del AGIES NSE2-2010.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Seleccionar y adecuar al PGA un conjunto de acelerogramas que sea aplicable al valle de Guatemala.

### **Específicos**

1. Explicar los parámetros sísmicos más importantes que influyen en la selección y adecuación de acelerogramas.
2. Examinar las características sísmicas más importantes que se presentan en el valle de la ciudad de Guatemala.
3. Presentar métodos convenientes de selección y adecuación para poder modificar acelerogramas existentes de la misma zona o de otras regiones, para utilizarlos en análisis estructurales en el sitio de interés.
4. Presentar ejemplos del proceso de selección y adecuación.



## INTRODUCCIÓN

Existen varios métodos (y variaciones) para realizar análisis de estructuras. Entre ellos están:

- Análisis estático equivalente con el período empírico (método A).
- Análisis estático equivalente modificado (método B)
- Análisis modal dinámico con espectro genérico de norma.
- Análisis modal dinámico con espectro específico de sitio.
- Análisis estático no lineal con cargas incrementales (*Pushover*)
- Análisis dinámico paso a paso con acelerogramas lineal y no lineal (*Response History*).

Los primeros cuatro análisis mencionados se basan en espectros sísmicos para representar la carga sísmica y se usan actualmente en Guatemala en coordinación con los estudios de amenaza sísmica existentes para el país. Hace décadas se utilizaba simplemente lo que prescribía el UBC para zona de sismicidad 4 (sin haber tenido certeza de que fueran o no adecuados o congruentes con las amenaza sísmica que ofrece el marco Sismogénico de la región).

Esta investigación aporta datos y enumera varias metodologías para poder obtener acelerogramas y espectros más específicos para el sitio de interés y que son indispensables para realizar el análisis dinámico paso a paso. Los acelerogramas son los que representan la carga sísmica a la que está sometida una estructura para evaluar los esfuerzos máximos que se pueden desarrollar en ella.

Sin embargo, la efectividad del análisis no solo depende del modelo matemático que se desarrolle de la estructura, depende de la correcta representación de la carga sísmica que se esté suponiendo en el sitio de interés. Los registros acelerográficos existentes son instancias particulares pasadas que no se repetirán exactamente igual en el futuro. Es por ello que los acelerogramas existentes que están disponibles (ya sean del mismo lugar o de otro sitio) deben ser seleccionados y adecuados al sitio de interés antes de ser utilizados en un análisis.

Para tener acelerogramas que sean aplicables a un sitio, la amenaza sísmica debe estar previamente cuantificada y establecida para poder representarla en el análisis. En tener una buena estimación de la amenaza sísmica reside en gran medida la confiabilidad de los resultados.

En Guatemala se iniciaron estudios de amenaza sísmica en 1977 después del terremoto de 1976 el cual devastó gran parte del territorio. Estos estudios fueron realizados por un equipo de investigadores de la Universidad Norteamericana de Stanford. Otros investigadores vinieron después incluyendo la investigación de Monzón-Despang en 1984 y varios otros estudios hasta llegar al proyecto de RESIS II (Realizado por Benito, et al en 2009 e incorporado en las Normas de Seguridad Estructural, en este caso la AGIES NSE2-2010).

Uno de los puntos que aún no han sido establecidos de manera consensuada es el límite hasta el cuál es posible adecuar un acelerograma. Aunque ninguna norma establece un número específico, investigadores consensan que mientras más cercano a la unidad sea el factor de escala del registro a adecuar con respecto al parámetro objetivo, se obtienen resultados más apegados a la amenaza sísmica.

Este trabajo trata de proporcionar información acerca de lo que se refiere a estos temas necesarios para generar acelerogramas que puedan utilizarse en el análisis estructural, representen de manera efectiva la amenaza sísmica del sitio y pueda utilizarse para evaluar el desempeño de estructuras existentes o diseñar nuevas estructuras.

Se hace un particular general en el valle de Guatemala debido a la vulnerabilidad que hay en esa zona. Varios factores concurren como son la concentración de población en el área metropolitana, su topografía y la alta amenaza sísmica que hay, no solamente por la zona sísmica de Motagua al norte, zona de subducción al sur, sino que también por las fallas locales que pueden generar eventos cercanos y superficiales muy peligrosos.

La metodología de esta investigación está dividida en tres partes. La primera se basa en estudiar y conocer los acelerogramas, sus parámetros propios y los parámetros externos que los afectan. Los factores que afectan los acelerogramas son importantes debido a que con base en estos se debe seleccionar y adecuar los acelerogramas para el análisis. Es necesario tener claro qué es cada uno de estos factores y que efecto tienen en el análisis de las estructuras.

Esta primera parte corresponde principalmente al marco teórico de la ingeniería sísmica, por lo que no se consideran como contribución intelectual del autor de esta investigación por ser temas establecidos (de igual forma el capítulo 6 ya que son recopilaciones monográficas de varios autores especializados en el tema). Si el lector tiene conocimiento de ingeniería sísmica, podría omitir los capítulos 2, 3, 4.

La segunda parte desarrollada en el capítulo 5 define las diferentes zonas en las cuales se ha dividido a al territorio nacional en función del conjunto de fuentes sísmicas, incluyendo la zona de subducción, la zona de límite entre la placa norteamericana y la del Caribe, así como las numerosas fallas intraplaca dispersas en el territorio.

En el texto también se mencionan estudios de amenaza sísmica realizados anteriormente que los investigadores pueden consultar para tomar idea de la amenaza sísmica a la que está sometido el valle de Guatemala en particular y el país en general.

La importancia de esta segunda parte radica en que se direcciona a investigaciones de las cuales se pueden inferir cargas sísmicas que pueden aplicarse a una estructura en el valle de Guatemala. Algunos de estos estudios tienen información para poder determinar la carga sísmica en cualquier parte del territorio nacional. Si el lector conoce sobre la amenaza sísmica del país puede omitir este capítulo y enfocarse en los últimos 2.

La última parte, capítulo 6 describe el proceso general de selección y adecuación de acelerogramas de forma descriptiva con base en recomendaciones de varios investigadores que han trabajado en el tema incluyendo Acevedo (2003), NEHRP (2011). El capítulo 7 es la parte práctica investigativa del proceso de selección y adecuación y está enfocado en la amenaza sísmica de la ciudad de Guatemala.

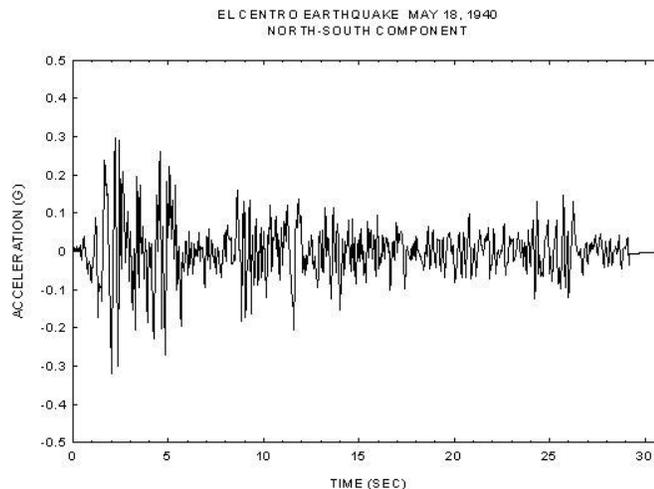
En la parte final se discute acerca de los espectros de respuesta generados por el proceso de selección y adecuación comparándolos, con los espectros de diseño genéricos incluidos en la Norma NSE2-2010 de AGIES y los espectros sísmicos del estudio RESIS II de Benito (2009).

# 1. EL ACELEROGRAMA

## 1.1. Descripción general

El acelerograma es un registro de aceleración en función del tiempo generado por un instrumento llamado acelerógrafo que registra los movimientos fuertes del suelo. Los acelerogramas dan una descripción del movimiento del suelo de forma cuantitativa, con lo cual es posible realizar diferentes tipos de análisis estructurales.

Figura 1. Un acelerograma típico



Fuente: <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>.

Consulta: 9 de septiembre de 2012.

Mucho antes de la actual época del acelerograma, la información de los movimientos fuertes del suelo era reportada de forma cualitativa, como se

puede observar en muchos de los textos de la historia. Los primeros acelerógrafos se desarrollaron en 1932 en California. Registraron los movimientos del suelo en el terremoto de Long Beach 1933.

Existen 2 tipos de acelerógrafos, los de primera generación que son acelerógrafos análogos que registra el movimiento del instrumento en papel o en película, estos acelerogramas no registran los datos de manera continua y son activados cuando el movimiento sobrepasa cierto umbral de fuerza, por lo que desafortunadamente no registra los movimientos iniciales, omitiendo información relativamente importante.

La segunda generación corresponde a los acelerógrafos que registran la información de manera digital con un transductor de balance de fuerza. La información puede ser registrada en medios como discos sólidos o magnéticos.

La ventaja de estos registros en comparación con los registros de los acelerógrafos de primera generación, es que monitorean la información de manera constante; pueden guardar mucha información debido a las grandes capacidades que existen en el almacenamiento magnético en estos días. Al efectuar un monitoreo constante de actividad se preservan las primeras ondas de un sismo fuerte.

Los acelerógrafos generalmente registran tres componentes perpendiculares (dos componentes horizontales y una componente vertical), que es como usualmente se representan los movimientos del suelo y es como usualmente se trabaja en la práctica de la ingeniería.

Existen 3 tipos de acelerogramas: los acelerogramas reales, los artificiales y sintéticos. Los acelerogramas reales son registros verdaderos producidos por los sismos y registrados por los acelerógrafos o sismómetros.

Los acelerogramas artificiales son registros que han sido generados para igualar un espectro de respuesta específico; una desventaja de este tipo de acelerogramas es que no tienen la apariencia de un registro real debido a que para que el acelerograma coincida con el espectro de respuesta se modifica el contenido de frecuencia cambiando la forma y la amplitud del espectro de respuesta del acelerograma original.

Los acelerogramas sintéticos son acelerogramas generados en base a registros sismográficos captados a distancia y modificados por métodos determinísticos o estocásticos. Estos han sido de utilidad cuando se necesita por ejemplo, determinar el movimiento fuerte en zonas cercanas a la fuente. Sin embargo, no son una fuente que pueda asegurar que realmente represente el escenario sísmico de manera precisa, por lo que queda siempre alguna incertidumbre sobre la confiabilidad de los resultados.

Un ejemplo de la utilidad de este recurso son los acelerogramas sintéticos del sismo del 4 de febrero de 1976 en Guatemala (A. Arce) ya que no hubo ningún registro en el campo cercano. A falta de un registro real este es un recurso de gran valor para la ingeniería.

## **1.2. Parámetros de los acelerogramas**

Los parámetros de mayor interés obtenidos de los acelerogramas son: el contenido de frecuencia de vibración, la amplitud y la duración. En ellos se basa la metodología para seleccionar y adecuar espectros sísmicos de sitio.

### **1.2.1. Duración**

Está relacionada con el tiempo requerido para que la ruptura que origina un sismo se propague por la superficie de falla. En otras palabras, la duración del movimiento está relacionada con el tiempo requerido para liberar la energía de deformación a lo largo de la parte de la falla que se disloca. Como resultado, la duración del movimiento fuerte está relacionada con la magnitud del sismo. Hanks y McGuire en 1981 recabaron suficiente soporte teórico para relacionar la duración con el momento sísmico, demostrando que la duración es proporcional a la raíz cúbica del momento sísmico.

El acelerograma contiene información desde el inicio del sismo hasta el nivel de ruido normal del suelo (para fines de diseño estructural solo es necesario el registro del movimiento fuerte).

Existen diferentes enfoques acerca de la duración, Bolt 1969 define la duración como el tiempo entre la primera y última excedencia de un umbral de aceleración (usualmente 0,05 g), otro enfoque es el de Trifunac y Brady (1975) que está basado en el intervalo en donde se registra el 5 y 95 por ciento de la energía (esta se puede observar en la grafica de la Intensidad de Arias). Boore (1983) la define como la suma de los intervalos de tiempo en donde las aceleraciones exceden un umbral. La más usada es la duración de Bolt.

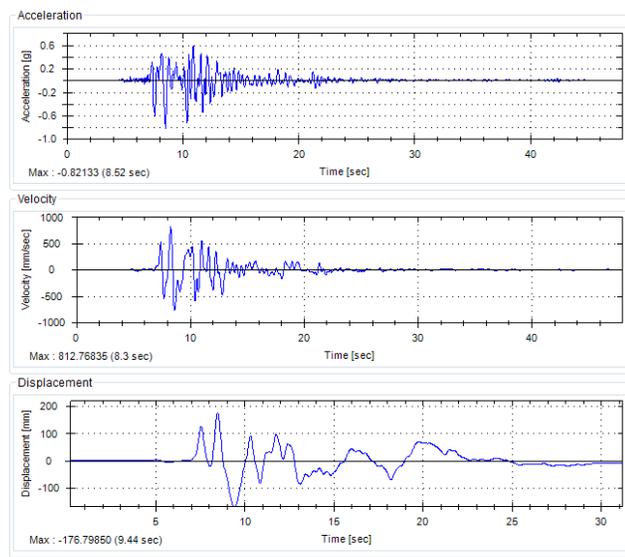
### **1.2.2. Parámetros de amplitud de movimiento del suelo**

Puede ser aceleración, velocidad o desplazamiento. Una de esas cantidades es registrada directamente; las demás son resultado del proceso de la integración o derivación del matemática de la señal registrada.

### 1.2.2.1. Aceleración pico del suelo (PGA)

La medida más común utilizada para caracterizar un movimiento particular del suelo es la aceleración horizontal. La aceleración pico del suelo es simplemente el valor absoluto más alto de de las aceleraciones horizontales del acelerograma. Si se toma la suma vectorial de las dos direcciones ortogonales (la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados) se puede obtener la aceleración pico horizontal máxima representativa del sismo.

Figura 2. Parámetros de amplitud



Fuente: elaboración propia, con el programa PRISM.

La aceleración pico vertical recibe menos atención que la horizontal, y generalmente se considera como  $2/3$  de la aceleración horizontal. Esta relación varía dependiendo del evento sísmico. Es mayor a distancias cercanas a la falla. Para estructuras de gran claro o voladizos grandes, el parámetro es muy importante.

Los sismos con aceleraciones pico altas, son usualmente más destructivos que los sismos con aceleraciones pico bajas aunque esta no es una regla general. Ha habido casos donde el valor de aceleración pico fue alto y no se generó tanto daño. Aunque la aceleración pico es un parámetro útil, no proporciona información acerca del contenido de frecuencia o de la duración del registro.

Además es una instancia sísmica no ponderada estadísticamente. No obstante, es fácil y objetiva de determinar y se le ha impuesto como el parámetro representativo de la amplitud de vibración.

#### **1.2.2.2. Velocidad pico (PGV)**

La velocidad pico no se registra directamente sino que se obtiene de la integración de las ordenadas del acelerograma y es un parámetro importante para la ingeniería sísmica.

Es la máxima velocidad que se presenta en el evento sísmico. Suele considerarse que la velocidad pico caracteriza la amplitud del movimiento del suelo de una manera más precisa que la aceleración horizontal.

Puede proveer mejor información acerca del potencial destructivo que la aceleración. Boomer en su libro *The Prediction and Use of Peak Ground Velocity* explica el uso de este parámetro para estimar macro-intensidad sísmica y daño estructural. No obstante, por razones históricas se han recolectado muchas más estadísticas de PGA que de PGV. El PGA es un parámetro con mayor difusión.

### **1.2.2.3. Desplazamiento máximo**

Este parámetro no se registra directamente, se obtiene de la doble integración del acelerograma. Corresponde al desplazamiento máximo generado en el evento sísmico.

Generalmente asociado con componentes de frecuencia baja, son difíciles de determinar de una manera precisa debido a los errores en la señal de filtrado e integración de los acelerogramas debido al ruido de período largo

### **1.2.2.4. Aceleración media cuadrática**

Se utiliza para estimar el daño potencial de un evento sísmico. Esta aceleración corresponde a la integración de la aceleración del suelo elevada al cuadrado. La ecuación está definida por la expresión:

$$a_{\text{rms}} = \frac{1}{(t_2 - t_1)^2} \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt$$

Donde  $(t_2 - t_1)$  corresponde a la duración significativa y  $a$  corresponde a la aceleración del suelo.

### **1.2.2.5. Medias cuadráticas**

Aunque históricamente se han utilizado menos los valores estadísticamente ponderados se consideran más representativos para caracterizar las amplitudes.

La aceleración media cuadrática (RMS – Root Mean Square) es un parámetro estadísticamente sólido. Al obtener la media ponderada con la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de la amplitud de los pulsos, la estadística favorece los pulsos altos pero impide que uno solo se imponga como representativo del evento sísmico.

### **1.2.3. Espectros sísmicos del contenido de frecuencia del sismo**

Describe cómo la amplitud del movimiento del suelo se distribuye en diferentes frecuencias de la vibración. Las edificaciones, puentes, taludes y depósitos de suelo son sensibles a la frecuencia de vibración. Los sismos producen ondas complicadas con componentes que tienen un gran rango de frecuencia. La caracterización del movimiento no puede ser completa sin tomar en cuenta el contenido de frecuencia. El contenido de frecuencia de un sismo en particular influye en el daño que se produce según el tipo de edificación.

#### **1.2.3.1. Espectro de Fourier**

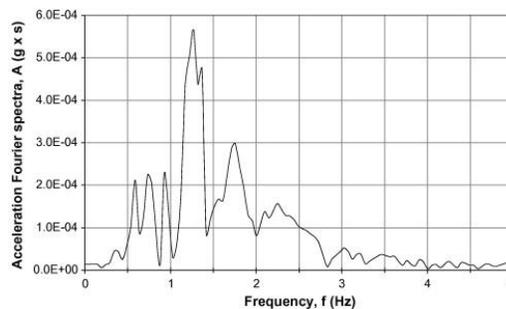
Es un espectro de frecuencias en donde se distribuyen las amplitudes para cada frecuencia. Usando las series de Fourier, una función periódica, que se repite en un intervalo de tiempo constante puede ser escrita de la forma:

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\omega_n t + \phi_n)$$

En donde  $c_n$  y  $\phi_n$  corresponden a la amplitud y el ángulo de fase de la  $n$ -ésima serie armónica de Fourier.

El espectro de amplitud de Fourier del movimiento del suelo muestra como la amplitud del movimiento está distribuida con respecto a la frecuencia. Un espectro estrecho implica que el movimiento tiene una frecuencia dominante, es decir, que el registro tiene una figura casi sinusoidal, si el espectro es ancho, el registro tiene variedad de frecuencias.

Figura 3. **Espectro de Fourier**



Fuente: <http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0266352X07000456-gr27.jpg>.

Consulta: 15 de agosto de 2012.

### 1.2.3.2. **Espectro de respuesta sísmico**

Es un gráfico de la respuesta máxima de un oscilador simple con frecuencia natural de vibración  $f$  sujeta a una excitación vibratoria dada. El gráfico se obtiene al variar la frecuencia del oscilador y graficar la respuesta máxima.

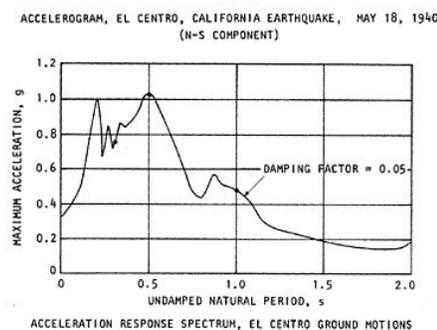
Este tipo de espectro es probablemente el más usado en la práctica de ingeniería sísmica. El espectro de respuesta describe la respuesta máxima de un sistema estructural simple de un grado de libertad para una entrada particular en función del período natural de frecuencia y la amortiguación inherente del sistema estructural.

El espectro de respuesta lineal elástico asume un comportamiento estructural lineal de fuerza desplazamiento. Pocas estructuras pueden responder elásticamente ante un movimiento fuerte, y el espectro lineal-elástico es una idealización. En la práctica, muchos de los diseños estructurales para cargas laterales incorporan empíricamente un factor simple para tomar en cuenta comportamiento postelástico no lineal.

Con base en un espectro lineal es posible crear una serie de espectros suponiendo diferentes factores de ductilidad para tomar en cuenta las respuestas no lineales de las estructuras.

En la gráfica del espectro de respuesta se grafican las respuestas en función del período natural de vibración, aunque también es común utilizar la frecuencia natural de vibración de la estructura.

Figura 4. **Un espectro de respuesta lineal elástico del sismo El Centro 1940**



Fuente: SEED e IDRIS. *Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes*. p. 24.

El espectro muestra las características del acelerograma de manera indirecta debido a que el acelerograma ha sido procesado por el sistema de un

grado de libertad. La amplitud y el contenido de frecuencia del movimiento influyen en el valor espectral, a pesar de que el espectro únicamente representa el valor máximo de

### 1.2.3.3. Intensidad de Arias

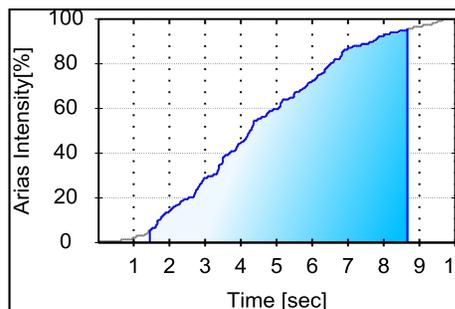
Usado para medir el potencial de daño, la intensidad de Arias muestra la energía que libera el movimiento; la tasa a la cual es impartida a la estructura.

La tasa de energía en un intervalo  $t_1$  a  $t_2$  como muestra la figura 5, está relacionada a otro parámetro llamado raíz cuadrada media de las suma de cuadrados de la aceleración (RMS o ARMS). Se define como:

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt$$

Donde  $a(t)$  es la aceleración del registro en el instante  $t$  se integra sobre la duración total del registro y  $t_f$  corresponde al tiempo final del evento.

Figura 5. Intensidad de Arias con duración 5%-95%



Fuente: elaboración propia, con el programa PRISM

#### 1.2.3.4. Intensidad espectral

Otro parámetro importante es el número equivalente de ciclos de esfuerzo uniforme, la cual muchas veces sustituye la duración, este parámetro cuenta el número de ciclos de un acelerograma con un factor de peso aplicado. Se usa en licuefacción de suelos en donde se requiere convertir un registro irregular de esfuerzos de corte a una serie equivalente de ciclos de esfuerzo.

La intensidad espectral es una medida de la intensidad de movimiento en un lugar determinado, se define como:

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} SV(T, \xi) dT$$

Donde  $SV$  corresponde al espectro de velocidad y  $\xi$  es el coeficiente de amortiguamiento.

## **2. FACTORES QUE AFECTAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ACELEROGRAMAS**

Las características del movimiento del suelo en cualquier sitio, se ven influenciadas por un gran número de factores que incluyen:

- Fuente de la vibración.
- Mecanismo de ruptura de falla que originó el sismo.
- Distancia del sitio a la fuente de la liberación de energía.
- Características geológicas de las rocas en todo el medio de transmisión de las ondas hacia el sitio analizado.
- Condiciones locales del suelo en el sitio analizado.

La influencia de estos factores está mejor entendida para unos factores que para otros. De hecho, la influencia detallada de algunos de estos factores como el mecanismo de fuente del sismo y la geología de la ruta de transmisión puede que nunca se entienda a cabalidad si no solamente en un sentido muy general.

De forma simple, la intensidad de vibración se atenúa con la distancia desde la fuente, aunque hay excepciones debidas a otros factores.

### **2.1. Fuente de vibración**

Se refiere a los factores en la fuente que generan eventos sísmicos. La fuente de vibración es muy importante, debido a que desde aquí se generan las ondas sísmicas que luego son transmitidas por el suelo.

### 2.1.1. Magnitud del sismo

Es uno de los factores principales que determina el acelerograma. La medida de la magnitud está principalmente basada en registros instrumentales. La magnitud es una expresión cuantitativa de la cantidad de energía liberada en un evento sísmico.

Existen diferentes mediciones de magnitud. Por ejemplo la Magnitud Local de Richter ML (1935) se basa en lecturas de un sismómetro Wood-Anderson para definir la magnitud de sismos locales superficiales en el sur de California, es el nombre de magnitud más conocido pero no resulta hoy en día ser la definición más apropiada para describir el tamaño de un sismo. Además se encuentra en desuso porque ya no hay aparatos Wood-Anderson ni interesan solo sismos locales.

Otras expresiones de la magnitud son las siguientes: la Magnitud de Onda de Superficie que está basada en la amplitud de las ondas de Rayleigh con un período aproximado de 20 segundos, la magnitud se determina bajo la siguiente ecuación:

$$M_s = \log A + 1,66 \log \Delta + 2,0$$

Donde A es el desplazamiento máximo en micrómetros y  $\Delta$  es la distancia epicentral del sismómetro medida en grados. Debido a las variables de las que depende la magnitud, esta puede ser medida con cualquier sismógrafo. Esta medida de magnitud describe el tamaño de sismos superficiales distantes.

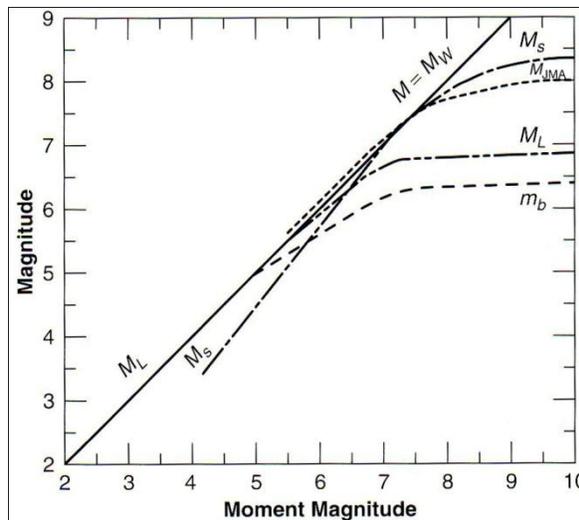
Para sismos profundos, se usa la magnitud de onda de cuerpo (Gutenberg 1945) basada en los primeros ciclos de ondas p que no son influenciadas por la profundidad focal esta magnitud está definida como:

$$M_b = \log A - \log T + 0,01\Delta + 5,9$$

Las magnitudes mencionadas corresponden a cantidades empíricas en mediciones instrumentales. Cuando la liberación de energía aumenta, los registros del movimiento no se incrementan en la misma tasa.

Para sismos fuertes las mediciones resultan menos sensibles al tamaño del sismo que para sismos pequeños, a esto se le llama saturación, las magnitudes Richter y de cuerpo se saturan a magnitudes de 6 a 7 y las de superficie a una magnitud  $M_s$  de 8.

Figura 6. **Comparación de magnitudes sísmicas**



Fuente: KRAMER, Steven L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. p. 49.

Para subsanar el problema de saturación, se plantea utilizar, la magnitud del momento sísmico. Es una medida que depende solamente de los factores del evento sísmico en la zona de ruptura de la falla. La magnitud del momento sísmico, se calcula con la siguiente expresión:

$$M_w = \frac{\log M_0}{1,5} - 10,7$$

Donde  $M_0$  es el momento sísmico, que está dado por:

$$M_0 = \mu A \bar{D}$$

Donde  $\mu$  es la rigidez de la roca,  $A$  es el área de ruptura y  $\bar{D}$  el desplazamiento entre las superficies de ruptura.

### **2.1.2. Falla geológica**

Se originan debido al desplazamiento relativo de dos porciones de corteza terrestre. Los desplazamientos tectónicos son continuos pero no se manifiestan continuamente.

Las 2 porciones en desplazamiento relativo quedan engarzadas a lo largo de zonas llamadas fallas geológicas, donde los desplazamientos relativos se manifiestan esporádicamente generando roturas súbitas recurrentes y espaciadas en el tiempo. Al ocurrir una rotura en el plano de falla, se generan vibraciones en el suelo debido a la energía de deformación acumulada que se libera súbitamente. Eso es un sismo.

Las fallas geológicas pueden tener desde pocos metros hasta cientos de kilómetros y pueden tener profundidades de muchos kilómetros. Pueden ser obvias o pueden pasar desapercibidas y pueden ser muy difíciles de detectar. Pueden ser fallas activas que acumulan energía de deformación o inactivas (que ya no tienen actividad o en remisión).

Algunas fallas no se observan en la superficie, y por lo tanto son más difíciles de detectar. Algunas veces los movimientos en las fallas pueden ser asísmicos, es decir que el movimiento relativo se manifiesta constantemente y no con roturas puntuales recurrentes. Otras fallas pueden tener un comportamiento combinado.

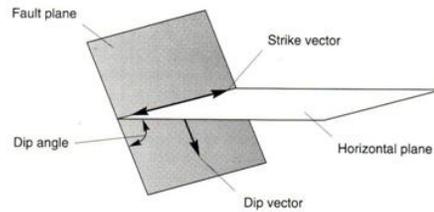
### **2.1.3. Geometría de las fallas**

Es necesario orientar una falla en el espacio. Generalmente las fallas son irregulares pero pueden describirse de una manera aproximada idealizando su geometría como planos simples. La orientación de un plano de falla se muestra en la figura 7.

La orientación de la falla esta descrita por el ángulo, vector de inclinación y el vector de golpe. El vector de golpe de la falla es la línea horizontal que interseque el plano de la falla y un plano horizontal, el azimut del ángulo de golpe se usa para describir la dirección de la falla con respecto al norte.

El ángulo de inclinación se usa para describir la pendiente de la falla (el ángulo entre el plano de falla y el plano horizontal, este ángulo puede llegar a 90 grados por fallas verticales o puede ser cercano a 0 como las fallas de dislocamiento horizontal).

Figura 7. **Vectores, planos y ángulos de las fallas**



Fuente: KRAMER, Steven L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. p. 34.

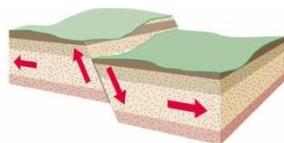
#### 2.1.4. **Desplazamientos de la fallas**

El desplazamiento de la falla, se puede dar en varias direcciones en un mismo punto. Generalmente predomina una componente del movimiento, y es por esa componente que se determina el desplazamiento.

##### 2.1.4.1. **Deslizamiento divergente**

Cuando los desplazamientos de la corteza son divergentes se generan fallas normales. La falla normal tiene un movimiento en el cual los bloques se desplazan de manera contraria debido a esfuerzos tensionantes produciendo así que uno de los bloques se desplace hacia abajo.

Figura 8. **Esfuerzos principales en la falla normal**



Fuente: <http://www.yourdictionary.com/images/main/A4fault.jpg>.

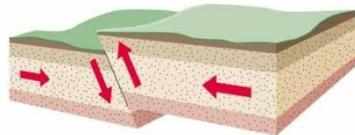
Consulta: 19 de noviembre 2012.

#### 2.1.4.2. Deslizamientos convergentes

Los desplazamientos convergentes de la corteza forman fallas inversas. Una falla inversa se define cuando el bloque cabalgante y el yacente se mueven en sentido opuesto produciendo contactos compresivos. En este tipo de deslizamiento uno de los bloques de la corteza tiende a montarse sobre el otro.

Los esfuerzos generados en la interacción son principalmente asociados a los de compresión y generan acortamientos de la corteza. Cuando el ángulo de inclinación es pequeño con valores tendiendo a cero se le llama falla de empuje.

Figura 9. **Esfuerzos principales en la falla inversa**



Fuente: <http://www.yourdictionary.com/images/main/A4fault.jpg>. Visitado

Consulta: 19 de noviembre 2012.

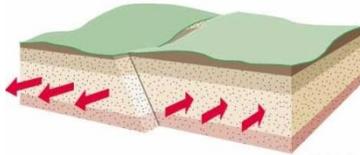
#### 2.1.4.3. Falla transcurrente

Es un tipo de falla en que los desplazamientos de la corteza son paralelos entre sí. Cuando el plano de falla es muy vertical, se pueden producir grandes desplazamientos.

Este tipo de fallas se definen por la dirección relativa en la cual se mueven.

Si un observador en un lado de la falla observa que el lado opuesto se mueve hacia la izquierda, la falla es transcurrente izquierda y viceversa para el caso de la falla transcurrente derecha. La falla del Motagua es un ejemplo de falla transcurrente izquierda; la falla de Jalpatagua tiene desplazamientos transcurrente derecho.

Figura 10. **Esfuerzos principales en una falla transcurrente**



Fuente: <http://www.yourdictionary.com/images/main/A4fault.jpg>.

Consulta: 19 de noviembre 2012.

## **2.2. Medio de transmisión**

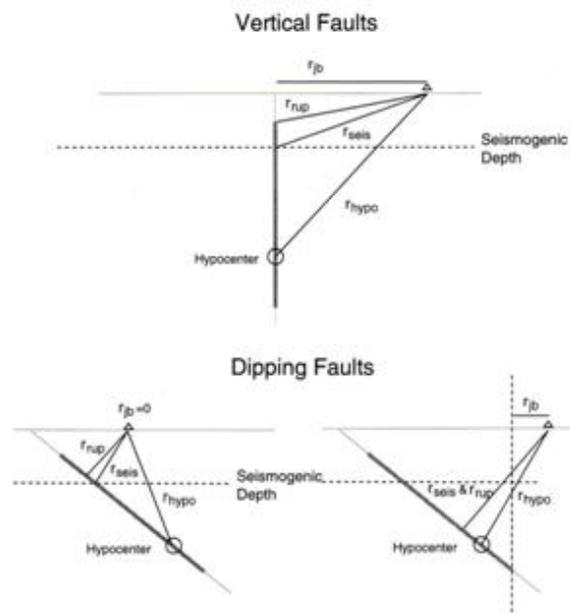
Se considera como camino entre la fuente del evento sísmico y el sitio analizado. A continuación se enumeran las variables que afectan las características de los acelerogramas a causa del medio de transmisión de las ondas sísmicas.

### **2.2.1. Distancia de la falla al sitio de interés**

La amplitud de vibración se ve reducida cuando aumenta la distancia entre el sitio y la fuente de liberación de energía. Ocasionalmente puede parecer amplificarse, pero eso sería debido a las condiciones de suelo del sitio y las condiciones topográficas.

Existe discrepancia en la forma de medir el parámetro distancia. Una de las medidas es la distancia hipocentral  $R_{hypo}$ , la cual se mide desde el sitio hasta el hipocentro, en este tipo de distancia se representa el evento como un punto y no toma en cuenta la longitud de la ruptura.

Figura 11. **Distancias del sitio a la zona de liberación de energía**



Fuente: *Seismological Research Letters* 1997. p. 10.

La figura 11 muestra las diferentes mediciones de distancia a la falla desde el sitio analizado. La distancia a la ruptura  $R_{rup}$  representa la distancia más cercana entre la falla en la capa sismogénica y el sitio. La distancia Joyner Boore mide la distancia del sitio a la proyección de la falla.

La distancia a la ruptura y la falla Joyner-Boore son las distancias más usadas, principalmente para ecuaciones de atenuación. La distancia al sitio es particularmente importante al analizar eventos en sitios cercanos a la falla.

### **2.2.2. Profundidad focal**

Es la profundidad a la cual se da la ruptura de la falla. Este valor es determinante para eventos sísmicos cercanos al sitio analizado, ya que producen sismos que pueden generar mucho daño a las poblaciones cercanas.

San Salvador 1986 es un claro ejemplo acerca del daño que pueden generar los sismos con poca profundidad focal. El terremoto tuvo una magnitud 5,5 a 5,4 kilómetros de profundidad y las aceleraciones en algunos lugares fueron del orden de 0,67 gravedades causando que estructuras medianas colapsaran. El parámetro pierde importancia cuando las fallas se encuentran a una distancia lejana del sitio investigado.

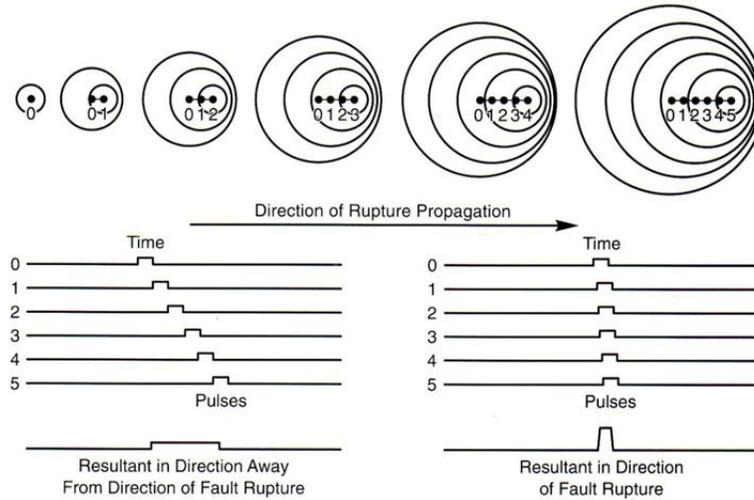
### **2.2.3. Direccionalidad**

Este tema es muy importante para el análisis de estructuras cercanas a la falla ya que existen variaciones en la formas de los acelerogramas, alargando o acortando las amplitudes y las duraciones de los eventos sísmicos.

La posición de la estructura con respecto a las lecturas de los acelerogramas deben ser lo más exactas para representar los efectos de pulso que pueden generarse en la falla y la respuesta de la estructura.

La figura 12 muestra la propagación de las ondas cuando se produce un evento sísmico. Como se puede observar, las ondas tienen dos componentes y dependiendo de las componentes, los pulsos pueden desarrollarse de diferentes maneras.

Figura 12. Pulsos derivados de la direccionalidad del sismo



Fuente: KRAMER, Steven L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. p. 40.

La dirección de la propagación de la ruptura tiene una componente frontal y una trasera. La direccionalidad frontal se da cuando la ruptura se propaga al sitio analizado al igual que la dirección de deslizamiento, esto se da cuando la velocidad de la ruptura es tan grande como la velocidad de corte cerca de la falla.

Pulsos largos se presentan orientados en dirección perpendicular a la falla, estos pulsos tienen generalmente amplitudes largas en estructuras con períodos medios a largos, y el movimiento generalmente es de corta duración.

La direccionalidad trasera ocurre cerca de la falla y cuando la falla se propaga lejos del sitio, este tipo de direccionalidad tiene particularidades como amplitudes pequeñas y duraciones largas.

### **2.3. Estructura de la corteza**

Parte de la energía en un evento sísmico se dispersa a través de las ondas sísmicas que se distribuyen por toda la corteza. Estas viajan desde la fuente del sismo y son absorbidas por los materiales en los cuales viajan. Este es uno de los factores que incide en que la amplitud esté estrechamente relacionada con la distancia.

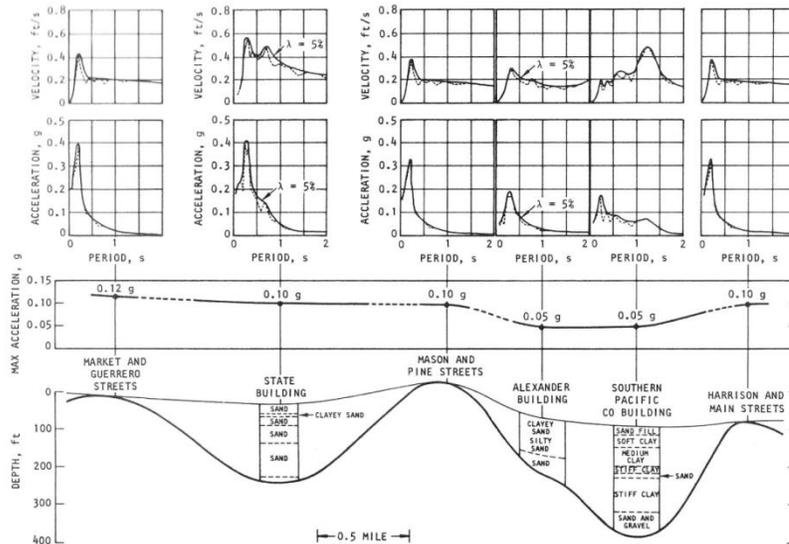
### **2.4. Condiciones de sitio**

Se ha observado que la intensidad del movimiento y el daño asociado a las estructuras están frecuentemente asociados a las condiciones locales del sitio. MacMurdo en 1984 explica que las estructuras situadas en roca no son afectadas tanto por esta condición como aquellas estructuras en las cuales los cimientos se encuentran descansando sobre depósitos de suelo.

Se ha establecido la variabilidad del movimiento fuerte del suelo en una misma área general. La figura que se muestra a continuación corresponde a perfiles de suelo con las características del sismo de San Francisco en 1957. Puede observarse las variaciones que ocurren en características como la aceleración y los espectros de respuesta dependiendo de los estratos de suelo en el área.

La investigación más contundente acerca de la relación del sitio con el tipo de suelo y sus efectos en las características del movimiento es la realizada a partir del sismo de Caracas en 1967. La magnitud del suelo fue de apenas 6,4 a una distancia de 56 kilómetros, pero la intensidad del sismo fue grande dejando 266 muertos y daños graves a estructuras nuevas.

Figura 13. Valores sísmicos en el terremoto de San Francisco 1957



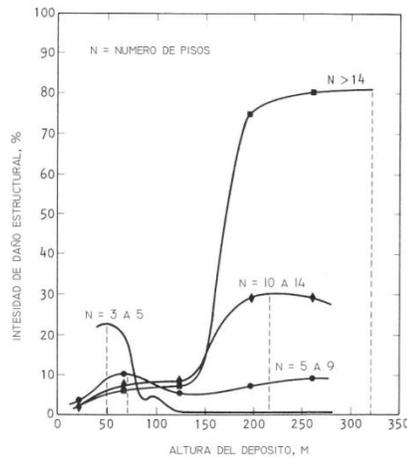
Fuente: SEED e IDRIS, *Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes*. p. 16.

Los valores de los suelos deben ser investigados para realizar diferentes estudios que involucren amenaza sísmica. En Guatemala si bien existen estudios puntuales de suelo por parte del sector privado, no existe información regional de estudios específicos por parte del gobierno, por lo que generalmente, los factores de amplificación para predecir las intensidades de los movimientos del suelo superficiales en campo libre que dicta el AGIES están basadas en el ASCE 7-10 y el estudio de aguas subterráneas del INSIVUMEH de finales del años 70.

La topografía en el sitio también incide en la respuesta de las estructuras. Esta condición no está investigada hasta ahora por las agencias del estado y existe poca información en las universidades sobre este tema. Es de especial

necesidad para el territorio debido a las pendientes y grandes taludes que existen en el territorio.

Figura 14. Daño a edificios por altura del suelo San Francisco 1957



Fuente: Adaptado de Seed e Idriss. *Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes*. p.18.

Tabla I. Clasificación sísmica del suelo

Clase de Sitio		Vps	Np	Nne	Sue
			(Todo el perfil)	(Sector no cohesivo)	(Sector cohesivo)
AB	Roca	>750m/s	No aplica	No aplica	No aplica
C	Suelo denso o roca suave	360 m/s	≥ 30	≥ 30	>200 kPa
D	Suelo Suave	360 a 180 m/s	30 a 5	30 a 5	200 a 50 kPa
E	Suelo muy Suave	<180 m/s	≤ 5	≤ 5	≤ 5 kPa
		Cualquier perfil de suelo con un estrato de 3.0 m o mas con índice de plasticidad IP > 20; humedad W ≥ 40% y Suc < 25 kPa			
F	Suelo con problemas	Véase NSE 2.1 Capitulo 5			

Fuente: AGIES. Normas de Seguridad Estructural NSE2-2010. p. 21.

### 3. ATENUACIÓN

En el diseño de estructuras sismorresistentes, uno de los pasos principales es la estimación de la carga sísmica que debe resistir cualquier estructura. Entre los métodos para estimar la carga, las Relaciones de Atenuación expresan los parámetros del movimiento en términos cuantitativos máximos en una serie de parámetros independientes.

Con base en esto, el sismo en un punto se representa por medio de regresiones de datos que son totalmente empíricas debido a la naturaleza de los sismos. Las Relaciones utilizan básicamente los siguientes parámetros: la magnitud, la distancia a la falla y algunas otras variables como el tipo de suelo del sitio analizado y el mecanismo de falla.

#### 3.1. Ecuación general de atenuación

Las regresiones de la mayoría de atenuaciones, se desarrollan con base en la ecuación genérica que se muestra a continuación y son típicamente logarítmicas. La expresión genérica está dada por la siguiente expresión:

$$\ln(y) = \underbrace{c_1}_{1} + \underbrace{c_2 m + c_3 m^{c_4}}_{2} + \underbrace{C_5 \ln[r]}_{3} + \underbrace{c_6 \exp(c_7 m)}_{4} + \underbrace{C_8 r}_{5} + \underbrace{f(\text{falla}) + f(\text{sitio})}_{6} + \underbrace{c_9}_{\sigma_{\ln Y}}$$

Donde el primer valor pico del parámetro del movimiento, el segundo la magnitud del sismo, con lo cual se entiende que el valor del parámetro Y debe ser proporcional a la magnitud.

El tercer término hace referencia a la difusión de las ondas de esfuerzo que viajan desde la fuente del sismo hace que la amplitud de las ondas de cuerpo p y s decrezcan a razón de  $1/r$  y las de superficie (principalmente las Rayleigh) a un ritmo de  $1/\sqrt{r}$ .

El cuarto término representa el área de ruptura donde ocurre la falla, el cual se incrementa cuando la magnitud se incrementa.

Debido a esto, algunas de las ondas que produce el movimiento en un sitio llegan desde una distancia  $r$  y otras desde otra distancia mayor. En base a esto, la distancia efectiva es mayor que " $r$ " en una cantidad que se incrementa conforme aumenta la magnitud del evento.

El quinto término toma en cuenta la energía absorbida por los materiales en los que viajan las ondas, esta amortiguación de los materiales hace que la amplitud del movimiento decrezca de una forma exponencial con la distancia y el sexto término caracteriza el mecanismo de ruptura y las características del suelo del sitio.

La ecuación general presenta todos estos términos, aunque muchas de las ecuaciones desarrolladas por varios investigadores pueden utilizar más términos o menos de los que la ecuación general indica para caracterizar el movimiento.

El término  $\sigma \ln(y)$  se refiere a la incertidumbre en el valor del parámetro de movimiento de suelo dado en la relación de predicción. Existen varias relaciones de atenuación que pueden usarse para predecir los movimientos.

Cabe resaltar que muchas de las ecuaciones están basadas en datos de distintos eventos sísmicos por lo que existen variaciones significativas en cada una. Adicionalmente muchas ecuaciones son específicas para ciertas regiones o ciertos tipos de falla.

### **3.2. Incidencia de los parámetros en la atenuación**

Como se mencionó anteriormente, la variación del movimiento en función de la distancia de la magnitud de los sismos ha sido estudiada por mucho tiempo y generalmente son representadas por las curvas de atenuación.

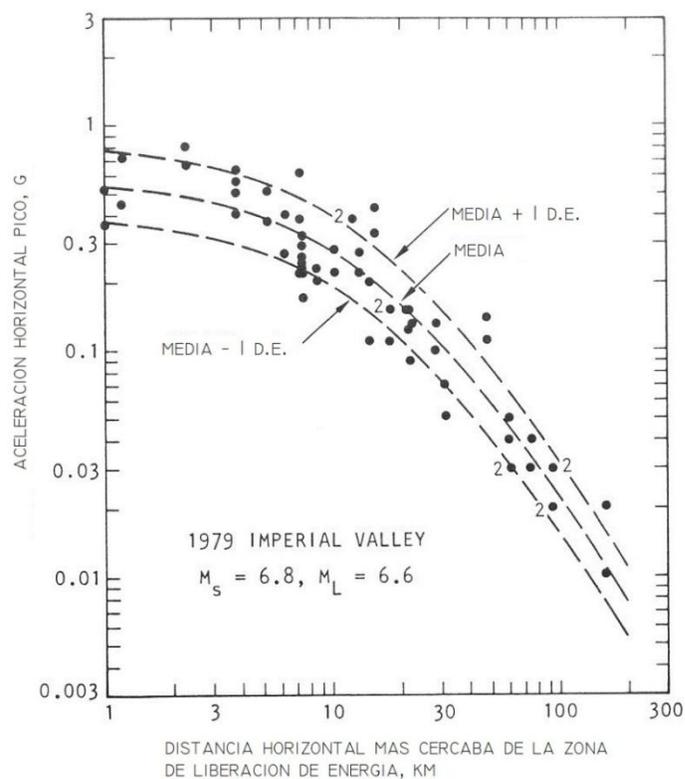
Seed e Idriss explican que existe un acuerdo generalizado de las atenuaciones de diferentes investigadores con magnitudes de 6 a 7 y para distancias de 25 a 60 kilómetros. Las diferencias son notables en base a la aceleración de sismos cercanos a la falla y los generados por eventos de gran magnitud, mucha de la discrepancia es debido a la falta de información de registros cercanos a la falla y para magnitudes grandes.

Registros cercanos a la falla fueron obtenidos en el sismo de Imperial Valley en 1979 con una magnitud  $M_l$  de 6,5, la superficie de falla activada se extendió 35 kilómetros y varios acelerógrafos estaban colocados en ambos lados de la falla, se muestra la figura 15 de la aceleración pico en función de la distancia.

La curva de la figura 15, indica la atenuación del sismo con respecto a la distancia a la falla, como se puede observar las aceleraciones se reducen cuando se aumenta la distancia al evento, esto, como se menciono anteriormente, se debe entre otros factores, a la amortiguación de los materiales en el medio de transmisión de las ondas sísmicas.

La figura mencionada contiene información valiosa acerca de las aceleraciones cerca de la falla, se puede observar que muchos de los puntos en figura (que corresponden a diferentes estaciones de registro) tienen una densidad mayor en la parte media y cercana a la falla.

Figura 15. **Regresión de aceleraciones del sismo Imperial Valley 1979**



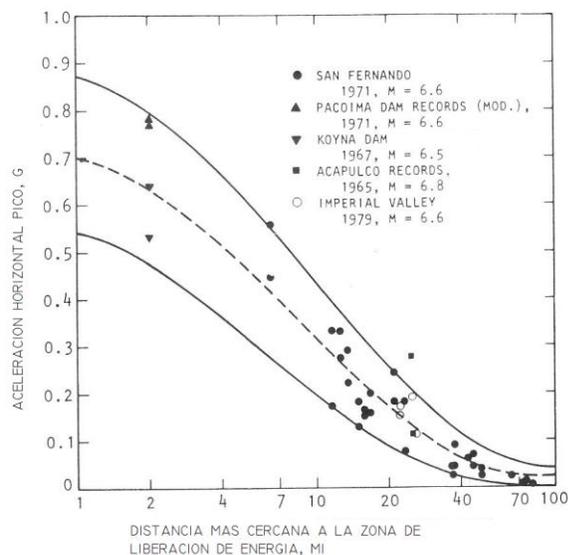
Fuente: adaptado de Seed e Idriss. *Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes*. p. 33.

Las relaciones de atenuación se forman a través del análisis de diferentes eventos sísmicos pasados con características similares para predecir las características de un posible evento sísmico.

La figura 16 contiene una dispersión alta, pero sigue el patrón mencionado anteriormente acerca de la disminución de las aceleraciones como sucede con muchos otros eventos, la diferencia con la figura 15, es que se agregaron otros eventos sísmicos para evidenciar el patrón de disminución.

Debido a la dispersión de datos, los investigadores obtienen diferentes formas de curvas medias, la figura siguiente muestra las gráficas de algunas relaciones de atenuación

Figura 16. **Relación de varios sismos de igual magnitud**

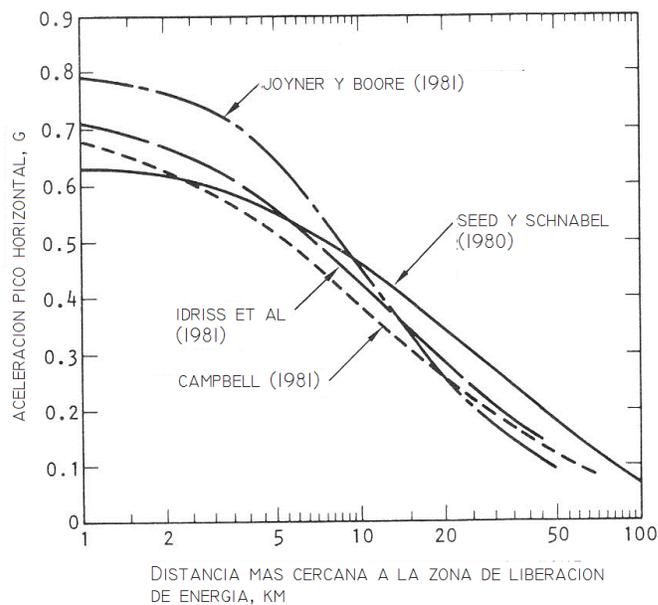


Fuente: adaptado de Seed e Idriss. *Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes*. p. 35.

No todas las atenuaciones son válidas para todos los tipos de eventos sísmicos, existen algunas que se usan en base al área analizada, o en base al mecanismo de ruptura, así como la distancia focal del evento, debido a que la relación a la cual cambia la aceleración pico puede ser diferente.

La figura 17 muestra las curvas de atenuación de diferentes investigadores, nótese que la suavidad de las curvas es diferente en muchos de los casos.

Figura 17. Relaciones de atenuación



Fuente: adaptado de Seed e Idriss. *Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes*. p. 38.

Existen varias ecuaciones de predicción en base a la aceleración pico debido a que es uno de los valores más utilizados en la ingeniería sísmica especialmente en el diseño, aunque no son las únicas que existen, ya que también se pueden estimar valores para parámetros de amplitud de contenido de frecuencia, duración, y otros parámetros como Intensidad de Arias. Una serie de relaciones de atenuación se presentan en el apéndice para su uso práctico.

## **4. PANORAMA SÍSMICO QUE AFECTA A LA CIUDAD DE GUATEMALA**

### **4.1. Marco tectónico del país**

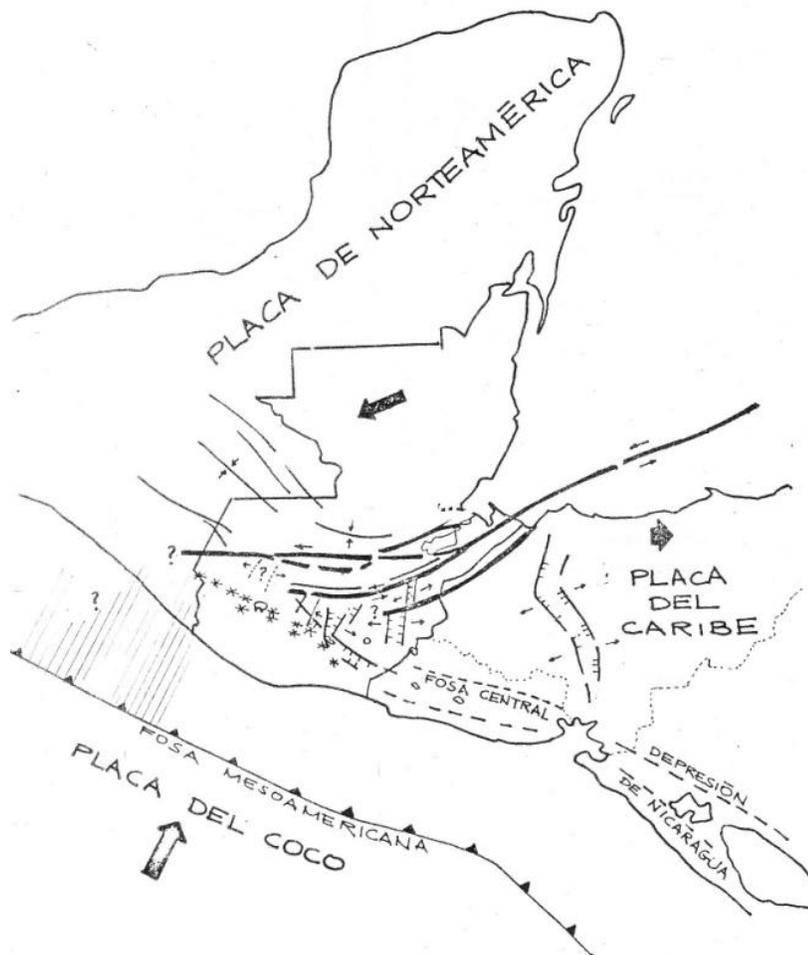
El territorio de Guatemala es un lugar con un alto grado de amenaza sísmica. Está en una zona convergencia de placas tectónicas (del Coco, Norte América y del Caribe). En el caso de la placa del Caribe existe además un desgarramiento de tracción de esa placa mientras que se mueve hacia el este mientras su extremo occidental está presionado transversalmente por la del Coco y la placa de Norte América.

Con base en lo mencionado en el párrafo anterior, la amenaza sísmica no solo se limita a los eventos que se pueden producir en las fronteras intraplaca sino que existen fallas superficiales intraplaca derivadas del mencionado desgarramiento traccional que ha formado varios grábenes sísmicamente activos incluido el valle mismo de Guatemala.

Existen varias características del marco tectónico en el país. El arco volcánico es un sistema de fallas de tipo superficial y paralelas a la fosa mesoamericana (Molina et al. 1999) conocido como graben o depresión de Nicaragua. Entre el arco volcánico y el límite de las placas de Norte América y el Caribe existen varios graben con rumbos casi norte sur. Los esfuerzos son traccionales (fallas normales) y la ciudad de Guatemala está asentada en uno de esos grábenes.

Por lo tanto la ciudad de Guatemala se puede ver afectada por sismos generados en las numerosas fallas activas que la rodean. Existen varios escenarios detectados donde se pueden producir (y de hecho se producen) movimientos fuertes del suelo. A continuación se describen las zonas más relevantes para la selección de los acelerogramas.

Figura 18. **Mapa Tectónico de Guatemala**



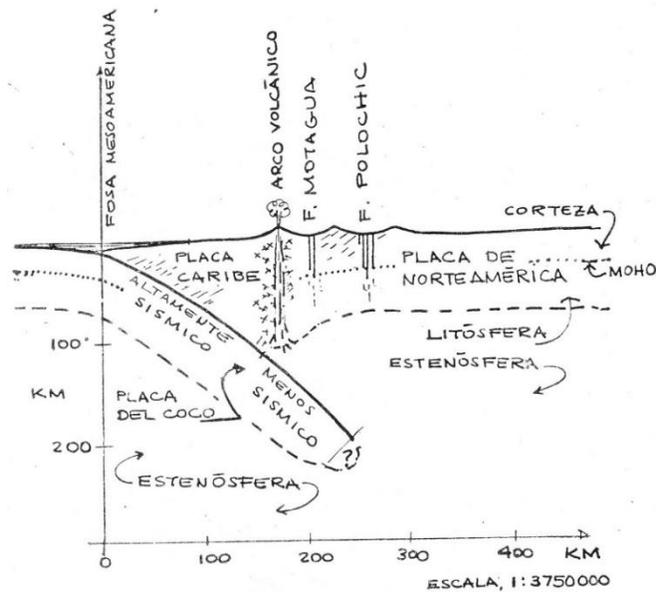
Fuente: MONZÓN-DESPANG. Informe Presentado a GTZ e INDE Fase II. p. 90.

#### 4.1.1. Zona de subducción

Esta zona se encuentra en las costas del pacífico del área centroamericana. En esta zona se da el contacto entre la placa del Coco y del Caribe, el desplazamientos entre las dos placas tiene un rumbo de 30 grados noreste y es de 7 a 8 centímetros por año lo que se traduce en una amenaza considerable aunque menos extremo que el desplazamiento de subducción en el área de Chile y Perú que llega a ser de 10 centímetros por año (fuerte).

La zona Wadati-Benioff situada bajo el arco volcánico tiene un ángulo de inclinación en el rango de 60 a 80 grados, los sismos en esta zona se dan (en el área del territorio de Guatemala) a una distancia focal de 200 kilómetros de profundidad.

Figura 19. Zona de subducción



Fuente: MONZÓN-DESPANG. Informe Presentado a GTZ e INDE Fase II. p.91.

Benito explica que en la Fosa Mesoamericana donde subduce la placa del Coco, los mecanismos de falla en la fosa son de tipo normal en los primeros 10 kilómetros de la zona de subducción que van desde la fosa, en dirección de la costa, y fallamiento inverso a profundidades entre 15 y 50 kilómetros (Dean y Drake, 1978; Quintero y Güendel, 2000; De Shon et al. 2003; Norabuena et al. 2004).

A profundidades entre 60 y 280 kilómetros existen sismos intraplacas (Güendel y Protti, 1998), que son de falla normal con planos subverticales que están en función de la temperatura y la presión que existe al introducirse una placa (del Coco) debajo de la otra (del Caribe). La sismicidad se da principalmente en la parte donde se generan los esfuerzos compresivos (fallamiento inverso) y los esfuerzos traccionales (zona intraplaca).

Los sismos más grandes generados por esta fuente sísmica se producen en Guatemala y El Salvador. Un ejemplo es el sismo de San Salvador en 2001 el cual fue producto del movimiento intraplacas (de tipo normal) a una profundidad de 60 kilómetros. La zona de subducción en base a análisis histórico de sismicidad realizado por Ambraseys y White (1996) revela que pueden ocurrir sismos de hasta Mw 8,0.

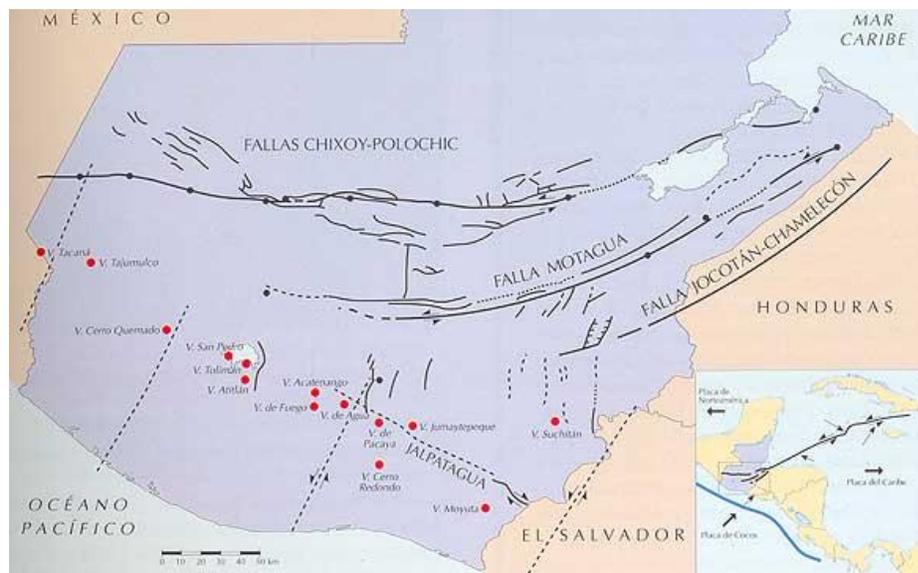
#### **4.1.2. Límite entre placa de Norte América y Caribe**

Formado por tres fallas, Chixoy-Polochic, Motagua y Jocotán-Chamelecón con rumbos Este-Oeste. La falla de Motagua conforma la cuenca del río del mismo nombre que inicia su recorrido en el occidente del país. La falla de Chixoy-Polochic tiene un trazo claro en la mayoría de su recorrido pero parece bifurcarse en área mexicana, el extremo este forma la cuenca del lago de

Izabal. La falla Jocotán-Chamelecón tiene dirección al sur paralela a la falla de Motagua, no muestra actividad desde el Neógeno.

El desplazamiento horizontal entre las placas de Norte América y El Caribe (NA-CA) es de 1,7 centímetros por año en la sección oriente y casi nulo en la sección occidental. Gordon y Muelhberger (1994) consideran que la falla se ha acomodado en el límite de las placas.

Figura 20. **Fallas de límite entre la placa norteamericana y del Caribe**



Fuente: <http://www.iagcovi.edu.gt/primaria/projekte/Vulkanweb/data/fallas.htm>

Consulta: 20 de marzo 2013.

#### 4.1.3. **Fallamientos secundarios superficiales**

Conjunto de fallamientos llamado debido a la localización geográfica como Arco Volcánico, se extiende desde el volcán de Tacaná hasta el volcán la Yeguada en el oeste de Panamá.

Las magnitudes de los sismos oscilan desde 5,7 hasta 6,9 a una distancia del eje del arco volcánico de 10 kilómetros. Considerados como sismos superficiales, estos sismos tienen la particularidad que pueden generar bastante daño con magnitudes pequeñas.

Uno de los sismos más grandes generados por el Arco Volcánico es el de 1854 cerca de San Salvador con una magnitud de 6,6 (Harlow et al., 1993). Los autores del estudio creen que esta es la magnitud máxima que puede alcanzar los sismos en la zona superficial porque la estructura es compleja y heterogénea, además de que la falla no puede romper en una gran extensión.

Un claro ejemplo fue el terremoto de San Salvador en 1986 generando un pulso que destruyó muchas de las estructuras de mediana altura en la capital salvadoreña. Otro sismo importante fue el de San Vicente el 13 de febrero de 2001 (Mw 6,6) en el segmento de Ilopango –San Vicente con un movimiento transcurrente lateral derecho.

En Guatemala, el evento más grande generado por esta zona se dio en el sureste en 1930 con una magnitud de 6,8-6,9 (White y Harlow, 1993; Ambraseys, 1995). Los más intensos fueron cinco sismos de magnitudes entre 5,1 y 6,2 entre diciembre de 1917 y enero de 1918 que destruyeron la ciudad de Guatemala.

Monzón-Despang explica que los fallamientos llamados secundarias no tienen este adjetivo desde un punto de vista tectónico. Este tipo de fallas liberan cantidades menores de energía que la zona de subducción, y aun así son capaces de generar gran daño debido a la cercanía de la falla a los sitios poblados y a su superficialidad. Muchas veces estas fallas pueden generar pulsos de velocidad que son destructivos para cualquier tipo de estructuras.

El daño que estos fallamientos pueden generar son muy altos debido a que existe una gran cantidad de infraestructura y población que se encuentra conglomerada en el área metropolitana ubicada en un graben, secundado por la inexistencia en el pasado de un código de construcción para edificaciones pequeñas y grandes. Por lo que existen estructuras grandes como centros comerciales, oficinas y edificaciones gubernamentales con una gran probabilidad de colapso ante este tipo de sismos (ejemplo claro es el sismo de San Salvador 1986).

Otra razón por la que el riesgo sísmico es mayor ante estos fallamientos es la falta de información e investigación sísmológica y geológica, es conocido de manera histórica y por la experiencia sísmica de los últimos años que existen las fallas pero no se sabe con exactitud la extensión de estas fallas, por lo que el riesgo aumenta con estos sismos secundarios. Un ejemplo muy claro de un sismo superficial de falla cercana a un sitio poblado es San Salvador en 1986.

Como describe Monzón-Despang, estas fallas caben dentro de la definición de actividad microsísmica significativa. Algunas zonas cercanas a la falla se describen en la siguiente tabla.

Tabla II. **Zonas de actividad microsísmica significativa**

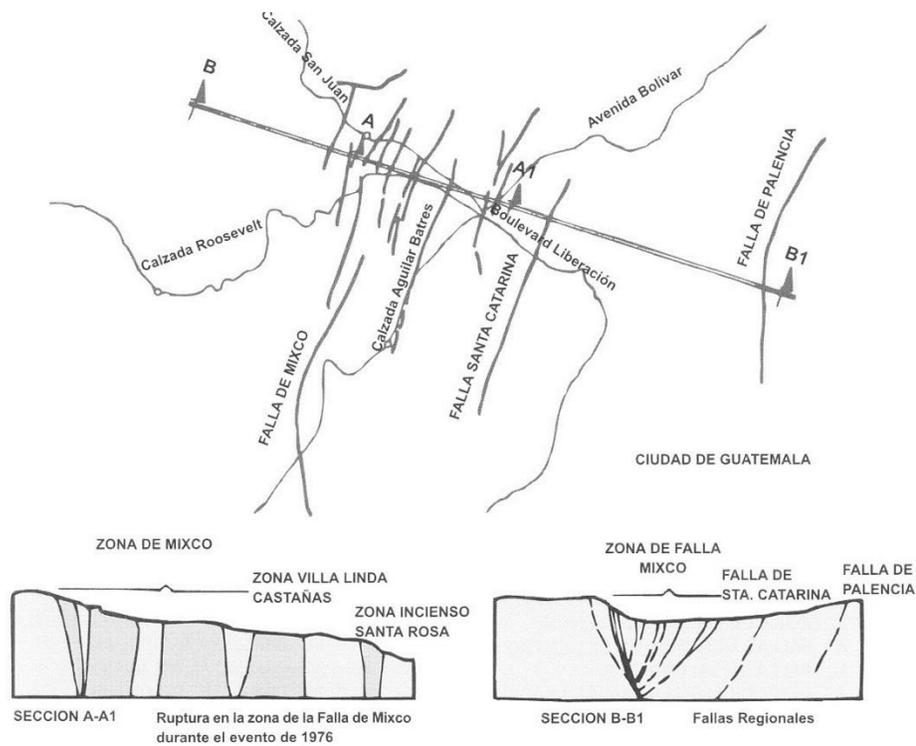
Zona
Chiapas
Ixcán
Jalpatagua
Cadena Volcánica
Central
Sacapulas
Ipala
Chiquimula
Montecristo
El Salvador

Fuente: MONZÓN, Héctor. Informe Presentado a GTZ e INDE Fase II. p.87.

La falla de Jalpatagua es considerada como una prolongación del borde norte del Graben de Nicaragua, esta falla se vuelve más evidente cuando se aleja al sur y es considerada por algunos investigadores como una falla de tipo transcurrente derecha.

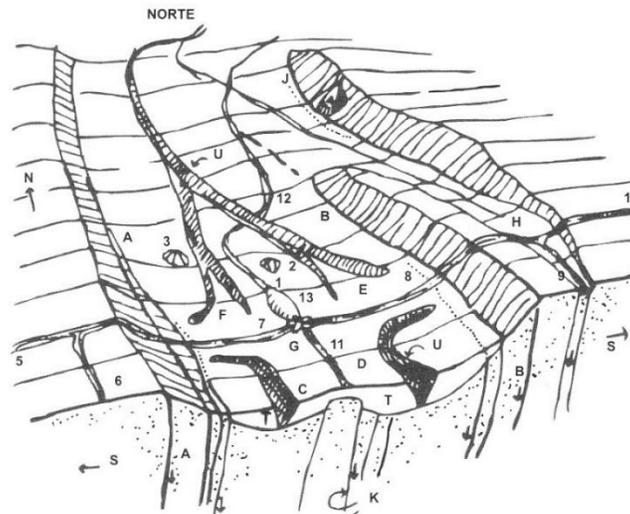
La zona central incluye al graben de la ciudad de Guatemala, el graben está formado por dos fallas normales, la falla de Mixco al oeste de la región metropolitana y la falla de Santa Catarina Pinula al este, las 2 fallas son de mecanismo normal (esfuerzos tensionantes), los rumbos de las fallas son casi paralelos al norte sur.

Figura 21. **Graben de la ciudad de Guatemala**



Fuente: UNICEF. Desastres Naturales y Zonas de Riesgo en Guatemala. p. 27.

Figura 22. **Morfología del valle de la ciudad de Guatemala**



- |  |                              |
|--|------------------------------|
| A. ZONA DE FALLA DE MIXCO  | 1. TEATRO NACIONAL           |
| B. ZONA DE FALLA DE SANTA CATARINA PINULA  | 2. CERRO DEL CARMEN          |
| C. CUADRANTE DEL RIO MOLINO  | 3. CERRO EL NARANJO          |
| D. CUADRANTE DEL RIO PINULA  | 4. PICO DE PALENCIA          |
| E. CUADRANTE DEL RIO LAS VACAS   | 5. CAMINO A CHIMALTENANGO    |
| F. CUADRANTE DE LOS RIOS EL ZAPOTE Y EL NARANJO  | 6. CAMINO A LA ANTIGUA       |
| G. EL TREBOL   | 7. CALZADA ROOSEVELT         |
| H. GRABEN, LATERAL DE SAN JOSE PINULA  | 8. CALZADA LOS PROCERES      |
| J. ZONA DE FALLA DE APLENCIA   | 9. CAMINO A EL SALVADOR      |
| K. FALLAS MENORES EN EL CENTRO DEL VALLE   | 10. CAMINO A MATAQUESCUINTLA |
| N. FALLA DE JALPATAGUA   | 11. CAMINO A AMATITLAN       |
| S. DIRECCION EN LA QUE SE MUEVE LA CORTEZA TERRESTRE Y QUE HACE QUE EL PISO DEL GRABEN DESCIENDA | 12. CAMINO AL ATLANTICO      |
| T. RELLENO DE ARENA Y CENIZAS  | 13. ZONA 8 DE GUATEMALA.     |
| U. BARRANCOS   |                              |

Fuente: UNICEF. Desastres Naturales y Zonas de Riesgo en Guatemala. p. 28.

#### 4.2. Estudios de sismicidad en Guatemala

Los primeros estudios se hicieron por parte de un equipo de la universidad de Stanford liderado por Kiremidjian en 1977 debido al sismo de 1976, dentro de sus resultados incluyeron mapas de PGA para períodos de retorno de 50, 100, 500 y 1 000 años para ocho ciudades. También se incluyeron mapas de PGV y duración para los mismos períodos de retorno.

Por su parte Monzón-Despang 1984, realizó un estudio de amenaza sísmica preparado para el INDE y GTZ, los resultados incluían mapas de amenaza, PGA para 475 años por fuentes y global para 70, 475, 950 y 10 años así como una zonificación sísmica para la Republica de Guatemala. Esta mismo zonificación la utilizó uso en el diseño estructural de edificios en las Normas Recomendadas para la Construcción de AGIES en 1997.

Otros estudios de amenaza sísmica incluyen el de Villagrán (1994) y Ligorria (1995) del cual que sirvió conjuntamente con las leyes de atenuación de Schmidt (1997) para realizar el estudio de Benito et al., en el 2001 llamado RESIS I. Este estudio se realizó específicamente para la Ciudad de Guatemala considerando de forma independiente las contribuciones de las fuentes sísmicas tanto de forma determinista como probabilista.

Los espectros de Benito et al., fueron comparados con los espectros de la Norma del AGIES que realizo Monzón-Despang. Los espectros también fueron comparados con la norma española NCSE-97. Los espectros de Benito et al., están hechos en base a la norma española mientras que los Monzón-Despang son en base a la norma americana del *Applied Technology Council* (ATC-306) que fue lo que se uso de base para la edición del AGIES NRE-97.

Molina realizo un estudio en 1999 para la ciudad de Guatemala con mapas de PGA para 50, 100 y 500 años para roca, curvas de peligrosidad y espectro PGV para 100 años. El estudio se basó en sismos históricos e instrumentados.

Para realizar las atenuación se baso en el modelo de predicción de Álvaro Clíment et al. en 1994, *Spectral Strong Motion Attenuation in Central America*, el estudio presenta la relación de predicción para los parámetros de PGV y PGA con 5 por ciento de amortiguación para una frecuencia de 40 Hertz (0,025s).

Otro de los estudios es el del INSIVUMEH en el 2003 financiado por el gobierno japonés. Los estudios de Molina, Villagrán y Ligorria fueron financiados por la NORAD, una institución noruega de cooperación para el desarrollo. Estos estudios fueron requeridos por parte de CEPREDENAC.

Existen otros estudios a escala regional y otros que involucran otros países. También existen otros estudios de tesis e investigaciones en varias universidades como los de Menéndez en 1982, López et al., (1993), Chavarría (1999) y Tvedt en 2000.

La siguiente tabla muestra una comparación de las aceleraciones máximas que pueden generarse en la ciudad de Guatemala de los estudios mencionados anteriormente.

Tabla III. **Aceleraciones máximas en el valle de Guatemala**

<b>Autor/ Recurrencia</b>	<b>2 500 Años</b>	<b>1 000 Años</b>	<b>500 años</b>
Molina et al.1999	2,262	2,782	4,422
Ligorria et al.1995	1,636	1,973	3,031
Villagrán et al. 1994	2,15	2,620	3,930
Monzón-Despang 1984	-	2 (70 años)	3,0 (480 años)
Menéndez 1982	1,5 (suelo)	2-3 (suelo)	-
Kiremidjian et al. 1977	2,5	3,0	4,5-5,0

Fuente: modificado de Molina et al. Amenaza sísmica en el valle de Guatemala. p. 40.

Benito et al., (2009), realizó un segundo estudio que incluye un la amenaza sísmica regional (América Central) y estudios específicos para los países de la región y sus capitales. El estudio está basado en análisis probabilístico y catálogos de eventos sísmicos utilizados en la investigación pertenecen a varios investigadores como White, Ambraseys, Adams Del Cid, González, Peraldo y Montero, Pacheco y Sykes, Sutch y Halow.

Para la república de Guatemala generó mapas de PGA con períodos de retorno de 500, 1 000 y 2 500 años. Para la ciudad de Guatemala generó curvas de amenaza sísmica del PGA 0,1 segundos, 0,2 segundos, 0,5 segundos, 1 y 2 segundos. Así como espectros de respuesta para los mismos períodos de retorno que los mapas de PGA de la república y con las aceleraciones espectrales que uso en las curvas de amenaza sísmica.

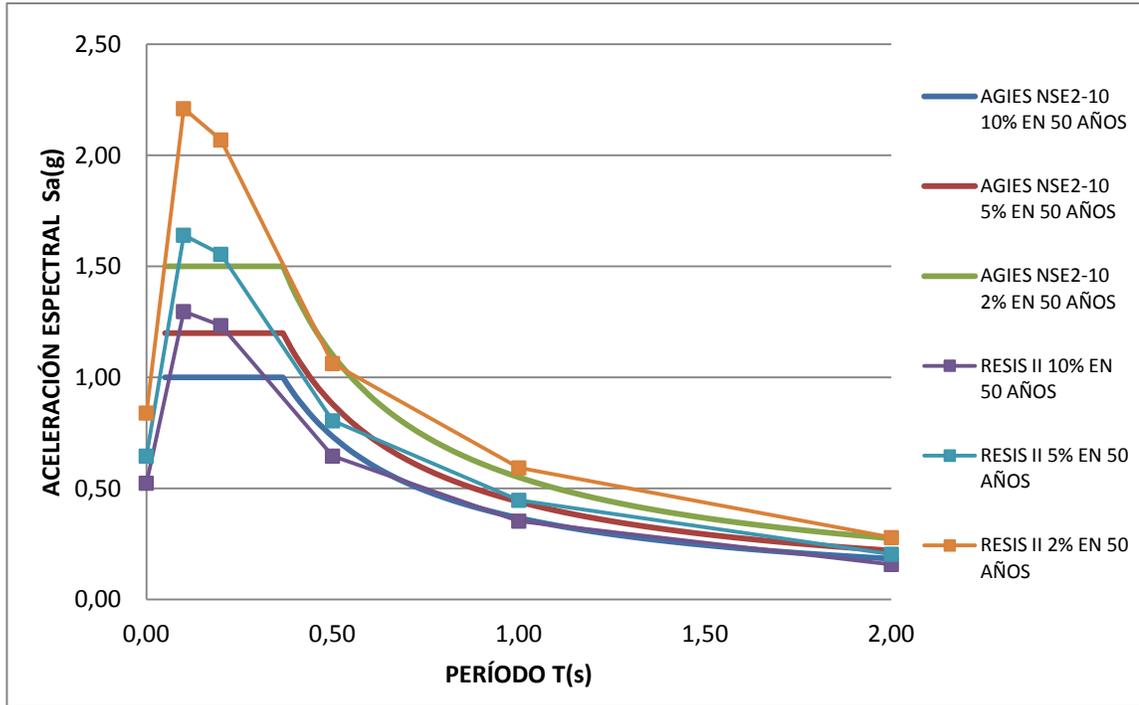
Los resultados de este estudio fueron utilizados por Monzón-Despang en el 2010 para la amenaza sísmica de las Norma AGIES NSE2-2010. Los espectros del AGIES se escogieron para que fueran compatibles con el estudio de RESIS II y en base al formato actual del ASCE/SEI 7-5.

Tal como se hizo anteriormente, se estableció una meseta que es menor a la de los espectros UHS elásticos, aproximadamente el 80 por ciento del valor máximo del espectro de RESIS II, lo cual es una práctica común para establecer espectros de norma.

Hablando de la amenaza sísmica propiamente las Norma AGIES2-2010 incluye mapas y tablas de zonificación sísmica por municipio basándose en índices de sismicidad (análogos a la zona sísmica del UBC-97).

La figura 23 muestra la comparación de espectro del estudio RESIS II de Benito et al., 2009, y los espectros genéricos de la Normas AGIES NSE-2010 desarrollados por Monzón-Despang para la ciudad de Guatemala.

Figura 23. **Comparación de espectros de la Norma AGIES 2010 y el estudio RESIS II para la ciudad de Guatemala**



Fuente: elaboración propia en base al AGIES NSE2-2010 y el libro Amenaza Sísmica en América Central de Benito et al. (2009).

Más recientemente Monzón-Despang en colaboración con Ligorría realizó un estudio de amenaza sísmica con análisis determinístico en el 2011.

El estudio consistía en analizar 20 escenarios sísmicos probables para la cuantificación de pérdidas. Los escenarios se basaron en el marco tectónico de registros históricos y de registros instrumentales así como los rasgos morfológicos que posee la región.

Los escenarios sísmicos, se muestran en la tabla IV con la magnitud de momento máxima probable para cada escenario y la zona en la cual se encuentra. La cuantificación de pérdidas era a nivel nacional, por lo que no se muestran las distancias al sitio.

Tabla IV. **Modelo de escenarios sísmicos en Guatemala**

Fuente	Mw Probable	Ubicación	Falla
Polochic	7,3-7,5	Alta Verapaz-Quiche-Izabal	Transcurrente
Motagua	7,2-7,5	Centro del País – Izabal	Transcurrente
Roatán	7,3	Mar Caribe	Transcurrente
Jocotán	7,0	Zacapa-Valle de Sula-Choloma	Transcurrente
Ipala	5,8	Graben de Ipala	Normal
Mixco	5,8	Graben de Guatemala	Normal
El frutal	5,0	Sur de Guatemala	Normal
Santa Catarina	5,8	Graben de Guatemala	Normal
Jalpatagua	6,5	Sur del Graben de Guatemala	Transcurrente
Salvador Oeste	6,5	Continuidad de Jalpatagua	Transcurrente
Madre Vieja	5,3	Cauce del río Madre Vieja	Normal
Samalá	5,8	A lo largo del río Samalá	Normal
Ante Arco	7,8	Océano Pacífico	Inversa
Post-Arco	7,6	Costas del Océano Pacífico	Normal profunda

Fuente: MONZÓN-Despang; Ligorria, Juan Pablo. Informe de Cúmulos. Anexo 1. p.4.

#### 4.3. Geología en el área de la ciudad de Guatemala

Como se mencionó en el capítulo 2, las condiciones del suelo en el sitio representan un factor muy importante del movimiento fuerte del suelo, los depósitos de suelo pueden amplificar las ondas sísmicas, y esto se traduce en una carga sísmica más alta para las estructuras.

En referencia a la geología del área, el trabajo de graduación de Yani (2006) resume los varios estudios de investigadores dedicados a este tema. El estudio resalta que el graben de la ciudad de Guatemala, está cubierto con una sucesión de depósitos volcánicos del período geológico tercerario al cuaternario.

En el trabajo de graduación, la geología la representó Ligorria et al., (1997) de manera descriptiva en base a los mapas de Bonis (1993), en donde se describen varias formaciones geológicas asociadas, expuestas en el valle de Guatemala con espesores y grados de consolidación. La consolidación estaba basada en el estudio de velocidad de propagación de onda de corte para cada unidad geotécnica.

También propuso una revisión de distribución de unidades en base a los trabajos anteriores de Ligorria et al., (1997) pero basándose en el IBC 2003 y con información de los trabajos de Flores et al., (2001), esto debido a que el estudio de Ligorria et al. Se basó en los criterios del Building Safety Council 1991.

La tabla V, describe el perfil de suelo describiendo las diferentes formaciones geológicas, no solo de manera cualitativa, también en base a la velocidad de onda de corte. La figura 24 muestra la distribución de estos perfiles en la ciudad de Guatemala.

**Tabla V. Unidades geotécnicas para la ciudad de Guatemala**

Perfil	Descripción
B	Depósitos volcánicos terciarios, compuestos mayormente de rocas de origen volcánico, cristalinas o ligeramente fracturadas. Vs entre 760 y 1500 m/s.
C	Depósito profundo y rígido de piroclastos, compuestos mayormente de ceniza de pómez, que suele exceder 60 metros de espesor; mostrando Vs entre 360 y 760 m/s; N encima de 50 o Su encima de 100 kPa.
C*	Sedimentos de transición hacia el este y oeste del graben, con un perfil entre 5 a 50 metros de profundidad conteniendo capas de arenas suaves a medio-rígidos mayormente pómez o depósitos de ceniza y gravas gruesas (ignimbritas), con o sin intervenciones de estratos de arcilla poco cohesionada.
D	Flujo de aluviones del cuaternario, saturado de agua y granos de tamaño no clasificados, con más de 15 metros de espesor, con un perfil caracterizado por Vs entre 360 y 180 m/s, con N entre 15 y 50, o Su entre 50 y 100 kPa.

Fuente: YANI, Robin. Mediciones de Intensidades Sísmicas del Área Urbana Extendida de la Ciudad de Guatemala. p. 21.

En base a las velocidades de corte se pueden determinar los factores de amplificación de sitio para aumentar la carga sísmica. El AGIES plantea dos factores de amplificación en base al tipo de suelo, estos factores son genéricos y no específicos de sitio.

El primer factor que se encuentra en la tabla VI, modifica la meseta del espectro de diseño mientras que el segundo factor que se obtiene de la tabla VII modifica la cola del espectro.

Los valores de estos factores son los mismos que los del UBC97, ya que este código es aun uno de los códigos más utilizados en el diseño estructural en la ciudad de Guatemala.

Figura 24. **Distribución geotécnica en la ciudad de Guatemala**



Fuente: YANI, Robin. Mediciones de Intensidades Sísmicas del Área Urbana Extendida de la Ciudad de Guatemala. p. 21.

Tabla VI. **Factores de clase de sitio AGIES NSE2-10 períodos cortos**

Clase de Sitio	Índice de sismicidad				
	2a	2b	3a	3b	4
AB	1,0.	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
D	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
E	1,7	1,2	1,0	0,9	0,9
F	Se requiere Evaluación Especifica Ver AGIES NSE2-10 Sec. 4.4.1				

Fuente: AGIES. Normas de Seguridad Estructural NSE2-10. p. 15.

Tabla VII. **Factores de clase de sitio AGIES NSE2-10 períodos largos**

Clase de Sitio	Índice de sismicidad				
	2a	2b	3a	3b	4
AB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
D	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5
E	3,2	2,8	2,6	2,4	2,4
F	Se requiere Evaluación Especifica Ver AGIES NSE2-10 Sec. 4.4.1				

Fuente: AGIES. Normas de Seguridad Estructural NSE2-10. p. 15.



## 5. SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS

La selección y adecuación de aceleración de acelerogramas se usa para el análisis dinámico de estructuras (*response history*) ya sea elástico (aunque realmente es un análisis post-elástico implícito) o post-elástico (explícito). Se enfatiza el análisis elástico debido a que la mayoría de análisis sísmicos en el diseño estructural se realizan con este método por la facilidad y el nivel conservador que tiene. Sin embargo, su efectividad depende de que los datos que se usen en el análisis logren describir la realidad de un escenario sísmico probable en el sitio analizado.

El análisis estático y el dinámico espectral describen de manera puntual el movimiento pero no muestran el comportamiento de la estructura ante acciones cíclicas ni cómo se reflejan algunos parámetros en la estructura para el caso de un evento específico (como ejemplo los pulsos en lugares cercanos a una falla, el efecto de la direccionalidad y el efecto del suelo), el *response history* puede ser utilizado para desarrollar movimientos del suelo específicos que tomen en cuenta estos factores.

El análisis tiene se ve limitado porque existen pocos registros, y en el caso de Guatemala se puede decir que no existen registros de movimientos fuertes en el país que sean significativos. Es allí donde la adecuación de los registros para utilizarlos en el análisis resulta ventajosa debido a que se pueden buscar registros de otros sitios que tengan similitud de parámetros (de suelo, geológicos, sísmicos) para utilizarlos en el análisis.

La razón por la que muy poca información de movimiento fuerte del suelo se ha registrado en el territorio es debido a las pocas estaciones que monitorean la actividad sísmica sumada, entre otras cosas, al poco apoyo que existe de parte del gobierno central y el sector académico para realizar estos estudios de amenaza. Aun así, existen varias entidades que han aportado de manera individual y con ayuda de organizaciones internacionales varios estudios de amenaza sísmica, aunque muy pocos para el área del valle de Guatemala.

Por estas razones, es necesario recurrir a registros de otras localidades. Existen muchas formas para adecuar estos acelerogramas pero el verdadero reto de la adecuación de estos acelerogramas artificiales es asegurar que el acelerograma represente de manera efectiva la amenaza sísmica, esto es, que las características sean consistentes con las de un sismo probable en el sitio.

Un punto importante son las directrices y las recomendaciones mínimas que proporcione una norma. Guatemala no tiene actualmente un reglamento que establezca normas mínimas para este tipo de análisis, tampoco que estandarice los parámetros del análisis como lo tiene para el estático equivalente y el modal espectral. Sin embargo mucha de la metodología actual viene heredada de la escuela norteamericana del UBC, SEAOC, NEHRP y últimamente del IBC y ASCE/SEI, por lo que el diseñador estructural siempre puede abocarse a estos para tener lineamientos mínimos.

Otro punto del proceso radica en que los acelerogramas deben verse razonables en el dominio de tiempo y en la amplitud, muchos acelerogramas son consistentes en el dominio de tiempo pero no en amplitud y también de la otra forma (amplitud pero no en el dominio de tiempo), de igual forma muchos acelerogramas pueden tener un amplitudes de aceleración razonables y al

integrar puede pasar que las velocidades o desplazamientos no sean razonables.

Los ejemplos en el capítulo 6 de esta investigación, están destinados para la parte práctica, aunque la metodología es aplicable para cualquier parte. Resulta perfectamente válido aplicar esta metodología a cualquier parte del país, pero debe analizarse posibles fallas locales en cada lugar que se seleccione.

Lo que se trata de lograr en esta investigación es mostrar los pasos del proceso de selección, adecuación y exponer las herramientas que se puede utilizar para poder realizar todos los pasos, ya que desafortunadamente no existen lineamientos en Guatemala para realizar este tipo de análisis, tampoco los registros y como se vio en el capítulo anterior la única herramienta que se tiene es la amenaza sísmica, que como se ve más adelante es una de las partes más importantes del análisis.

En definitiva es importante contar con herramientas de software para el análisis de los registros, existen algunos programas como el PRISM, el ViewWave y el Seismosignal para modificar los registros y estos pueden ser adquiridos sin costo (el Seismosignal tiene una versión de prueba, pero proporciona licencia para uso ilimitado si sus fines de uso son de tipo académico).

Se busca que se pueda completar el proceso para poder realizar un análisis de *Response History*, se proporcionan las posibles soluciones para las herramientas de las cuales se carecen (como es el caso de los registros y los programas de proceso) y adicionalmente se muestra una pequeña explicación de los parámetros que intervienen en este proceso.

## **5.1. Tipos de estructuras que pueden estar sujetas al análisis**

De manera general, a cualquier estructura civil se le puede realizar el análisis de respuesta de historia para el análisis sísmico, el trabajo de investigación está enfocado para las edificaciones y obra de infraestructura que considera el AGIES NSE1-10, esto se refiere principalmente a edificios de pequeña a mediana altura, ya que son las obras que en altura son las más comunes en la ciudad de Guatemala.

Cuando la referencia es a mediana altura se habla de alturas de hasta 80 metros, esto debido a que la altura está limitada por el plato aéreo de la Dirección General de Aviación en toda la ciudad de Guatemala.

El análisis también puede ser aplicado a cualquier estructura que esté dentro de la categoría ocupacional descrita en el AGIES NSE1-10. Existen cuatro tipos de categoría ocupacional para definir a las estructuras (no en su sistema sismorresistente, sino en términos de uso). La tabla de estructuras por categoría ocupacional se muestra en el anexo.

## **5.2. Proceso de selección y adecuación**

El proceso de selección y adecuación, se puede explicar de manera general. El proceso inicia con determinar el objetivo de análisis hasta evaluar los resultados de los acelerogramas (conjuntamente con el análisis).

- Determinar el objetivo del análisis (obra nueva, evaluación, rehabilitación).
- Determinar el número de acelerogramas a usar.

- Determinar las bases de datos de registros de movimiento fuerte para seleccionar los registros a utilizar.
- Seleccionar los acelerogramas en base a los parámetros establecidos en la amenaza sísmica hasta obtener el número de acelerogramas de nuestro interés.
- Adecuar los acelerogramas en base a los parámetros sísmicos y la amenaza sísmica por cualquier método de escala.
- Evaluar los valores de escala para determinar los límites dentro de los cuales la escala es adecuada si se encuentra de los límites.

El proceso se divide principalmente en dos partes, la primera parte hasta la selección de los registros, la segunda parte implica los métodos de adecuación de los acelerogramas seleccionados y los criterios para establecer los límites hasta los cuales se permite realizar la adecuación.

Se expondrá acerca de cada paso del proceso en base a las recomendaciones de los algunos autores que estudian el tema. La figura 25 muestra el diagrama general del proceso de selección y adecuación de registros para que sean utilizados en el Response History.

Figura 25. **Diagrama del proceso de selección y adecuación**



Fuente: elaboración propia con software EDraw.

### 5.3. **Objetivo del análisis**

Existen dos objetivos primordiales para un análisis paso a paso, para diseño y para evaluar el desempeño de una estructura (para una estructura ya sea nueva o existente). El NEHRP recomienda que el analista debe entender el objetivo del análisis para poder seleccionar el procedimiento de selección y de adecuación.

Debe tenerse claro que el análisis debe incorporar un mínimo número de registros en base a los resultados del análisis que se buscan. De igual manera el tipo de adecuación varía en función de los valores de respuesta que se quieran evaluar.

Por ejemplo, si necesitamos evaluar la respuesta de derivas promedio se necesitan registros que no tengan mucha variabilidad entre ellos. Caso diferente es si necesitamos evaluar los esfuerzos de corte en columnas ya la variabilidad es importante para evaluar que esfuerzos varían en cada elemento con cada registro analizado.

Los objetivos más específicos por los cuales se usa el análisis paso a paso son:

- Diseño de estructuras nuevas
- Rehabilitación de estructuras existentes
- Diseño de estructuras con sistemas estructurales no conformes
- Desempeño de estructuras nuevas o existentes

La metodología de estos análisis están en función de cada país que tiene su código sísmico. En Guatemala solo existe la norma de diseño de estructuras por el método prescriptivo, el AGIES NSE3-2010. Que está basado en la metodología del ASCE/SEI 7-10.

Los diseñadores en Guatemala en tiempos anteriores a las normas AGIES NSE 2010 adoptadas por CONRED en el 2011 han utilizado primordialmente normas americanas (UBC, IBC, ASCE, ATC). Es por esta razón que se hace mucho énfasis en las normas de ese país.

### **5.3.1. Normas para la selección y adecuación**

En base a los objetivos anteriormente mencionados, se muestran los códigos americanos que tienen desarrollada una metodología para el análisis paso a paso y que contiene directrices para la selección y adecuación de acelerogramas.

- Diseño de edificaciones nuevas: ASCE/SEI 7-5, ASCE/SEI 7-10.
- Diseño de rehabilitación de estructuras existentes: ASCE/SEI 41-06.
- Diseño de estructuras con sistemas estructurales no conformes: ASCE/SEI 41-06
- Desempeño de estructuras nuevas o existentes: ATC-58-1

Otras normativas internacionales de referencia son la norma canadiense National Building Code of Canada del *Canadian Commission on Building and Fire Code* 2005; y la norma neozelandesa *New Zealand Standard 1170.5* del *Council of Standards New Zealand* 2004.

### **5.4. Número de acelerogramas a utilizar**

En la mayoría de códigos no se tiene un valor general mínimo de acelerogramas para el análisis de estructuras. El NEHRP en un artículo acerca de selección y escala de acelerogramas *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses* recomienda un cierto número de registros en función de las respuestas que se quieren encontrar en el análisis.

El número de sets de registros (2 horizontales o las 3 componentes) requeridos es dependiente de factores que incluyen:

- Si el valor medio o la distribución de respuestas es requerida.
- El grado esperado de respuesta inelástica.
- El número de modos que contribuyen significativamente a las cantidades de la respuesta de interés (deriva de piso o aceleraciones en el piso).
- Si los registros son seleccionados al azar (lo cual no es recomendado) o con explícita consideración de la forma espectral.
- La calidad y el detalle del modelo matemático así como el suelo.
- La certeza requerida de los valores estimados de la media y varianza.

Muchos *sets* de movimientos son requeridos para estimar valores estables de la varianza más que la media. En general, mientras más grande sea la media de respuesta inelástica, más grande es el número de *sets* requeridos para estimar valores estables de la media y la varianza. También es lógico mencionar que solo un registro es requerido para estimar la máxima respuesta inelástica de un sistema de un grado de libertad.

El ASCE/SEI 7-10 requiere el uso de tres acelerogramas para el análisis *Response History*. Si se usan tres, la respuesta máxima es usada para verificar las componentes. Si se usan siete *sets* o más, la respuesta máxima promedio de todos los acelerogramas usados se toma para verificar los componentes. El cálculo de las probabilidades de colapso del edificio o de la construcción de curvas de fragilidad para el cálculo de pérdidas por medio del ATC-58-10 debe usar no menos de 30 *sets* de movimientos del suelo debido a que la variabilidad de la respuesta será mayor.

En contraparte, conseguir 30 registros con las características que representen el movimiento del suelo no es fácil, por lo que, como se puede observar, el ASCE/SEI 7-10 define el mínimo en 3.

En el caso del código canadiense el mínimo no está especificado, el código neozelandés requiere 3, el mismo número que requiere el euro código; y el código mexicano requiere como mínimo 4.

## **5.5. Bases de datos de registros de movimiento fuerte**

Como se mencionó en el capítulo 1, los registros de movimiento fuerte del suelo eran registrados en papel o en película, una de las desventajas es la lectura de estos valores debido a que el equipo que lo registraba era análogo.

Afortunadamente ahora, los registros se guardan digitalizados, lo que hace que estos puedan ser utilizados en cualquier computadora, y adicionalmente puedan estar disponibles en cualquier parte del mundo por medio del Internet.

Existen varias páginas de internet del cual se pueden encontrar registros procesados de movimiento fuerte, muchos países tienen sus servicios sismológicos, en los cuales tienen la base de datos de registros de movimiento de la actividad sísmica del país, algunos poseen los registros procesados y no procesados (para realizar investigaciones más especializadas).

Otras páginas de internet tienen alianzas estratégicas con instituciones que aportan sus bases de datos con fines académicos.

Tabla VIII. **Sitios de registros de movimiento fuerte**

<b>Sitio</b>	<b>País</b>
<a href="http://www.k-net.bosai.go.jp/">http://www.k-net.bosai.go.jp/</a> .	Japón
<a href="http://www.strongmotioncenter.org/">http://www.strongmotioncenter.org/</a>	EUA
<a href="http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database/">http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database/</a>	EUA
<a href="http://www.sismologia.cl/">http://www.sismologia.cl/</a>	Chile
<a href="http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/earthqk.shtml">http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/earthqk.shtml</a>	EUA
<a href="http://db.cosmos-eq.org/">http://db.cosmos-eq.org/</a>	EUA
<a href="http://www.data.scec.org/">http://www.data.scec.org/</a>	EUA
<a href="http://nsmp.wr.usgs.gov/">http://nsmp.wr.usgs.gov/</a>	EUA
<a href="http://www.gns.cri.nz/">http://www.gns.cri.nz/</a>	Nueva Zelanda

Fuente: elaboración propia.

#### **5.6. Determinar la amenaza sísmica**

La amenaza sísmica está determinada por el estudio del marco tectónico del lugar. Determinar la amenaza sísmica es uno de los pasos más importantes del proceso de adecuación de acelerogramas. En el análisis sísmico de estructuras es la amenaza sísmica la que representa de manera directa la cantidad de carga lateral que se le aplicará a una estructura para su posterior análisis (del mismo modo en la evaluación y rehabilitación de estructuras existentes).

En análisis de daño sísmico es esta característica la que determina las curvas de fragilidad con las cuales se hacen perdidas probables para estudios destinados a entidades como por ejemplo, los seguros.

Mientras exista mayor cantidad de información acerca de la amenaza sísmica en un sitio, se pueden obtener resultados más realísticos del análisis del modelo. La amenaza sísmica debe poseer características que encajen con el escenario para el sitio.

Bolt (1978) demostró que si los registros previos poseen las características del escenario en términos de fuente, camino y sitio, la probabilidad de que los registros encajen con el sismo de diseño es cercana a 1, de la misma manera sucede que si las características de los registros se ajustan a los del sismo se incrementan las probabilidades de adecuar de manera eficiente los acelerogramas.

La amenaza sísmica se puede determinar por dos análisis, el análisis determinístico y el probabilístico.

#### **5.6.1. Análisis sísmico de amenaza determinístico**

Conocido como *DSHA Deterministic Seismic Hazard Assessment* es el tipo de análisis que considera escenarios sísmicos individuales, el escenario que produce las condiciones más severas es el que se toma para diseño. Pueden existir casos en los casos dos escenarios presenten condiciones máximas, uno en períodos cortos y el otro en períodos largos, para los 2 casos deben ser considerados para determinar cual controla para la estructura analizada.

Los pasos del análisis son los siguientes en base a la explicación de la *Federal Emergency Management Agency*:

- Se determinan todas las fuentes sísmicas que puedan afectar al sitio que se va a analizar, y se debe investigar los parámetros de la fuente:
  - Identificar tipos de fuentes
    - Falla (como se menciona en el capítulo 1).
    - Estructura localizada: zonas identificables que se presume, tienen actividad sísmica, este tipo de fuente es

- generalmente una concentración de fallas activas conocidas y desconocidas.
- Provincia sismotectónica: región en la cual se sabe que existe riesgo sísmico pero no hay evidencia de fallas activas o de estructuras localizadas.
  - Determinar el sismo máximo en la fuente: existen cuatro tipos de sismo máximo utilizados, el sismo máximo posible, el sismo máximo creíble, el sismo máximo histórico y el máximo considerado.
    - Sismo máximo posible: es un valor de límite superior determinado en base a procesos de sismología.
    - Sismo máximo creíble: es el sismo máximo razonable basado en procesos de sismología.
    - Sismo histórico máximo: es el sismo máximo en base a la historia o captado por los instrumentos y es el valor menor para un sismo máximo posible o creíble.
    - Sismo máximo considerado: es el nivel máximo de movimiento sísmico que es razonable que pueda resistir una estructura normal.
  - Atenuar el movimiento (algunas atenuaciones comúnmente usadas se pueden encontrar en el anexo):
    - Seleccionar la relación de atenuación
      - En base a la zona
      - En base al mecanismo de ruptura
      - En base a la región sísmica
      - En base al tipo de suelo en el sitio
  - Determinar el escenario sísmico (o los escenarios sísmicos) que controlan el análisis.

En el capítulo anterior se pueden observar pocos estudios de análisis determinísticos, esto debido a que no se tiene mucha información detallada de las fallas en Guatemala, muchos de los estudios han sido enfocados en base a los sismos históricos recopilados por autores como Ambraseys, Adams y White.

Una de las ventajas del uso de este análisis es que provee una forma clara de computar los eventos sísmicos con supuestos que son fácilmente desentrañables. Muestra escenarios que son entendibles de una manera explícita. Como desventaja principal no toma en cuenta la incertidumbre, sus conclusiones pueden ser fácilmente derribadas si existen nuevos eventos sísmicos.

### **5.6.2. Análisis sísmico de amenaza probabilístico**

Conocido como PSHA *Probabilistic Seismic Hazard Assesment*, este análisis no considera los escenarios de manera individual, se basa en el análisis de todos los eventos que pueden ocurrir incluyendo la variabilidad aleatoria de los eventos para una magnitud y distancia (que representa una ventaja ante el análisis determinístico). El resultado final es una curva de amenaza de aceleración que muestra la probabilidad de excedencia de varios eventos. Para poder utilizar este tipo de análisis es necesario que exista una desegregación de las amenazas sísmicas para determinar que eventos son los que contribuyen al PSHA.

El resumen del análisis se muestra a continuación:

- Determinar los escenarios sísmicos históricos que pueden afectar al sitio analizado.

- Determinar la recurrencia de los eventos en base a su probabilidad de excedencia, esto se determina en base a la relación de recurrencia como la de Gutenberg-Richter  $\log \lambda_m = a - bm$  donde  $\lambda_m$  es la tasa media de recurrencia (eventos por año) y a y b es determinado de los datos.
- Relacionar los eventos sísmicos en función de la magnitud, la distancia y la incertidumbre.
- Generar la curva de probabilidad de excedencia en función del parámetro del movimiento del suelo.
- En base al estudio se puede generar un espectro de amenaza (ya sea uniforme, medio condicional o condicional) en donde todas las ordenadas tiene la misma probabilidad de excedencia y contiene la contribución de todos los escenarios sísmicos.

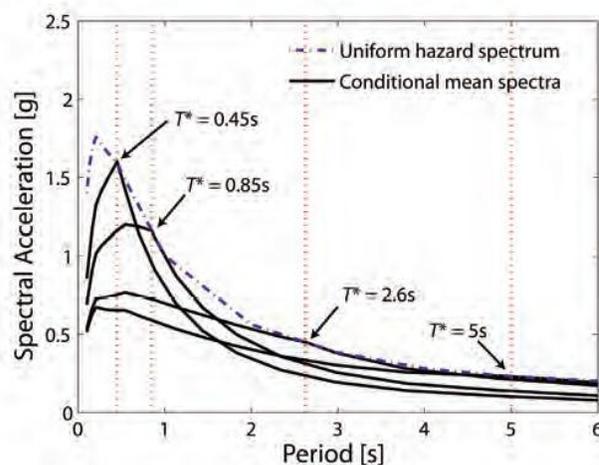
La desagregación es realizada en función de la relación de magnitud-distancia a la falla con la contribución a la amenaza. El método usado es el de McGuire (1995), este define el escenario en términos de magnitud distancia y  $\epsilon$ . Si muchas fuentes dominan el escenario de amenaza en diferentes períodos, entonces diferentes escenarios deben ser definidos para varios períodos.

Bazurro y Cornell propusieron en 1999 una alternativa al proceso de McGuire debido a que su desagregación tiene una debilidad, y es que solo se limita a dar contribuciones de amenaza a valores de los escenarios (magnitud, distancia y  $\epsilon$ ) que aseguren que  $S_a$  sea igualado pero no excedido.

La ventaja del análisis probabilístico es que puede integrar mucha información e incertidumbre para trabajarlos de manera conjunta. La desventaja reside en que des individualiza la información con lo que los valores finales se muestran en términos generales sin saber las contribuciones de los datos en el espectro final. Adicionalmente debido a al análisis cuantitativo y extenso puede llevar a falsas impresiones de precisión.

En el caso del espectro generado por el análisis probabilístico, según la FEMA el espectro UHS resulta conservador para el análisis modal espectral y no resulta adecuado para la generación de registros artificiales, sin embargo el NEHRP lo utiliza para la adecuación de acelerogramas, de la misma forma que el ASCE/SEI 7-10 permite usarlo para el diseño de edificios con el *Reponse History Analysis*.

Figura 26. **Espectro condicional medio**



Fuente: NIST, *Selecting and Scaling Ground Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analysis* p. 57.

Muchas veces este espectro no contempla los parámetros de amplificación del suelo, una de las soluciones en base a las recomendaciones del NEHRPP es crear los espectros en basamento rocoso y desarrollar un análisis de respuesta de sitio con algún programa validado o simplemente aplicar los factores de cómo los del ASCE/SEI 7-10 (para el caso de Guatemala, el AGIES NSE2-10), aunque estos no representen valores específicos del suelo analizado.

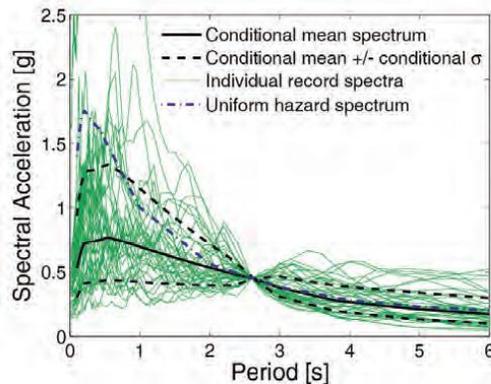
Existen otros espectros creados a partir del análisis probabilístico como el espectro condicional medio (CMS) que condiciona el espectro a un período específico y calcula los otros períodos a la media de los valores, una de las desventajas en la práctica es que no se sabe de manera inicial el período con el cual se va a trabajar, y en el caso del diseño estructural, el período cambia y por lo tanto el espectro también por lo que resulta muy poco práctico en el diseño.

El otro espectro es el Espectro Condicional (CS por *Conditional Spectrum*) que se basa en la variabilidad que existe en los registros generados por el análisis, es un espectro derivado del condicional medio que toma en cuenta la dispersión de los registros y tiene un intervalo de espectros en los cuales se encuentra la dispersión de los datos, este tipo de espectro mantiene la condicionante de conocer el período de la estructura para formular el espectro por lo que tampoco resulta práctico en el diseño de estructuras nuevas en la parte inicial.

Como amenaza sísmica, se pueden utilizar estudios como el de las Normas AGIES que tienen un espectro de amenaza uniforme, el cual está basado en parte en el estudio de RESIS II. Como se menciono anteriormente, el

espectro AGIES NSE2-10 es la base del diseño estructural en la ciudad de Guatemala por acuerdo municipal.

Figura 27. **Espectro condicional, medio y uniforme**



Fuente: NIST, *Selecting and Scaling Ground Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analysis*. p. 58.

## 5.7. Selección de registros

Al tener los escenarios de amenaza sísmica es posible seleccionar los registros. La selección se puede dar de dos formas en base a parámetros sismológicos u en base a parámetros de movimiento fuerte.

La selección en base a los parámetros sismológicos se realizan cuando los escenarios de amenaza sísmica son tomados de manera individual, por lo que aquí entran directamente los escenarios en base al análisis determinístico y los escenarios generados por desagregación del análisis probabilístico. Los escenarios que están representados por un espectro de código (como el del AGIES NSE2-10) u otros espectros UHS, CMS y CS pueden seleccionarse en base a los parámetros de movimiento fuerte.

El ASCE/SEI 7-10 determina que los registros deben ser acelerogramas de eventos registrados (acelerogramas reales), estos deben ser de eventos que tengan magnitud, distancia a la falla y mecanismos de falla que sean consistentes con el sismo máximo considerado. En el caso de no cumplir con los tener los registros suficientes, se pueden utilizar acelerogramas artificiales.

El ASCE/SEI 7-10 no pone mucho énfasis en la selección debido a que el proceso de adecuación resulta más dependiente del espectro objetivo y de una adecuación con el sismo estático equivalente.

Otro de los métodos consiste en seleccionar registros que sus ordenadas espectrales coincidan con el espectro objetivo para un rango de períodos (Idriss 1993), este elimina el proceso de escala pero como se menciono anteriormente, es muy difícil de encontrar registros que se adecuen a todas las condiciones del escenario sísmico.

A la hora de la selección es importante mencionar que la forma espectral no se modifica al cambiar la amplitud en el proceso de adecuación, el parámetro que rige este cambio es la magnitud por lo que se debe prestar bastante atención a la este parámetro en el proceso de selección, además el espectro de respuesta si se ve influenciado claramente por la las condiciones de sitio, en el capítulo 2, se puede observar el efecto que tiene las condiciones de sitio en el espectro de respuesta. No hay que olvidar que la direccionalidad es un tema importante en la selección de los registros.

## **5.8. Adecuación**

La adecuación es la multiplicación del registro por un factor de escala que logra que el acelerograma o espectro de respuesta se ajuste a los valores de

diseño requeridos de la estructura o en un rango de períodos de interés. La adecuación puede realizarse en términos de amplitud, aunque es posible hacer la adecuación en términos del tiempo, la diferencia reside en que al adecuar la amplitud existe un cambio solamente en los valores de máximos del espectro manteniendo la forma y el contenido de frecuencia, contrario a la adecuación en términos del tiempo, con lo cual se tiene un registro totalmente diferente.

La adecuación en términos en el eje del tiempo no cambia el número de ciclos, lo único que hace es aumentar la duración de los ciclos (afectando directamente el contenido de frecuencia), al cambiar el contenido de frecuencia se obtiene un registro diferente y un espectro que cambia su forma y pierde las propiedades del movimiento fuerte original. Acevedo (2003) menciona que deben aprovecharse al máximo los beneficios del registro original, y que por lo tanto al cambiar el contenido de frecuencia, el registro pierde muchas propiedades del registro original y se de distancia del mismo.

Figura 28. **Comparación de acelerograma original y adecuado**

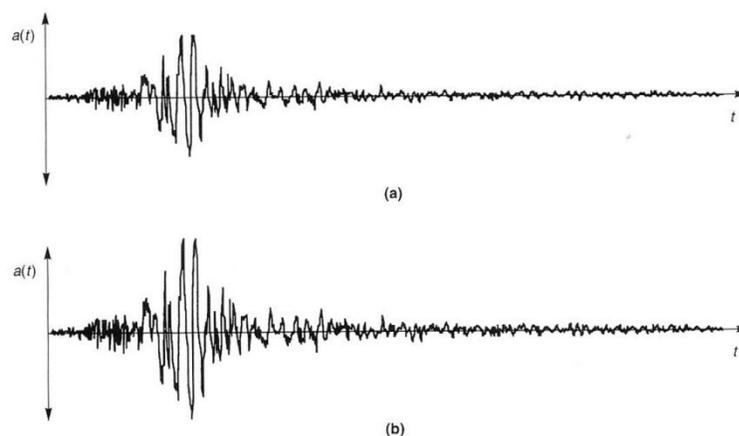


Figure 8.20 (a) Original accelerogram from actual earthquake; (b) rescaled version of original accelerogram in which accelerations were scaled upward by a factor of 1.5 to match target peak acceleration.

Fuente: KRAMER, *Geotechnical Earthquake Engineering*. p. 341.

### **5.8.1. Adecuación en base a parámetros del suelo**

Esta sección muestra los parámetros más utilizados que se usan en la práctica. Se muestran las conclusiones de cada adecuación en base al parámetro utilizado con sus ventajas y desventajas.

#### **5.8.1.1. Adecuación en base al PGA y PGV**

Para este caso los parámetros de la adecuación se basan en la aceleración máxima del suelo, aunque muchas veces se adecua a la velocidad máxima del suelo para determinar la respuesta sísmica de las estructuras. La respuesta de estructuras con períodos menores a aproximadamente 0,5 segundos se ven afectadas de manera proporcional a la aceleración. Estructuras con períodos medianos (0,5 a 3,0 segundos) mantienen valores proporcionales a la velocidad y estructuras de período largo están proporcionalmente relacionadas con el desplazamiento del suelo.

Aunque resulte lógico adecuar las estructuras de períodos cortos a la aceleración y estructuras con períodos medios a la velocidad, algunos estudios (Nau y Hall, 1984) sugieren que el PGA y PGV no son valores adecuados para realizar la adecuación para un rango grande de frecuencias, por lo que concluyeron en que resulta mejor adecuar en relación al período natural de la estructura y no a un intervalo de períodos.

#### **5.8.1.2. Intensidad de Arias y RMS**

Estudios de Nau y Hall (1984) concluyeron que el uso de la intensidad de Arias para la adecuación no constituye una ventaja frente a los parámetros de suelo, ya que simplemente provee reducción en la dispersión dentro de los

límites de frecuencia. De igual manera fueron los resultados presentados por los mismos autores acerca de la adecuación en base a la aceleración RMS, este parámetros no presenta ventaja frente al uso de los parámetros de PGA y PGV.

#### **5.8.1.3. Intensidad de espectro y el índice iv**

Los términos de efectividad de la adecuación en base al espectro de intensidad fueron evaluados en términos de su correlación con las demandas de desplazamientos de ductilidad.

Fue desarrollado por Fajfar et al., (1990) ya que los métodos de escala no tomaban en cuenta la duración del movimiento del suelo. Este factor de escala incluye dos de los parámetros básico de movimiento de suelo (PGV y Duración), aunque estos parámetros no están disponibles en muchos de los registros.

Se encontró que el uso de este parámetro representa una reducción en la dispersión del desplazamiento y la energía de entrada cuando la escala se hace en base a valores de PGV.

#### **5.8.1.4. Aceleración espectral**

Adecuar la aceleración espectral en el período natural de la estructura es la adecuación fundamental de los códigos de diseño. El código neozelandés especifica la adecuación en términos descriptivos en un rango de período de interés de la estructura, el argentino es más específico adecuando a las áreas de los dos espectros entre 0,05 segundos y el período natural de la estructura, el código francés adecua en todo el período para el valor del espectro medio, el

UBC 97 lo adecua en función de un rango vecino al período natural y lo mismo el ASCE/SEI 7-10.

#### **5.8.1.5. En el tiempo**

La escala en el tiempo debe realizarse con bastante cuidado. La forma espectral se puede ver afectada y puede cambiar el registro, reduciendo así la posibilidad de que el registro puede representar un evento real en base a los parámetros establecidos.

#### **5.8.1.6. Transformada de Fourier y Wavelets**

La amplitud de los registros pueden ser modificados de forma que el espectro de respuesta se ajuste al espectro objetivo, este tipo de modificación se llama usualmente *Spectrum Matching* aplicando la transformada de Fourier o la teoría de las Wavelets.

Programas como RASCAL o RSPMATCH pueden realizar esta tarea. En este proceso la amplitud y el tiempo y el registro se descomponen en un número finito de *time histories* con frecuencias de bandas de energía que no se traslapan, estos son adecuados de manera iterativa para que el *time history* ensamblado sea compatible con el espectro objetivo.

Debido a que las amplitudes espectrales son modificadas pero no sus fases, el nuevo registro tiene cierto parecido con el original. En base a esto se puede mencionar que es una buena opción para adecuar registros, pero estos pierden su naturaleza de registros reales.

## 5.9. Evaluación de la selección y escala

Los códigos (exceptuando el neozelandés) no mencionan un factor máximo o mínimo de escala aunque algunos autores propongan números máximos y mínimos como se menciona al principio del capítulo. Acevedo menciona un criterio de aceptación descriptivo para un acelerograma seleccionado y adecuado:

No importando el proceso de adecuación, el espectro resultante debe reflejar un evento sísmico realístico, y esto se logra cuando las características del sismo son consistentes con los registros reales.

Krinitzky y Chang (1979) recomendaron que el análisis siempre debía ser cercano a la unidad en la medida de lo posible, y que estuviera entre valores de 0,25 y 4,0, Vanmarcke (1979) sugirió que los valores dependían de la aplicación a la que se le fuera a dar el análisis, para análisis lineal elástico los valores de Krinitzky y Chang eran recomendados, pero para análisis que incluyen potencial licuefacción, el factor de escala lo recomienda en 0,5 a 2,0.

La efectividad de la adecuación es determinada por el espectro de respuesta obtenido de los registros y su adecuación al espectro de diseño, así como la dispersión presentada en los pares de registros.

El ASCE/SEI 7-10 no tiene un límite en el factor de escala. El código neozelandés aplica dos diferentes factores  $k_1$  y  $k_2$ . El primer factor  $k_1$  es aplicado a cada registro por lo que el factor varía dependiendo de cada registro. El segundo factor  $k_2$  aplica a todos los registros en general. Los valores aceptables de escala se encuentran entre los rangos

$$0,33 < k_1 < 3,0$$

$$1,0 < k_2 < 1,3$$

Estos factores son empíricos y no basados en análisis formal.

El ASCE/SEI 7-10 no enfatiza un valor de escala, simplemente requiere al diseñador que los espectros de respuesta medios de todos los registros estén por encima del espectro de diseño en un intervalo de períodos.

#### **5.10. Comentarios acerca de la selección y escala por medio del ASCE/SEI 7-10**

Se discutió acerca de la metodología de selección y adecuación con Monzón-Despang y Ligorria. Uno de los puntos que no favorecen esta metodología es que resulta demasiado conservadora debido a que la media de los espectros de respuesta de los registros debe estar por encima del espectro de diseño en un intervalo de períodos, perdiendo así valores reales de eventos que tengan similitud con los de la fuente.

Un ejemplo es, si se tiene el registro de un evento mayor tomado en un sitio determinado y se va a evaluar una estructura en un lugar con características muy similares al sitio donde se obtuvo el registro, en base a la metodología del ASCE/SEI el registro debe ser adecuado de igual forma, con lo cual se pierden resultados reales, y en muchos casos pueden obtenerse valores muy conservadores o valores muy por debajo de lo que la fuente sísmica es capaz de generar.

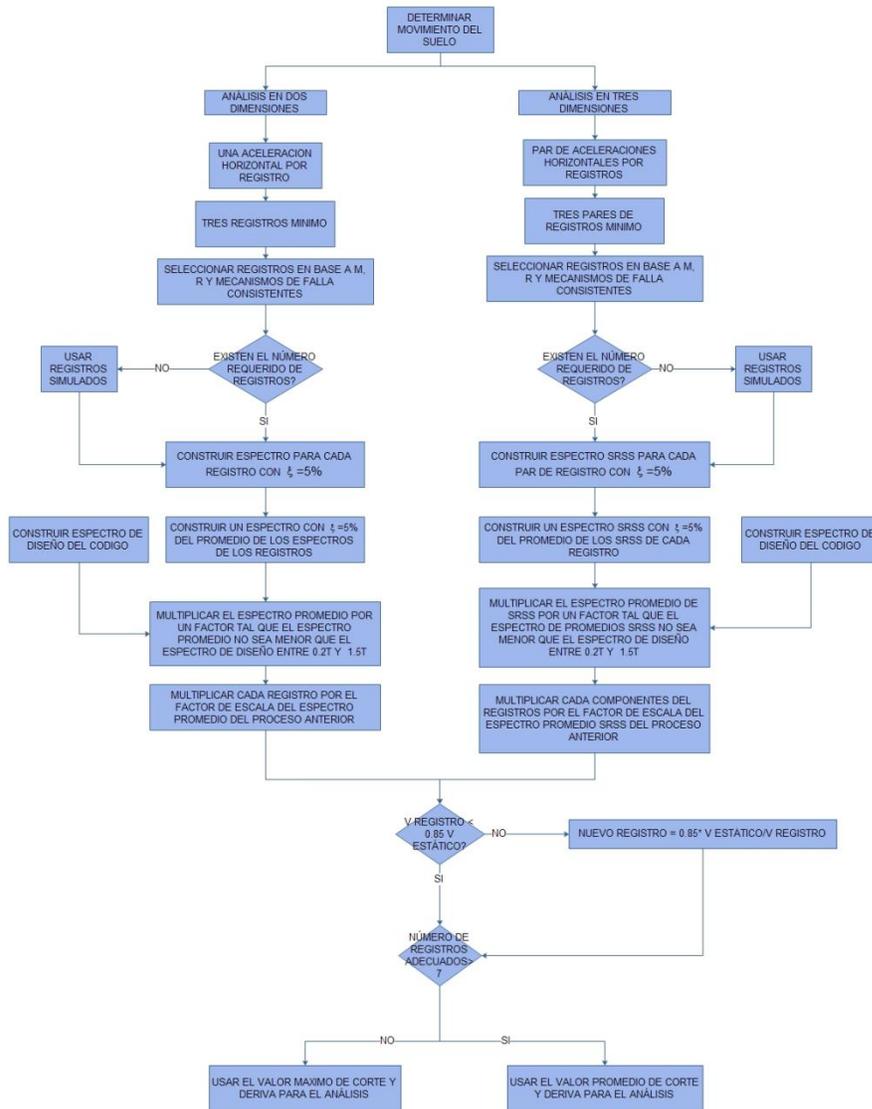
El ASCE/SEI 7-10 solo da las prescripciones para el diseño de estructuras nuevas por este método y la metodología está regida por un número mínimo de

secciones que no deja mucha opción para escoger como lo logra evidenciar el trabajo de Haselton et al. (2012) para la WCEE de 2012 en Lisboa *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses*. Dentro de los temas que se consideran muy importantes para esta investigación se encuentran:

- El espectro genérico que se usa para diseño. El espectro de diseño de en el caso de Guatemala es un espectro genérico UHS. Los espectros UHS contienen todos los valores máximos de la amenaza sísmica para cada período. La probabilidad de que todos esos valores sean excedidos en un mismo evento es desconocido, por lo que se convierte en un espectro objetivo conservador.
- El número de acelerogramas. El ASCE/SEI 7-10 pide como mínimo 3 acelerogramas, utilizando para evaluar la estructura, los valores máximos del análisis. Si se utilizan 7 registros para evaluar, deben evaluarse los valores promedio del análisis. El número de registros del análisis debe ser dependiente de los objetivos del análisis y en base a qué respuesta estructural se busca para el análisis.
- Pulsos de velocidad. Alavi y Krawinkler (2000), Somerville et al., (2004) y otros investigadores han propuesto relaciones para estimar el número apropiado de registros con pulso de velocidad en un set registros de movimiento fuerte para diseño.
- Nivel de movimiento. Los autores del estudio sugieren como recomendación que la carga sísmica se ancle al sismo máximo considerado y no al sismo de diseño.

- Diseñar un método de escala más directo que el de la metodología actual.

Figura 29. Selección y adecuación con base en ASCE/SEI 7-10



Fuente: elaboración propia, con base en ASCE/SEI7-10 capítulo 16.



## **6. EJEMPLOS DE ACELEROGRAMAS APLICABLES AL VALLE DE GUATEMALA**

Los ejemplos no solamente tienen un objetivo didáctico. Esta sección es una investigación que evalúa los espectros de diseño genéricos de la Norma guatemalteca AGIES NSE2-2010 para la ciudad de Guatemala y los compara de forma práctica con los espectros de amenaza sísmica del estudio RESIS II, esto se detalla en la sección de la determinación de la amenaza sísmica.

En esta parte se integran todos los conceptos teóricos de los capítulos del 1 a 6 para utilizarlos de manera práctica. Los capítulos 1 al 4 se utilizan para determinar los parámetros que se utilizan dentro de todo el proceso de selección y adecuación.

Del capítulo 5 se toman los estudios de amenaza sísmica para determinar los parámetros de selección, así como el valor objetivo al que se adecuan los acelerogramas. El capítulo 6 tiene la metodología paso a paso que sirve para realizar estos ejemplos y desarrollar la parte investigativa de este estudio.

Se muestran las definiciones generales para estos ejemplos:

- El análisis de los acelerogramas es lineal.
- Los espectros de respuesta generados son de sistemas de un grado de libertad con 5 por ciento de amortiguamiento.

- Los espectros genéricos de diseño AGIES NSE2-2010 son de 5% de amortiguación.
- Los espectros UHS generados por el estudio de RESIS II también son de 5 por ciento de amortiguación.
- El programas utilizado para procesar los acelerogramas es el PRISM versión 1.1.0, el cual es un software gratuito de la universidad de INHA Corea del Sur.

## **6.1. Determinación del objetivo de la investigación**

El objetivo principal de estos ejemplos es la comparación de los espectros de diseño generados por el AGIES en la Norma NSE2-2010 y los espectros promedio de respuesta de los acelerogramas seleccionados y adecuados al PGA del estudio de amenaza sísmica RESISII de Benito en 2009. De igual manera estos registros pueden ser usados para el análisis paso a paso en el análisis de estructuras.

### **6.1.1. Antecedentes**

Como se menciona en el capítulo 5, el RESIS II surgió en el 2009 como la continuación del estudio de amenaza sísmica RESIS I. El RESIS I consistía en una serie de investigaciones para generar catálogos sísmicos, leyes de atenuación, relaciones empíricas para homogenizar la magnitud y una base general de registros de movimientos fuertes. Estos estudios que fueron realizados por varios investigadores, fueron financiados por la NORAD a través de la CEPREDENAC.

En base a los estudios realizados por RESIS I, el RESIS II consistió en generar estudios de amenaza sísmica por el método probabilístico para generar mapas de amenaza sísmica para la región centroamericana.

El resultado del RESIS II contiene los siguientes resultados:

- Estudio de amenaza sísmica y mapas de aceleración espectral a 0,2 segundos y 1 segundo; para períodos de retorno de 500, 1 000, y 2 500 años para toda la región centroamericana.
- Estudio de amenaza sísmica y mapas de aceleración espectral a 0,2 segundos y 1 segundo; para períodos de retorno de 500, 1 000, y 2 500 años para cada país centroamericano en el cual se incluye Guatemala.
- Estudio de amenaza sísmica y valores de PGA, valores espectrales para períodos a 0,1, 0,2, 0,5, 1 y 2 segundos; para períodos de retorno de 500, 1 000, y 2 500 años para toda cada capital centroamericana.

En 2010, Monzón Despang y el AGIES financiados por el Banco Mundial, generaron una actualización a las normas AGIES de 1996. Dentro de estas normas se encuentra la NSE2-2010 que contiene los parámetros para determinar el espectro genérico de diseño para el análisis de estructuras.

Este espectro genérico está basado en los resultados del RESIS II que fue modificado en base a aspectos prácticos de ingeniería civil y más específicamente a los de la ingeniería estructural.

El espectro de diseño genérico del AGIES NSE2-2010 tiene las siguientes características:

- El espectro genérico en basamento rocoso es una función que depende de la aceleración espectral a 0,2 segundos y la aceleración espectral a 1 segundo.
- La meseta del espectro que Monzón-Despang propuso para la norma es más pequeña que la del RESIS II (ver capítulo 5).
- La probabilidad de ocurrencia en los espectros genéricos de diseño se toma en cuenta por los anclados al sismo de 2500 años de retorno (2% de probabilidad en 50 años).

La reducción de la meseta en los espectros de diseño es relevante debido a que el RESIS II contenía una meseta que resultaba incompatible con los valores de diseño del ASCE y del UBC, normas que son generalmente utilizadas por los estructurales en Guatemala.

Después de algunas conversaciones entre Monzón-Despang y Benito, se acordó que la meseta del espectro de diseño se redujera a un 80 por ciento del valor que muestra RESIS II, con lo cual se obtienen valores más parecidos a los valores que existen en lugares de alta sismicidad de muchas otras normas internacionales.

### **6.1.2. Justificación**

Los registros seleccionados se seleccionan en base a los sismos de control del RESIS II y se adecuan al PGA de ese mismo estudio para obtener espectros promedio y así compararlos con los espectros de diseño genéricos de la norma NSE2-2010.

Esta comparación se realiza debido a que no existe ninguna comprobación práctica del espectro genérico de diseño del AGIES. En base a esta comparación se puede sacar conclusiones de la forma del espectro y observar donde se encuentran los valores de los espectros de respuesta con respecto a los de la norma, si son o no conservadores.

## **6.2. Número de acelerogramas**

Se utilizaron nueve pares de registros en base a la sección 6.4. Se definió utilizar nueve pares debido a que el ASCE/SEI 7-10 en la sección del análisis *Response History* menciona que al tener como mínimo 7 acelerogramas se pueden utilizar los valores de respuesta media para evaluar las estructuras.

Aunque no se está analizando una estructura directamente, el número es razonable. Muy pocos acelerogramas pueden llevar a resultados con mucha incertidumbre. Por el otro lado, una gran cantidad de registros puede reducir la incertidumbre, pero obtener una gran cantidad de registros resulta muy complicado debido a la poca cantidad de registros existentes que puedan ser compatibles con los parámetros de selección.

## **6.3. Fuentes de registros**

Para la obtención de registros se recurrió a dos páginas de registros, una de ellas, la del PEER (*Pacific Earthquake Engineering Research Center*) y el USGS (*United States Geological Survey*), debido a que estos son compatibles con el software utilizado para generar espectros de respuesta y para aplicarles factor de escala.

#### 6.4. Determinación del espectro genérico de diseño AGIES NSE2-2010

A continuación se explican los pasos para construir los espectros genéricos de diseño de la Norma AGIES NSE2-2010, para la ciudad de Guatemala. Existen 3 diferentes espectros en base a la probabilidad de ocurrencia que se mencionan dentro de los siguientes pasos.

- Selección de valores de aceleración en basamento rocoso para la ciudad de Guatemala, el área del valle de Guatemala (que contiene prácticamente toda el área tiene el mismo índice de sismicidad, por lo que estos valores de aceleración son los mismos. Las aceleraciones se pueden encontrar en el anexo A de la norma AGIES NSE2-2010.

$$S_{cr} = 1,50g \text{ (NSE2-2010 Anexo A)}$$

$$S_{1r} = 0,55g \text{ (NSE2-2010 Anexo A)}$$

- Los valores de aceleración en basamento fueron modificados por las condiciones del suelo en el sitio. Guatemala posee suelos que como el TIPO AB en la zona 1 (en el área del centro cívico en donde se encuentra un horst) y suelos tipo D en el área del graben. Se tomó el tipo de suelo D debido a que es el tipo de suelo que se encuentra generalmente en las zonas más superficiales del valle de Guatemala (excluyendo el horst que existen en gran parte de la zona 1 y lugares aledaños).

$$F_a = 1,50 \text{ (NSE2-2010 tabla 4-2)}$$

$$F_v = 1,00 \text{ (NSE2-2010 tabla 4-3)}$$

- De igual forma, los valores de aceleración deben ser modificados si existe alguna falla cercana, los factores están en función de la distancia

del sitio a la falla y el tipo de fuente sísmica. En este caso, debe analizarse los eventos sísmicos probables, si bien es cierto que existen fallas cercanas al sitio, no se ha recabado suficiente información para determinar la tasa de sismicidad de las fallas (de manera oficial). Otro punto es que la sección 4.6 de la Norma NSE2-10 explica que no se puede requerir a los proyectistas que incluyan estas previsiones si no existe información oficialmente reconocida por los entes ediles y estatales; por lo que estos factores se tomaran con un valor de 1.

$N_a = 1,00$  (NSE2-2010 tabla 4-6)

$N_v = 1,00$  (NSE2-2010 tabla 4-7)

Un último factor que se necesita para construir el espectro el factor de escala K, que considera la probabilidad de ocurrencia de los sismos. En la práctica del diseño estructural se utilizan tres probabilidades.

- El 10 por ciento de probabilidad de que el valor de aceleración pueda ser excedido en 50 años, que es llamado sismo de servicio o sismo ordinario y contiene aceleraciones de sismos frecuentes.
- El 5 por ciento de probabilidad de que el valor sea excedido en 50 años, (muchas veces llamado sismo severo o básico en la metodología del AGIES NR-2000.).
- El 2 por ciento de probabilidad de que el valor de aceleración pueda ser excedido en 50 años. Este sismo es llamada Sismo Extremo, Sismo Maximo Considerado o MCE (*Maximun Considered Earthquake*). Este sismo incluye valores de aceleración grandes y la Norma AGIES NSE2-10 no trabaja con este valor para diseño de estructuras.

El factor de escala depende de la clasificación de obra (ver anexo). Para la investigación se evaluarán las tres probabilidades de recurrencia.

$K_d=0,67$  para una probabilidad de ocurrencia de 10 por ciento en 50 años

$K_d=0,80$  para una probabilidad de ocurrencia de 5 por ciento en 50 años

$K_d=1,00$  para una probabilidad de ocurrencia de 2 por ciento en 50 años

Los 3 valores están dados en la sección 4.3.4.1 de la Norma NSE2-2010. Al tener estos todos estos datos, es posible construir el espectro genérico de diseño con las siguientes ecuaciones:

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_v \text{ (NSE sección 4.3.3.3)}$$

$$S_{cd} = S_{cs} * k_d \text{ (NSE2-2010 sección 4.3.4.2)}$$

$$S_{1s} = S_{1r} * k_d \text{ (NSE Sección 4.3.3.3)}$$

$$S_{1d} = S_{1c} * k_d \text{ (NSE2-2010 sección 4.3.4.2)}$$

Las aceleraciones espectrales de diseño están condicionadas por los siguientes valores.

$$S_a(T) = S_{cd} \text{ si } T \leq T_s$$

$$S_a(T) = S_{1d}/T \text{ si } T > T_s$$

$$\text{Donde } T_s = S_{1d}/S_{cd} = 0,55g/1g = 0,55s$$

En la tabla IX muestra el resumen de los valores sísmicos del espectro.

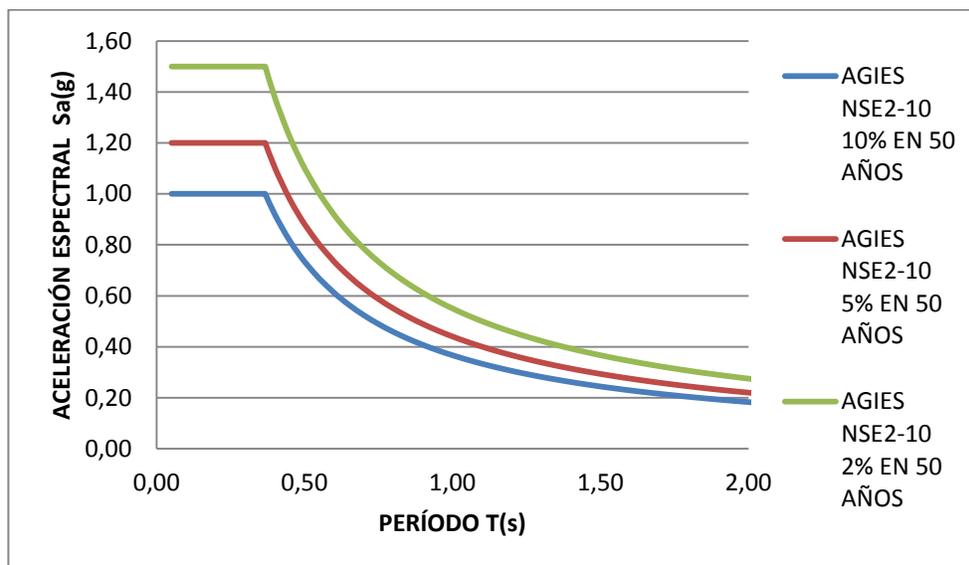
Tabla IX. **Valores de los espectros genéricos de diseño AGIES NSE2 2010 para el valle de Guatemala**

Probabilidad	Scr	S1r	Fa	Fv	Na	Nv	Scs	S1s	Kd	Scd	S1d	Ts
10% en 50 años	1,50	0,55	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	0,825	0,67	1,0	0,55	0,55
5% en 50 años	1,50	0,55	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	0,825	0,8	1,2	0,66	0,55
2% en 50 años	1,50	0,55	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	0,825	1,0	1,5	0,825	0,55

Fuente: elaboración propia en base a los parámetros de AGIES NSE2-2010.

La figura 30 muestra los espectros genéricos de diseño para las tres probabilidades de excedencia para suelo tipo D.

Figura 30. **Espectros de diseño AGIES NSE2-10 para suelo tipo D**



Fuente: elaboración Propia en base a normas AGIES NSE2-10.

El valor de la aceleración pico del suelo del AGIES NSE2-10 se obtiene por la ecuación (4-7) de la sección 4.3.4.3, que corresponde a:

$PGA = AMS = 0,4 * Scd = 1,0 \text{ g (0,4 g)} = 0,4 \text{ g}$  con 10 por ciento de probabilidad de ser excedida en 50 años.

$PGA = AMS = 0,4 * Scd = 1,2 \text{ g (0,4 g)} = 0,48 \text{ g}$  con 10 por ciento de probabilidad de ser excedida en 50 años.

$PGA = AMS = 0,4 * Scd = 1,5 \text{ g (0,4 g)} = 0,60 \text{ g}$  con 10 por ciento de probabilidad de ser excedida en 50 años.

## **6.5. Selección de acelerograma**

La selección es la primera parte del proceso. El proceso de selección, es muy importante debido a que si se hace una buena selección de registros, las probabilidades de que la adecuación este dentro de los límites permisibles aumenta.

### **6.5.1. Parámetros de selección de acelerogramas**

Como se explicó anteriormente en la sección 6.7, existen dos formas de seleccionar acelerogramas, una es con las características sismológicas y otra en base a los parámetros del movimiento (en este caso el espectro), si se selecciona en base a parámetros sismológicos, la magnitud, distancias, mecanismo de falla y las condiciones de sitio son los factores importantes que deben tomarse en cuenta.

Si se selecciona en base a los parámetros del movimiento, deben seleccionarse registros cuyos espectros tengan una forma similar al espectro objetivo (que para este caso, es el espectro AGIES). Se utilizó la selección en base a los parámetros sismológicos.

La información acerca de los sismos de control para seleccionar en base a los parámetros sismológicos, se obtiene de los sismos de control para el estudio de amenaza sísmica en la Ciudad de Guatemala en el estudio de Benito et al., (2009) y en base a los estudios de Monzón-Despang, especialmente el de escenarios sísmicos realizado conjuntamente con Ligorria (2011).

El estudio de Benito et al., (2009) menciona que las aceleraciones en los períodos analizados del espectro de amenaza sísmica para la ciudad de Guatemala, pertenecían principalmente a sismos locales con distancias al sitio de 5 a 15 kilómetros con una magnitud de 6,5 como muestra la tabla X.

Para algunos períodos mayores del espectro, los valores máximos provienen sismos no someros con distancias hipocentrales de 135 a 150 para períodos de retorno de 500 años y 150-180 para períodos de retorno de 2 500 años.

El estudio pone en evidencia que la zona de subducción afecta al valle de Guatemala con la parte profunda, en la zona donde la tiene un mecanismo normal. El mecanismo inverso influye principalmente cuando se va a acercando a la costa con aceleraciones en basamento rocoso de 0,66g.

Para la selección de acelerogramas se toman los parámetros sismológicos. Estos parámetros son los evaluados por Monzón-Despang en el su estudio mencionado en la sección 5.2.

Benito et al., en el estudio de RESIS II muestra 2 sismos de control de la desagregación de la amenaza sísmica en la Ciudad de Guatemala. Uno de ellos es superficial a una distancia de 15 kilómetros con una magnitud Mw de 6,5 y el

segundo es un sismo profundo (entre 135 y 180) con magnitud Mw que va entre 7,0 y 7,5.

Tabla X. **Sismos de control para la selección de registros.**

No.	ESCENARIO	TIPO	R	PROFUNDIDAD	M
A	MOTAGUA	TRANSCURRENTE	35	SOMERO	7,5
B	SANTA CATARINA PINULA	NORMAL	15	SOMERO	6,5
C	JALPATAGUA	NORMAL	10	SOMERO	7,5
D	SUBDUCCIÓN	NORMAL	3	NO SOMERO (150km)	7.5

Fuente: elaboración propia en base al estudio escenarios sísmicos de Monzón y Ligorria; y Benito et al.

### 6.5.2. Fuente de registros de acelerogramas

Las páginas utilizadas para buscar registros de acelerogramas que fueran compatibles con la tabla X fueron: la página del PEER y la página del USGS. Las dos páginas tiene la dirección electrónica en la tabla XIII del capítulo anterior.

Se utilizaron estas dos páginas por varias razones:

- La cantidad de registros que tienen en sus bases de datos.
- La fácil interacción de la página para buscar y seleccionar los acelerogramas.
- Los dos programas poseen filtros, por lo que se puede buscar en función de los parámetros que se deseen.

- La más importante es debido al formato del acelerograma. Muchos acelerogramas vienen en archivos de texto, sin embargo, no todos los programas son capaces de captar la información de los formatos en los cuales están los acelerogramas. El software que se usa para la investigación es capaz de procesar los formatos del PEER y del USGS.

### **6.5.3. Registros seleccionados**

Las bases de datos mencionadas en el capítulo anterior arrojaron varios registros. Estos registros son filtrados principalmente por la magnitud, el tipo de falla y la distancia de la ruptura a la zona evaluada (en este caso, el valle de Guatemala).

Existe un criterio de para seleccionar los acelerogramas. Y esto es que se seleccionaron los acelerogramas de eventos que sucedieron en El Salvador y Nicaragua.

De estos tres eventos se seleccionaron 4 registros. Estos eventos fueron seleccionados debido a que los parámetros sísmicos son similares a los parámetros de los sismos de control que se muestran en la tabla X.

Adicionalmente se seleccionaron acelerogramas de eventos sísmicos que se desarrollaron en Turquía, Estados Unidos e Italia. La tabla XI muestra los eventos que se seleccionaron para utilizarlos en el proyecto de adecuación.

La columna del evento muestra el nombre del evento y el país en donde fue registrado el evento. El ID muestra el número de registro de la base de datos de la pagina del PEER, en el caso de El Salvador en 2001, no tiene el identificador debido a que se obtuvo de la página del USGS.

Tabla XI. **Eventos seleccionados para ejemplos**

	EVENTO	ID	FECHA	PULSO	ESTACIÓN	M	MEC	Rjb	Rrup	SUELO
1	KOCAELI, TURQUÍA	1162	1999	0-0	GOYNUK	7,51	SS	31,7	31,7	424.8
2	DINAR, TURQUÍA	1141	1995	0-0	DINAR	6,4	N	0,0	3,4	219.8
3	IMPERIAL VALLEY USA	191	1979	0-0	VICTORIA	6,53	SS	31,9	31,9	274.5
4	IRPINA, ITALIA	284	1980	0-0	AULETTA	6,9	N	9,5	9,6	1000
5	LANDERS,	884	1992	0-0	PALM SPRINGS AIRP.	7,28	SS	36,1	36,1	207.5
6	MANAGUA, NICARAGUA	95	1972	0-0	MANAGUA, ESSO	6,24	SS	3,5	4,1	288
7	SAN SALVADOR, EL SALVADOR	568	1986	1-1	GEOTECH INVEST CENT.	5,8	SS	2,1	6,3	545
8	EL SALVADOR 13 DE ENERO	-	2001	-	OBSERVATORIO	7,6	N	-	91,0	D
9	EL SALVADOR	569	1986	0-1	NAT. GEOGRAFICAL INST.	5,8	SS	3,7	7,0	350

Fuente: elaboración propia en base a los registros seleccionados del PEER y USGS.

La columna pulso indica si el registro tiene características que indiquen un pulso de velocidad (el cual se puede presentar en sismos donde el sitio analizado es cercano a la falla y el registro se encuentra en la dirección frontal del camino de las ondas). Los pulsos pueden estar presentes en una de las dos componentes de un registro, un ejemplo claro es el registro 9 de la tabla XI que muestra un pulso en una de las direcciones. El registro 7 corresponde al mismo evento del registro 9 solo que registrado en otro lugar, este registro si contiene un pulso en las dos direcciones.

La columna M contiene la magnitud de momento, y la columna MEC el mecanismo de falla de la ruptura donde SS significa falla transcurrente, N para falla normal. Rjb es la distancia Joyner-Boore del sitio a la falla, su definición está dada gráficamente en la figura 11 y Rrup es la distancia del sitio donde se registro el evento a la fuente de ruptura también mostrada gráficamente en la figura antes mencionada.

La columna suelo corresponde a la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros de profundidad y está dada en metros por segundo. En base a esta velocidad, es posible clasificar el suelo para aplicarle factores de amplificación al espectro genérico de diseño de la norma AGIES.

Para el sismo de El Salvador 2001 el suelo indicado es D debido a que no se tiene información de la velocidad de onda de corte, pero el registro si menciona que es un suelo firme, es por eso que se le asigno ese tipo de suelo.

Al descargar los registros originales (es decir, sin adecuar) de la página (los acelerogramas se encuentran en el Apéndice), se obtienen los espectros de respuesta de los acelerogramas. El PEER tiene una opción para descargar los espectros de respuesta de los registros seleccionados.

En este caso se utilizó el programa PRISM para obtener los espectros de respuesta. Una de las desventajas de este programa es, que los espectros de respuesta solo se muestran hasta 4 segundos. Aun así se opta por este programa debido a que no existen muchas estructuras que tengan sus primeros períodos de vibración estén más allá de este valor. En caso de que se analice una estructura muy flexible, debe utilizarse otro programa como el Seismosignal para poder obtener los espectros de respuesta.

El paquete del registro viene en tríos (2 componentes horizontales perpendiculares y una componente vertical), para esta investigación se trabaja con solo 2 componentes, y principalmente con el promedio de las 2.

Esto debido a que se trabaja con una serie de valores para representar la estación en vez de 2 y también porque muchos espectros no están suavizados

por lo que tienen varios picos en ciertos períodos y son más complicados de evaluar con respecto a los espectros de diseño.

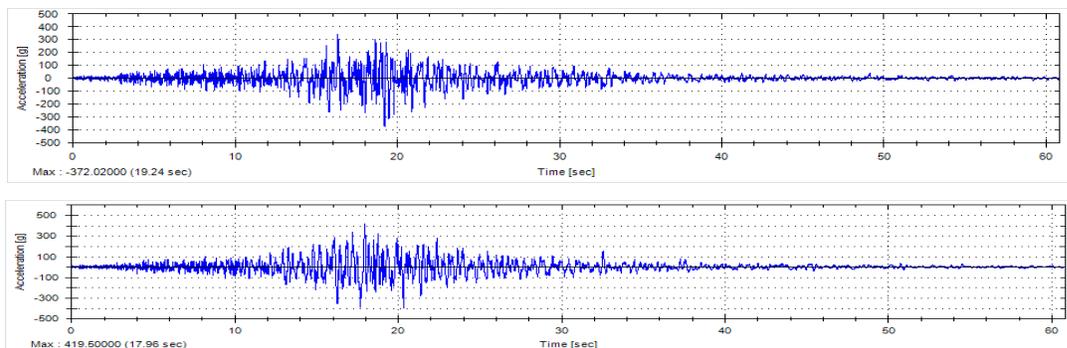
#### 6.5.4. Acelerogramas seleccionados para la adecuación

Las acelerogramas mostrados a continuación, corresponden a acelerogramas no adecuados con anterioridad. Únicamente están corregidos (proceso necesario para eliminarle los ruidos como la vibración ambiental).

Los acelerogramas fueron tomados de las bases de datos del PEER y el USGS, estos acelerogramas fueron procesados utilizando el programa PRISM para obtener las aceleraciones pico y los espectros de respuesta de cada registro.

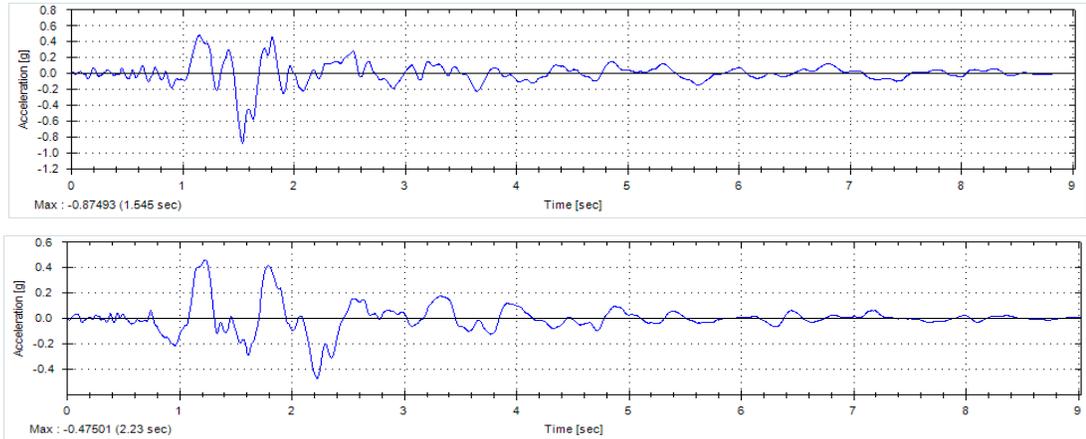
Las aceleraciones están en términos de la gravedad (g). Se muestran dos componentes perpendiculares registradas por los aparatos en los eventos sísmicos.

Figura 31. **Acelerogramas originales San Salvador 13 de enero 2001**



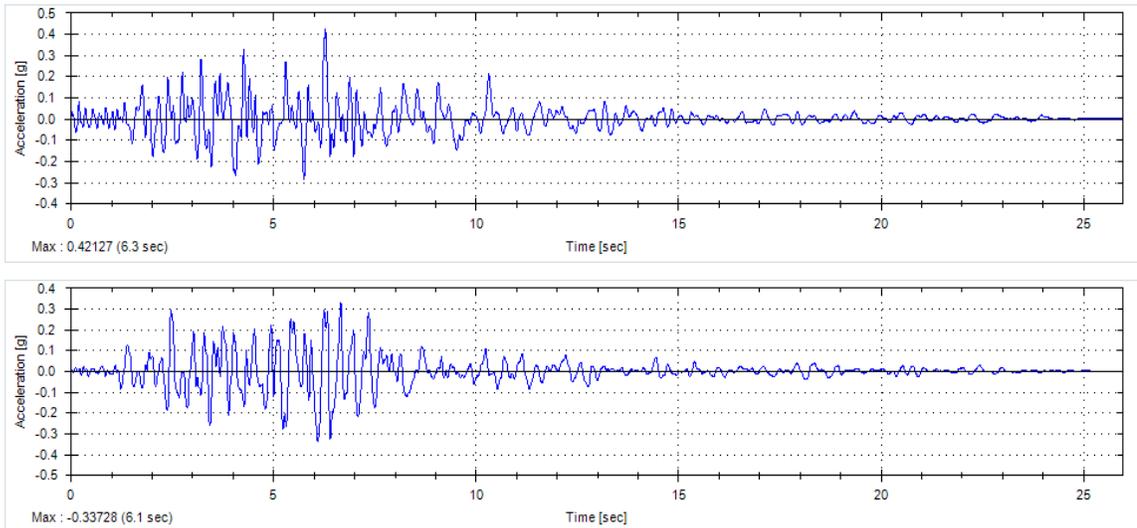
Fuente: base de datos de movimiento fuerte del USGS (*United States Geological Survey*) y generados por el programa PRISM.

Figura 32. **Acelerogramas originales San Salvador 1986 Geotécnico**



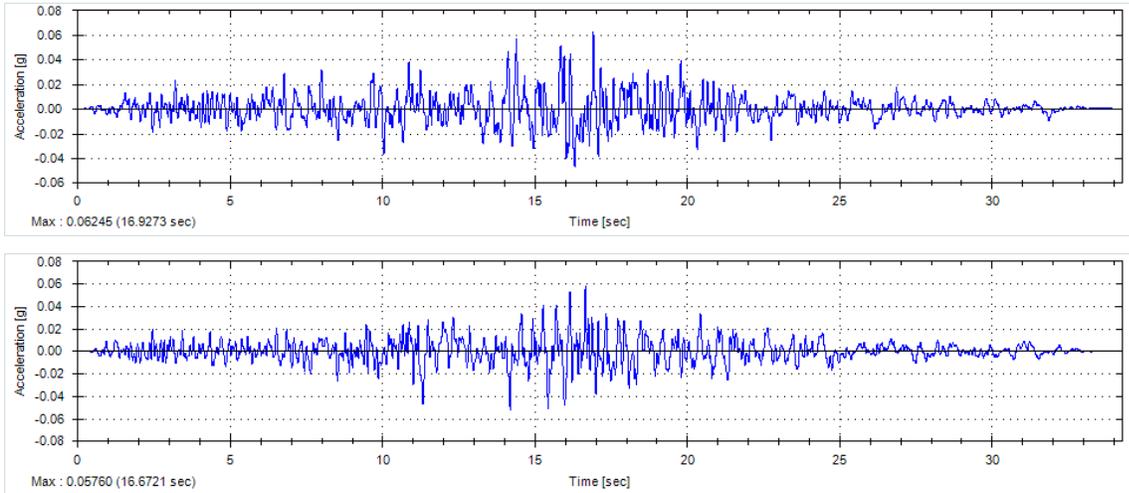
Fuente: base de datos de movimiento fuerte del PEER (*PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH Center*) y generados con el programa PRISM.

Figura 33. **Acelerogramas originales Managua 1972**



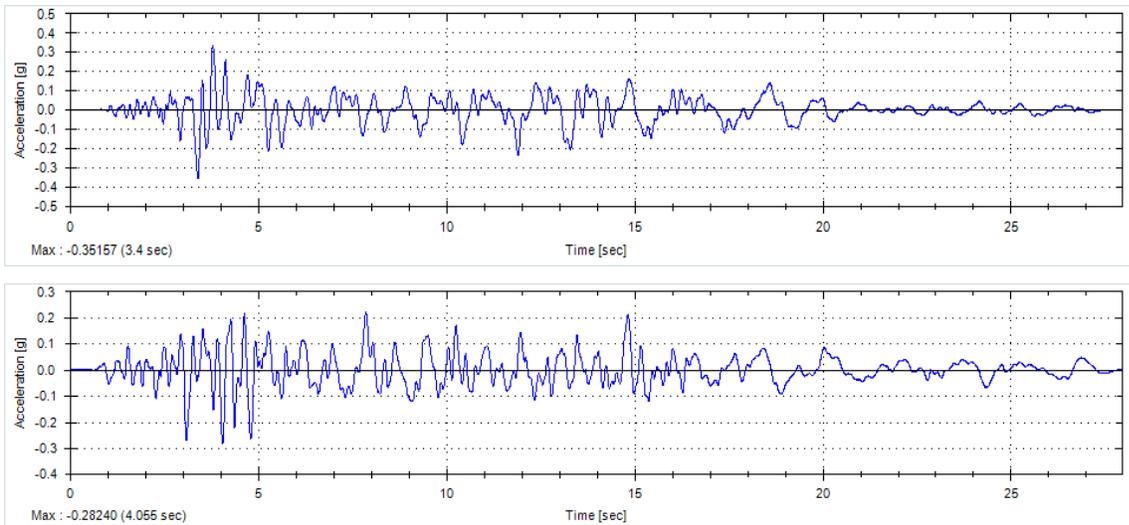
Fuente: base de datos de movimiento fuerte del PEER (*PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH Center*) y generados con el programa PRISM.

**Figura 34. Acelerogramas originales Irpina 1980**



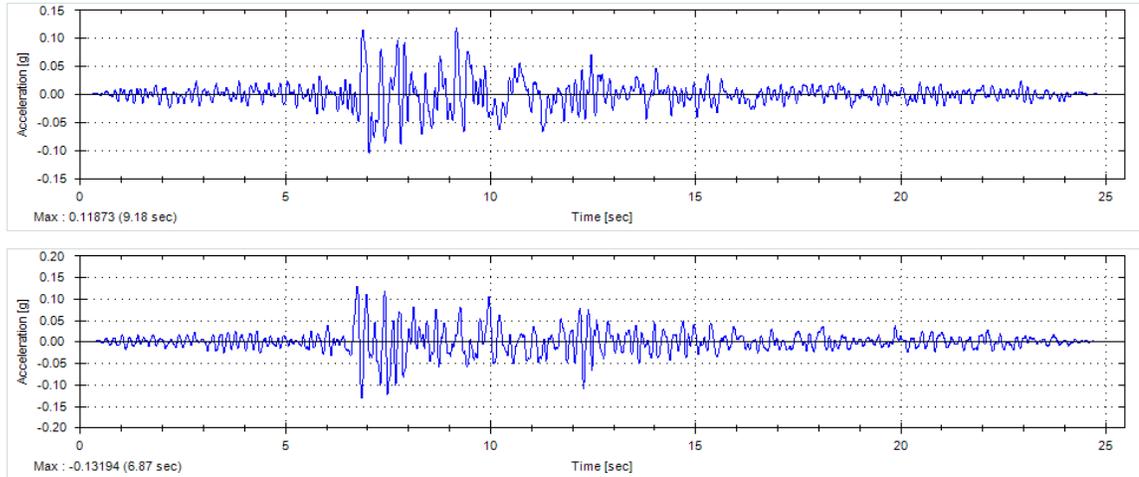
Fuente: base de datos de movimiento fuerte del PEER (*PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH Center*) y generados con el programa PRISM.

**Figura 35. Acelerogramas originales Dinar 1995**



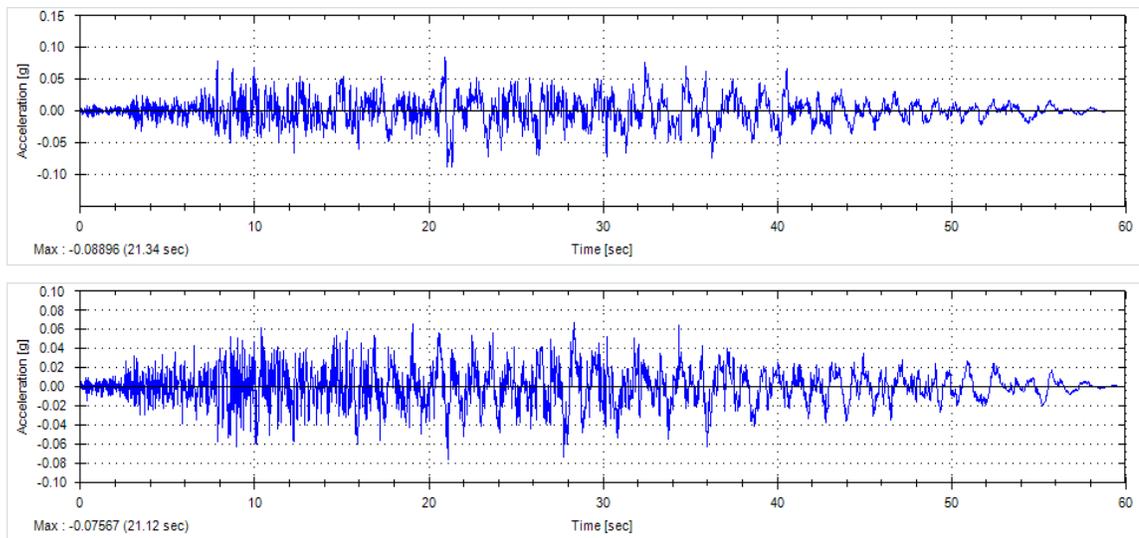
Fuente: base de datos de movimiento fuerte del PEER (*PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH Center*) y generados con el programa PRISM.

Figura 36. **Acelerogramas originales Kocaeli 1999**



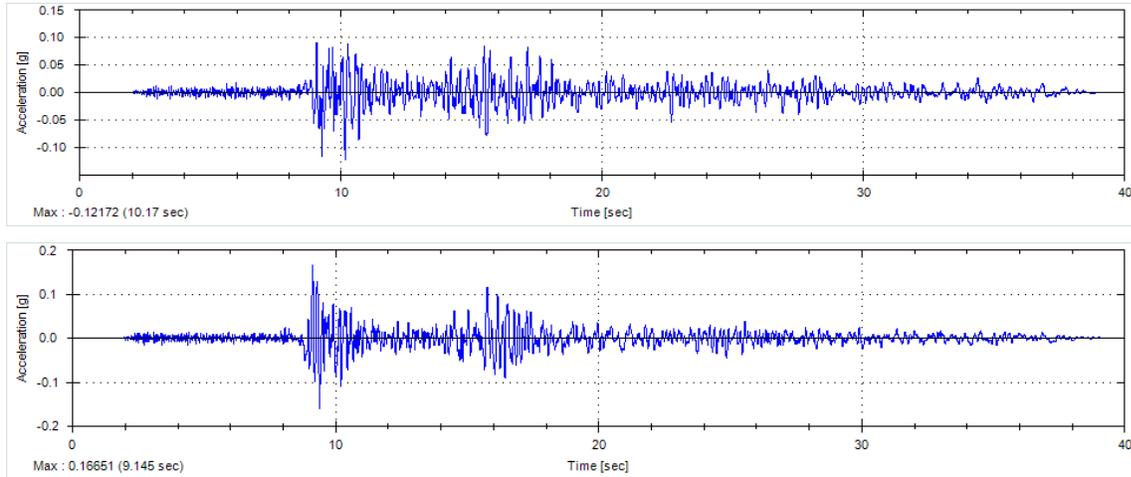
Fuente: base de datos de movimiento fuerte del PEER (*PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH Center*) y generados con el programa PRISM.

Figura 37. **Acelerogramas originales Landers 1992**



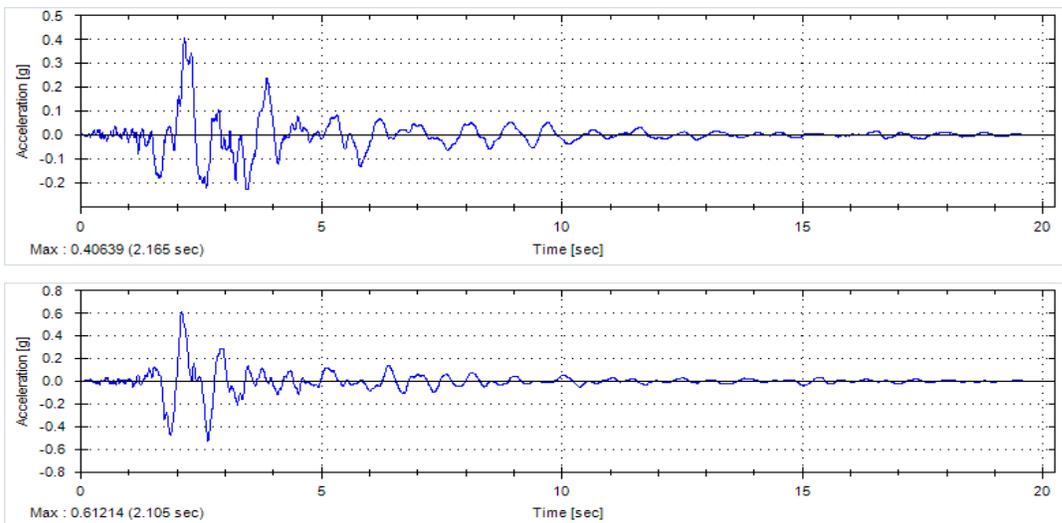
Fuente: base de datos de movimiento fuerte del PEER (*PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH Center*) y generados con el programa PRISM.

Figura 38. **Acelerogramas original Imperial Valley 1979**



Fuente: Base de datos de movimiento fuerte del PEER (*PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH Center*) y generados con el programa PRISM.

Figura 39. **Acelerogramas originales San Salvador 1986 Geográfico**

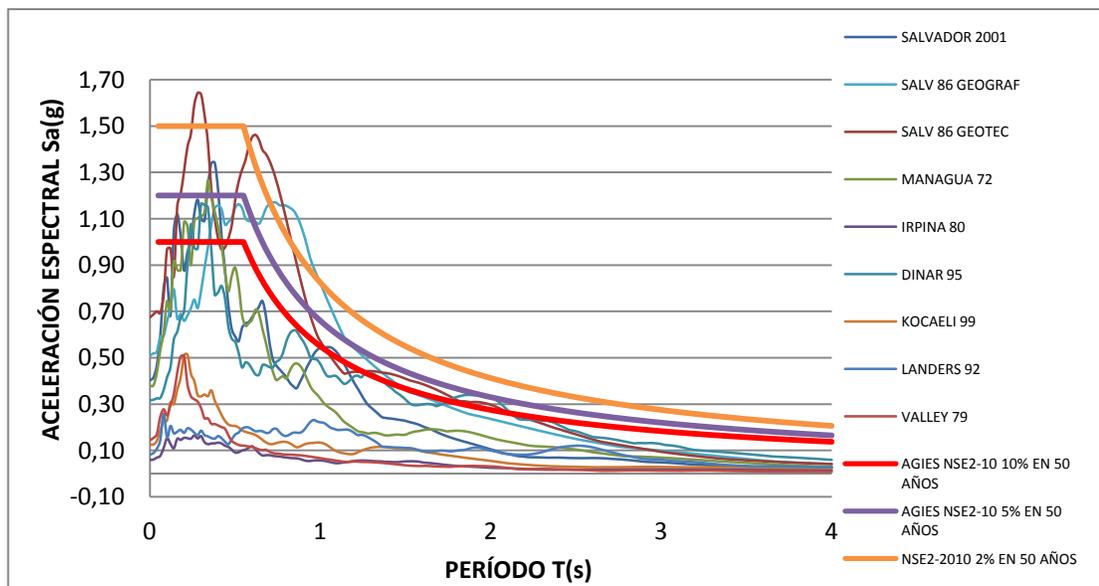


Fuente: base de datos de movimiento fuerte del PEER (*PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH Center*) y generados con el programa PRISM.

Los registros fueron procesados por el programa para obtener los parámetros de respuesta. Existen varios parámetros que se pueden obtener en el análisis. El programa tiene la capacidad de adecuar automáticamente a un PGA, cortar el registro. Realizar el análisis paso a paso (lineal y no lineal) para un sistema de un grado de libertad si se introducen los parámetros necesarios.

Dentro de los parámetros de respuesta que puede generar el programa se encuentran espectros de respuesta elásticos o con ductilidad constante, historia de aceleraciones, velocidades y desplazamientos de sistema.

Figura 40. **Comparación de espectros de respuesta promedio y espectro de NSE2-10**



Fuente: elaboración propia en base a los espectros generados por el programa PRISM.

El parámetro que se usa para esta investigación es el espectro de respuesta. Esto debido a que la comparación será contra el espectro de diseño genérico de la norma. La figura 40 muestra los espectros de respuesta promedio de cada par de acelerogramas seleccionados. En esta figura se muestra el espectro de diseño genérico para comparar los valores de los acelerogramas originales.

Los espectros de respuesta son los valores promedio de cada par de acelerogramas de cada evento y son mostradas con líneas más delgadas. Los espectros genéricos de diseño son las líneas más gruesas.

Los valores de aceleración máxima de suelo (AMS o PGA) corresponden a la ordenada espectral para el período cero, como se hace en la práctica general. La tabla XII muestra los valores PGA de los registros, el promedio y la comparación con los valores PGA del espectro de diseño.

Observación a la gráfica anterior. En ningún espectro para un período mayor que aproximadamente 1,2 segundos ninguna aceleración espectral es mayor que los valores del espectro de diseño para una probabilidad de ocurrencia del 5 por ciento en 50 años que corresponde a la línea azul.

Suena congruente si se observa que son registros de eventos que no son considerados ordinarios y que tienen una probabilidad de ocurrencia un poco más pequeña sin llegar a saber si son auténticamente sismos máximos esperados.

Tabla XII. **Valores PGA de espectros de respuesta**

<b>EVENTO</b>	<b>PGA (g) PROM</b>
SALVADOR 2001	0,404
SALVADOR 86 GEOGRÁFICO	0,509
SALVADOR 86 GEOTÉCNICO	0,675
MANAGUA 72	0,379
IRPINA 80	0,060
DINAR 95	0,317
KOCAELI 99	0,125
LANDERS 92	0,082
VALLEY 79	0,144
<b>MEDIA</b>	<b>0,300</b>
RESIS II 10% EN 50 AÑOS	0,524
RESIS II 5% EN 50 AÑOS	0,646
RESIS II 2% EN 50 AÑOS	0,840

Fuente: elaboración propia en base a resultados de espectros con el programa PRISM.

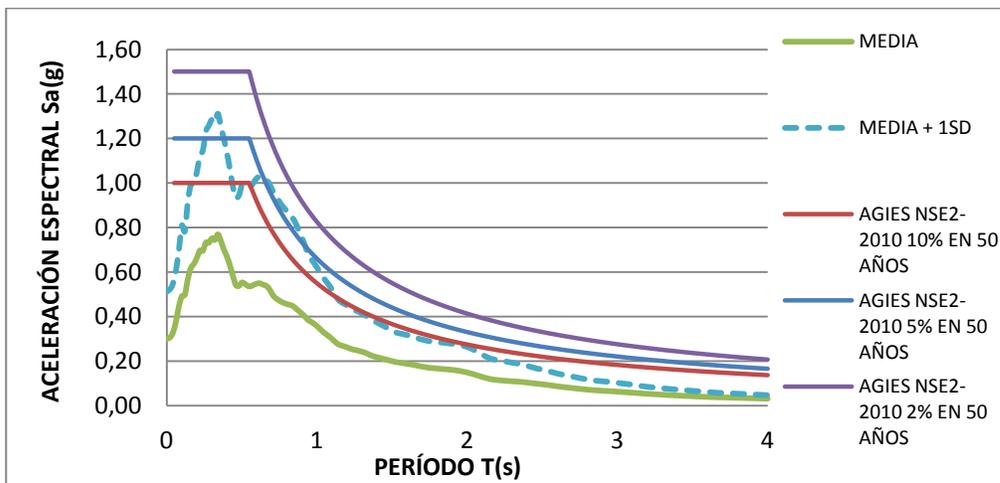
La evaluación de los registros se hace de forma integral tomando la media de todos los registros promedio. Esta parte de la metodología es igual a la del ASCE/SEI 7-10 que pide que para más de siete acelerogramas se tome la respuesta de media de los acelerogramas.

La respuesta media muestra la respuesta media ante todos los eventos. Esto es perfectamente aceptable siempre y cuando la dispersión de los datos no sea alta. Tomando los valores individuales se vuelve un análisis muy conservador y se recomendaría para evaluar el desempeño máximo de los componentes de la estructura ante un evento. No para el diseño de estructuras.

La figura 41 muestra el promedio y también muestra un espectro promedio más una desviación estándar para representar la variabilidad de los datos. La

desviación se da principalmente en los períodos de la meseta y el inicio de la cola del espectro y disminuye conforme aumenta el período.

Figura 41. **Comparación del espectro de respuesta promedio y AGIES**



Fuente: elaboración propia en base a los registros promediados y norma AGIES NSE2-2010.

## 6.6. Adecuación acelerogramas al parámetro PGA

Al tener los espectros de respuesta, se adecuan los registros al PGA del RESIS II. Por lo que el factor que debe aplicarse a los acelerogramas para que tengan el mismo PGA que el estudio es:

$$FA = \frac{PGA_a}{PGA_o}$$

Donde FA corresponde al factor que se debe aplicar al acelerograma para obtener acelerogramas adecuados al PGA.  $PGA_a$  es el PGA a adecuar, en este caso, la aceleración pico del RESIS II dependiendo de la probabilidad de excedencia.  $PGA_o$  corresponde al PGA del registro original.

Tabla XIII. **Factores para adecuar al PGA de AGIES NSE2-10**

<b>EVENTO</b>	<b>PGA (g)</b>	<b>FA 10% en 50 años</b>	<b>FA 5% en 50 años</b>	<b>FA 2% en 50 años</b>
SALVADOR 2001	0,40	1,30	1,60	2,08
SALVADOR 86 GEOGRÁFICO	0,51	1,03	1,27	1,65
SALVADOR 86 GEOTÉCNICO	0,67	0,78	0,96	1,24
MANAGUA 72	0,38	1,38	1,70	2,21
IRPINA 80	0,06	8,73	10,76	13,99
DINAR 95	0,32	1,65	2,04	2,65
KOCAELI 99	0,13	4,18	5,15	6,70
LANDERS 92	0,08	6,37	7,85	10,20
VALLEY 79	0,14	3,64	4,48	5,83
PROMEDIO	0,30	1,75	2,16	2,80
RESIS II 10% EN 50 AÑOS	0,52	1,00	-	-
RESIS II 5% EN 50 AÑOS	0,65	-	1,00	-
RESIS II 2% EN 50 AÑOS	0,84	-	-	1,00

Fuente: elaboración propia en base a los valores PGA de los registros.

La tabla XIII muestra los valores PGA y los factores de escala para que todos los espectros de los registros tengan el mismo PGA del RESIS II.

Como se menciona en el capítulo 5, al aplicar un mismo factor en los registros, solamente aumenta la amplitud de los registros de aceleración de los acelerogramas, y de la misma forma que aumentan las ordenadas espectrales de los registros sin cambiar la forma del espectro.

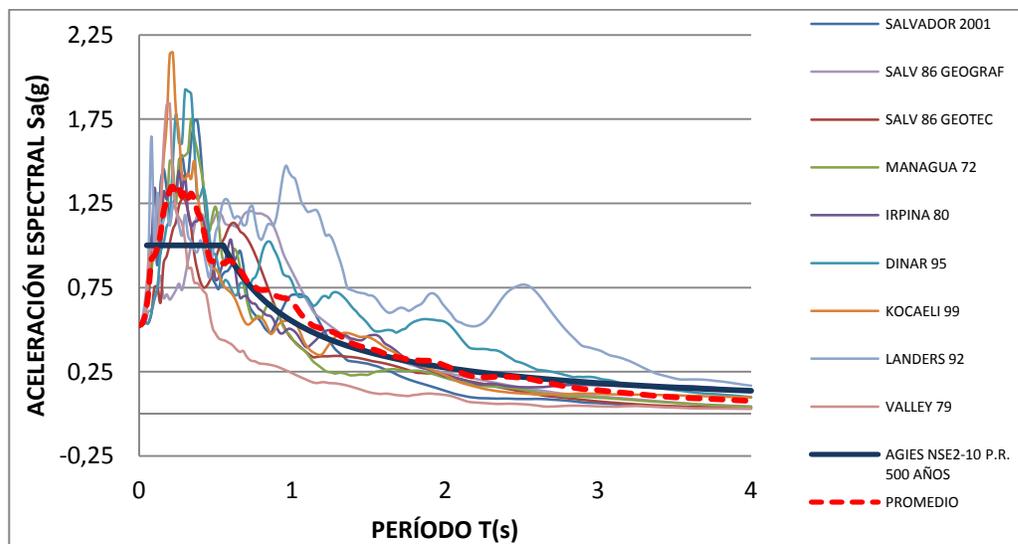
Si se observan los factores de escala para adecuar, se evidencia que los eventos regionales son los que tiene un factor de escala cercano a uno, sin tomar en cuenta Dinar 1995, todos los demás registros son mayores a 2, lo que muestra una consistencia con la tectónica regional.

Para obtener los acelerogramas adecuados al PGA del RESIS II, se debe multiplicar cada uno de los valores de aceleración por el factor de su respectivo registro. De esta manera se vuelve a realizar el análisis y se debe generar un nuevo espectro de respuesta.

## 6.7. Resultados de la adecuación

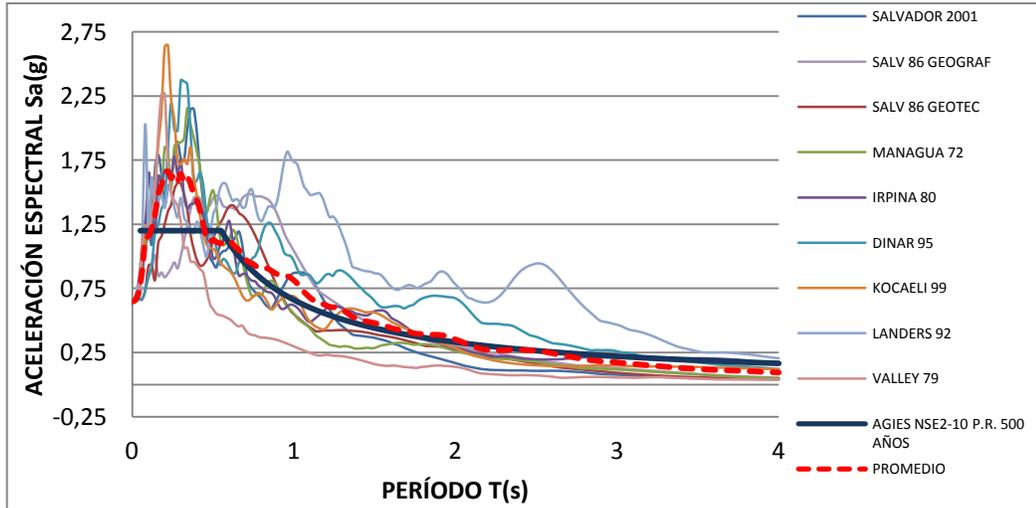
Se aplicaron los factores de escala a los registros originales, las figuras 42 a 44 muestran los espectros de respuesta adecuados al PGA del RESIS II dependiendo de su probabilidad de excedencia. Para todos los casos, en el período de 0 segundos, la aceleración espectral es la misma, ya que como se menciona anteriormente, la aceleración espectral en este período representa el PGA (en estos casos, los PGAs de RESISII).

Figura 42. **Espectros adecuados al PGA de RESIS II y AGIES NSE2-2010 para 10% de probabilidad de excedencia en 50 años**



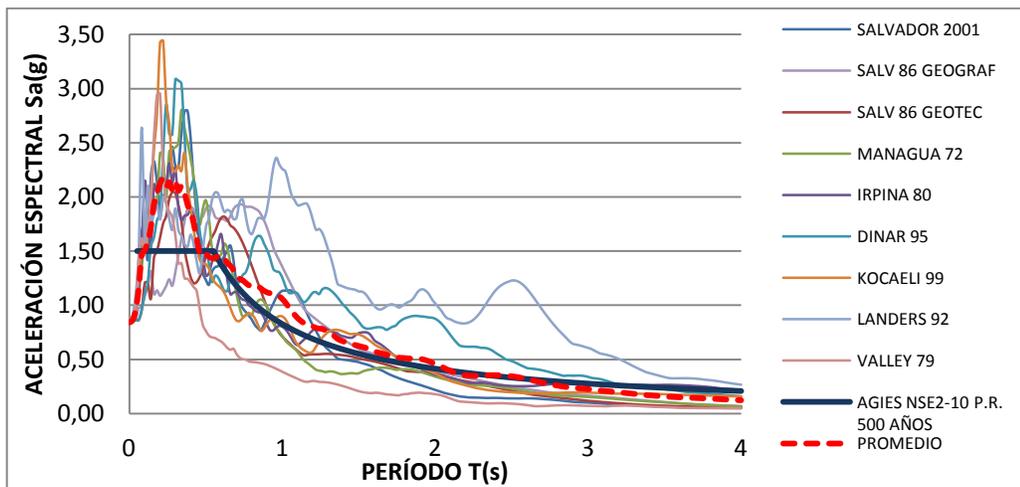
Fuente: elaboración propia utilizando los valores generados por programa PRISM.

Figura 43. **Espectros adecuados al PGA de RESIS II y AGIES NSE2-2010 para 5% de probabilidad de excedencia en 50 años**



Fuente: elaboración propia utilizando los valores generados por programa PRISM.

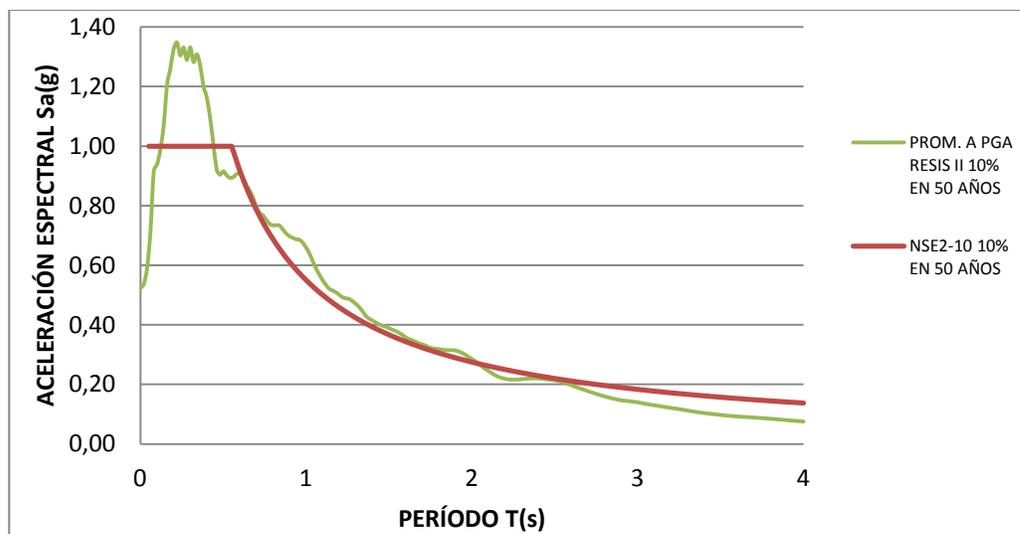
Figura 44. **Espectros adecuados al PGA de RESIS II y AGIES NSE2-2010 para 2% de probabilidad de excedencia en 50 años**



Fuente: elaboración propia en base a los resultados del programa PRISM.

A simple vista existe una gran variabilidad de respuestas que se dan principalmente en la meseta del espectro genérico de diseño y en el inicio de la cola. Las figuras 45 a 47 muestran la comparación de espectros promedios con los espectros genéricos de respuesta.

Figura 45. **Espectro promedio adecuados a PGA de RESIS II y espectro NSE2-2010 10% de probabilidad de excedencia en 50 años**

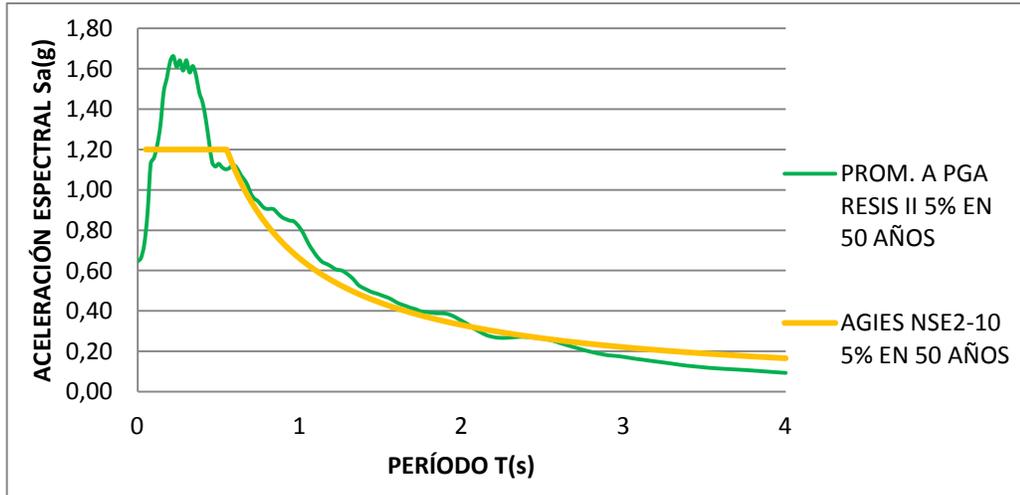


Fuente: elaboración propia utilizando los valores generados por programa PRISM.

Las gráficas 46 y 47 como se ha mencionado anteriormente, no tienen un cambio de forma de pesar de que tienen espectros con otra probabilidad de ocurrencia, difieren en amplitud.

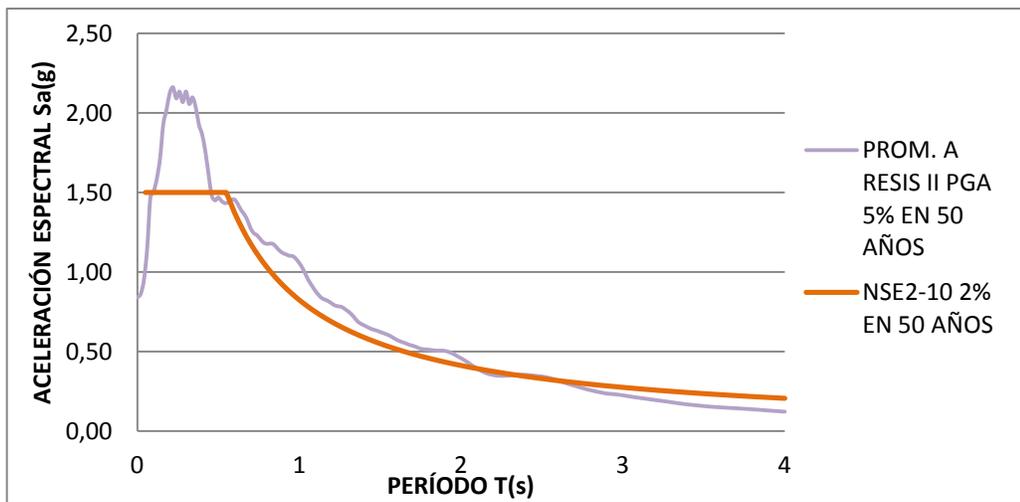
Las características principales en estas gráficas radican en más alto del espectro en períodos cortos, principalmente en donde se encuentra la meseta del espectro y en algunos valores entre el inicio de la cola del espectro y el período de 2 segundos.

Figura 46. **Espectro promedio adecuados a PGA de RESIS II y espectro NSE2-2010 5% de probabilidad de excedencia en 50 años**



Fuente: elaboración propia utilizando los valores generados por programa PRISM.

Figura 47. **Espectro promedio adecuados a PGA de RESIS II y espectro NSE2-2010 2% de probabilidad de excedencia en 50 años**



Fuente: elaboración propia utilizando los valores generados por programa PRISM.

Como observaciones principales a estas gráficas se tiene que:

- Las aceleraciones espectrales del espectro de respuesta son sustancialmente más grandes que la meseta del espectro genérico de diseño.
- Los valores del espectro de respuesta para períodos intermedios en relación a los valores del espectro genérico de diseño son ligeramente más grandes que los valores del espectro genérico para períodos intermedios.
- Los valores del espectro de respuesta son menores que las del espectro genérico para períodos largos.

En el caso de los períodos cortos, como se menciono anteriormente el código recorta los valores de los estudios sismológicos ya que seria casi imposible diseñar con esos valores picos. Las Normas AGIES NSE2-2010 tienen un recorte de la meseta de los resultados del RESIS II dejándolo en una proporción del 0,8.

Para evaluar la compatibilidad del procedimiento de reducción de la meseta del espectro, se promediaron las aceleraciones del espectro de respuesta promedio en el rango de la meseta del espectro de diseño (entre 0,2 y 0,55 segundos). Este promedio se hizo para las tres probabilidades de ocurrencia. Luego se compara la proporción de la meseta del espectro genérico de diseño con las aceleraciones promedio del rango de la meseta.

La tabla XIV muestra la comparación de la meseta con el promedio de aceleración en los rangos que tiene la meseta de AGIES (Entre 0,2 y 0,55 segundos).

Tabla XIV. **Comparación de aceleraciones espectrales entre 0,2 y 0,5 segundos**

PERÍODO	Sa PARA 10% EN 50 AÑOS	Sa PARA 5% EN 50 AÑOS	Sa PARA 2% EN 50 AÑOS
0,20	1.33	1.64	2,13
0,22	1.35	1.66	2,16
0,24	1.30	1.61	2,09
0,26	1.33	1.64	2,13
0,28	1,29	1,59	2,07
0,30	1,33	1,64	2,14
0,32	1,28	1,58	2,06
0,34	1,31	1,61	2,10
0,36	1,27	1,57	2,04
0,38	1,20	1,48	1,93
0,40	1,16	1,43	1,86
0,42	1,10	1,35	1,76
0,44	1,01	1,24	1,61
0,46	0,92	1,13	1,48
0,48	0,90	1,12	1,45
0,50	0,92	1,13	1,47
0,52	0,90	1,11	1,45
0,54	0,89	1,10	1,43
PROMEDIO 0,2<Sa<0,55	1,16	1,42	1,85
MESETA NSE2-2010	1,00	1,20	1,50
PROMEDIO/MESETA	1,16	1,19	1,23
MESETA/PROMEDIO	0,87	0,84	0,81

Fuente: elaboración propia de los espectros de respuesta generados.

Se ve en la aceleración espectral para 2 por ciento de probabilidad de excedencia en 50 años, la proporción de la media de aceleraciones espectrales

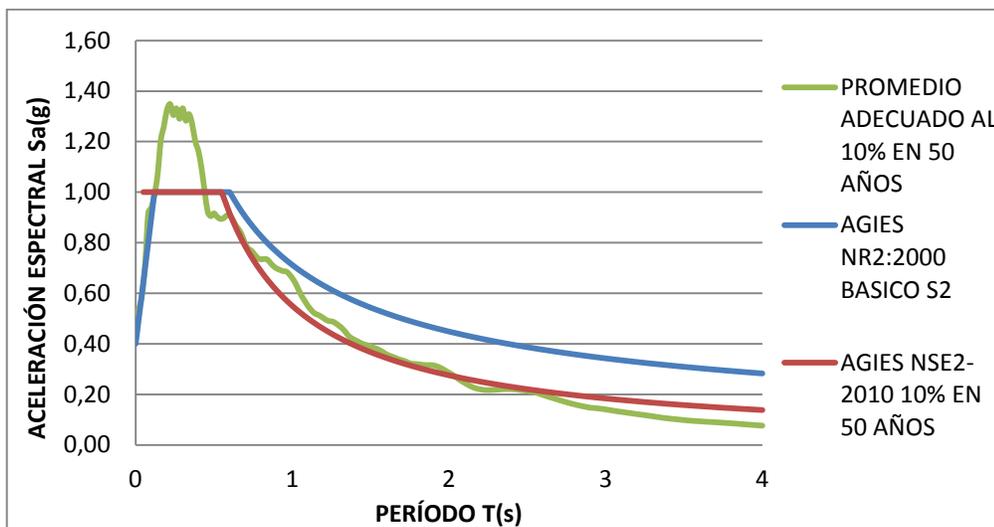
de los acelerogramas con respecto a la meseta del AGIES es de 0,8, mismo valor que se uso para disminuir las aceleraciones espectrales de los períodos cortos del estudio de RESIS II.

La cola de los espectros sigue la misma forma que la del espectro genérico de diseño con valores muy similares, por lo que se podría considerar que la disminución del espectro en la cola (que está en proporción de  $1/T$ ) es apropiada en base al análisis realizado.

Acerca de la cola del espectro, las normas anteriores a la NSE2-2010, las AGIES NR-2000 estaban basadas la norma ATC de años anteriores que sugerían una función distinta a la proporción  $1/T$ , la ATC proponía una disminución de  $1/T^{(2/3)}$  con lo cual da un espectro con una cola que cae con menor proporción.

Para evaluar la diferencia de formas en la cola del espectro, se armó el espectro genérico de diseño de la norma recomendada del AGIES en 2000. El espectro mostrado es un sismo básico que puede ser el análogo al sismo ordinario, que es con el que se diseñan los edificios muy pequeños en la práctica formal.

Figura 48. Espectro de respuesta y Normas NSE2-2010 y NR-2000

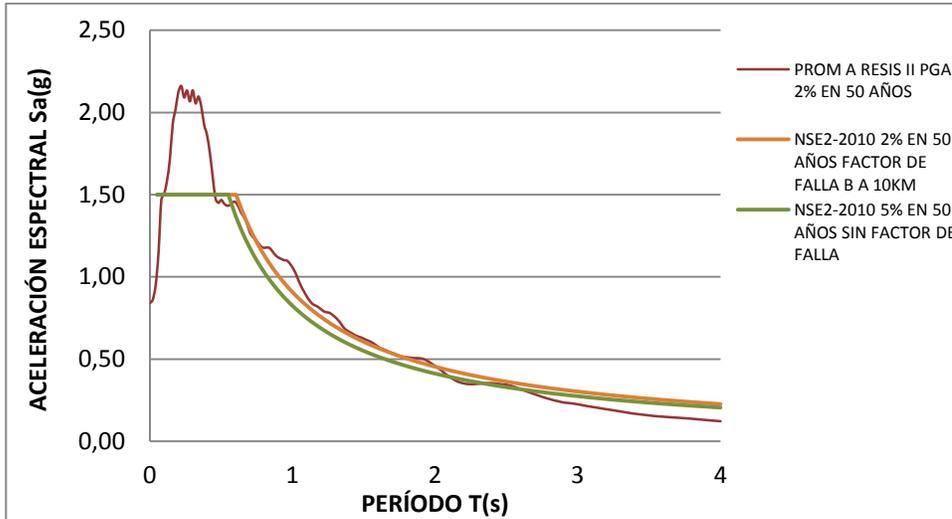


Fuente: elaboración propia en base a AGIES NSE2-2010, NR-2000 y datos generados de del software PRISM.

Como se puede observar, la cola del espectro era muy conservadora. Esto incide en el diseño de estructuras generalmente altas y que generalmente tienen altos períodos de vibración porque los cortes resultan muy altos. La ASCE/SEI 7-05 tiene incluso una disminución de la proporción  $1/T$  en períodos muy largos, del orden de 10 segundos (100 niveles, aproximado) y lo disminuye a una proporción de  $1/T^2$ .

Como última comparación, se evalúa el espectro de respuesta adecuado al PGA del RESIS II contra el espectro genérico de diseño de la NSE2-2010 pero con la aplicación de factores de falla cercana aplicados. Suponiendo un tipo de falla B a 5 kilómetros. La figura 49 muestra los resultados de esta comparación. Se tomó en cuenta solo el espectro genérico para 2 por ciento de probabilidad en 50 años ya la forma se mantiene para cualquier otra probabilidad de ocurrencia, la diferencia radica en la amplitud.

Figura 49. **Espectro promedio y NSE2-2010 falla tipo B a 5 kilómetros**



Fuente: elaboración propia en base a las respuestas generadas por el software PRISM y AGIES NSE2-2010.

En el caso de tipo de la gráfica anterior se observa que muchas más aceleraciones espectrales quedan contenidas dentro del espectro genérico de diseño cuando se le aplica el factor de falla cerca.

Este factor resulta ser congruente se toma en cuenta que los sismos de control para períodos cortos son de fallas que ocurren a menos de 15 kilómetros en cualquier punto de la ciudad de Guatemala.

El factor para una falla tipo B a 10 kilómetros afecta solamente la cola del espectro como es observable en la figura 48. Para futuras investigaciones es necesario investigar si estos factores que son genéricos (y heredados del ASCE/SEI 7-05) son congruentes para la amenaza sísmica de la región.

En cualquier punto de la ciudad de Guatemala se encuentra una falla cercana del graben. Por lo que es importante el uso de estos factores, aunque más importante es que las fallas cercanas se investiguen de manera más significativa para conocer cuáles deben ser los factores de modificación por falla cercana.

Existen los factores genéricos en la Norma NSE2-2010 pero el problema no solo radica en el hecho de que sean factores genéricos que no tomen las condiciones especiales del lugar. El problema radica en que no existen muchos estudios para determinar la microzonificación sísmica.

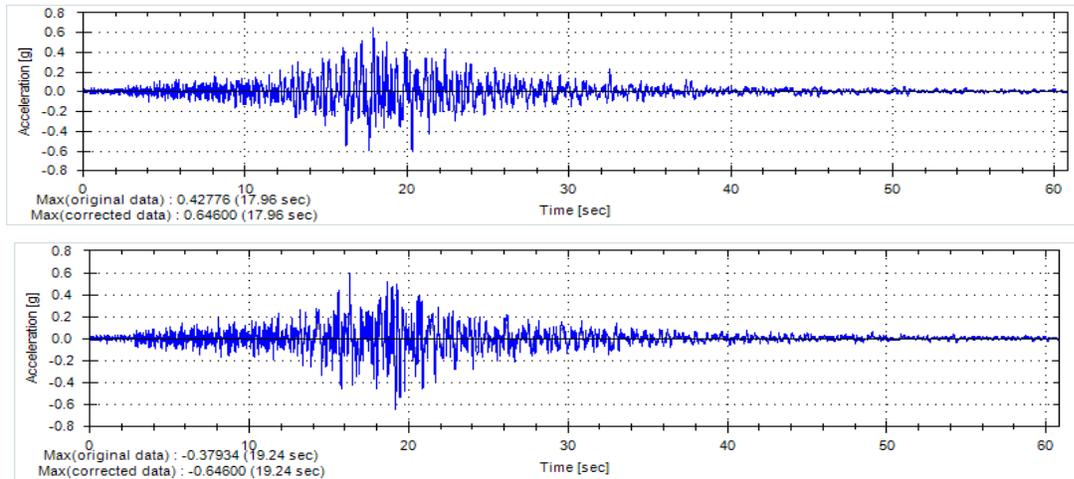
A continuación se muestran los acelerogramas adecuados al PGA de RESIS II para una probabilidad de excedencia de 10 por ciento en 50 años ya que estos son de utilidad para el diseño de estructuras importantes que generalmente requieren un diseño de ingeniería y no empírico como generalmente son los diseños de obras importantes.

#### **6.8. Acelerogramas adecuados**

A continuación se muestran los pares de acelerogramas de reales adecuados al PGA del estudio RESIS II. Se puede observar que la gráfica muestra el valor máximo original y valor corregido (o adecuado para este caso).

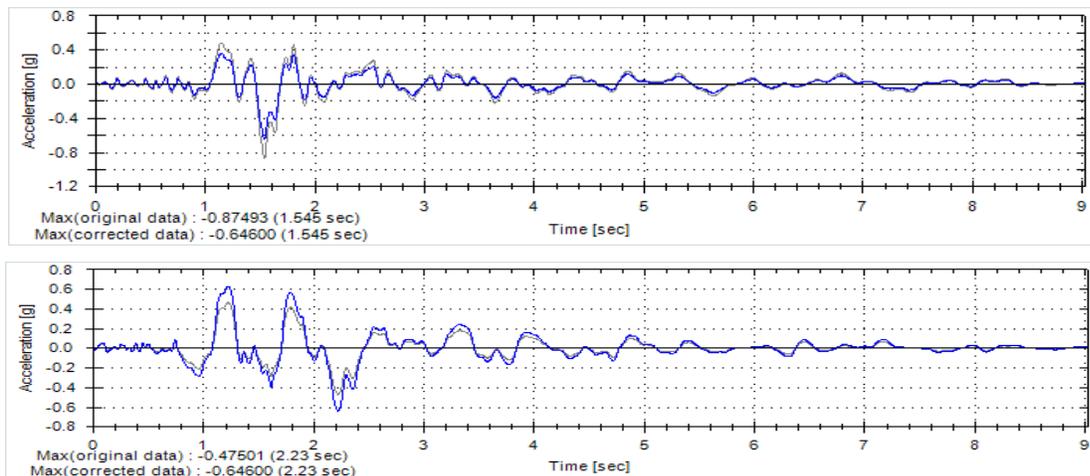
Los acelerogramas fueron modificados en el programa PRISM utilizando el PGA de un sismo de 5 por ciento de probabilidad de recurrencia en 50 años. Se utilizó este sismo debido a que con este sismo se diseñan estructuras importantes y esenciales.

Figura 50. **Acelerogramas adecuado al PGA. San Salvador 2001**



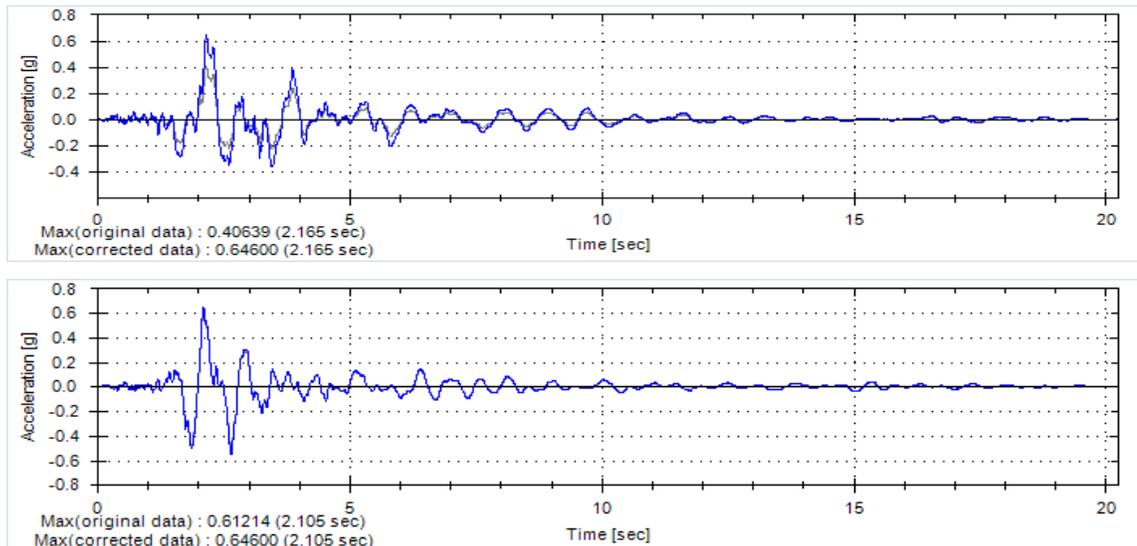
Fuente: acelerogramas modificados por el programa PRISM.

Figura 51. **Acelerograma adecuado al PGA. San Salvador 1986 Instituto Geográfico**



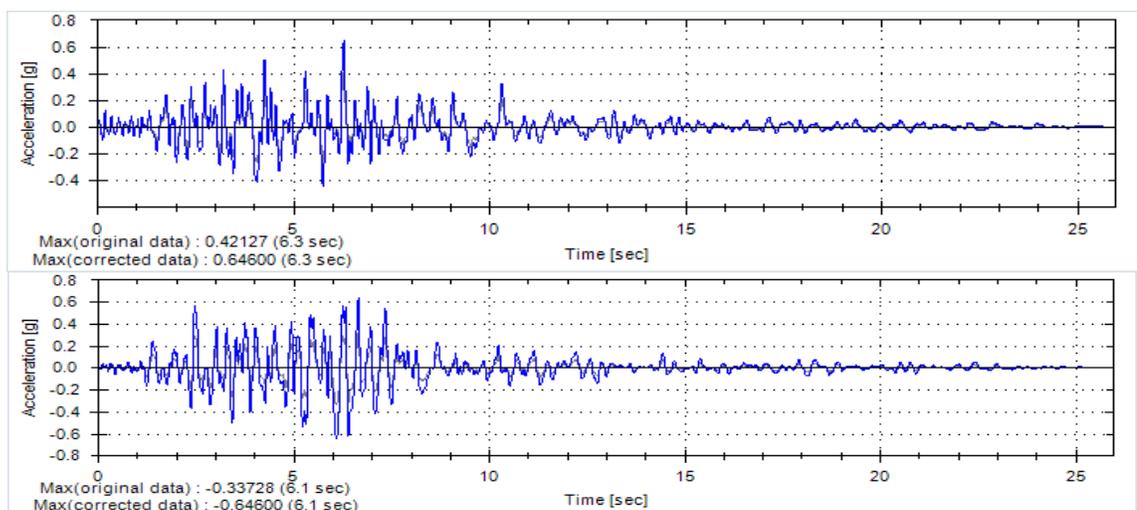
Fuente: acelerogramas modificados por el programa PRISM.

Figura 52. **Acelerograma adecuado al PGA. San Salvador 1986 Instituto Geotécnico**



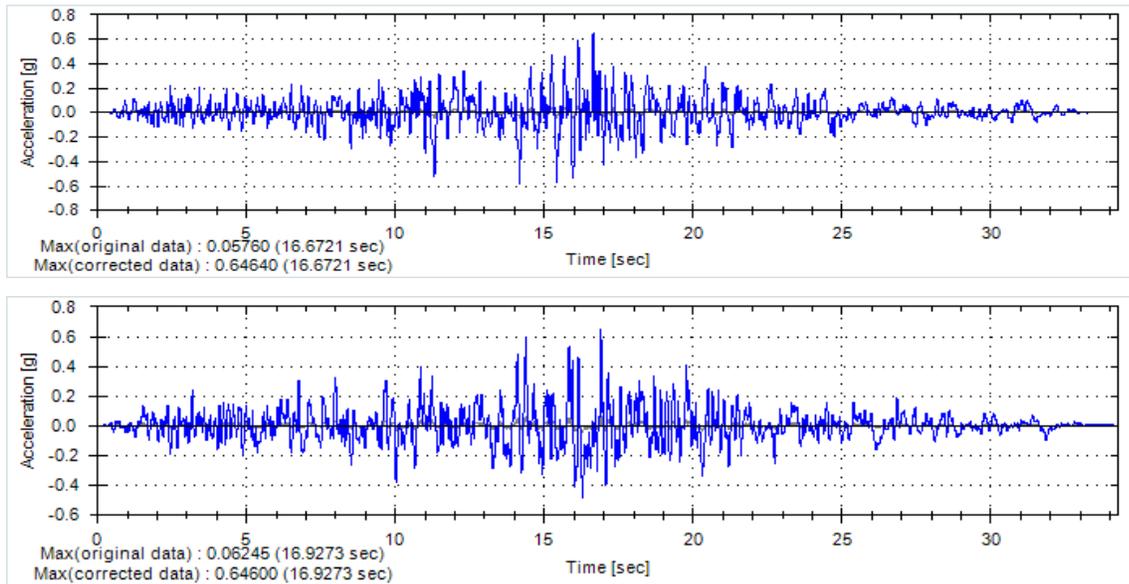
Fuente: acelerogramas modificados por el programa PRISM.

Figura 53. **Acelerograma adecuado al PGA. Managua 1972**



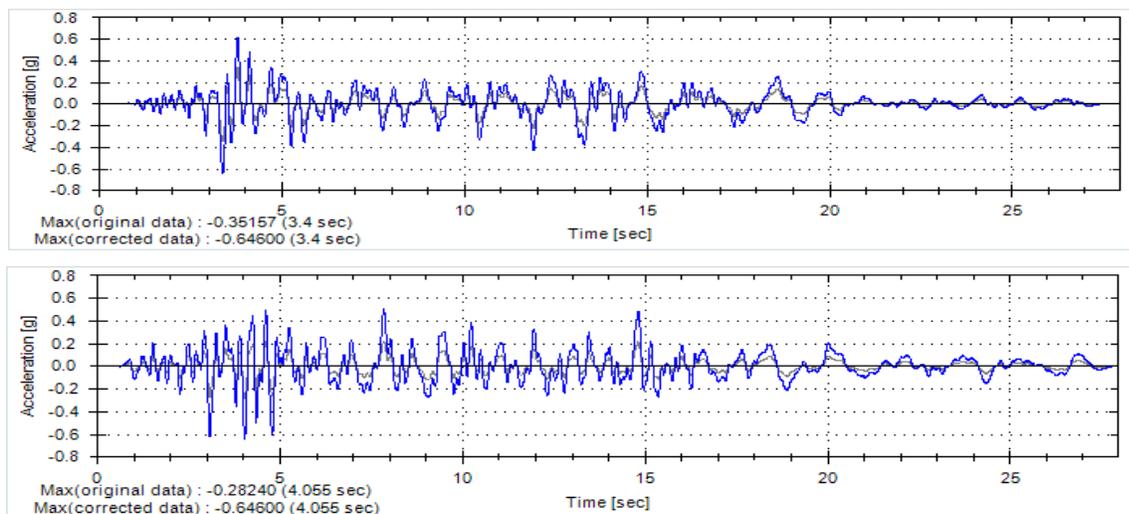
Fuente: acelerogramas modificados por el programa PRISM.

Figura 54. **Acelerograma adecuado al PGA. Irpina 1980**



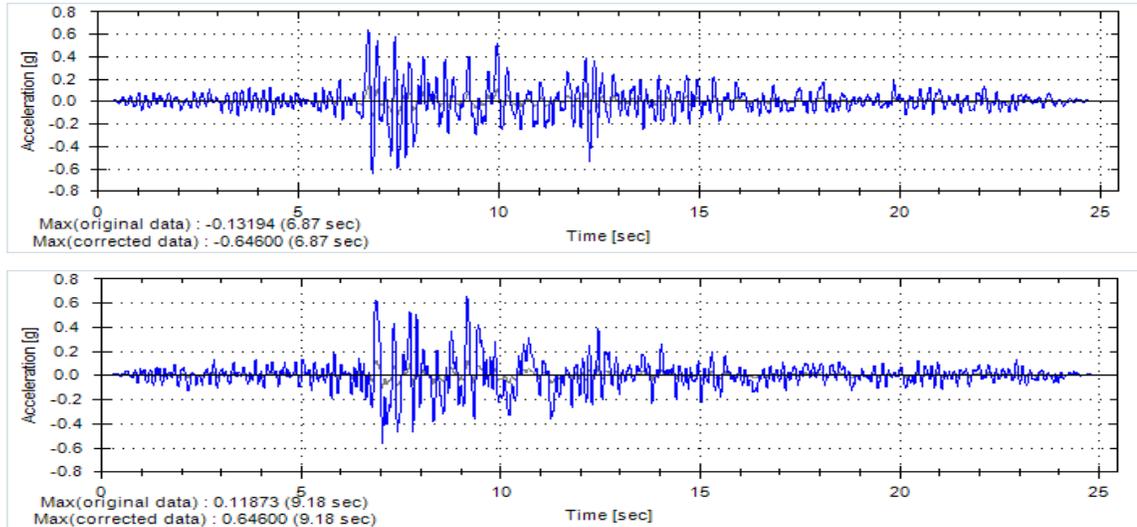
Fuente: acelerogramas modificados por el programa PRISM.

Figura 55. **Acelerograma adecuado al PGA. Dinar 1995**



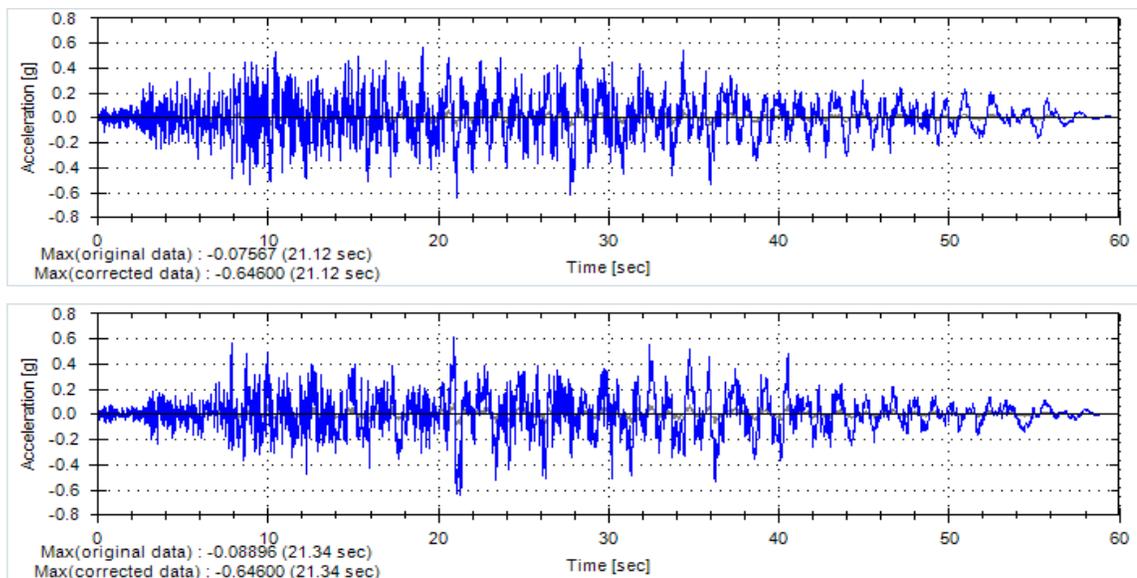
Fuente: acelerogramas modificados por el programa PRISM.

Figura 56. **Acelerograma adecuado al PGA. Kocaeli 99**



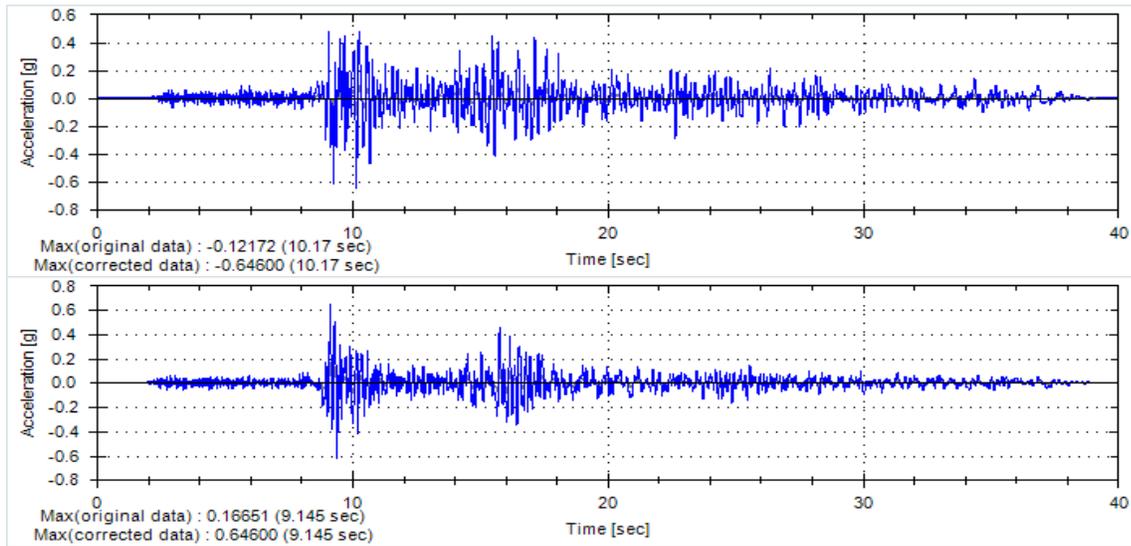
Fuente: acelerogramas modificados por el programa PRISM.

Figura 57. **Acelerograma adecuado al PGA. Landers 1992**



Fuente: acelerogramas modificados por el programa PRISM.

Figura 58. **Acelerograma adecuado al PGA. Imperial Valley 1979**



Fuente: acelerogramas modificados por el programa PRISM.

## CONCLUSIONES

1. El conjunto de espectros adecuados resulta útil para el análisis de estructuras cuando se toman de manera conjunta, el solo tomar un registro para el análisis puede dar resultados muy conservadores.
2. La cola del espectro de la Norma AGIES NSE2-2010 bajan con la misma proporción con la que baja el espectro de respuesta medio de los acelerogramas, por lo que la proporción  $1/T$  para períodos largos es aceptable.
3. Los acelerogramas regionales son los que usaron un factor más cercano a 1, por lo que deben ser considerados en cualquier análisis en donde hayan fallas superficiales y si la subducción profunda representa una amenaza significativa en el sitio a analizar.
4. Las aceleraciones del espectro de diseño genérico del AGIES NSE2-2010 son menores que las del espectro de respuesta en una proporción de 0,8 a 0,87 lo cual hace los valores de RESIS II, AGIES y los resultados de la adecuación congruentes entre si.



## RECOMENDACIONES

1. Al observar que los registros que no necesitaron un factor de escala mucho mayor a 1 fueron los sismos regionales, se devela lo importante que es la información local del movimiento fuerte del suelo. Es importante que se cuente con la instrumentación adecuada en el país para poder utilizarla y así disminuir la vulnerabilidad que tiene el país.
2. Mientras más información se utilice para el análisis, mejores resultados se obtienen, el análisis no se limita a usar un número pequeño de registros. Por lo que es provechoso tomar la mayor cantidad de acelerogramas posibles siempre y cuando la selección de los registros sea congruente con la amenaza sísmica del sitio.
3. Es importante tomar en cuenta la direccionalidad, la aplicación de las aceleraciones y la topografía cuando se tienen sismos locales. Las estructuras se ven mayormente afectadas por estas condiciones y se vuelven relevantes en el análisis sísmico.
4. Es necesario que el Gobierno Central genere más investigación sobre el tema de sismología en el país. Los sismos son unos de los fenómenos naturales más destructivos y mortales que existen y Guatemala es una zona con una sismicidad muy alta.

5. Uno de los temas que deben realizarse con la mayor prontitud son los estudios de microzonificación. Esto resulta necesario principalmente (aunque no solo) para la ciudad de Guatemala, la cual está rodeada de varias fallas superficiales con un poder destructivo alto.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ACEVEDO JARAMILLO, Ana Beatriz. *Seismological Criteria for Selecting and Scaling Real Accelerograms for Use in Engineering Analysis and Design*. Trabajo de Graduación de Maestría en Ingeniería Sísmica, Instituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, 2003. 138 p.
2. AMBRASEYS Y ADAMS. *The Seismicity of Central America*. Inglaterra: Imperial College Press, 2001. 309 p.
3. American Society of Civil Engineers. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Estados Unidos: ASCE/SEI, 2011. 608 p.
4. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica. *Normas de seguridad estructural de edificios y obras de infraestructura para la República de Guatemala*. Guatemala: AGIES, 2010. 75 p.
5. BENITO Y TORRES. *Amenaza sísmica en América Central*. España: Entimeta, 2009. 371 p.
6. CLIMENT, A., et. al. *Spectral Strong Motion Attenuation in Central America*. Technical Report No. 2- 17. NORSAR, 1994.
7. Federal Emergency Management Agency. *Seismic Hazard Analysis*. Estados Unidos de America: FEMA, 2003. 17 p.

8. International Code Council. *International Building Code 2003*. ICC. Estados Unidos de América: ICC, 2003. 656 p.
9. KRAMER, Steven L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Estados Unidos de America: Prentice Hall, 1996. 653 p.
10. McGUIRE, Robin K. *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Estados Unidos de America: Earthquake Engineering Research Institute, 2004. 221 p.
11. MOLINA et al. *Amenaza sísmica en el valle de la ciudad de Guatemala*. Guatemala: NORSAR, 1999. 45 p.
12. National Institute of Standards and Technology. *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analysis*. Estados Unidos de America: NIST, 2011. 256 p.
13. SEED E IDRISSE. *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*. Estados Unidos de America: EERI, 1982.134 p.
14. Seismological Society of America. *Seismological Research Letters*. Estados Unidos de América: Seismological Society of America, 1997. 255 p.
15. TOLA, Adrian. *Response History Analysis Procedure for Seismic Procedure for Seismic Load Analysis*. Trabajo de graduación de maestría en Ingeniería Civil, Virginia Polytechnic Institute and State University. Estados Unidos de America: 2010. 312p.

16. UNICEF, INFOM, UNEPAR, Asdi. *Desastres naturales y zonas de riesgo en Guatemala*. Guatemala: UNICEF, 2001. 94 p.
17. YANI QUIYUCH, Robin Onelio. *Mediciones de Intensidades Sísmicas Dentro del Área Urbana Extendida, de la Ciudad de Guatemala*. Guatemala. Universidad San Carlos, Facultad de Ingeniería, 2006. 77 p.



## **APÉNDICE**



### Tablas de espectros de respuesta utilizados

T(s)	ESPECTRO DE REGISTROS PROMEDIO ORIGINALES											
	SALV	GEOGRAF	GEOTEC	MANAG	IRPINA	DINAR	KOCAELI	LANDERS	VALLEY	PROM.	S.D.	PROM+1SD
0,00	0,40	0,51	0,67	0,38	0,06	0,32	0,13	0,08	0,14	0,30	0,21	0,51
0,02	0,41	0,52	0,69	0,38	0,06	0,32	0,13	0,09	0,15	0,31	0,22	0,52
0,04	0,47	0,53	0,70	0,43	0,07	0,33	0,14	0,11	0,17	0,33	0,22	0,55
0,06	0,59	0,59	0,69	0,53	0,08	0,33	0,19	0,14	0,24	0,38	0,23	0,60
0,08	0,80	0,59	0,77	0,61	0,11	0,36	0,22	0,26	0,28	0,45	0,25	0,70
0,10	0,85	0,66	0,97	0,74	0,15	0,42	0,23	0,16	0,25	0,49	0,32	0,81
0,12	0,68	0,71	0,97	0,71	0,13	0,46	0,31	0,21	0,30	0,50	0,29	0,78
0,14	1,05	0,80	0,85	0,91	0,11	0,58	0,30	0,17	0,34	0,57	0,35	0,92
0,16	1,12	0,67	1,15	0,88	0,15	0,61	0,36	0,18	0,44	0,62	0,37	0,99
0,18	1,03	0,69	1,21	0,88	0,15	0,67	0,41	0,19	0,50	0,64	0,36	1,00
0,20	0,88	0,66	1,31	1,09	0,16	0,70	0,51	0,18	0,51	0,66	0,38	1,05
0,22	0,96	0,68	1,41	1,07	0,15	0,90	0,51	0,20	0,38	0,70	0,42	1,12
0,24	1,00	0,71	1,47	0,90	0,15	1,08	0,43	0,19	0,33	0,70	0,45	1,15
0,26	1,12	0,75	1,59	1,09	0,17	0,97	0,40	0,18	0,32	0,73	0,50	1,23
0,28	1,18	0,71	1,64	1,10	0,15	0,97	0,34	0,17	0,31	0,73	0,53	1,26
0,30	1,10	0,79	1,64	1,11	0,16	1,16	0,33	0,19	0,28	0,75	0,53	1,28
0,32	1,09	0,89	1,55	1,13	0,14	1,16	0,34	0,17	0,24	0,74	0,53	1,27
0,34	1,24	0,98	1,43	1,27	0,13	1,15	0,33	0,16	0,24	0,77	0,54	1,31
0,36	1,34	1,08	1,22	1,19	0,13	0,97	0,36	0,15	0,21	0,74	0,51	1,25
0,38	1,34	1,15	1,10	1,13	0,13	0,77	0,31	0,15	0,21	0,70	0,50	1,20
0,40	1,22	1,16	1,01	1,06	0,13	0,78	0,28	0,16	0,21	0,67	0,47	1,13
0,42	1,03	1,14	0,97	0,99	0,13	0,81	0,25	0,15	0,20	0,63	0,43	1,06
0,44	0,88	1,07	0,98	0,87	0,12	0,76	0,23	0,14	0,19	0,58	0,40	0,98
0,46	0,72	1,09	1,02	0,79	0,12	0,63	0,21	0,13	0,16	0,54	0,39	0,93
0,48	0,62	1,10	1,07	0,85	0,10	0,58	0,21	0,15	0,14	0,54	0,41	0,94
0,50	0,59	1,15	1,18	0,89	0,09	0,57	0,21	0,17	0,13	0,55	0,44	0,99
0,52	0,57	1,16	1,26	0,81	0,09	0,52	0,20	0,18	0,12	0,55	0,45	0,99
0,54	0,63	1,15	1,31	0,69	0,10	0,46	0,19	0,19	0,12	0,54	0,45	0,99
0,56	0,65	1,10	1,35	0,64	0,10	0,48	0,18	0,20	0,12	0,54	0,45	0,98
0,58	0,65	1,09	1,41	0,65	0,11	0,47	0,18	0,20	0,12	0,54	0,46	1,00
0,60	0,68	1,09	1,45	0,67	0,12	0,45	0,17	0,19	0,11	0,55	0,47	1,02
0,62	0,70	1,09	1,46	0,71	0,10	0,43	0,17	0,18	0,11	0,55	0,48	1,03
0,64	0,72	1,08	1,44	0,69	0,09	0,43	0,16	0,18	0,10	0,54	0,48	1,02
0,66	0,75	1,11	1,40	0,62	0,08	0,47	0,15	0,18	0,10	0,54	0,47	1,01
0,68	0,68	1,14	1,38	0,56	0,08	0,47	0,13	0,18	0,10	0,53	0,47	1,00

Continuación de la tabla espectros de registro promedio originales

0,70	0,57	1,16	1,35	0,50	0,08	0,46	0,13	0,18	0,09	0,50	0,47	0,97
0,72	0,49	1,17	1,31	0,44	0,08	0,46	0,13	0,19	0,09	0,48	0,46	0,95
0,74	0,47	1,17	1,27	0,40	0,08	0,48	0,13	0,19	0,09	0,48	0,45	0,93
0,76	0,45	1,16	1,21	0,41	0,07	0,49	0,13	0,18	0,09	0,47	0,44	0,90
0,78	0,43	1,16	1,16	0,42	0,07	0,52	0,14	0,17	0,08	0,46	0,43	0,89
0,80	0,42	1,16	1,10	0,41	0,07	0,57	0,14	0,16	0,08	0,46	0,42	0,87
0,82	0,39	1,15	1,03	0,44	0,07	0,60	0,13	0,17	0,08	0,45	0,41	0,86
0,84	0,38	1,14	0,97	0,47	0,07	0,62	0,12	0,18	0,08	0,45	0,39	0,84
0,86	0,37	1,11	0,91	0,48	0,07	0,62	0,11	0,18	0,08	0,44	0,38	0,82
0,88	0,40	1,08	0,85	0,47	0,06	0,59	0,12	0,18	0,08	0,42	0,36	0,79
0,90	0,43	1,04	0,79	0,44	0,06	0,57	0,12	0,19	0,08	0,41	0,34	0,75
0,92	0,46	0,99	0,73	0,41	0,06	0,54	0,13	0,20	0,08	0,40	0,32	0,72
0,94	0,49	0,93	0,68	0,38	0,05	0,50	0,13	0,22	0,07	0,38	0,30	0,68
0,96	0,52	0,89	0,64	0,36	0,06	0,50	0,13	0,23	0,07	0,38	0,28	0,66
0,98	0,53	0,85	0,60	0,34	0,06	0,49	0,13	0,23	0,07	0,37	0,27	0,64
1,00	0,54	0,82	0,57	0,32	0,06	0,47	0,13	0,22	0,07	0,36	0,26	0,62
1,02	0,55	0,78	0,55	0,30	0,06	0,44	0,13	0,22	0,06	0,34	0,25	0,60
1,04	0,55	0,75	0,53	0,29	0,05	0,42	0,12	0,21	0,06	0,33	0,24	0,58
1,06	0,55	0,72	0,51	0,28	0,05	0,42	0,11	0,20	0,06	0,32	0,24	0,56
1,08	0,54	0,68	0,48	0,27	0,05	0,42	0,10	0,19	0,06	0,31	0,23	0,54
1,10	0,52	0,65	0,47	0,26	0,05	0,42	0,10	0,19	0,05	0,30	0,22	0,52
1,12	0,50	0,62	0,45	0,24	0,05	0,40	0,09	0,19	0,05	0,29	0,21	0,50
1,14	0,47	0,59	0,43	0,22	0,05	0,39	0,09	0,19	0,05	0,28	0,20	0,48
1,16	0,45	0,57	0,44	0,21	0,05	0,39	0,08	0,19	0,05	0,27	0,19	0,46
1,18	0,42	0,55	0,44	0,20	0,05	0,41	0,08	0,18	0,05	0,27	0,19	0,46
1,20	0,39	0,54	0,44	0,19	0,06	0,42	0,09	0,17	0,05	0,26	0,19	0,45
1,22	0,37	0,53	0,44	0,18	0,06	0,42	0,09	0,17	0,05	0,26	0,18	0,44
1,24	0,34	0,51	0,44	0,18	0,06	0,42	0,10	0,17	0,05	0,25	0,18	0,43
1,26	0,32	0,50	0,44	0,18	0,06	0,43	0,10	0,16	0,05	0,25	0,18	0,43
1,28	0,30	0,49	0,44	0,17	0,06	0,44	0,11	0,16	0,05	0,25	0,17	0,42
1,30	0,28	0,47	0,44	0,18	0,06	0,43	0,11	0,15	0,05	0,24	0,17	0,41
1,32	0,27	0,46	0,44	0,18	0,05	0,43	0,11	0,14	0,05	0,24	0,17	0,41
1,34	0,26	0,45	0,44	0,17	0,05	0,42	0,12	0,13	0,05	0,23	0,17	0,40
1,36	0,24	0,44	0,44	0,17	0,05	0,41	0,12	0,12	0,05	0,22	0,16	0,39
1,38	0,24	0,43	0,44	0,17	0,05	0,39	0,11	0,12	0,04	0,22	0,16	0,38
1,40	0,24	0,41	0,43	0,17	0,05	0,38	0,11	0,11	0,04	0,22	0,16	0,37
1,42	0,24	0,40	0,43	0,17	0,05	0,37	0,11	0,11	0,04	0,21	0,15	0,37

Continuación de la tabla espectros de registro promedio originales

1,44	0,24	0,39	0,43	0,17	0,05	0,35	0,11	0,11	0,04	0,21	0,15	0,36
1,46	0,23	0,38	0,42	0,17	0,05	0,34	0,11	0,11	0,04	0,21	0,15	0,35
1,48	0,23	0,37	0,42	0,17	0,05	0,33	0,11	0,11	0,04	0,20	0,14	0,34
1,50	0,23	0,36	0,41	0,17	0,05	0,32	0,11	0,11	0,04	0,20	0,14	0,34
1,52	0,22	0,35	0,40	0,17	0,05	0,31	0,11	0,11	0,03	0,20	0,13	0,33
1,54	0,22	0,35	0,40	0,18	0,05	0,30	0,10	0,11	0,03	0,19	0,13	0,33
1,56	0,22	0,34	0,40	0,18	0,05	0,30	0,10	0,11	0,03	0,19	0,13	0,32
1,58	0,21	0,34	0,39	0,18	0,05	0,30	0,10	0,10	0,03	0,19	0,13	0,32
1,60	0,20	0,33	0,39	0,19	0,05	0,30	0,10	0,10	0,03	0,19	0,13	0,32
1,62	0,20	0,33	0,38	0,19	0,05	0,30	0,09	0,10	0,03	0,19	0,13	0,31
1,64	0,19	0,32	0,38	0,19	0,05	0,30	0,09	0,09	0,03	0,18	0,13	0,31
1,66	0,19	0,32	0,37	0,19	0,04	0,30	0,09	0,10	0,03	0,18	0,12	0,31
1,68	0,18	0,31	0,36	0,19	0,04	0,29	0,09	0,10	0,03	0,18	0,12	0,30
1,70	0,17	0,30	0,36	0,19	0,04	0,30	0,08	0,10	0,03	0,17	0,12	0,30
1,72	0,17	0,30	0,35	0,19	0,04	0,30	0,08	0,10	0,03	0,17	0,12	0,29
1,74	0,16	0,29	0,34	0,18	0,04	0,31	0,08	0,10	0,03	0,17	0,12	0,29
1,76	0,16	0,29	0,33	0,18	0,04	0,32	0,08	0,10	0,03	0,17	0,12	0,29
1,78	0,15	0,28	0,33	0,18	0,03	0,33	0,08	0,10	0,03	0,17	0,12	0,29
1,80	0,15	0,28	0,32	0,19	0,03	0,33	0,07	0,10	0,03	0,17	0,12	0,28
1,82	0,14	0,27	0,31	0,18	0,03	0,34	0,07	0,10	0,03	0,16	0,12	0,28
1,84	0,14	0,27	0,31	0,18	0,03	0,34	0,07	0,10	0,03	0,16	0,12	0,28
1,86	0,14	0,26	0,31	0,18	0,03	0,34	0,07	0,10	0,03	0,16	0,12	0,28
1,88	0,13	0,26	0,31	0,18	0,03	0,34	0,07	0,11	0,03	0,16	0,12	0,28
1,90	0,13	0,25	0,31	0,17	0,03	0,34	0,06	0,11	0,03	0,16	0,12	0,28
1,92	0,12	0,25	0,31	0,17	0,03	0,34	0,06	0,11	0,03	0,16	0,12	0,28
1,94	0,12	0,25	0,31	0,17	0,03	0,34	0,06	0,11	0,03	0,16	0,12	0,27
1,96	0,11	0,24	0,31	0,16	0,03	0,33	0,06	0,11	0,03	0,15	0,12	0,27
1,98	0,11	0,24	0,30	0,16	0,03	0,33	0,06	0,10	0,03	0,15	0,12	0,27
2,00	0,10	0,24	0,30	0,15	0,03	0,33	0,05	0,10	0,03	0,15	0,11	0,26
2,02	0,10	0,23	0,29	0,15	0,03	0,32	0,05	0,10	0,03	0,14	0,11	0,26
2,04	0,10	0,23	0,29	0,15	0,02	0,31	0,05	0,09	0,03	0,14	0,11	0,25
2,06	0,09	0,23	0,28	0,14	0,02	0,30	0,05	0,09	0,03	0,14	0,11	0,24
2,08	0,09	0,22	0,27	0,14	0,02	0,29	0,05	0,09	0,03	0,13	0,10	0,24
2,10	0,08	0,22	0,26	0,14	0,02	0,27	0,04	0,09	0,02	0,13	0,10	0,23
2,12	0,08	0,21	0,26	0,14	0,02	0,26	0,04	0,08	0,02	0,12	0,10	0,22
2,14	0,08	0,21	0,25	0,13	0,02	0,25	0,04	0,08	0,02	0,12	0,09	0,21
2,16	0,08	0,21	0,25	0,13	0,02	0,24	0,04	0,08	0,02	0,12	0,09	0,21

Continuación de la tabla espectros de registro promedio originales.

2,18	0,07	0,20	0,24	0,13	0,02	0,23	0,04	0,08	0,02	0,12	0,09	0,21
2,20	0,07	0,20	0,24	0,12	0,02	0,23	0,04	0,08	0,02	0,11	0,09	0,20
2,22	0,07	0,20	0,24	0,12	0,02	0,23	0,04	0,08	0,02	0,11	0,09	0,20
2,24	0,07	0,19	0,23	0,12	0,02	0,23	0,04	0,08	0,02	0,11	0,09	0,20
2,26	0,07	0,19	0,23	0,12	0,02	0,23	0,04	0,09	0,02	0,11	0,09	0,20
2,28	0,07	0,19	0,22	0,12	0,02	0,23	0,03	0,09	0,02	0,11	0,08	0,19
2,30	0,07	0,18	0,22	0,12	0,02	0,23	0,03	0,09	0,02	0,11	0,08	0,19
2,32	0,07	0,18	0,21	0,12	0,02	0,23	0,03	0,10	0,02	0,11	0,08	0,19
2,34	0,07	0,18	0,21	0,12	0,02	0,23	0,03	0,10	0,02	0,11	0,08	0,19
2,36	0,07	0,17	0,20	0,11	0,02	0,22	0,03	0,11	0,02	0,11	0,08	0,18
2,38	0,07	0,17	0,20	0,11	0,02	0,22	0,03	0,11	0,02	0,10	0,08	0,18
2,40	0,07	0,17	0,19	0,11	0,02	0,21	0,03	0,11	0,02	0,10	0,07	0,18
2,42	0,07	0,16	0,19	0,11	0,02	0,20	0,03	0,12	0,02	0,10	0,07	0,17
2,44	0,07	0,16	0,18	0,11	0,02	0,20	0,03	0,12	0,02	0,10	0,07	0,17
2,46	0,07	0,16	0,18	0,11	0,02	0,19	0,03	0,12	0,02	0,10	0,07	0,17
2,48	0,07	0,15	0,17	0,11	0,02	0,19	0,03	0,12	0,02	0,10	0,07	0,16
2,50	0,07	0,15	0,17	0,10	0,02	0,18	0,03	0,12	0,02	0,10	0,07	0,16
2,52	0,07	0,15	0,17	0,10	0,02	0,18	0,03	0,12	0,02	0,09	0,06	0,16
2,54	0,07	0,14	0,16	0,10	0,02	0,17	0,03	0,12	0,02	0,09	0,06	0,15
2,56	0,07	0,14	0,16	0,10	0,02	0,17	0,03	0,12	0,01	0,09	0,06	0,15
2,58	0,07	0,14	0,15	0,09	0,02	0,16	0,03	0,12	0,01	0,09	0,06	0,15
2,60	0,07	0,14	0,15	0,09	0,02	0,16	0,03	0,11	0,01	0,09	0,06	0,14
2,62	0,07	0,13	0,14	0,09	0,02	0,16	0,03	0,11	0,01	0,08	0,06	0,14
2,64	0,07	0,13	0,14	0,09	0,02	0,16	0,03	0,11	0,01	0,08	0,05	0,14
2,66	0,07	0,13	0,14	0,09	0,02	0,15	0,03	0,10	0,01	0,08	0,05	0,14
2,68	0,07	0,13	0,13	0,08	0,02	0,15	0,03	0,10	0,01	0,08	0,05	0,13
2,70	0,06	0,12	0,13	0,08	0,02	0,15	0,03	0,09	0,01	0,08	0,05	0,13
2,72	0,06	0,12	0,13	0,08	0,02	0,15	0,03	0,09	0,01	0,08	0,05	0,13
2,74	0,06	0,12	0,13	0,08	0,02	0,15	0,03	0,09	0,01	0,08	0,05	0,12
2,76	0,06	0,12	0,12	0,08	0,02	0,14	0,03	0,08	0,01	0,07	0,05	0,12
2,78	0,06	0,11	0,12	0,08	0,02	0,14	0,03	0,08	0,01	0,07	0,05	0,12
2,80	0,06	0,11	0,12	0,08	0,02	0,14	0,03	0,08	0,01	0,07	0,05	0,12
2,82	0,06	0,11	0,12	0,07	0,02	0,13	0,03	0,07	0,01	0,07	0,04	0,11
2,84	0,06	0,11	0,11	0,07	0,02	0,13	0,03	0,07	0,01	0,07	0,04	0,11
2,86	0,06	0,11	0,11	0,07	0,02	0,13	0,03	0,07	0,01	0,07	0,04	0,11
2,88	0,05	0,11	0,11	0,07	0,02	0,13	0,03	0,07	0,01	0,07	0,04	0,11
2,90	0,05	0,11	0,11	0,07	0,02	0,13	0,03	0,06	0,01	0,07	0,04	0,11

Continuación de la tabla espectros de registro promedio originales.

2,92	0,05	0,11	0,10	0,07	0,02	0,13	0,03	0,06	0,01	0,07	0,04	0,11
2,94	0,05	0,10	0,10	0,07	0,02	0,13	0,03	0,06	0,01	0,06	0,04	0,11
2,96	0,05	0,10	0,10	0,07	0,02	0,13	0,03	0,06	0,01	0,06	0,04	0,11
2,98	0,05	0,10	0,10	0,07	0,02	0,13	0,03	0,06	0,01	0,06	0,04	0,10
3,00	0,05	0,10	0,09	0,07	0,02	0,13	0,03	0,06	0,01	0,06	0,04	0,10
3,02	0,05	0,10	0,09	0,07	0,02	0,12	0,03	0,06	0,01	0,06	0,04	0,10
3,04	0,05	0,10	0,09	0,07	0,02	0,12	0,03	0,06	0,01	0,06	0,04	0,10
3,06	0,05	0,10	0,09	0,07	0,02	0,12	0,03	0,06	0,01	0,06	0,04	0,10
3,08	0,05	0,09	0,09	0,07	0,02	0,12	0,03	0,05	0,01	0,06	0,04	0,10
3,10	0,04	0,09	0,09	0,06	0,02	0,12	0,03	0,05	0,01	0,06	0,04	0,09
3,12	0,04	0,09	0,08	0,06	0,02	0,11	0,03	0,05	0,01	0,06	0,03	0,09
3,14	0,04	0,09	0,08	0,06	0,02	0,11	0,03	0,05	0,01	0,06	0,03	0,09
3,16	0,04	0,09	0,08	0,06	0,02	0,11	0,03	0,05	0,01	0,05	0,03	0,09
3,18	0,04	0,09	0,08	0,06	0,02	0,10	0,03	0,05	0,01	0,05	0,03	0,09
3,20	0,04	0,09	0,08	0,06	0,02	0,10	0,03	0,05	0,01	0,05	0,03	0,08
3,22	0,04	0,08	0,08	0,06	0,02	0,10	0,03	0,05	0,01	0,05	0,03	0,08
3,24	0,04	0,08	0,07	0,06	0,02	0,10	0,03	0,05	0,01	0,05	0,03	0,08
3,26	0,04	0,08	0,07	0,06	0,02	0,10	0,03	0,05	0,01	0,05	0,03	0,08
3,28	0,04	0,08	0,07	0,06	0,02	0,10	0,03	0,04	0,01	0,05	0,03	0,08
3,30	0,04	0,08	0,07	0,06	0,02	0,10	0,03	0,04	0,01	0,05	0,03	0,08
3,32	0,04	0,08	0,07	0,05	0,02	0,10	0,03	0,04	0,01	0,05	0,03	0,08
3,34	0,04	0,08	0,07	0,05	0,02	0,09	0,03	0,04	0,01	0,05	0,03	0,07
3,36	0,03	0,07	0,06	0,05	0,02	0,09	0,03	0,04	0,01	0,05	0,03	0,07
3,38	0,03	0,07	0,06	0,05	0,02	0,09	0,03	0,04	0,01	0,05	0,03	0,07
3,40	0,03	0,07	0,06	0,05	0,02	0,09	0,03	0,04	0,01	0,04	0,03	0,07
3,42	0,03	0,07	0,06	0,05	0,02	0,09	0,03	0,04	0,01	0,04	0,03	0,07
3,44	0,03	0,07	0,06	0,05	0,02	0,09	0,03	0,04	0,01	0,04	0,03	0,07
3,46	0,03	0,07	0,06	0,05	0,02	0,09	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,07
3,48	0,03	0,07	0,06	0,05	0,02	0,09	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,07
3,50	0,03	0,06	0,06	0,05	0,02	0,09	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,07
3,52	0,03	0,06	0,06	0,05	0,02	0,08	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,54	0,03	0,06	0,06	0,05	0,02	0,08	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,56	0,03	0,06	0,06	0,04	0,02	0,08	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,58	0,03	0,06	0,05	0,04	0,02	0,08	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,60	0,03	0,06	0,05	0,04	0,02	0,08	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,62	0,03	0,06	0,05	0,04	0,02	0,08	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,64	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,08	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06

Continuación de la tabla espectros de registro promedio originales.

3,66	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,07	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,68	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,07	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,70	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,07	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,72	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,07	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,06
3,74	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,07	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,05
3,76	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,07	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,05
3,78	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,07	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,80	0,03	0,05	0,05	0,04	0,02	0,07	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,82	0,03	0,05	0,05	0,03	0,02	0,07	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,84	0,03	0,05	0,05	0,03	0,02	0,07	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,86	0,03	0,05	0,05	0,03	0,02	0,07	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,88	0,03	0,05	0,05	0,03	0,02	0,07	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,90	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,06	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,92	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,06	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,94	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,06	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,96	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,06	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
3,98	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,06	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05
4,00	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,06	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,05

Fuente: Elaboración propia con el programa Microsoft Excel en base a los resultados del programa PRISM.

ESPECTRO DE REGISTROS PROMEDIO ADECUADOS A PGA 10% en 50 años												
T(s)	SALV	GEOGRAF	GEOTEC	MANAG	IRPINA	DINAR	KOCAELI	LANDERS	VALLEY	PROM.	S.D.	PROM+1SD
0,00	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,00	0,52
0,54	0,54	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,56	0,56	0,54	0,01	0,55
0,61	0,61	0,54	0,54	0,60	0,61	0,54	0,59	0,68	0,62	0,59	0,05	0,64
0,77	0,77	0,61	0,54	0,73	0,67	0,54	0,78	0,90	0,89	0,71	0,14	0,85
1,04	1,04	0,61	0,60	0,84	0,97	0,60	0,94	1,65	1,01	0,92	0,33	1,25
1,10	1,10	0,68	0,75	1,03	1,34	0,69	0,96	0,99	0,91	0,94	0,21	1,15
0,89	0,89	0,73	0,75	0,98	1,12	0,76	1,29	1,31	1,07	0,99	0,22	1,21
1,37	1,37	0,82	0,66	1,26	0,96	0,96	1,25	1,11	1,25	1,07	0,24	1,31
1,45	1,45	0,69	0,90	1,21	1,32	1,01	1,52	1,15	1,59	1,20	0,30	1,50
1,33	1,33	0,71	0,94	1,21	1,27	1,11	1,73	1,20	1,83	1,26	0,35	1,61
1,14	1,14	0,68	1,01	1,50	1,35	1,16	2,14	1,12	1,84	1,33	0,44	1,77
1,24	1,24	0,70	1,10	1,48	1,34	1,49	2,15	1,25	1,40	1,35	0,38	1,73
1,30	1,30	0,73	1,14	1,24	1,32	1,78	1,80	1,21	1,21	1,30	0,33	1,63

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 10%  
en 50 años

1,46	1,46	0,77	1,24	1,51	1,44	1,61	1,67	1,12	1,17	1,33	0,28	1,61
1,54	1,54	0,74	1,28	1,53	1,33	1,61	1,41	1,06	1,13	1,29	0,28	1,57
1,43	1,43	0,81	1,27	1,53	1,42	1,92	1,39	1,18	1,03	1,33	0,32	1,65
1,42	1,42	0,91	1,20	1,56	1,18	1,92	1,43	1,06	0,87	1,28	0,33	1,62
1,62	1,62	1,01	1,11	1,75	1,11	1,90	1,40	1,02	0,87	1,31	0,37	1,68
1,74	1,74	1,11	0,95	1,64	1,14	1,60	1,50	0,98	0,78	1,27	0,35	1,62
1,74	1,74	1,18	0,86	1,56	1,14	1,28	1,32	0,96	0,78	1,20	0,32	1,52
1,59	1,59	1,19	0,79	1,47	1,17	1,29	1,19	1,03	0,75	1,16	0,28	1,44
1,33	1,33	1,17	0,75	1,36	1,14	1,34	1,06	0,97	0,73	1,10	0,24	1,34
1,15	1,15	1,11	0,76	1,20	1,05	1,25	0,95	0,88	0,70	1,01	0,19	1,20
0,94	0,94	1,12	0,79	1,09	1,01	1,05	0,88	0,81	0,60	0,92	0,17	1,09
0,81	0,81	1,14	0,83	1,18	0,90	0,96	0,86	0,94	0,51	0,90	0,20	1,10
0,77	0,77	1,18	0,92	1,23	0,80	0,94	0,86	1,08	0,48	0,92	0,23	1,15
0,74	0,74	1,20	0,98	1,12	0,81	0,86	0,83	1,13	0,45	0,90	0,23	1,14
0,82	0,82	1,18	1,02	0,95	0,87	0,76	0,78	1,23	0,44	0,89	0,24	1,13
0,84	0,84	1,13	1,05	0,88	0,90	0,79	0,75	1,27	0,43	0,90	0,24	1,14
0,85	0,85	1,12	1,10	0,90	0,98	0,78	0,74	1,27	0,42	0,91	0,25	1,16
0,88	0,88	1,12	1,13	0,92	1,03	0,74	0,72	1,21	0,41	0,91	0,25	1,16
0,91	0,91	1,12	1,13	0,98	0,91	0,71	0,69	1,16	0,40	0,89	0,25	1,14
0,94	0,94	1,11	1,12	0,95	0,77	0,71	0,66	1,17	0,38	0,87	0,26	1,13
0,97	0,97	1,14	1,08	0,86	0,69	0,77	0,61	1,16	0,37	0,85	0,27	1,12
0,88	0,88	1,18	1,07	0,78	0,70	0,77	0,56	1,12	0,37	0,83	0,27	1,09
0,74	0,74	1,20	1,05	0,69	0,70	0,76	0,53	1,13	0,34	0,79	0,28	1,08
0,64	0,64	1,20	1,02	0,61	0,67	0,76	0,53	1,22	0,32	0,78	0,31	1,08
0,61	0,61	1,20	0,98	0,56	0,66	0,80	0,55	1,23	0,31	0,77	0,31	1,08
0,59	0,59	1,19	0,94	0,57	0,65	0,81	0,56	1,14	0,31	0,75	0,29	1,04
0,56	0,56	1,19	0,90	0,58	0,63	0,86	0,57	1,06	0,30	0,74	0,28	1,02
0,54	0,54	1,19	0,85	0,57	0,61	0,94	0,57	1,03	0,30	0,73	0,29	1,02
0,51	0,51	1,18	0,80	0,61	0,59	1,00	0,55	1,08	0,30	0,74	0,30	1,03
0,49	0,49	1,17	0,75	0,65	0,58	1,02	0,51	1,12	0,29	0,73	0,31	1,04
0,48	0,48	1,15	0,70	0,66	0,58	1,02	0,48	1,13	0,29	0,72	0,31	1,03
0,51	0,51	1,11	0,66	0,64	0,56	0,98	0,49	1,12	0,29	0,71	0,30	1,00
0,55	0,55	1,07	0,61	0,61	0,51	0,94	0,52	1,18	0,28	0,70	0,30	0,99
0,60	0,60	1,01	0,57	0,57	0,48	0,89	0,54	1,30	0,27	0,69	0,32	1,01
0,63	0,63	0,96	0,53	0,52	0,48	0,83	0,55	1,42	0,27	0,69	0,34	1,03
0,67	0,67	0,92	0,50	0,49	0,50	0,82	0,55	1,47	0,26	0,69	0,35	1,04

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 10%  
en 50 años

0,69	0,69	0,88	0,46	0,47	0,51	0,81	0,56	1,44	0,25	0,67	0,34	1,02
0,71	0,71	0,84	0,44	0,45	0,50	0,78	0,56	1,41	0,24	0,66	0,34	1,00
0,71	0,71	0,81	0,43	0,42	0,49	0,73	0,54	1,39	0,23	0,64	0,34	0,98
0,71	0,71	0,77	0,41	0,40	0,46	0,70	0,51	1,33	0,22	0,61	0,32	0,93
0,71	0,71	0,74	0,39	0,39	0,43	0,69	0,47	1,26	0,22	0,59	0,31	0,89
0,70	0,70	0,70	0,38	0,37	0,41	0,70	0,42	1,23	0,21	0,57	0,30	0,87
0,68	0,68	0,67	0,36	0,35	0,39	0,69	0,40	1,20	0,20	0,55	0,30	0,85
0,65	0,65	0,64	0,35	0,33	0,41	0,66	0,38	1,20	0,19	0,53	0,30	0,83
0,61	0,61	0,60	0,34	0,31	0,43	0,64	0,36	1,21	0,19	0,52	0,30	0,82
0,58	0,58	0,59	0,34	0,29	0,44	0,65	0,35	1,21	0,18	0,52	0,30	0,82
0,54	0,54	0,57	0,34	0,28	0,46	0,68	0,35	1,17	0,19	0,51	0,29	0,80
0,51	0,51	0,56	0,34	0,27	0,48	0,70	0,36	1,11	0,19	0,50	0,28	0,78
0,48	0,48	0,54	0,34	0,25	0,49	0,70	0,38	1,06	0,19	0,49	0,26	0,76
0,44	0,44	0,53	0,34	0,25	0,50	0,69	0,41	1,06	0,18	0,49	0,26	0,75
0,41	0,41	0,51	0,34	0,24	0,50	0,71	0,44	1,04	0,18	0,49	0,26	0,75
0,38	0,38	0,50	0,34	0,24	0,49	0,72	0,45	1,00	0,18	0,48	0,25	0,73
0,37	0,37	0,49	0,34	0,24	0,48	0,72	0,47	0,94	0,18	0,47	0,24	0,71
0,35	0,35	0,47	0,34	0,24	0,47	0,71	0,48	0,89	0,18	0,46	0,22	0,68
0,33	0,33	0,46	0,34	0,24	0,47	0,69	0,48	0,82	0,17	0,45	0,21	0,65
0,32	0,32	0,45	0,34	0,23	0,46	0,67	0,48	0,75	0,17	0,43	0,19	0,62
0,31	0,31	0,44	0,34	0,23	0,45	0,65	0,48	0,74	0,16	0,42	0,19	0,61
0,31	0,31	0,43	0,34	0,23	0,45	0,62	0,47	0,73	0,16	0,41	0,18	0,60
0,31	0,31	0,41	0,33	0,23	0,44	0,61	0,46	0,72	0,15	0,41	0,18	0,59
0,31	0,31	0,40	0,33	0,23	0,44	0,58	0,46	0,72	0,15	0,40	0,18	0,58
0,30	0,30	0,39	0,33	0,23	0,44	0,57	0,46	0,72	0,14	0,40	0,17	0,57
0,30	0,30	0,38	0,32	0,23	0,45	0,55	0,46	0,71	0,13	0,39	0,17	0,57
0,30	0,30	0,37	0,32	0,23	0,46	0,53	0,45	0,70	0,13	0,39	0,17	0,56
0,29	0,29	0,36	0,31	0,24	0,47	0,51	0,45	0,70	0,12	0,38	0,17	0,55
0,29	0,29	0,36	0,31	0,25	0,47	0,49	0,44	0,69	0,12	0,38	0,17	0,54
0,28	0,28	0,35	0,31	0,25	0,46	0,49	0,43	0,67	0,12	0,37	0,16	0,53
0,27	0,27	0,35	0,30	0,25	0,45	0,49	0,41	0,64	0,12	0,37	0,15	0,52
0,27	0,27	0,34	0,30	0,26	0,42	0,49	0,40	0,62	0,12	0,36	0,15	0,51
0,26	0,26	0,34	0,30	0,26	0,41	0,50	0,39	0,61	0,12	0,35	0,14	0,50
0,25	0,25	0,33	0,29	0,26	0,40	0,50	0,38	0,60	0,12	0,35	0,14	0,49
0,24	0,24	0,33	0,29	0,26	0,39	0,49	0,37	0,61	0,11	0,34	0,14	0,49
0,23	0,23	0,32	0,28	0,26	0,37	0,48	0,36	0,62	0,11	0,34	0,15	0,48

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 10%  
en 50 años

0,23	0,23	0,31	0,28	0,26	0,36	0,49	0,35	0,63	0,11	0,33	0,15	0,49
0,22	0,22	0,31	0,27	0,26	0,34	0,50	0,34	0,63	0,11	0,33	0,15	0,48
0,21	0,21	0,30	0,27	0,25	0,33	0,51	0,33	0,62	0,11	0,32	0,15	0,48
0,20	0,20	0,30	0,26	0,25	0,32	0,52	0,32	0,61	0,11	0,32	0,16	0,48
0,20	0,20	0,29	0,25	0,26	0,30	0,54	0,31	0,62	0,11	0,32	0,16	0,48
0,19	0,19	0,28	0,25	0,26	0,29	0,55	0,31	0,63	0,11	0,32	0,17	0,48
0,19	0,19	0,28	0,24	0,26	0,28	0,55	0,30	0,64	0,11	0,32	0,17	0,49
0,18	0,18	0,27	0,24	0,25	0,28	0,56	0,29	0,65	0,12	0,32	0,17	0,49
0,18	0,18	0,27	0,24	0,25	0,27	0,56	0,28	0,67	0,12	0,32	0,18	0,50
0,17	0,17	0,26	0,24	0,25	0,27	0,56	0,27	0,70	0,12	0,32	0,19	0,50
0,16	0,16	0,26	0,24	0,24	0,26	0,56	0,27	0,71	0,12	0,31	0,19	0,51
0,16	0,16	0,26	0,24	0,24	0,25	0,56	0,26	0,72	0,12	0,31	0,20	0,51
0,15	0,15	0,25	0,24	0,23	0,25	0,56	0,25	0,71	0,12	0,31	0,19	0,50
0,15	0,15	0,25	0,24	0,22	0,24	0,55	0,24	0,69	0,12	0,30	0,19	0,49
0,14	0,14	0,25	0,23	0,22	0,23	0,55	0,24	0,66	0,11	0,29	0,18	0,48
0,14	0,14	0,24	0,23	0,21	0,22	0,55	0,23	0,63	0,11	0,29	0,18	0,47
0,13	0,13	0,24	0,23	0,21	0,22	0,53	0,22	0,61	0,11	0,28	0,17	0,45
0,12	0,12	0,24	0,22	0,20	0,22	0,52	0,21	0,59	0,10	0,27	0,17	0,44
0,12	0,12	0,23	0,22	0,20	0,21	0,50	0,20	0,57	0,10	0,26	0,16	0,42
0,11	0,11	0,23	0,21	0,19	0,21	0,47	0,19	0,55	0,09	0,25	0,16	0,41
0,11	0,11	0,22	0,20	0,19	0,21	0,45	0,19	0,54	0,09	0,24	0,15	0,40
0,11	0,11	0,22	0,20	0,19	0,20	0,43	0,18	0,53	0,08	0,24	0,15	0,39
0,10	0,10	0,22	0,20	0,18	0,20	0,41	0,18	0,53	0,07	0,23	0,14	0,38
0,10	0,10	0,21	0,19	0,18	0,19	0,39	0,17	0,52	0,07	0,23	0,14	0,37
0,10	0,10	0,21	0,19	0,18	0,19	0,39	0,17	0,52	0,07	0,22	0,14	0,36
0,09	0,09	0,21	0,19	0,17	0,18	0,39	0,16	0,52	0,07	0,22	0,14	0,36
0,09	0,09	0,20	0,18	0,17	0,18	0,39	0,16	0,53	0,07	0,22	0,15	0,36
0,09	0,09	0,20	0,18	0,17	0,18	0,39	0,15	0,54	0,06	0,22	0,15	0,37
0,09	0,09	0,20	0,18	0,16	0,18	0,38	0,15	0,55	0,06	0,22	0,15	0,37
0,09	0,09	0,19	0,17	0,16	0,18	0,38	0,14	0,57	0,06	0,22	0,16	0,38
0,09	0,09	0,19	0,17	0,16	0,18	0,38	0,14	0,59	0,06	0,22	0,17	0,38
0,09	0,09	0,18	0,16	0,16	0,18	0,38	0,14	0,62	0,06	0,22	0,17	0,39
0,09	0,09	0,18	0,16	0,16	0,18	0,38	0,14	0,64	0,06	0,22	0,18	0,40
0,09	0,09	0,18	0,16	0,16	0,17	0,37	0,13	0,67	0,06	0,22	0,19	0,41
0,09	0,09	0,17	0,15	0,16	0,17	0,36	0,13	0,69	0,06	0,22	0,20	0,42
0,09	0,09	0,17	0,15	0,16	0,17	0,35	0,13	0,72	0,06	0,22	0,20	0,42

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 10%  
en 50 años

0,09	0,09	0,17	0,15	0,15	0,16	0,34	0,13	0,73	0,06	0,22	0,21	0,43
0,09	0,09	0,16	0,14	0,15	0,16	0,32	0,13	0,74	0,06	0,22	0,21	0,43
0,09	0,09	0,16	0,14	0,15	0,16	0,31	0,12	0,75	0,06	0,22	0,21	0,43
0,09	0,09	0,16	0,14	0,15	0,16	0,31	0,12	0,76	0,06	0,22	0,22	0,43
0,09	0,09	0,15	0,13	0,14	0,16	0,30	0,12	0,77	0,06	0,21	0,22	0,43
0,09	0,09	0,15	0,13	0,14	0,16	0,30	0,12	0,77	0,06	0,21	0,22	0,43
0,09	0,09	0,15	0,13	0,14	0,16	0,29	0,12	0,76	0,05	0,21	0,22	0,43
0,09	0,09	0,15	0,12	0,13	0,16	0,28	0,12	0,75	0,05	0,21	0,21	0,42
0,09	0,09	0,14	0,12	0,13	0,16	0,27	0,12	0,74	0,05	0,20	0,21	0,41
0,09	0,09	0,14	0,11	0,13	0,16	0,26	0,12	0,72	0,05	0,20	0,20	0,40
0,09	0,09	0,14	0,11	0,12	0,16	0,26	0,11	0,70	0,05	0,19	0,20	0,39
0,09	0,09	0,14	0,11	0,12	0,16	0,26	0,12	0,67	0,04	0,19	0,19	0,38
0,09	0,09	0,13	0,11	0,12	0,16	0,26	0,12	0,65	0,04	0,19	0,18	0,37
0,09	0,09	0,13	0,10	0,12	0,16	0,25	0,12	0,62	0,04	0,18	0,18	0,36
0,08	0,08	0,13	0,10	0,11	0,16	0,25	0,12	0,60	0,04	0,18	0,17	0,35
0,08	0,08	0,12	0,10	0,11	0,17	0,25	0,12	0,57	0,04	0,17	0,16	0,33
0,08	0,08	0,12	0,10	0,11	0,17	0,24	0,12	0,55	0,04	0,17	0,15	0,32
0,08	0,08	0,12	0,10	0,11	0,17	0,24	0,12	0,53	0,05	0,17	0,15	0,31
0,08	0,08	0,12	0,09	0,10	0,17	0,23	0,12	0,51	0,05	0,16	0,14	0,30
0,08	0,08	0,12	0,09	0,10	0,17	0,23	0,12	0,49	0,05	0,16	0,13	0,29
0,08	0,08	0,12	0,09	0,10	0,17	0,22	0,12	0,47	0,05	0,16	0,13	0,28
0,07	0,07	0,11	0,09	0,10	0,17	0,22	0,12	0,45	0,05	0,15	0,12	0,28
0,07	0,07	0,11	0,09	0,10	0,17	0,22	0,12	0,43	0,05	0,15	0,12	0,27
0,07	0,07	0,11	0,08	0,10	0,17	0,22	0,12	0,41	0,05	0,15	0,11	0,26
0,07	0,07	0,11	0,08	0,10	0,17	0,22	0,12	0,40	0,05	0,15	0,11	0,26
0,07	0,07	0,11	0,08	0,10	0,17	0,22	0,12	0,40	0,05	0,15	0,11	0,25
0,07	0,07	0,11	0,08	0,10	0,17	0,22	0,12	0,39	0,05	0,14	0,11	0,25
0,06	0,06	0,11	0,08	0,10	0,17	0,22	0,12	0,39	0,05	0,14	0,11	0,25
0,06	0,06	0,10	0,08	0,10	0,17	0,22	0,12	0,38	0,04	0,14	0,11	0,25
0,06	0,06	0,10	0,07	0,10	0,17	0,21	0,12	0,38	0,04	0,14	0,10	0,24
0,06	0,06	0,10	0,07	0,09	0,17	0,21	0,12	0,37	0,04	0,14	0,10	0,24
0,06	0,06	0,10	0,07	0,09	0,17	0,20	0,12	0,36	0,04	0,14	0,10	0,24
0,06	0,06	0,10	0,07	0,09	0,17	0,20	0,12	0,35	0,04	0,13	0,10	0,23
0,06	0,06	0,10	0,07	0,09	0,17	0,20	0,12	0,35	0,04	0,13	0,10	0,23
0,06	0,06	0,10	0,07	0,09	0,17	0,19	0,12	0,34	0,04	0,13	0,09	0,22
0,06	0,06	0,09	0,06	0,09	0,17	0,19	0,12	0,34	0,04	0,13	0,09	0,22

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 10%  
en 50 años

0,05	0,05	0,09	0,06	0,09	0,17	0,18	0,11	0,33	0,04	0,13	0,09	0,22
0,05	0,05	0,09	0,06	0,09	0,17	0,18	0,11	0,33	0,04	0,12	0,09	0,21
0,05	0,05	0,09	0,06	0,08	0,17	0,17	0,11	0,32	0,04	0,12	0,09	0,21
0,05	0,05	0,09	0,06	0,08	0,17	0,17	0,11	0,31	0,05	0,12	0,09	0,21
0,05	0,05	0,09	0,06	0,08	0,17	0,17	0,11	0,31	0,05	0,12	0,08	0,20
0,05	0,05	0,09	0,06	0,08	0,17	0,16	0,11	0,30	0,05	0,12	0,08	0,20
0,05	0,05	0,08	0,06	0,08	0,17	0,16	0,11	0,29	0,05	0,12	0,08	0,20
0,05	0,05	0,08	0,05	0,08	0,17	0,16	0,11	0,28	0,05	0,11	0,08	0,19
0,05	0,05	0,08	0,05	0,08	0,17	0,16	0,11	0,27	0,05	0,11	0,08	0,19
0,05	0,05	0,08	0,05	0,07	0,17	0,16	0,11	0,26	0,04	0,11	0,07	0,18
0,05	0,05	0,08	0,05	0,07	0,17	0,16	0,11	0,25	0,04	0,11	0,07	0,18
0,04	0,04	0,08	0,05	0,07	0,17	0,15	0,11	0,25	0,04	0,11	0,07	0,18
0,04	0,04	0,07	0,05	0,07	0,17	0,15	0,11	0,24	0,04	0,11	0,07	0,17
0,04	0,04	0,07	0,05	0,07	0,16	0,15	0,11	0,23	0,04	0,10	0,07	0,17
0,04	0,04	0,07	0,05	0,07	0,16	0,15	0,11	0,23	0,04	0,10	0,07	0,17
0,04	0,04	0,07	0,05	0,07	0,16	0,15	0,11	0,22	0,04	0,10	0,07	0,17
0,04	0,04	0,07	0,05	0,07	0,17	0,14	0,11	0,22	0,04	0,10	0,06	0,16
0,04	0,04	0,07	0,05	0,07	0,17	0,14	0,11	0,21	0,04	0,10	0,06	0,16
0,04	0,04	0,07	0,05	0,06	0,17	0,14	0,11	0,21	0,04	0,10	0,06	0,16
0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,17	0,14	0,11	0,21	0,04	0,10	0,06	0,16
0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,17	0,14	0,11	0,20	0,04	0,10	0,06	0,16
0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,17	0,13	0,11	0,20	0,03	0,09	0,06	0,16
0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,16	0,13	0,11	0,20	0,03	0,09	0,06	0,16
0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,16	0,13	0,11	0,20	0,03	0,09	0,06	0,15
0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,16	0,12	0,11	0,20	0,03	0,09	0,06	0,15
0,04	0,04	0,05	0,04	0,06	0,16	0,12	0,11	0,20	0,03	0,09	0,06	0,15
0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,16	0,12	0,11	0,20	0,03	0,09	0,06	0,15
0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,16	0,12	0,10	0,20	0,03	0,09	0,06	0,15
0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,16	0,12	0,10	0,20	0,03	0,09	0,06	0,15
0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,16	0,12	0,10	0,20	0,03	0,09	0,06	0,15
0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,15	0,12	0,10	0,19	0,03	0,09	0,06	0,14
0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,15	0,11	0,10	0,19	0,03	0,09	0,06	0,14
0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,15	0,11	0,10	0,19	0,03	0,08	0,06	0,14
0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,15	0,11	0,10	0,19	0,03	0,08	0,06	0,14

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 10% en 50 años

0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,15	0,11	0,10	0,19	0,03	0,08	0,06	0,14
0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,14	0,11	0,10	0,18	0,03	0,08	0,06	0,14
0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,14	0,11	0,10	0,18	0,03	0,08	0,05	0,13
0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,14	0,11	0,10	0,18	0,03	0,08	0,05	0,13
0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,14	0,10	0,10	0,17	0,03	0,08	0,05	0,13
0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,14	0,10	0,10	0,17	0,03	0,08	0,05	0,13
0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,14	0,10	0,10	0,17	0,03	0,08	0,05	0,13
0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,14	0,10	0,10	0,17	0,03	0,08	0,05	0,13

Fuente: Elaboración propia con el programa Microsoft Excel en base a los resultados del programa PRISM.

T(s)	ESPECTRO DE REGISTROS PROMEDIO ADECUADOS A PGA 5% en 50 años											
	SALV	GEOGRAF	GEOTEC	MANAG	IRPINA	DINAR	KOCAELI	LANDERS	VALLEY	PROM.	S.D.	PROM+1SD
0,00	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,00	0,65
0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,66	0,65	0,65	0,69	0,69	0,66	0,02	0,68
0,67	0,75	0,67	0,67	0,74	0,75	0,66	0,72	0,84	0,76	0,73	0,06	0,79
0,75	0,95	0,75	0,66	0,90	0,83	0,67	0,96	1,12	1,09	0,88	0,17	1,05
0,75	1,28	0,75	0,73	1,04	1,19	0,74	1,16	2,03	1,24	1,13	0,41	1,54
0,83	1,35	0,83	0,93	1,27	1,65	0,85	1,18	1,22	1,13	1,16	0,26	1,42
0,90	1,10	0,90	0,93	1,21	1,38	0,94	1,59	1,62	1,32	1,22	0,28	1,50
1,01	1,68	1,01	0,82	1,56	1,18	1,18	1,54	1,37	1,54	1,32	0,29	1,61
0,85	1,79	0,85	1,11	1,50	1,62	1,25	1,87	1,42	1,96	1,48	0,37	1,85
0,87	1,64	0,87	1,16	1,50	1,57	1,37	2,13	1,49	2,26	1,55	0,43	1,99
0,84	1,40	0,84	1,25	1,85	1,67	1,43	2,63	1,38	2,27	1,64	0,55	2,18
0,87	1,53	0,87	1,35	1,82	1,65	1,84	2,65	1,54	1,72	1,66	0,47	2,14
0,91	1,60	0,91	1,40	1,53	1,63	2,19	2,22	1,49	1,50	1,61	0,40	2,01
0,95	1,80	0,95	1,52	1,86	1,78	1,99	2,06	1,38	1,44	1,64	0,35	1,99
0,91	1,89	0,91	1,57	1,88	1,64	1,98	1,74	1,31	1,39	1,59	0,34	1,93
1,00	1,76	1,00	1,57	1,89	1,75	2,37	1,72	1,46	1,27	1,64	0,39	2,03
1,12	1,75	1,12	1,48	1,92	1,46	2,36	1,76	1,30	1,07	1,58	0,41	1,99
1,24	1,99	1,24	1,37	2,16	1,37	2,34	1,72	1,26	1,07	1,61	0,46	2,07
1,36	2,14	1,36	1,17	2,03	1,40	1,97	1,85	1,20	0,96	1,57	0,43	2,00

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 5%  
en 50 años

1,45	2,15	1,45	1,06	1,92	1,41	1,57	1,62	1,18	0,96	1,48	0,39	1,87
1,47	1,96	1,47	0,97	1,81	1,44	1,60	1,47	1,27	0,93	1,43	0,34	1,78
1,45	1,64	1,45	0,93	1,68	1,40	1,65	1,30	1,20	0,90	1,35	0,30	1,65
1,36	1,41	1,36	0,93	1,48	1,30	1,54	1,17	1,08	0,87	1,24	0,24	1,48
1,38	1,16	1,38	0,97	1,34	1,25	1,29	1,09	1,00	0,74	1,13	0,21	1,34
1,40	1,00	1,40	1,03	1,46	1,11	1,19	1,06	1,16	0,63	1,12	0,24	1,36
1,46	0,95	1,46	1,13	1,51	0,98	1,16	1,06	1,33	0,59	1,13	0,28	1,41
1,47	0,91	1,47	1,21	1,39	1,00	1,06	1,03	1,39	0,55	1,11	0,29	1,40
1,45	1,01	1,45	1,25	1,17	1,08	0,94	0,96	1,52	0,54	1,10	0,30	1,40
1,40	1,04	1,40	1,29	1,09	1,12	0,98	0,93	1,57	0,54	1,11	0,30	1,40
1,38	1,05	1,38	1,35	1,11	1,21	0,97	0,91	1,56	0,52	1,12	0,31	1,43
1,38	1,08	1,38	1,39	1,13	1,27	0,92	0,89	1,49	0,51	1,12	0,31	1,43
1,38	1,12	1,38	1,40	1,21	1,13	0,87	0,86	1,43	0,49	1,10	0,31	1,41
1,37	1,16	1,37	1,38	1,17	0,95	0,87	0,81	1,45	0,47	1,07	0,32	1,39
1,40	1,19	1,40	1,34	1,06	0,85	0,95	0,75	1,43	0,45	1,05	0,33	1,38
1,45	1,09	1,45	1,32	0,96	0,86	0,95	0,69	1,38	0,46	1,02	0,33	1,35
1,47	0,92	1,47	1,29	0,85	0,86	0,94	0,66	1,39	0,42	0,98	0,35	1,33
1,48	0,79	1,48	1,26	0,75	0,83	0,93	0,66	1,50	0,40	0,96	0,38	1,34
1,48	0,75	1,48	1,21	0,69	0,81	0,98	0,68	1,52	0,39	0,95	0,39	1,33
1,47	0,72	1,47	1,16	0,70	0,80	1,00	0,70	1,41	0,38	0,93	0,36	1,29
1,47	0,69	1,47	1,11	0,72	0,77	1,06	0,71	1,30	0,37	0,91	0,35	1,26
1,47	0,67	1,47	1,05	0,70	0,75	1,16	0,70	1,27	0,37	0,90	0,35	1,26
1,45	0,63	1,45	0,99	0,76	0,73	1,23	0,68	1,33	0,36	0,91	0,37	1,27
1,44	0,61	1,44	0,93	0,80	0,72	1,26	0,63	1,39	0,36	0,90	0,38	1,28
1,41	0,59	1,41	0,87	0,81	0,72	1,25	0,59	1,39	0,36	0,89	0,38	1,27
1,37	0,63	1,37	0,81	0,79	0,68	1,21	0,60	1,38	0,35	0,87	0,36	1,24
1,32	0,68	1,32	0,75	0,75	0,63	1,16	0,64	1,46	0,35	0,86	0,37	1,23
1,25	0,73	1,25	0,70	0,70	0,59	1,10	0,66	1,60	0,34	0,85	0,39	1,24
1,18	0,78	1,18	0,65	0,64	0,59	1,03	0,68	1,75	0,33	0,85	0,42	1,27
1,13	0,82	1,13	0,61	0,61	0,61	1,01	0,68	1,82	0,32	0,85	0,44	1,28
1,08	0,85	1,08	0,57	0,58	0,62	1,00	0,69	1,77	0,31	0,83	0,42	1,26
1,04	0,87	1,04	0,55	0,55	0,62	0,96	0,69	1,74	0,30	0,81	0,42	1,23
1,00	0,87	1,00	0,52	0,52	0,60	0,90	0,67	1,72	0,29	0,79	0,41	1,20
0,95	0,87	0,95	0,50	0,50	0,57	0,86	0,63	1,64	0,28	0,76	0,40	1,15
0,91	0,87	0,91	0,48	0,48	0,53	0,85	0,58	1,55	0,27	0,72	0,38	1,10
0,86	0,86	0,86	0,46	0,46	0,50	0,86	0,52	1,52	0,26	0,70	0,38	1,08

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 5%  
en 50 años

0,82	0,83	0,82	0,45	0,44	0,49	0,85	0,49	1,48	0,25	0,68	0,37	1,05
0,78	0,80	0,78	0,43	0,41	0,50	0,82	0,46	1,48	0,24	0,66	0,37	1,03
0,74	0,76	0,74	0,41	0,38	0,52	0,79	0,45	1,49	0,23	0,64	0,37	1,01
0,72	0,71	0,72	0,42	0,36	0,55	0,80	0,44	1,49	0,23	0,64	0,37	1,01
0,70	0,67	0,70	0,42	0,35	0,57	0,83	0,43	1,45	0,23	0,63	0,36	0,99
0,69	0,62	0,69	0,42	0,33	0,59	0,86	0,44	1,37	0,23	0,62	0,34	0,96
0,67	0,59	0,67	0,42	0,31	0,61	0,86	0,47	1,31	0,23	0,61	0,32	0,93
0,65	0,55	0,65	0,42	0,31	0,61	0,85	0,51	1,31	0,22	0,60	0,32	0,93
0,63	0,51	0,63	0,42	0,30	0,61	0,88	0,54	1,29	0,22	0,60	0,32	0,92
0,62	0,47	0,62	0,42	0,29	0,60	0,89	0,56	1,23	0,22	0,59	0,31	0,90
0,60	0,45	0,60	0,42	0,30	0,59	0,89	0,58	1,16	0,22	0,58	0,29	0,87
0,59	0,43	0,59	0,42	0,30	0,58	0,87	0,59	1,10	0,22	0,57	0,28	0,84
0,57	0,41	0,57	0,42	0,30	0,58	0,85	0,59	1,01	0,21	0,55	0,26	0,80
0,55	0,39	0,55	0,42	0,29	0,57	0,83	0,59	0,92	0,21	0,53	0,24	0,77
0,54	0,39	0,54	0,42	0,28	0,55	0,80	0,59	0,91	0,20	0,52	0,23	0,75
0,52	0,38	0,52	0,41	0,28	0,55	0,77	0,58	0,90	0,19	0,51	0,23	0,74
0,51	0,38	0,51	0,41	0,28	0,54	0,75	0,57	0,89	0,19	0,50	0,22	0,72
0,50	0,38	0,50	0,41	0,29	0,54	0,72	0,56	0,89	0,18	0,50	0,22	0,71
0,48	0,37	0,48	0,40	0,29	0,54	0,70	0,56	0,88	0,17	0,49	0,22	0,70
0,47	0,37	0,47	0,40	0,28	0,56	0,68	0,56	0,88	0,17	0,49	0,21	0,70
0,46	0,36	0,46	0,39	0,29	0,57	0,65	0,56	0,87	0,16	0,48	0,21	0,69
0,45	0,36	0,45	0,39	0,30	0,58	0,62	0,55	0,87	0,15	0,47	0,21	0,68
0,44	0,35	0,44	0,38	0,30	0,58	0,61	0,54	0,85	0,15	0,47	0,20	0,67
0,44	0,35	0,44	0,38	0,31	0,57	0,60	0,53	0,83	0,15	0,46	0,20	0,66
0,43	0,34	0,43	0,37	0,31	0,55	0,60	0,51	0,79	0,14	0,45	0,19	0,64
0,42	0,33	0,42	0,37	0,32	0,52	0,61	0,49	0,77	0,15	0,44	0,18	0,62
0,42	0,32	0,42	0,37	0,32	0,51	0,61	0,48	0,75	0,15	0,43	0,18	0,61
0,41	0,31	0,41	0,36	0,33	0,49	0,61	0,47	0,74	0,15	0,43	0,18	0,60
0,40	0,30	0,40	0,35	0,33	0,48	0,61	0,46	0,75	0,14	0,42	0,18	0,60
0,39	0,29	0,39	0,35	0,32	0,46	0,59	0,44	0,76	0,14	0,42	0,18	0,60
0,39	0,28	0,39	0,34	0,32	0,44	0,60	0,43	0,77	0,14	0,41	0,19	0,60
0,38	0,27	0,38	0,33	0,32	0,42	0,62	0,42	0,78	0,13	0,41	0,19	0,60
0,37	0,26	0,37	0,33	0,31	0,41	0,62	0,41	0,77	0,13	0,40	0,19	0,59
0,36	0,25	0,36	0,32	0,31	0,39	0,65	0,40	0,75	0,13	0,40	0,19	0,59
0,36	0,24	0,36	0,31	0,31	0,37	0,66	0,39	0,76	0,13	0,39	0,20	0,59
0,35	0,24	0,35	0,30	0,32	0,36	0,68	0,38	0,78	0,14	0,39	0,20	0,60

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 5% en 50 años

0,34	0,23	0,34	0,30	0,31	0,35	0,68	0,37	0,79	0,14	0,39	0,21	0,60
0,34	0,22	0,34	0,30	0,31	0,34	0,69	0,36	0,80	0,14	0,39	0,21	0,60
0,33	0,22	0,33	0,30	0,31	0,34	0,69	0,35	0,82	0,15	0,39	0,22	0,61
0,33	0,21	0,33	0,30	0,30	0,33	0,69	0,34	0,86	0,15	0,39	0,23	0,62
0,32	0,20	0,32	0,30	0,30	0,32	0,69	0,33	0,88	0,15	0,39	0,24	0,63
0,32	0,20	0,32	0,30	0,29	0,31	0,69	0,32	0,88	0,15	0,38	0,24	0,62
0,31	0,19	0,31	0,30	0,28	0,30	0,69	0,31	0,87	0,14	0,38	0,24	0,62
0,31	0,18	0,31	0,29	0,28	0,29	0,68	0,30	0,85	0,14	0,37	0,23	0,60
0,30	0,17	0,30	0,29	0,27	0,28	0,68	0,29	0,81	0,14	0,36	0,23	0,59
0,30	0,17	0,30	0,28	0,26	0,28	0,67	0,28	0,78	0,14	0,35	0,22	0,57
0,30	0,16	0,30	0,28	0,26	0,27	0,66	0,27	0,76	0,13	0,34	0,22	0,56
0,29	0,15	0,29	0,27	0,25	0,27	0,64	0,26	0,73	0,13	0,33	0,21	0,54
0,29	0,15	0,29	0,27	0,24	0,26	0,61	0,25	0,70	0,12	0,32	0,20	0,52
0,28	0,14	0,28	0,26	0,24	0,26	0,59	0,24	0,68	0,12	0,31	0,19	0,50
0,28	0,14	0,28	0,25	0,24	0,26	0,56	0,23	0,67	0,11	0,30	0,19	0,49
0,27	0,13	0,27	0,25	0,23	0,25	0,53	0,22	0,66	0,10	0,29	0,18	0,48
0,27	0,13	0,27	0,24	0,23	0,24	0,50	0,22	0,65	0,09	0,28	0,18	0,46
0,26	0,12	0,26	0,24	0,22	0,24	0,48	0,21	0,64	0,09	0,28	0,18	0,45
0,26	0,12	0,26	0,23	0,22	0,23	0,48	0,20	0,64	0,08	0,27	0,18	0,45
0,25	0,12	0,25	0,23	0,21	0,22	0,48	0,20	0,64	0,08	0,27	0,18	0,45
0,25	0,11	0,25	0,23	0,21	0,22	0,47	0,19	0,65	0,08	0,27	0,18	0,45
0,25	0,11	0,25	0,22	0,20	0,22	0,47	0,19	0,66	0,08	0,27	0,18	0,45
0,24	0,11	0,24	0,22	0,20	0,22	0,47	0,18	0,68	0,08	0,27	0,19	0,46
0,24	0,11	0,24	0,21	0,20	0,22	0,47	0,18	0,70	0,08	0,27	0,20	0,46
0,23	0,11	0,23	0,21	0,20	0,22	0,47	0,17	0,73	0,07	0,27	0,20	0,47
0,23	0,11	0,23	0,20	0,20	0,22	0,47	0,17	0,76	0,07	0,27	0,21	0,48
0,22	0,11	0,22	0,20	0,20	0,22	0,46	0,17	0,79	0,07	0,27	0,22	0,50
0,22	0,11	0,22	0,19	0,20	0,21	0,45	0,16	0,83	0,07	0,27	0,23	0,51
0,21	0,11	0,21	0,19	0,19	0,21	0,44	0,16	0,86	0,07	0,27	0,24	0,51
0,21	0,11	0,21	0,18	0,19	0,20	0,43	0,16	0,88	0,07	0,27	0,25	0,52
0,21	0,11	0,21	0,18	0,19	0,20	0,41	0,16	0,90	0,07	0,27	0,26	0,53
0,20	0,11	0,20	0,18	0,19	0,20	0,40	0,15	0,92	0,07	0,27	0,26	0,53
0,20	0,11	0,20	0,17	0,18	0,20	0,38	0,15	0,93	0,07	0,27	0,26	0,53
0,19	0,11	0,19	0,17	0,18	0,20	0,38	0,15	0,94	0,07	0,27	0,27	0,53
0,19	0,11	0,19	0,16	0,18	0,20	0,37	0,15	0,95	0,07	0,26	0,27	0,53
0,19	0,11	0,19	0,16	0,17	0,20	0,36	0,15	0,95	0,07	0,26	0,27	0,53

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 5%  
en 50 años

0,18	0,11	0,18	0,15	0,17	0,20	0,35	0,15	0,94	0,07	0,26	0,27	0,52
0,18	0,11	0,18	0,15	0,17	0,20	0,34	0,15	0,93	0,07	0,25	0,26	0,52
0,18	0,11	0,18	0,15	0,16	0,20	0,33	0,14	0,91	0,06	0,25	0,26	0,51
0,17	0,11	0,17	0,14	0,16	0,20	0,32	0,14	0,89	0,06	0,24	0,25	0,49
0,17	0,11	0,17	0,14	0,15	0,20	0,32	0,14	0,86	0,06	0,24	0,24	0,48
0,17	0,11	0,17	0,13	0,15	0,20	0,32	0,14	0,83	0,05	0,23	0,23	0,47
0,16	0,11	0,16	0,13	0,15	0,20	0,31	0,14	0,80	0,05	0,23	0,23	0,45
0,16	0,10	0,16	0,13	0,14	0,20	0,31	0,14	0,77	0,05	0,22	0,22	0,44
0,16	0,10	0,16	0,13	0,14	0,20	0,31	0,14	0,74	0,05	0,22	0,21	0,43
0,15	0,10	0,15	0,12	0,14	0,21	0,30	0,14	0,71	0,05	0,21	0,20	0,41
0,15	0,10	0,15	0,12	0,13	0,21	0,30	0,14	0,68	0,06	0,21	0,19	0,40
0,15	0,10	0,15	0,12	0,13	0,21	0,29	0,14	0,65	0,06	0,21	0,18	0,39
0,15	0,10	0,15	0,12	0,13	0,21	0,28	0,14	0,63	0,06	0,20	0,17	0,37
0,14	0,10	0,14	0,11	0,13	0,21	0,28	0,14	0,60	0,06	0,20	0,16	0,36
0,14	0,09	0,14	0,11	0,13	0,21	0,27	0,15	0,58	0,06	0,19	0,16	0,35
0,14	0,09	0,14	0,11	0,13	0,21	0,27	0,15	0,56	0,06	0,19	0,15	0,34
0,14	0,09	0,14	0,11	0,13	0,21	0,27	0,15	0,53	0,06	0,19	0,14	0,33
0,14	0,09	0,14	0,10	0,12	0,21	0,27	0,15	0,51	0,06	0,18	0,14	0,32
0,14	0,08	0,14	0,10	0,12	0,21	0,27	0,15	0,50	0,06	0,18	0,13	0,32
0,13	0,08	0,13	0,10	0,12	0,21	0,27	0,15	0,49	0,06	0,18	0,13	0,31
0,13	0,08	0,13	0,10	0,12	0,21	0,27	0,15	0,49	0,06	0,18	0,13	0,31
0,13	0,08	0,13	0,10	0,12	0,21	0,27	0,15	0,48	0,06	0,18	0,13	0,31
0,13	0,08	0,13	0,09	0,12	0,21	0,27	0,15	0,47	0,05	0,17	0,13	0,30
0,13	0,08	0,13	0,09	0,12	0,21	0,26	0,15	0,47	0,05	0,17	0,13	0,30
0,12	0,08	0,12	0,09	0,12	0,21	0,25	0,15	0,46	0,05	0,17	0,13	0,30
0,12	0,08	0,12	0,09	0,12	0,21	0,25	0,15	0,45	0,05	0,17	0,12	0,29
0,12	0,07	0,12	0,09	0,11	0,21	0,25	0,14	0,44	0,05	0,16	0,12	0,28
0,12	0,07	0,12	0,08	0,11	0,21	0,24	0,14	0,43	0,05	0,16	0,12	0,28
0,12	0,07	0,12	0,08	0,11	0,21	0,24	0,14	0,42	0,05	0,16	0,12	0,28
0,12	0,07	0,12	0,08	0,11	0,21	0,23	0,14	0,42	0,05	0,16	0,11	0,27
0,11	0,07	0,11	0,08	0,11	0,21	0,23	0,14	0,41	0,05	0,16	0,11	0,27
0,11	0,07	0,11	0,08	0,11	0,21	0,22	0,14	0,40	0,05	0,15	0,11	0,26
0,11	0,06	0,11	0,07	0,10	0,21	0,21	0,14	0,40	0,06	0,15	0,11	0,26
0,11	0,06	0,11	0,07	0,10	0,21	0,21	0,14	0,39	0,06	0,15	0,11	0,26
0,11	0,06	0,11	0,07	0,10	0,21	0,21	0,14	0,38	0,06	0,15	0,10	0,25
0,11	0,06	0,11	0,07	0,10	0,21	0,20	0,14	0,37	0,06	0,15	0,10	0,25

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 5%  
en 50 años

0,10	0,06	0,10	0,07	0,10	0,21	0,20	0,14	0,36	0,06	0,14	0,10	0,24
0,10	0,06	0,10	0,07	0,10	0,21	0,20	0,14	0,35	0,06	0,14	0,10	0,24
0,10	0,06	0,10	0,07	0,09	0,21	0,20	0,14	0,33	0,06	0,14	0,09	0,23
0,10	0,06	0,10	0,06	0,09	0,21	0,20	0,14	0,32	0,05	0,14	0,09	0,23
0,10	0,06	0,10	0,06	0,09	0,20	0,19	0,14	0,31	0,05	0,13	0,09	0,22
0,09	0,06	0,09	0,06	0,09	0,20	0,19	0,14	0,30	0,05	0,13	0,09	0,22
0,09	0,05	0,09	0,06	0,09	0,20	0,19	0,14	0,29	0,05	0,13	0,08	0,21
0,09	0,05	0,09	0,06	0,09	0,20	0,19	0,14	0,29	0,05	0,13	0,08	0,21
0,09	0,05	0,09	0,06	0,09	0,20	0,18	0,14	0,28	0,05	0,13	0,08	0,21
0,09	0,05	0,09	0,06	0,08	0,20	0,18	0,14	0,28	0,05	0,13	0,08	0,21
0,08	0,05	0,08	0,06	0,08	0,20	0,18	0,14	0,27	0,05	0,12	0,08	0,20
0,08	0,05	0,08	0,06	0,08	0,20	0,18	0,14	0,26	0,05	0,12	0,08	0,20
0,08	0,05	0,08	0,06	0,08	0,20	0,17	0,14	0,26	0,05	0,12	0,08	0,20
0,08	0,05	0,08	0,05	0,08	0,20	0,17	0,14	0,25	0,04	0,12	0,08	0,20
0,08	0,05	0,08	0,05	0,08	0,20	0,17	0,13	0,25	0,04	0,12	0,08	0,19
0,08	0,05	0,08	0,05	0,08	0,20	0,17	0,13	0,25	0,04	0,12	0,08	0,19
0,07	0,05	0,07	0,05	0,07	0,20	0,16	0,13	0,25	0,04	0,12	0,08	0,19
0,07	0,05	0,07	0,05	0,07	0,20	0,16	0,13	0,25	0,04	0,11	0,08	0,19
0,07	0,05	0,07	0,05	0,07	0,20	0,16	0,13	0,25	0,04	0,11	0,08	0,19
0,07	0,05	0,07	0,05	0,07	0,20	0,15	0,13	0,25	0,04	0,11	0,08	0,19
0,07	0,05	0,07	0,05	0,07	0,20	0,15	0,13	0,25	0,04	0,11	0,08	0,19
0,07	0,05	0,07	0,05	0,07	0,20	0,15	0,13	0,25	0,04	0,11	0,08	0,19
0,07	0,05	0,07	0,05	0,07	0,20	0,15	0,13	0,25	0,04	0,11	0,08	0,19
0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,20	0,15	0,13	0,25	0,04	0,11	0,07	0,18
0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,19	0,15	0,13	0,24	0,04	0,11	0,07	0,18
0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,19	0,14	0,13	0,24	0,04	0,11	0,07	0,18
0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,19	0,14	0,13	0,24	0,04	0,11	0,07	0,18
0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,19	0,14	0,13	0,24	0,04	0,10	0,07	0,18
0,06	0,05	0,06	0,04	0,06	0,19	0,14	0,13	0,23	0,04	0,10	0,07	0,17
0,06	0,05	0,06	0,04	0,06	0,18	0,14	0,13	0,23	0,04	0,10	0,07	0,17
0,06	0,05	0,06	0,04	0,06	0,18	0,14	0,12	0,23	0,04	0,10	0,07	0,17
0,06	0,05	0,06	0,04	0,06	0,18	0,13	0,12	0,22	0,04	0,10	0,07	0,17
0,06	0,05	0,06	0,04	0,05	0,18	0,13	0,12	0,22	0,04	0,10	0,07	0,17
0,06	0,05	0,06	0,04	0,05	0,17	0,13	0,12	0,22	0,04	0,10	0,07	0,16
0,06	0,05	0,06	0,04	0,05	0,17	0,13	0,12	0,21	0,04	0,10	0,07	0,16
0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,17	0,13	0,12	0,21	0,04	0,10	0,06	0,16

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 5% en 50 años

0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,17	0,12	0,12	0,21	0,04	0,09	0,06	0,16
0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,17	0,12	0,12	0,21	0,04	0,09	0,06	0,16

Fuente: Elaboración propia con el programa Microsoft Excel en base a los resultados del programa PRISM.

ESPECTRO DE REGISTROS PROMEDIO ADECUADOS A PGA 2% en 50 años												
T(s)	SALV	GEOGRAF	GEOTEC	MANAG	IRPINA	DINAR	KOCAELI	LANDERS	VALLEY	PROM.	S.D.	PROM+1SD
0,00	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,00	0,84
0,86	0,86	0,86	0,86	0,84	0,85	0,85	0,84	0,90	0,89	0,86	0,02	0,88
0,87	0,97	0,87	0,87	0,96	0,97	0,86	0,94	1,10	0,99	0,95	0,08	1,02
0,86	1,23	0,97	0,86	1,18	1,07	0,87	1,25	1,45	1,42	1,14	0,22	1,36
0,96	1,67	0,98	0,96	1,35	1,55	0,96	1,50	2,64	1,62	1,47	0,53	2,00
1,21	1,76	1,08	1,21	1,65	2,15	1,10	1,54	1,59	1,46	1,50	0,34	1,85
1,21	1,42	1,18	1,21	1,57	1,80	1,22	2,06	2,10	1,72	1,59	0,36	1,95
1,06	2,19	1,31	1,06	2,03	1,53	1,54	2,01	1,78	2,00	1,72	0,38	2,09
1,44	2,33	1,10	1,44	1,95	2,11	1,62	2,43	1,84	2,55	1,93	0,48	2,41
1,50	2,13	1,14	1,50	1,95	2,04	1,78	2,77	1,93	2,94	2,02	0,56	2,59
1,63	1,82	1,09	1,63	2,40	2,17	1,86	3,42	1,79	2,95	2,13	0,71	2,84
1,76	1,99	1,13	1,76	2,37	2,14	2,39	3,44	2,00	2,24	2,16	0,62	2,78
1,82	2,08	1,18	1,82	1,99	2,11	2,85	2,89	1,94	1,95	2,09	0,52	2,61
1,98	2,34	1,24	1,98	2,42	2,31	2,58	2,67	1,80	1,87	2,13	0,45	2,59
2,04	2,46	1,18	2,04	2,45	2,13	2,58	2,26	1,70	1,81	2,07	0,45	2,51
2,04	2,29	1,30	2,04	2,46	2,27	3,08	2,23	1,89	1,65	2,14	0,51	2,64
1,93	2,27	1,46	1,93	2,50	1,90	3,07	2,29	1,69	1,39	2,06	0,54	2,59
1,78	2,59	1,61	1,78	2,80	1,78	3,04	2,24	1,64	1,39	2,10	0,59	2,69
1,52	2,79	1,77	1,52	2,64	1,83	2,56	2,41	1,57	1,25	2,04	0,56	2,60
1,37	2,79	1,89	1,37	2,50	1,83	2,05	2,11	1,54	1,25	1,93	0,51	2,43
1,26	2,54	1,91	1,26	2,35	1,87	2,07	1,91	1,65	1,21	1,86	0,45	2,31
1,20	2,13	1,88	1,20	2,18	1,83	2,15	1,70	1,56	1,17	1,76	0,39	2,14
1,22	1,84	1,77	1,22	1,92	1,69	2,01	1,53	1,40	1,13	1,61	0,31	1,92
1,26	1,51	1,79	1,26	1,74	1,62	1,68	1,42	1,30	0,96	1,48	0,27	1,74
1,34	1,30	1,82	1,34	1,89	1,45	1,54	1,38	1,51	0,82	1,45	0,31	1,76
1,47	1,23	1,89	1,47	1,97	1,28	1,51	1,38	1,72	0,76	1,47	0,37	1,84
1,57	1,19	1,92	1,57	1,80	1,30	1,38	1,33	1,81	0,72	1,45	0,38	1,82

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 2%  
en 50 años

1,63	1,31	1,89	1,63	1,52	1,40	1,22	1,25	1,98	0,70	1,43	0,38	1,82
1,68	1,35	1,82	1,68	1,41	1,45	1,27	1,21	2,04	0,70	1,44	0,39	1,83
1,76	1,36	1,80	1,76	1,44	1,58	1,25	1,18	2,03	0,68	1,45	0,40	1,85
1,81	1,41	1,80	1,81	1,48	1,66	1,19	1,15	1,94	0,66	1,46	0,40	1,86
1,82	1,45	1,79	1,82	1,57	1,47	1,13	1,11	1,86	0,64	1,43	0,40	1,83
1,79	1,50	1,78	1,79	1,53	1,24	1,13	1,05	1,88	0,61	1,39	0,42	1,81
1,74	1,55	1,82	1,74	1,38	1,10	1,24	0,97	1,86	0,59	1,36	0,43	1,79
1,72	1,42	1,89	1,72	1,25	1,12	1,24	0,90	1,80	0,60	1,33	0,43	1,75
1,68	1,19	1,92	1,68	1,11	1,12	1,22	0,86	1,81	0,55	1,27	0,45	1,72
1,64	1,03	1,93	1,64	0,98	1,08	1,21	0,85	1,95	0,52	1,24	0,49	1,74
1,58	0,97	1,93	1,58	0,90	1,05	1,28	0,88	1,98	0,50	1,23	0,50	1,73
1,51	0,94	1,91	1,51	0,91	1,05	1,30	0,90	1,83	0,50	1,21	0,47	1,67
1,44	0,90	1,91	1,44	0,93	1,00	1,38	0,92	1,69	0,48	1,18	0,45	1,63
1,36	0,87	1,91	1,36	0,91	0,98	1,51	0,91	1,66	0,48	1,18	0,46	1,63
1,29	0,82	1,89	1,29	0,98	0,95	1,60	0,88	1,73	0,47	1,18	0,47	1,65
1,21	0,79	1,88	1,21	1,04	0,94	1,64	0,82	1,80	0,47	1,17	0,49	1,67
1,13	0,77	1,84	1,13	1,05	0,93	1,63	0,76	1,81	0,46	1,15	0,49	1,65
1,05	0,82	1,78	1,05	1,03	0,89	1,57	0,78	1,80	0,46	1,13	0,47	1,61
0,98	0,89	1,71	0,98	0,98	0,82	1,51	0,83	1,89	0,45	1,12	0,48	1,59
0,91	0,96	1,63	0,91	0,91	0,77	1,43	0,86	2,08	0,44	1,11	0,51	1,61
0,85	1,01	1,53	0,85	0,84	0,77	1,34	0,88	2,27	0,43	1,10	0,54	1,65
0,80	1,07	1,47	0,80	0,79	0,80	1,31	0,89	2,36	0,41	1,10	0,57	1,67
0,75	1,11	1,41	0,75	0,76	0,81	1,30	0,90	2,30	0,40	1,08	0,55	1,63
0,71	1,13	1,35	0,71	0,72	0,80	1,25	0,89	2,26	0,39	1,06	0,54	1,60
0,68	1,13	1,29	0,68	0,67	0,78	1,17	0,87	2,24	0,37	1,02	0,54	1,56
0,65	1,14	1,24	0,65	0,64	0,74	1,12	0,82	2,13	0,36	0,98	0,52	1,50
0,63	1,14	1,18	0,63	0,62	0,69	1,11	0,75	2,02	0,35	0,94	0,49	1,43
0,60	1,12	1,12	0,60	0,60	0,65	1,12	0,68	1,97	0,33	0,91	0,49	1,40
0,58	1,08	1,07	0,58	0,57	0,63	1,11	0,64	1,92	0,32	0,88	0,48	1,36
0,56	1,04	1,02	0,56	0,53	0,66	1,06	0,60	1,93	0,31	0,86	0,48	1,34
0,54	0,98	0,97	0,54	0,49	0,68	1,03	0,58	1,94	0,30	0,84	0,48	1,32
0,54	0,93	0,94	0,54	0,47	0,71	1,04	0,57	1,94	0,29	0,83	0,48	1,31
0,55	0,87	0,91	0,55	0,45	0,74	1,08	0,56	1,88	0,30	0,82	0,47	1,29
0,55	0,81	0,89	0,55	0,43	0,77	1,12	0,57	1,78	0,30	0,80	0,44	1,25
0,55	0,76	0,87	0,55	0,41	0,79	1,12	0,62	1,70	0,30	0,79	0,42	1,21
0,55	0,71	0,85	0,55	0,40	0,80	1,10	0,66	1,71	0,29	0,78	0,42	1,21

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 2%  
en 50 años

0,55	0,66	0,83	0,55	0,39	0,79	1,15	0,70	1,67	0,29	0,78	0,42	1,20
0,55	0,62	0,80	0,55	0,38	0,79	1,16	0,73	1,60	0,29	0,77	0,40	1,17
0,55	0,59	0,78	0,55	0,39	0,77	1,15	0,75	1,51	0,29	0,75	0,38	1,13
0,55	0,56	0,76	0,55	0,39	0,76	1,13	0,77	1,42	0,28	0,74	0,36	1,09
0,55	0,54	0,74	0,55	0,38	0,75	1,11	0,77	1,32	0,28	0,71	0,33	1,05
0,54	0,51	0,72	0,54	0,38	0,74	1,07	0,77	1,20	0,27	0,69	0,31	1,00
0,54	0,50	0,70	0,54	0,37	0,72	1,04	0,76	1,18	0,26	0,67	0,30	0,97
0,54	0,50	0,68	0,54	0,37	0,71	1,00	0,76	1,17	0,25	0,66	0,29	0,96
0,53	0,49	0,66	0,53	0,37	0,70	0,97	0,74	1,16	0,24	0,65	0,29	0,94
0,53	0,49	0,65	0,53	0,37	0,70	0,94	0,73	1,15	0,23	0,64	0,28	0,93
0,52	0,48	0,63	0,52	0,37	0,70	0,91	0,73	1,15	0,22	0,64	0,28	0,92
0,52	0,48	0,61	0,52	0,37	0,73	0,88	0,73	1,14	0,22	0,63	0,28	0,91
0,51	0,47	0,59	0,51	0,37	0,74	0,85	0,73	1,13	0,21	0,62	0,27	0,90
0,50	0,46	0,58	0,50	0,39	0,75	0,81	0,72	1,13	0,20	0,62	0,27	0,89
0,50	0,46	0,57	0,50	0,40	0,75	0,79	0,70	1,11	0,19	0,61	0,27	0,87
0,49	0,45	0,57	0,49	0,40	0,75	0,78	0,68	1,07	0,19	0,60	0,26	0,86
0,49	0,44	0,56	0,49	0,41	0,72	0,79	0,66	1,03	0,19	0,59	0,25	0,83
0,48	0,43	0,55	0,48	0,41	0,68	0,79	0,64	1,00	0,19	0,57	0,24	0,81
0,47	0,41	0,54	0,47	0,42	0,66	0,80	0,62	0,97	0,19	0,57	0,23	0,79
0,47	0,40	0,53	0,47	0,42	0,64	0,80	0,61	0,96	0,19	0,56	0,23	0,79
0,46	0,39	0,52	0,46	0,42	0,62	0,79	0,59	0,97	0,18	0,55	0,23	0,78
0,45	0,38	0,51	0,45	0,42	0,60	0,77	0,58	0,99	0,18	0,54	0,24	0,78
0,44	0,36	0,50	0,44	0,42	0,57	0,79	0,56	1,01	0,18	0,54	0,24	0,78
0,43	0,35	0,49	0,43	0,41	0,55	0,80	0,54	1,01	0,17	0,53	0,25	0,78
0,42	0,34	0,48	0,42	0,40	0,53	0,81	0,53	1,00	0,17	0,52	0,25	0,77
0,42	0,33	0,47	0,42	0,41	0,51	0,84	0,52	0,98	0,17	0,52	0,25	0,77
0,41	0,32	0,46	0,41	0,41	0,49	0,86	0,50	0,99	0,18	0,51	0,26	0,77
0,40	0,31	0,46	0,40	0,41	0,47	0,88	0,49	1,01	0,18	0,51	0,27	0,78
0,39	0,30	0,45	0,39	0,41	0,46	0,89	0,48	1,03	0,18	0,51	0,27	0,78
0,39	0,29	0,44	0,39	0,41	0,44	0,90	0,46	1,04	0,19	0,51	0,28	0,79
0,39	0,28	0,43	0,39	0,40	0,44	0,90	0,45	1,07	0,19	0,51	0,29	0,79
0,38	0,27	0,42	0,38	0,39	0,43	0,90	0,44	1,12	0,19	0,51	0,30	0,81
0,39	0,26	0,42	0,39	0,39	0,42	0,90	0,43	1,14	0,19	0,50	0,31	0,81
0,39	0,25	0,41	0,39	0,38	0,41	0,90	0,41	1,15	0,19	0,50	0,31	0,81
0,38	0,25	0,41	0,38	0,37	0,40	0,89	0,40	1,13	0,19	0,49	0,31	0,80
0,38	0,24	0,40	0,38	0,36	0,38	0,89	0,39	1,10	0,19	0,48	0,30	0,79

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 2% en 50 años

0,38	0,23	0,40	0,38	0,35	0,37	0,88	0,38	1,05	0,18	0,47	0,30	0,76
0,37	0,22	0,39	0,37	0,34	0,36	0,87	0,37	1,02	0,18	0,46	0,29	0,75
0,36	0,21	0,38	0,36	0,33	0,35	0,86	0,35	0,98	0,17	0,45	0,28	0,73
0,36	0,20	0,38	0,36	0,32	0,35	0,83	0,34	0,95	0,17	0,43	0,27	0,70
0,35	0,19	0,37	0,35	0,32	0,34	0,80	0,33	0,91	0,16	0,42	0,26	0,68
0,34	0,18	0,37	0,34	0,31	0,34	0,76	0,31	0,88	0,15	0,40	0,25	0,65
0,33	0,18	0,36	0,33	0,31	0,33	0,72	0,30	0,87	0,14	0,39	0,24	0,64
0,32	0,17	0,35	0,32	0,30	0,33	0,69	0,29	0,85	0,13	0,38	0,24	0,62
0,31	0,16	0,35	0,31	0,29	0,32	0,65	0,28	0,84	0,12	0,37	0,23	0,60
0,31	0,16	0,34	0,31	0,29	0,31	0,63	0,27	0,84	0,11	0,36	0,23	0,59
0,30	0,16	0,34	0,30	0,28	0,30	0,62	0,27	0,83	0,11	0,36	0,23	0,58
0,30	0,15	0,33	0,30	0,28	0,29	0,62	0,26	0,83	0,11	0,35	0,23	0,58
0,29	0,15	0,32	0,29	0,27	0,28	0,62	0,25	0,84	0,11	0,35	0,23	0,58
0,29	0,15	0,32	0,29	0,27	0,28	0,62	0,24	0,86	0,10	0,35	0,24	0,59
0,28	0,15	0,31	0,28	0,26	0,28	0,62	0,24	0,88	0,10	0,35	0,25	0,59
0,28	0,15	0,31	0,28	0,26	0,29	0,61	0,23	0,91	0,10	0,35	0,26	0,60
0,27	0,15	0,30	0,27	0,26	0,29	0,61	0,23	0,95	0,10	0,35	0,27	0,61
0,26	0,14	0,30	0,26	0,26	0,28	0,61	0,22	0,99	0,09	0,35	0,28	0,63
0,26	0,14	0,29	0,26	0,26	0,28	0,60	0,22	1,03	0,09	0,35	0,29	0,64
0,25	0,14	0,28	0,25	0,25	0,28	0,59	0,21	1,07	0,09	0,35	0,30	0,66
0,24	0,14	0,28	0,24	0,25	0,27	0,57	0,21	1,11	0,09	0,35	0,31	0,67
0,24	0,14	0,27	0,24	0,25	0,27	0,56	0,21	1,15	0,10	0,35	0,32	0,68
0,23	0,14	0,27	0,23	0,25	0,26	0,54	0,20	1,17	0,10	0,35	0,33	0,68
0,23	0,14	0,26	0,23	0,24	0,26	0,52	0,20	1,19	0,10	0,35	0,34	0,69
0,22	0,14	0,26	0,22	0,24	0,26	0,50	0,20	1,21	0,09	0,35	0,34	0,69
0,22	0,14	0,25	0,22	0,23	0,26	0,49	0,20	1,22	0,09	0,34	0,35	0,69
0,21	0,14	0,25	0,21	0,23	0,26	0,48	0,19	1,23	0,09	0,34	0,35	0,69
0,21	0,14	0,24	0,21	0,23	0,25	0,47	0,19	1,23	0,09	0,34	0,35	0,69
0,20	0,14	0,24	0,20	0,22	0,25	0,46	0,19	1,22	0,09	0,33	0,35	0,68
0,19	0,14	0,23	0,19	0,22	0,25	0,45	0,19	1,20	0,09	0,33	0,34	0,67
0,19	0,14	0,23	0,19	0,21	0,25	0,43	0,19	1,18	0,08	0,32	0,34	0,66
0,18	0,14	0,23	0,18	0,20	0,25	0,42	0,19	1,15	0,08	0,32	0,33	0,64
0,18	0,14	0,22	0,18	0,20	0,25	0,42	0,18	1,12	0,07	0,31	0,32	0,63
0,17	0,14	0,22	0,17	0,20	0,26	0,41	0,18	1,08	0,07	0,30	0,31	0,61
0,17	0,14	0,21	0,17	0,19	0,26	0,41	0,19	1,04	0,07	0,30	0,29	0,59
0,17	0,14	0,21	0,17	0,19	0,26	0,40	0,19	1,00	0,07	0,29	0,28	0,57

Continuación de la tabla espectros de registro promedio adecuados a PGA 2%  
en 50 años

0,16	0,13	0,20	0,16	0,18	0,26	0,40	0,19	0,96	0,07	0,28	0,27	0,55
0,16	0,13	0,20	0,16	0,18	0,27	0,39	0,19	0,92	0,07	0,28	0,26	0,54
0,16	0,13	0,20	0,16	0,18	0,27	0,39	0,19	0,88	0,07	0,27	0,25	0,52
0,15	0,13	0,19	0,15	0,17	0,27	0,38	0,19	0,85	0,07	0,27	0,23	0,50
0,15	0,13	0,19	0,15	0,17	0,27	0,37	0,19	0,81	0,07	0,26	0,22	0,49
0,15	0,12	0,19	0,15	0,17	0,27	0,36	0,19	0,78	0,08	0,26	0,21	0,47
0,15	0,12	0,19	0,15	0,17	0,28	0,36	0,19	0,75	0,08	0,25	0,20	0,46
0,14	0,12	0,18	0,14	0,16	0,28	0,35	0,19	0,72	0,08	0,25	0,20	0,44
0,14	0,11	0,18	0,14	0,16	0,28	0,35	0,19	0,69	0,08	0,24	0,19	0,43
0,14	0,11	0,18	0,14	0,16	0,28	0,35	0,19	0,66	0,08	0,24	0,18	0,42
0,13	0,11	0,18	0,13	0,16	0,28	0,35	0,19	0,64	0,08	0,24	0,17	0,41
0,13	0,11	0,17	0,13	0,16	0,28	0,35	0,19	0,64	0,08	0,23	0,17	0,41
0,13	0,10	0,17	0,13	0,16	0,28	0,35	0,19	0,63	0,07	0,23	0,17	0,40
0,12	0,10	0,17	0,12	0,16	0,27	0,35	0,19	0,62	0,07	0,23	0,17	0,40
0,12	0,10	0,17	0,12	0,16	0,27	0,35	0,19	0,62	0,07	0,23	0,17	0,40
0,12	0,10	0,16	0,12	0,15	0,27	0,34	0,19	0,61	0,07	0,22	0,17	0,39
0,12	0,10	0,16	0,12	0,15	0,27	0,33	0,19	0,60	0,07	0,22	0,16	0,38
0,11	0,10	0,16	0,11	0,15	0,27	0,33	0,19	0,58	0,07	0,22	0,16	0,38
0,11	0,10	0,16	0,11	0,15	0,27	0,32	0,19	0,57	0,07	0,21	0,16	0,37
0,11	0,09	0,16	0,11	0,15	0,27	0,32	0,19	0,56	0,07	0,21	0,15	0,36
0,11	0,09	0,15	0,11	0,14	0,27	0,31	0,19	0,55	0,07	0,21	0,15	0,36
0,10	0,09	0,15	0,10	0,14	0,27	0,30	0,19	0,54	0,07	0,21	0,15	0,35
0,10	0,09	0,15	0,10	0,14	0,27	0,29	0,18	0,54	0,07	0,20	0,15	0,35
0,10	0,09	0,15	0,10	0,14	0,27	0,28	0,18	0,53	0,07	0,20	0,14	0,34
0,10	0,08	0,14	0,10	0,14	0,27	0,28	0,18	0,52	0,07	0,20	0,14	0,34
0,10	0,08	0,14	0,10	0,13	0,27	0,27	0,18	0,50	0,07	0,19	0,14	0,33
0,09	0,08	0,14	0,09	0,13	0,27	0,27	0,18	0,49	0,07	0,19	0,13	0,33
0,09	0,08	0,14	0,09	0,13	0,27	0,26	0,18	0,48	0,07	0,19	0,13	0,32
0,09	0,08	0,13	0,09	0,13	0,27	0,26	0,18	0,46	0,07	0,19	0,13	0,31
0,09	0,08	0,13	0,09	0,12	0,27	0,26	0,18	0,45	0,07	0,18	0,12	0,31
0,09	0,08	0,13	0,09	0,12	0,27	0,26	0,18	0,44	0,07	0,18	0,12	0,30
0,08	0,07	0,13	0,08	0,12	0,27	0,25	0,18	0,42	0,07	0,18	0,12	0,29
0,08	0,07	0,12	0,08	0,12	0,27	0,25	0,18	0,41	0,07	0,17	0,11	0,29
0,08	0,07	0,12	0,08	0,12	0,27	0,25	0,18	0,39	0,07	0,17	0,11	0,28
0,08	0,07	0,12	0,08	0,11	0,26	0,25	0,18	0,38	0,07	0,17	0,11	0,28
0,08	0,07	0,12	0,08	0,11	0,26	0,24	0,18	0,37	0,06	0,17	0,11	0,27

0,08	0,07	0,12	0,08	0,11	0,26	0,24	0,18	0,37	0,06	0,16	0,11	0,27
0,08	0,07	0,11	0,08	0,11	0,26	0,24	0,18	0,36	0,06	0,16	0,10	0,27
0,07	0,07	0,11	0,07	0,11	0,26	0,23	0,18	0,35	0,06	0,16	0,10	0,26
0,07	0,07	0,11	0,07	0,11	0,27	0,23	0,18	0,34	0,06	0,16	0,10	0,26
0,07	0,06	0,11	0,07	0,10	0,27	0,23	0,18	0,34	0,06	0,16	0,10	0,26
0,07	0,06	0,10	0,07	0,10	0,27	0,22	0,18	0,33	0,06	0,15	0,10	0,25
0,07	0,06	0,10	0,07	0,10	0,27	0,22	0,18	0,33	0,06	0,15	0,10	0,25
0,07	0,06	0,10	0,07	0,10	0,26	0,22	0,17	0,33	0,06	0,15	0,10	0,25
0,07	0,06	0,10	0,07	0,10	0,26	0,21	0,17	0,33	0,05	0,15	0,10	0,25
0,07	0,06	0,09	0,07	0,09	0,26	0,21	0,17	0,33	0,05	0,15	0,10	0,25
0,07	0,06	0,09	0,07	0,09	0,26	0,20	0,17	0,33	0,05	0,15	0,10	0,25
0,07	0,06	0,09	0,07	0,09	0,26	0,20	0,17	0,33	0,05	0,15	0,10	0,25
0,06	0,06	0,09	0,06	0,09	0,26	0,20	0,17	0,33	0,05	0,15	0,10	0,24
0,06	0,06	0,09	0,06	0,09	0,26	0,20	0,17	0,33	0,05	0,14	0,10	0,24
0,06	0,06	0,09	0,06	0,09	0,26	0,19	0,17	0,32	0,05	0,14	0,10	0,24
0,06	0,06	0,08	0,06	0,08	0,25	0,19	0,17	0,32	0,05	0,14	0,10	0,24
0,06	0,06	0,08	0,06	0,08	0,25	0,19	0,17	0,32	0,05	0,14	0,10	0,24
0,06	0,06	0,08	0,06	0,08	0,25	0,19	0,17	0,31	0,05	0,14	0,10	0,23
0,06	0,06	0,08	0,06	0,08	0,25	0,19	0,16	0,31	0,05	0,14	0,09	0,23
0,06	0,06	0,08	0,06	0,08	0,24	0,18	0,16	0,31	0,05	0,14	0,09	0,23
0,06	0,06	0,08	0,06	0,08	0,24	0,18	0,16	0,30	0,05	0,13	0,09	0,23
0,06	0,06	0,08	0,06	0,08	0,24	0,18	0,16	0,30	0,05	0,13	0,09	0,22
0,06	0,06	0,08	0,06	0,07	0,23	0,18	0,16	0,30	0,05	0,13	0,09	0,22
0,06	0,06	0,08	0,06	0,07	0,23	0,17	0,16	0,29	0,05	0,13	0,09	0,22
0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,23	0,17	0,16	0,29	0,05	0,13	0,09	0,22
0,05	0,06	0,07	0,05	0,07	0,23	0,17	0,16	0,28	0,05	0,13	0,09	0,21
0,05	0,06	0,07	0,05	0,07	0,22	0,17	0,16	0,28	0,05	0,13	0,08	0,21
0,05	0,06	0,07	0,05	0,07	0,22	0,16	0,16	0,27	0,05	0,12	0,08	0,21
0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,22	0,16	0,16	0,27	0,05	0,12	0,08	0,20

Fuente: Elaboración propia con el programa Microsoft Excel en base a los resultados del programa PRISM.



## **ANEXOS**



## 1. Relaciones de atenuación

Ecuaciones de predicción del *Seismological Society of America* en su libro *Seismological Research Letters*, 1997.

Youngs et al. (Subducción)

Válido para magnitudes mayores que 5 u distancias de 10 a 500 kilómetros.

$$\ln(PGA)_{ij} = C_1^* + C_2 M_i + C_3^* \ln \left[ (r_{rup})_{ij} + e^{C_4^* - \frac{C_2^*}{C_3^*} M_i} \right] + C_5 Z_{ss} + C_8 Z_t + C_9 H_i + \eta_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$$\begin{aligned} C_1^* &= C_1 + C_3 C_4 - C_3^* C_4^* \\ C_3^* &= C_3 + C_6 Z_s \\ C_4^* &= C_4 + C_7 Z_s \end{aligned}$$

Z (tipo de fuente)=0 para eventos interplacas, 1 para eventos intraplacas

Z<sub>ss</sub> (Rigidez superficial)=1 para sitios de suelo superficial, 0 para cualquier otro.

Z<sub>r</sub> (Sitio de roca)=1 para roca, 0 para cualquier otro

i=índice del sismo

j= índice de registro para el i-avo evento

PGA=Media geométrica de las dos componentes horizontales

M=Magnitud de momento

R<sub>rup</sub>=Distancia del sitio a la falla (km)

H=Distancia Focal

N<sub>i</sub>= variabilidad entre sismos

E=variable del sismo

Abrahamson y Silva (1997) (Sismos superficiales en placa)

$$\ln Sa(g) = f_1(M_W, r_{rup}) + F f_3(M_W) + HW f_4(M_W, r_{rup}) + S f_5(\overline{pga}_{rock})$$

$$f_1(M_W, r_{rup})$$

$$= \begin{cases} a_1 + a_2(M_W - c_1) + a_{12}(8,5 - M_W)^n + [a_3 + a_{13}(M_W - c_1)] \ln R & \text{cuando } M_W \leq c_1 \\ a_1 + a_4(M_W - c_1) + a_{12}(8,5 - M_W)^n + [a_3 + a_{13}(M_W - c_1)] \ln R & \text{cuando } M_W > c_1 \end{cases}$$

$$f_4(M_W, r_{rup}) = f_{HW}(M_W) f_{HW}(r_{rup})$$

$$R = \sqrt{r_{rup}^2 + c_4^2}$$

$$f_3(M_W) = \begin{cases} a_5 & \text{Si } M_W \leq 5,8 \\ a_{5 + \frac{(a_6 - a_5)}{c_1 - 5,8}} & \text{Si } 5,8 < M_W < c_1 \\ a_6 & \text{Si } M_W \geq c_1 \end{cases}$$

$$f_{HW}(M_W) = \begin{cases} 0 & \text{si } M_W \leq 5,5 \\ M_W & \text{si } 5,5 < M_W < 6,5 \\ 1 & \text{si } M_W \geq 6,5 \end{cases}$$

$$f_{HW}(r_{rup}) = \begin{cases} 0 & \text{si } r_{rup} \leq 4 \\ a_9 \frac{r_{rup} - 4}{4} & \text{si } 4 < r_{rup} < 8 \\ a_9 & \text{si } 8 < r_{rup} < 18 \\ a_9 \left(1 - \frac{r_{rup} - 18}{7}\right) & \text{si } 18 < r_{rup} < 24 \\ 0 & \text{si } r_{rup} > 25 \end{cases}$$

$$f_5(\overline{PGA}_{roca}) = a_{10} + a_{11} \ln(\overline{PGA}_{roca} + c_5)$$

Donde  $\overline{PGA}$  es la aceleración esperada en roca pronosticada por la ecuación de atenuación con  $S=0$ .

Parámetros de suelo

Roca  $S=0$

Suelo S=1

Mecanismo de falla

Inversa F=1

Inversa Oblicua F=0.5

Transcurrente y Normal F=0

Muro colgante HW=1

Cualquier otro HW=0

Error estándar

$$\sigma_{total}(M_W) = \begin{cases} b_5 & \text{si } M_W \leq 5,5 \\ b_5 - b_6(M_W - 5) & \text{si } 5,5 \leq M_W \leq 7,0 \\ b_5 - 2b_6 & \text{si } M_W \geq 7 \end{cases}$$

Boore et al. (1997)

$$\ln Y = b_1 + b_2(M_W - 6) + b_3(M_W - 6)^2 + b_5 \ln r + b_v \ln \frac{V_S}{V_A}$$

Donde:

$$r = \sqrt{r_{jb}^2 + h^2}$$

Parámetros de sitio

Vs=Velocidad de onda de corte promedio a 30 metros

Mecanismo de falla

Transcurrente:  $b_1 = b_{1SS}$

Inversa:  $b_1 = b_{1RS}$

No especificada  $b_1 = b_{1ALL}$

Desviación estándar

$\sigma_{\ln Y}$  vario con el período y esta dado en la regresión

Youngs et al. (1997)

$$\ln(PGA) = C_1 + C_2 M + C_3 \ln(r_{rup} + C_4 e^{c_5 M}) + C_6 Z_r$$

Donde  $Z_t$  es un indicador que vale 1 para eventos de mecanismo de falla inversa y 0 para falla transcurrente. No es muy efectiva para magnitudes lejanas a  $M 6,5$ .

$$\ln(SA/PGA) = C_7 + C_8(8.5 - M)^{2.5} + C_9 \ln(r_{rup} + C_4 e^{c_5 M})$$

Funciona en magnitudes entre 4 a 8+

Y distancias de 0 a 100 kilómetros.

Campbell (1997)

$$\begin{aligned} \ln(SA_H) = & \ln A_H + c_1 \\ & + c_2 \tanh(c_3(M_W - 4,7)) + (c_4 + c_5 M_W) R_{SEIS} + 0,5c_6 S_{SR} \\ & + C_7 \tanh(c_g D)(1 - S_{HR}) + f_{SA}(D) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln(A_H) = & -3,512 + 0,904 M_W - 1,328 \ln \sqrt{R_{SEIS}^2 + [0,149 \exp(0,647 M_W)]^2} \\ & + [1,125 - 0,112 \ln R_{SEIS} - 0,0957 M_W] F \\ & + [0,440 - 0,171 \ln R_{SEIS}] S_{SR} + [0,405 - 0,222 \ln R_{SEIS}] S_{HR} \end{aligned}$$

$$f_{SA}(D) = \begin{cases} 0 & \text{si } D \geq 1 \text{ km} \\ c_6(1 - S_{HR})(1 - D) + 0,5c_6(1 - D) S_{SR} & \text{si } D < 1 \text{ km} \end{cases}$$

Suelo: Roca, Aluvión, o suelo firme y suelo suave.

Roca se refiere a cretáceas y depósitos de roca sedimentaria vieja, roca metamórfica, cristalina y depósitos volcánicos duros (basalto).

Aluvión y suelo firme se refiere a depósitos cuaternarios con profundidades mayores a 10 metros.

Suelo suave: depósitos terciarios con depósitos volcánicos suaves (depósitos de ceniza).

Roca dura:  $S_{sr}=0$ ,  $S_{hr}=1$

Aluvión o tierra firme:  $S_{sr}=0$ ,  $S_{hr} = 0$

Suelo Suave:  $S_{sr}=1$ ,  $S_{hr}=0$

Mecanismo de falla:

Transcurrente:  $F=0$

Otro:  $F=1$

Desviación estándar

$$\sigma = \begin{cases} 0,55 & \text{si } A_H < 0,068g \\ 1,73 - 0,140 \ln A_H & \text{si } 0,068g \leq A_H \leq 0,21g \\ 0,39 & \text{si } A_H > 0,21g \end{cases}$$

Climent (1994) (Aplica a la región centroamericana)

PGA

$$\ln A = -1,348 + 0,492M - 0,564 \ln r - 0,0031r + 0,439S$$

Estos valores no incluyen información de los sismos de Guerrero, México.

$$\ln A = -1,687 + 0,553M - 0,537 \ln r - 0,00302 \ln r + 0,279S + \ln \varepsilon$$

Donde  $\sigma=0,75$

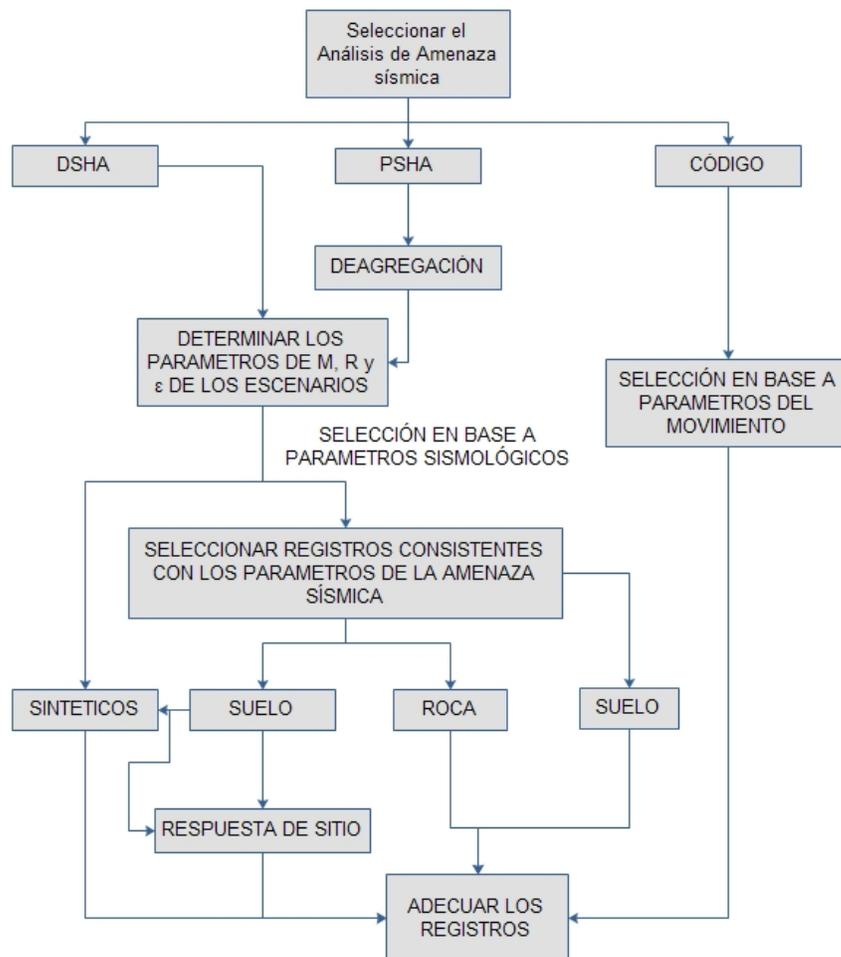
## 2. Categoría Ocupacional de las Estructuras en base al AGIES NSE1-10

<b>Categoría Ocupacional</b>	
I	Obras que albergan personas de manera incidental, y que no tienen instalación de estar de trabajo o no son habitables. Obras accidentales de infraestructura.
II	Son las obras que no están en las categorías I, III o IV.
III	<p>Son las que albergan o pueden afectar a mas de 300 personas, aquellas donde los ocupantes estén restringidos a desplazarse, las que se prestan servicios importantes (pero no esenciales después de algún desastre) a gran número de personas o entidades, obras que albergan valores culturales reconocidos o equipo de alto costo.</p> <p>En esta categoría están incluidas las siguientes obras, aunque no se limitan a estas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obras y edificaciones gubernamentales que no son esenciales.</li> <li>- Edificios educativos y guarderías públicas y privadas</li> <li>- Instalaciones de salud, públicos y privados que no clasifiquen como esenciales.</li> <li>- Garajes de vehículos de emergencia.</li> <li>- Prisiones</li> <li>- Museos</li> <li>- Todos los edificios de más de 3000 metros cuadrados de área rentable (excluyendo estacionamientos)</li> <li>- Teatros, cines, templos, auditorios mercados, restaurantes y similares que alojen más de 300 personas que en un mismo salón o más de 3000 personas en la edificación.</li> <li>- Graderíos al aire libre donde pueda haber más de 3000 personas a la vez.</li> <li>- Obras de infraestructura que no sean esenciales incluyendo subestaciones eléctricas, líneas de alto voltaje, circuitos principales de agua, drenajes, drenajes colectores, puentes de carretera, centrales de telecomunicaciones.</li> <li>- Obras en las que hay fabricación y/o almacenamiento de materiales tóxicos, explosivos o inflamables.</li> </ul>
IV	<p>Don las que deben permanecer esencialmente operativas durante y después de un desastre o evento.</p> <p>Se incluyen en esta categoría las obras estatales o privadas están limitadas a estas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Instalaciones de salud con servicios de emergencia de cuidado intensivo o quirófanos.</li> <li>- Instalaciones de defensa civil, bomberos, policía y de comunicaciones asociadas con la atención de desastres.</li> <li>- Centrales telefónicas, de telecomunicación y de radiodifusión.</li> <li>- Aeropuertos, hangares de aeronaves, estaciones ferroviarias y sistemas masivos de transportes.</li> <li>- Plantas de energía e instalaciones para la operación continúa de las obras de esta categoría.</li> <li>- Líneas troncales de transmisión eléctrica y sus centrales de operación y control.</li> <li>- Instalaciones de captación y tratamiento de aguas y sus centrales de operación y control.</li> <li>- Estructura que formen parte de sus sistemas contra incendio.</li> <li>- Puentes sobre carretera de primer orden.</li> <li>- Instalaciones designadas como refugios para emergencias.</li> <li>- Instalaciones de importancia estratégica.</li> <li>- Aquellas obras que las autoridades estatales o municipales específicamente declaren como tales.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia con el programa Microsoft Word en base a AGIES NSE1-10.



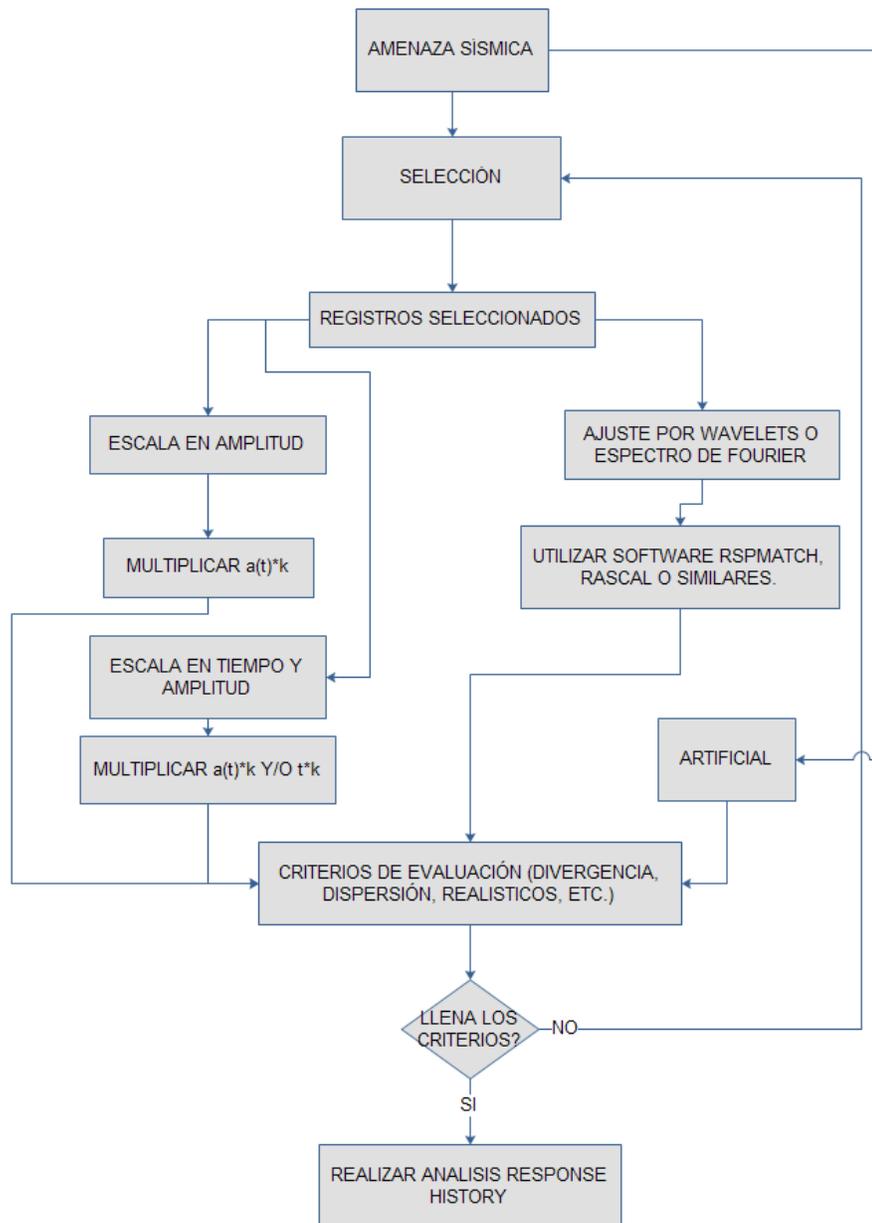
### 3. Diagrama de selección de acelerogramas en base a los diagramas de la disertación de Acevedo (2003)



Fuente: Elaboración propia con el programa Microsoft EDRAW en base a los diagramas de Acevedo.

Es posible realizar la selección por código en base a parámetros sísmológicos, Acevedo enfatiza solo en base a parámetros del movimiento para que el factor de adecuación de los acelerogramas sea más cercano a 1.

**DIAGRAMA DE ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS (en base al diagrama de Acevedo)**



Fuente: Elaboración propia con el programa Microsoft EDRAW en base a los diagramas de Acevedo.