

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ACELEROGRAMAS  
REALES PARA SU USO EN ANÁLISIS DINÁMICOS  
PARA LA CIUDAD DE MEDELLÍN

ALEJANDRO PARDO RAMOS

Asesor:

ANA BEATRIZ ACEVEDO JARAMILLO

UNIVERSIDAD EAFIT  
MAESTRÍA EN ESTRUCTURAS

2014

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la oportunidad de la vida.

La presente investigación se llevó a cabo gracias al patrocinio de la universidad EAFIT, institución con la que estoy profundamente agradecido.

Quiero agradecer a la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC), especialmente a los ingenieros María Luisa Bermúdez, Carlos Fernando Lozano y Jorge Hernán Correa por su entera disposición y oportuna atención de las constantes solicitudes de información relacionada con señales sísmicas registradas en el país.

También, quiero agradecer al Observatorio Sismológico de la Universidad del Quindío (OSQ), particularmente al ingeniero Hugo Monsalve Jaramillo, Marisol Gómez Cano y Juan Carlos Zorrilla por su apoyo durante la solicitud y el procesamiento de las señales sísmicas.

De la misma forma, quiero expresar mi agradecimiento a la profesora Ana Beatriz Acevedo por las enseñanzas impartidas durante el curso de la investigación. Finalmente, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional en esta etapa de mi formación personal y académica.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>i</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTADO DE TABLAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 AMENAZA SÍSMICA EN COLOMBIA Y MEDELLÍN .....	2
1.2 REGLAMENTO NSR-10 Y LA REPRESENTACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA	3
1.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS.....	6
1.4 SELECCIÓN DE SEÑALES PARA USO EN ANÁLISIS DINÁMICO EN COLOMBIA .....	7
1.5 OBJETIVOS .....	9
1.6 ESQUEMA GENERAL DEL INFORME.....	9
<b>2 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>11</b>
2.1 ANÁLISIS DE AMENAZA SÍSMICA.....	11
2.2 ESPECTRO DE RESPUESTA.....	14
2.3 ESPECTRO DE AMENAZA UNIFORME .....	15
2.4 ESPECTRO DE DISEÑO .....	16
2.5 ANÁLISIS MODAL CRONOLÓGICO .....	17
2.6 REQUISITOS NORMATIVOS PARA LA SELECCIÓN DE SEÑALES ACELEROGRÁFICAS.....	17
2.7 PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO FUERTE DEL SUELO .....	19
<b>3 SELECCIÓN DE SEÑALES</b> .....	<b>23</b>
3.1 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	23
3.2 PROCESAMIENTO DE REGISTROS ACELEROGRÁFICOS .....	25
3.3 SELECCIÓN DE SEÑALES.....	45
<b>4 HERRAMIENTA COMPUTACIONAL</b> .....	<b>65</b>
4.1 DESCRIPCIÓN.....	65
4.2 DIAGRAMA DE FLUJO .....	65
4.3 APLICACIÓN DEL PROGRAMA .....	69
<b>5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>75</b>
5.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE .....	75
5.2 REQUISITOS NORMATIVOS.....	77
5.3 COMPARACIÓN ENTRE SELECCIONES DE SEÑALES .....	84
<b>6 CONCLUSIONES</b> .....	<b>87</b>
<b>7 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>93</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>A-1</b>

ANEXO A: MANUAL DE USUARIO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL.....	A - 1
ANEXO B: BASE DE DATOS.....	B - 1
ANEXO C: HERRAMIENTA COMPUTACIONAL .....	C - 1

# LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Ambiente tectónico de la zona noroccidental de Colombia. Se aprecia la zona de subducción compuesta por las placas Nazca, Caribe y Suramericana. (Modificado de: Mora y Kellog, 1995) .....	2
Figura 1.2 Espectro de diseño definido en el reglamento NSR-10.....	4
Figura 1.3 Sismo de 1999 del Quindío ( $M_w = 6,2$ ) registrado por la estación CBETA (componente 1) ubicada a 192.1 Km de la localización del sismo. ....	5
Figura 1.4 Acelerograma sintético del sismo de 1999 del Quindío ( $M_w = 6,2$ ) .....	6
Figura 2.1 Pasos para el cálculo de la amenaza sísmica determinista. (Modificado de: Kramer, 1996) .....	12
Figura 2.2 Pasos para el cálculo de la amenaza sísmica determinista. (Modificado de: Kramer, 1996) .....	13
Figura 2.3 Cálculo de espectro de respuesta de aceleraciones .....	14
Figura 2.4 Curva de amenaza (Modificado de: Acevedo (2012), notas de clase).....	15
Figura 2.5 Construcción del espectro de amenaza uniforme. (Modificado de: Acevedo (2012), notas de clase) .....	15
Figura 2.6 Ilustración esquemática del espectro de amenaza uniforme (EAU) como envolvente de espectros de fuentes sísmicas individuales. (Bommer et al., 2000b).....	16
Figura 2.7 Espectro de diseño definido en el reglamento NSR-10.....	17
Figura 2.8 Requisitos establecidos en el reglamento NSR-10 para la selección de señales para ser usadas en análisis dinámicos consistentes en evaluaciones contra el tiempo. (a) Requisito para los espectros de los acelerogramas individuales (Rango $0,8T - 1,2T$ ). (b) Requisito para la combinación de espectros de acelerogramas a ser empleados (Rango $0,2T - 1,5T$ ). .....	19
Figura 3.1 Eventos registrados en suelo y roca suministrados por la RNAC. ....	24
Figura 3.2 Requisitos establecidos en el reglamento NSR-10 para la selección de señales para ser usadas en análisis dinámicos consistentes en evaluaciones contra el tiempo. Requisito para los espectros de los acelerogramas individuales (Rango $0,8T - 1,2T$ ). $T = 1,60$ s.....	26
Figura 3.3 Límites máximo y mínimo de aceleraciones espectrales establecidos para la selección de señales. ....	26
Figura 3.4 Comparación de espectros en perfil de suelo tipo B (límites máximo y mínimo) con los espectros recopilados en la base de datos. (a) Sismos que no cumplen requisitos de aceleración en todos los periodos. (b) Sismos que cumplen parcialmente el requisito de aceleración. (c) Sismo cumplen los requisitos de aceleración y periodo.....	28
Figura 3.5 Comparación de espectros en perfil de suelo tipo C (límites máximo y mínimo) con los espectros recopilados en la base de datos. (a) Sismos que no cumplen requisitos de aceleración en todos los periodos. (b) Sismos que cumplen parcialmente el requisito de aceleración. (c) Sismo cumplen los requisitos de aceleración y periodo.....	30
Figura 3.6 Comparación de espectros en perfil de suelo tipo E (límites máximo y mínimo) con los espectros recopilados en la base de datos. (a) Sismos que no cumplen requisitos de aceleración en todos los periodos. (b) Sismos que cumplen parcialmente el requisito de aceleración. (c) Sismo cumplen los requisitos de aceleración y periodo.....	31
Figura 3.7 Espectros recopilados en la base de datos que cumplen los requisitos de aceleración y periodo.....	32
Figura 3.8 Comparación de las ecuaciones de atenuación con el espectro del perfil de suelo tipo B del reglamento NSR-10 para los periodos $0,2$ s- $2$ s. (a) Boore <i>et al.</i> (1997). (b) Abrahamson y Silva (1997). (c) Youngs <i>et al.</i> (1997).....	34
Figura 3.9 Comparación de las ecuaciones de atenuación con el espectro para el perfil de suelo tipo C del reglamento NSR-10 para los periodos $0,2$ s- $0,6$ . (a) Boore <i>et al.</i> (1997). (b) Abrahamson y Silva (1997). (c) Youngs <i>et al.</i> (1997). ....	35
Figura 3.10 Comparación de las ecuaciones de atenuación con el espectro para el perfil de suelo tipo E del reglamento NSR-10 para los periodos $0,2$ s- $0,6$ . (a) Boore <i>et al.</i> (1997). (b) Abrahamson y Silva (1997). (c) Youngs <i>et al.</i> (1997) .....	36

Figura 3.11 Comparación del espectro de roca del reglamento NSR-10 y los espectros de los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares. ....	38
Figura 3.12 Comparación de los espectros para perfil de suelo tipo C del reglamento NSR-10 y los espectros de los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares. ....	39
Figura 3.13 Comparación de los espectros en perfil de suelo tipo E del reglamento NSR-10 y los espectros de los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares. ....	41
Figura 3.14 Base de datos completa que recopila sismos nacionales y de ambientes tectónicos similares. El punto abierto representa sismos nacionales y el punto cerrado representa sismos de ambientes tectónicos similares. ....	44
Figura 3.15 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo A a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	51
Figura 3.16 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo B a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	52
Figura 3.17 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo C a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	53
Figura 3.18 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo D a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	54
Figura 3.19 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo E a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	55
Figura 3.20 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo A a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	60
Figura 3.21 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo B a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	60
Figura 3.22 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo C a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	61
Figura 3.23 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo D a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	62
Figura 3.24 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo E a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	63
Figura 4.1 Diagrama de flujo de la herramienta computacional .....	66
Figura 4.2 Rango $0,2T - 1,5T$ en el que se determina $mT$ para cada periodo $T$ y $m$ para el intervalo completo. ....	69
Figura 4.3 Espectros de los acelerogramas a ser analizados según los requisitos presentados en A.2.7.1. ....	69
Figura 4.4 Espectros para el perfil de suelo tipo A al 80% y al 100%. ....	70
Figura 4.5 (a) Espectros sin escalar. (b) Escalamiento de los espectros por el factor $F1i$ calculado en este paso. Se puede observar que en la figura (b) todas las señales igualan o sobrepasan las ordenadas del 80% del espectro de diseño en el intervalo $0,8T-1,2T$ para el perfil de suelo tipo A. ....	70
Figura 4.6 Señales seleccionadas para el perfil de suelo tipo A a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c .....	73
Figura 5.1 Sismos nacionales y de ambientes tectónicos similares que cumplen los requisitos de A.2.7.1(c) para señales individuales. El punto abierto representa sismos nacionales y el punto cerrado representa sismos de ambientes tectónicos similares. ....	78
Figura 5.2 Espectro de diseño definido en el reglamento NSR-10. ....	79
Figura 5.3 Ilustración esquemática del espectro de amenaza uniforme (EAU) como envolvente de espectros de fuentes sísmicas individuales (Bommer <i>et al.</i> , 2000b). ....	80
Figura 5.4 Espectros de respuesta normalizados con respecto a su aceleración pico efectiva .....	80
Figura 5.5 Intervalo de tiempo para cada periodo del rango $[0,2T - 1,5T]$ en el que el promedio de los espectros de respuesta deben superar las ordenadas espectrales del espectro de diseño. ....	81
Figura 5.6 Promedios de espectros seleccionados en 3.3.1 para el perfil de suelo tipo E .....	81
Figura 5.7 Comparación de promedios de espectros seleccionados en 3.3.1 y 3.3.2 para todos los perfiles de suelo. ....	85
Figura 8.1 Ingreso del periodo al archivo de entrada "Input" en la pestaña "Señal (es)" .....	2
Figura 8.2 Diagrama de flujo de la herramienta computacional .....	3

Figura 8.3 Ingreso de la descripción de los sismos al archivo de entrada “Input” en la pestaña “Señal (es)” .....	4
Figura 8.4 Ingreso de los espectros de los acelerogramas al archivo de entrada “Input” en la pestaña “Señal (es)” .....	4
Figura 8.5 Ingreso de la descripción del espectro de diseño al archivo de entrada “Input” en la pestaña “Espectro” .....	5
Figura 8.6 Ingreso de la descripción del espectro de diseño al archivo de entrada “Input” en la pestaña “Espectro” .....	6
Figura 8.7 Ejecución de la herramienta computacional y ubicación del archivo “Input” .....	6
Figura 8.8 Ejecución de la herramienta computacional .....	6
Figura 8.9 Archivo de salida “Selección” .....	7



# LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1. Registros para perfil de suelo tipo B que cumplen el criterio presentado en A.2.7.1.c. ..	27
Tabla 3.2. Registros en suelo que cumplen el criterio presentado en A.2.7.1.c para los espectros en suelo C .....	29
Tabla 3.3. Registros en suelo que cumplen el criterio presentado en A.2.7.1.c para los espectros en suelo E.....	29
Tabla 3.4 Pares de magnitud y distancia (M-d) para la búsqueda de señales para perfil de suelo tipo B en el intervalo 0,2 s-2 s. ....	33
Tabla 3.5 Pares de magnitud y distancia (M-d) para la búsqueda de señales para el perfil de suelo tipo C en el intervalo 0,2 s-2 s. ....	34
Tabla 3.6 Pares de magnitud y distancia (M-d) para la búsqueda de señales para el perfil de suelo tipo E en el intervalo 0,2 s-2 s. ....	35
Tabla 3.7 Selección de sismos en perfil de suelo tipo A y B de ambientes tectónicos similares para complementar la base de datos nacional. ....	37
Tabla 3.8 Sismos para perfiles de suelo tipo A y B seleccionados de ambientes tectónicos similares .....	37
Tabla 3.9 Selección de sismos para perfil de suelo tipo C de ambientes tectónicos similares para complementar la base de datos nacional.....	38
Tabla 3.10 Sismos para perfil en suelo tipo C seleccionados de ambientes tectónicos similares ...	39
Tabla 3.11 Selección de sismos para perfil de suelo tipo D y E de ambientes tectónicos similares para complementar la base de datos nacional .....	40
Tabla 3.12 Sismos para perfiles de suelo tipo D y E seleccionados de ambientes tectónicos similares .....	40
Tabla 3.13 Compilación de sismos para perfil de suelo tipo A y B de la base de datos nacional y de ambientes tectónicos similares .....	42
Tabla 3.14 Compilación de sismos perfil de suelo tipo C de la base de datos nacional y de ambientes tectónicos similares .....	42
Tabla 3.15 Compilación de sismos para suelos tipo D y E de la base de datos nacional y de ambientes tectónicos similares .....	43
Tabla 3.16 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo A .....	46
Tabla 3.17 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo B .....	47
Tabla 3.18 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo C.....	48
Tabla 3.19 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo D.....	49
Tabla 3.20 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo E .....	50
Tabla 3.21 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo A (se incluye al menos un sismo colombiano).....	56
Tabla 3.22 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo B (se incluye al menos un sismo colombiano).....	56
Tabla 3.23 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo C (se incluye al menos un sismo colombiano).....	57
Tabla 3.24 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo D (se incluye al menos un sismo colombiano).....	58
Tabla 3.25 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo E (se incluye al menos un sismo colombiano).....	59
Tabla 4.1 Factor de escala $F_{1i}$ calculado para cada espectro de los acelerogramas. ....	70
Tabla 4.2 Determinación del factor $F_{2i}$ por medio de los factores $F_{máx}$ y $F_{1i}$ para cada uno de los espectros .....	71
Tabla 4.3 Cálculo de los vectores [1 : F2i] .....	71

Tabla 4.4 Combinaciones $j$ y sus correspondientes combinaciones $k$ .....	71
Tabla 4.5 Selección de las combinaciones $j$ que cumplen los requisitos presentados en A.2.7.1.c	72
Tabla 4.6 Selección de la combinación $k$ que cumple los criterios 1 y 2.....	72
Tabla 4.7 Combinación $j$ seleccionada por medio del producto $m * m_j$ .....	72
Tabla 5.1 Información inicial e información que cumplió los requisitos de A.2.7.1.c para señales individuales.....	75
Tabla 5.2 Número de combinaciones conformadas por al menos un sismo nacional.....	76
Tabla 5.3 Requisitos de diferentes códigos que incluyen el análisis dinámico consistente en evaluaciones contra el tiempo.....	83

# RESUMEN

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) presenta los requisitos para la selección de acelerogramas (reales o sintéticos) a ser utilizados en análisis dinámicos consistentes en evaluaciones contra el tiempo. Esta metodología de análisis cuenta con una ventaja importante teniendo en cuenta que los acelerogramas contienen información sobre la naturaleza del movimiento fuerte. En este trabajo se realizó la selección de acelerogramas reales aptos para su uso en análisis dinámicos para la ciudad de Medellín a partir de información suministrada por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) con la que se generó una base de datos de acelerogramas inicial. La información se procesó con los requisitos de la NSR-10 para acelerogramas individuales y grupos de acelerogramas, como resultado se observó que un número bajo de registros pueden usarse para este tipo de análisis. Por tal razón la base de datos se complementó con acelerogramas de eventos registrados en ambientes tectónicos similares.

La base de datos final se procesó para seleccionar grupos de 3 acelerogramas para los periodos comprendidos en el rango 0,2 s a 2,0 s (con incrementos de 0,2 s) para los perfiles de suelo A, B, C, D y E definidos en el reglamento NSR-10, para un total de 50 grupos. Para la manipulación de la señales se desarrolló una herramienta computacional que permite de manera ágil seleccionar los grupos de señales. De los 50 grupos obtenidos, se observó que en su mayoría los conforman sismos de ambientes tectónicos similares debido a que presentan aceleraciones mayores a los sismos nacionales.

Con respecto a los requisitos normativos se encontró que para todos los perfiles de suelo, los factores de escalamiento aumentaron en los periodos iniciales donde el espectro de diseño es constante (lo que se considera como exigente), además, se observó que las ventanas de periodo exigidas por el reglamento NSR – 10 para el promedio de señales definidas en el intervalo  $0,2T - 1,5T$  aumentan proporcionalmente con el periodo, lo que genera que se superen ampliamente las ordenadas espectrales del espectro objetivo para la mayoría de periodos de dicho intervalo.

Finalmente, se realizó una comparación del código colombiano con códigos de diferentes países de donde se observó que hay similitud con los criterios exigidos en otras normas; sin embargo, se identificaron algunos aspectos que se podrían incluir en el reglamento y beneficiarían muy positivamente la selección de acelerogramas como la identificación de los pares M-d que representen la amenaza local y los límites de escalamiento de las señales.

**PALABRAS CLAVE:** acelerograma, análisis dinámico, perfil de suelo, ambiente tectónico, espectro de respuesta.

# 1 INTRODUCCIÓN

El riesgo sísmico es la posibilidad de pérdida (humana, social o económica) causada por eventos sísmicos y está conformado por tres factores que son: amenaza sísmica, exposición y vulnerabilidad. La amenaza sísmica se refiere a los efectos que los sismos pueden causar a las estructuras, que en el caso de Medellín se relaciona con los efectos causados por los sismos que puedan ocurrir en los sistemas de fallas que influyen sobre el Valle de Aburrá. La exposición se refiere a la población, edificios, instalaciones e infraestructura que se encuentran en el sitio donde pueden ocurrir sismos y la vulnerabilidad representa la probabilidad de daño que puede tener una estructura cuando se expone a los efectos de un sismo particular (Bommer y Boore, 2004).

Para la mitigación del riesgo sísmico se deben reducir al máximo los factores que lo componen. Usualmente, el único factor que puede reducirse es la vulnerabilidad, puesto que la amenaza sísmica es un factor invariante porque la ocurrencia de un evento sísmico no puede ser evitada y la exposición es difícil de disminuir debido a que las poblaciones continúan en un proceso continuo de expansión. Por su parte, la vulnerabilidad se relaciona con los daños en las estructuras y se puede disminuir por medio del diseño y construcción de estructuras con una resistencia suficiente para soportar los efectos de los sismos (Bommer y Boore, 2004).

Debido a que la mejor manera de reducir el riesgo sísmico corresponde a la disminución de la vulnerabilidad, a nivel mundial se han desarrollado ayudas de diseño, las cuales se consignan en normas de diseño que indican los requisitos mínimos necesarios para que las estructuras tengan el desempeño deseado ante cargas sísmicas.

En el caso de Colombia, donde gran parte de la población está expuesta a un riesgo sísmico, el reglamento vigente corresponde al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10; reglamento que incluye la representación de la amenaza sísmica en el país y los diferentes métodos de análisis que pueden usarse para considerar las fuerzas sísmicas. La ciudad de Medellín, sitio de interés para esta investigación, presenta una amenaza sísmica intermedia según el mencionado reglamento, NSR-10. Entre los métodos de análisis que incluye el reglamento se encuentra el método dinámico cronológico, que requiere como datos de entradas registros acelerográficos.

En esta investigación se busca seleccionar acelerogramas reales que puedan usarse en la aplicación del método dinámico cronológico en la ciudad de Medellín. Aunque la investigación se centra en una única ciudad del país, la metodología que se presenta en este informe puede aplicarse en cualquier otro lugar de Colombia. Adicionalmente, como se menciona más adelante, la ciudad de Medellín alberga un porcentaje importante de la población colombiana, por lo que los resultados de esta investigación tienen un impacto importante en el país.

A continuación se tratan los temas de amenaza sísmica del país y de la ciudad de Medellín, y como esta amenaza es representada en la NSR-10 para ser empleada en los diferentes métodos de análisis que incluye el reglamento. Finalmente se introduce el tema de la selección de señales para el uso dinámico en Colombia.

## 1.1 AMENAZA SÍSMICA EN COLOMBIA Y MEDELLÍN

Colombia se encuentra en el punto de convergencia de tres placas tectónicas: la placa oceánica Nazca, la placa oceánica del Caribe y la placa continental Suramericana como se presenta en la Figura 1.1. Esta interacción entre placas hace que el país cuente con una actividad sísmica importante, destacándose el proceso de subducción de la placa Nazca en la placa Suramericana y la actividad cortical debido a los sistemas de fallas que cruzan el país de norte a sur, presentando actividad en la totalidad de su trayectoria. El sistema de falla Romeral es el sistema de fallas corticales más importante en el país.

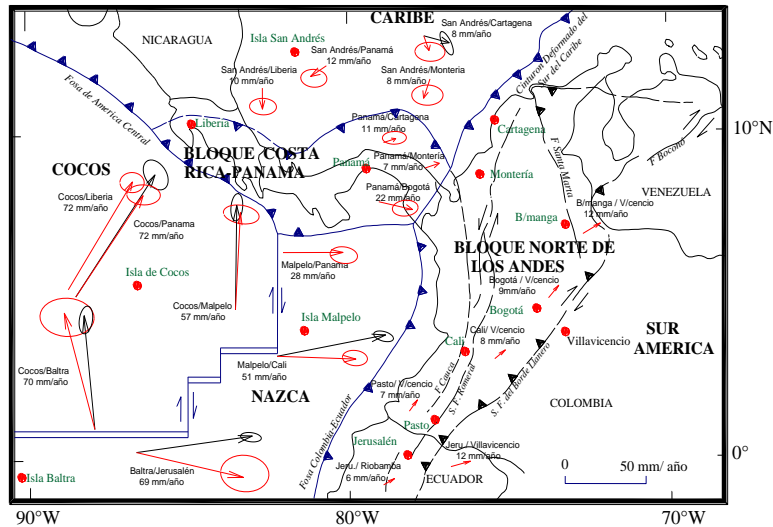


Figura 1.1 Ambiente tectónico de la zona noroccidental de Colombia. Se aprecia la zona de subducción compuesta por las placas Nazca, Caribe y Suramericana. (Modificado de: Mora y Kellog, 1995)

Con respecto a la población colombiana, la amenaza sísmica del país representa un peligro latente, puesto que el 87% de la población se encuentra expuesta a este tipo de amenaza (NSR-10). Lo anterior es debido a que la mayoría de la población se concentra en el centro (región Andina) y norte (región Caribe) del país, lugares donde la actividad sísmica de las fallas y la subducción están presentes, como se puede observar en la Figura 1.1. En Colombia, al igual que en muchos países en vía de desarrollo, la población se concentra en las ciudades capitales. La población del país según el censo del año 2005 realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2005), es de 41'468.384 habitantes de los cuales el 29,39% se encuentra concentrado en las principales ciudades como: Bogotá (6'778.691 habitantes), Medellín (2'219.861 habitantes), Cali (2'075.380 habitantes) y Barranquilla (1'112.889 habitantes). Las demás ciudades colombianas no superan el millón de habitantes. De las mencionadas ciudades Cali presenta una amenaza sísmica alta; Bogotá y Medellín una amenaza sísmica intermedia; mientras que Barranquilla tiene una amenaza sísmica baja. Por lo anterior, realizar un esfuerzo en disminuir el riesgo sísmico en las principales ciudades capitales del país beneficia a un alto porcentaje de la población colombiana. Se observa entonces que un porcentaje importante de la población expuesta al riesgo sísmico en el país se encuentra en la ciudad de Medellín.

Medellín, que es la segunda ciudad más importante del país en cuanto a población, se encuentra ubicada en valle de Aburrá en el sector septentrional del bloque andino. Por su ubicación, el valle de Aburrá está influenciado por la subducción y sistemas de fallas que

atraviesan y rodean el valle, clasificando a Medellín dentro de una amenaza sísmica intermedia según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Esta amenaza sísmica establece para la ciudad un riesgo sísmico que debe ser mitigado. La amenaza sísmica de Medellín –y de las demás localidades del país– se representa en el reglamento NSR-10 mediante un espectro de diseño o mediante acelerogramas, como se explica en el siguiente numeral.

## 1.2 REGLAMENTO NSR-10 Y LA REPRESENTACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA

El diseño sismo resistente en Colombia está regido por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, el cual tiene como objeto “reducir a un mínimo el riesgo de la pérdida de vidas humanas, y defender en lo posible el patrimonio del Estado y de los ciudadanos”.

Debido a que la actividad sísmica se puede representar por temblores de poca intensidad, temblores moderados y temblores fuertes, el reglamento menciona: “una edificación diseñada siguiendo los requisitos de este Reglamento, debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas que le impone su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño a los elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales pero sin colapso.”

Para el diseño de estructuras, los requisitos sísmicos del reglamento NSR-10 se representan por medio del espectro de diseño y en acelerogramas (reales o sintéticos). El espectro corresponde a una amenaza con un periodo de retorno de 475 años equivalente a una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, y los acelerogramas deben ser consistentes con la amenaza para la misma probabilidad de excedencia.

### 1.2.1 ESPECTROS DE DISEÑO

El espectro de diseño es una representación de la amenaza sísmica en la cual se indican para diferentes periodos estructurales el valor de aceleración esperado. El espectro de diseño presente en el reglamento NSR-10, definido para un coeficiente de cinco por ciento (5%) del amortiguamiento crítico, depende de los valores de aceleración y velocidad pico efectiva, el tipo de suelo y la importancia de la estructura. La aceleración y la velocidad pico efectiva ( $A_a$  y  $A_v$ , respectivamente) representan la amenaza sísmica y son el resultado de un estudio de amenaza sísmica que tiene en cuenta un periodo de retorno de 475 años. El coeficiente de importancia,  $I$ , modifica el espectro de diseño aumentando su aceleración y por ende las fuerzas sísmicas para tener en cuenta que según el tipo de estructura es el desempeño esperado, es decir, se espera que estructuras esenciales como hospitales sigan en funcionamiento (sin daños en elementos estructurales) después de un evento sísmico importante, mientras que una vivienda residencial puede sufrir daños en los elementos estructurales si la intensidad del sismo es alta. Al modificar el espectro con el coeficiente de importancia se obtienen valores de aceleración con una probabilidad de ser excedidos menor que el 10% en 50 años. Para representar los efectos de sitio, la aceleración es afectada por el factor  $F_a$  en la zona de periodos cortos (periodos menores a  $T_C$  en la Figura 1.2), y la velocidad es afectada por el factor  $F_v$  en la zona de periodos intermedios.

En la Figura 1.2 se presenta el espectro de amenaza del reglamento NSR-10 que corresponde a un espectro de amenaza uniforme, es decir, un espectro cuyos valores de

aceleración para cada periodo tienen la misma probabilidad de excedencia, que en este caso corresponde a un periodo de retorno de 475 años.

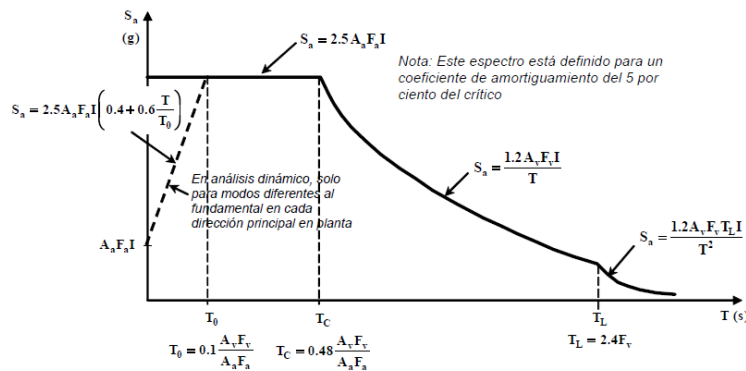


Figura 1.2 Espectro de diseño definido en el reglamento NSR-10.

donde:

- $S_a$  = Máxima aceleración horizontal de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad, para un sistema de un grado de libertad con un período de vibración  $T$ .
- $A_a$  = coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva, para diseño.
- $A_v$  = coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva, para diseño.
- $T$  = período de vibración del sistema elástico.
- $T_0$  = período de vibración el cual inicia la zona de aceleraciones constantes del espectro de aceleraciones, en segundos.
- $T_c$  = período de vibración, en segundos, correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para períodos cortos, y la parte descendiente del mismo.
- $T_l$  = período de vibración, en segundos, correspondiente al inicio de la zona de desplazamiento aproximadamente constante del espectro de diseño, para períodos largos.
- $F_a$  = coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debida a los efectos de sitio, adimensional.
- $F_v$  = coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios, debida a los efectos de sitio, adimensional.
- $I$  = coeficiente de importancia.

### 1.2.2 Acelerogramas

Según lo define el reglamento NSR-10, un acelerograma es la “descripción en el tiempo de las aceleraciones a que estuvo sometido el terreno durante la ocurrencia de un sismo real”, que se obtiene por medio de un instrumento de registro denominado acelerógrafo. Una vez se da la liberación de energía generada en un evento sísmico que tiene una ubicación espacial en términos del epicentro, la profundidad, y el tiempo, se generan ondas sísmicas que viajan a través de la corteza terrestre que pueden ser registradas a diferentes distancias, con lo cual se pueden obtener diversos registros del mismo movimiento fuerte (acelerogramas). La amplitud de los registros depende principalmente de la distancia relativa que se encuentra el instrumento de registro al evento sísmico, de las propiedades del suelo donde se ubica el acelerógrafo y de la magnitud del sismo que representa la cuantificación de la energía liberada. Este tipo de registros se denominan acelerogramas reales, pero también existen otros tipos de acelerogramas, como los

sintéticos generados a partir de modelos matemáticos y los artificiales que se generan a partir de un contenido frecuencial esperado.

En Colombia, el monitoreo de eventos sísmicos con base en el registro de aceleraciones se realiza por medio de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia, la cual dispone de una red de instrumentación a nivel nacional que permite obtener la información de los eventos generados en la corteza terrestre. Es a partir de esta información que se realiza el presente trabajo.

### **Acelerogramas reales**

Un acelerograma real es el registro del movimiento fuerte (en términos de aceleración) de un evento sísmico producto de la liberación de energía en la corteza terrestre. Debido a que representan las características genuinas de un sismo, los acelerogramas reales son ampliamente utilizados para procesos de investigación como el desarrollo de leyes de atenuación, estudio de efectos de sitio, interacción suelo estructura, diseño sismo resistente y estudios de instrumentación sísmica, solo por nombrar algunas de las aplicaciones. Una representación de un acelerograma real se presenta en la Figura 1.3.

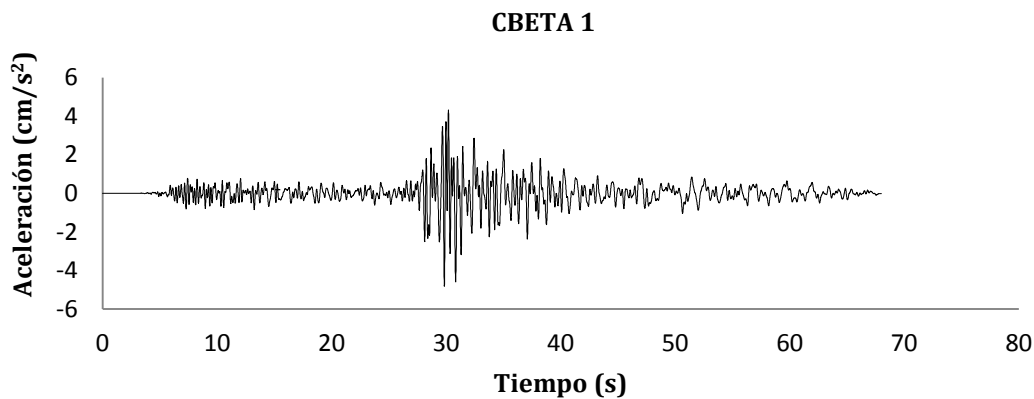


Figura 1.3 Sismo de 1999 del Quindío (Mw = 6,2) registrado por la estación CBETA (componente 1) ubicada a 192.1 Km de la localización del sismo.

### **Acelerogramas sintéticos**

Un acelerograma sintético es una representación de la respuesta sísmica obtenida por medio de simulaciones computacionales a partir de representaciones teóricas de la fuente, la trayectoria y los efectos locales. Son ampliamente utilizados en lugares donde la cantidad de acelerogramas reales es insuficiente o nula, para complementar bases de datos y desarrollar investigaciones. En la Figura 1.4 se presenta el acelerograma sintético obtenido para representar el acelerograma real mostrado en la Figura 1.3.

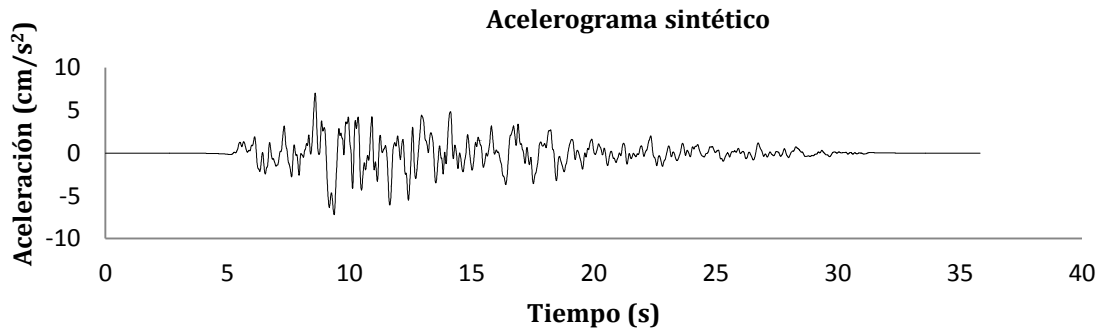


Figura 1.4 Acelerograma sintético del sismo de 1999 del Quindío ( $M_w = 6,2$ )

### Acelerogramas artificiales

Un acelerograma artificial es la representación de la respuesta sísmica obtenida a partir de un espectro objetivo como un espectro de diseño. Lo que se busca con este tipo de acelerogramas es satisfacer la necesidad de cumplir con rangos de frecuencias específicos que es difícil encontrar en acelerogramas reales por la variedad de factores que influyen en el contenido frecuencial de un sismo. Un problema en este tipo de acelerogramas es que debido a el procedimiento de generación de la señal, se genera un contenido de energía muy alto que no corresponde a la realidad (Bommer *et al.*, 2003).

## 1.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Con respecto al diseño como camino hacia la reducción de la vulnerabilidad, el reglamento NSR-10 presenta dos métodos de análisis: los métodos estático y dinámico. En cuanto al método estático se presenta el “método de la fuerza horizontal equivalente” y para el caso dinámico se presentan dos opciones como lo son el análisis dinámico elástico espectral y el método de análisis dinámico cronológico. A continuación se explican brevemente los diferentes métodos de análisis, siendo el método del análisis cronológico el método que requiere como datos de entrada registros acelerográficos, tema de estudio de esta investigación.

### 1.3.1 Método de la fuerza horizontal equivalente

El método de la fuerza horizontal equivalente es un método estático conservador por el cual se calcula el periodo de la estructura de forma poco precisa y a partir de éste la aceleración del espectro de diseño. La representación de la fuerza dinámica generada por el sismo de diseño, se da por medio de una fuerza estática que se aplica en la estructura. Se debe tener en cuenta que este método solo aplica para estructuras en donde el primer modo de vibración es el principal.

### 1.3.2 Análisis dinámico elástico espectral

El análisis dinámico elástico espectral es un método más estricto conceptualmente que el método de la fuerza horizontal equivalente, por medio del cual se obtiene la respuesta modal de la estructura (modos de vibración) y el periodo por medio de propiedades como la rigidez y la masa. La aceleración se obtiene por medio del espectro de diseño y el periodo correspondiente a cada modo de vibración para calcular por último las fuerzas sísmicas de diseño.

### 1.3.3 Método de análisis dinámico cronológico

El análisis dinámico cronológico es un método que tiene en cuenta la acción sísmica de una forma más precisa porque la información de entrada son acelerogramas que contienen las características propias del evento sísmico (pueden ser reales o sintéticos). Es un método utilizado generalmente para estructuras importantes.

Para la aplicación del método de análisis dinámico cronológico el reglamento NSR-10 en el capítulo A.2.7 se refiere a los parámetros requeridos en la selección de acelerogramas para el análisis dinámico consistente en evaluaciones contra el tiempo. Esta selección se debe hacer basándose en parámetros sismológicos y espectrales, a partir de una base de datos que contenga registros acelerográficos que cumplan los requisitos normativos según lo estipulado con respecto a los registros de los eventos sísmicos, “todos ellos representativos de los movimientos esperados del terreno teniendo en cuenta que deben provenir de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar, pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posible”. La selección debe hacerse de tal forma que los espectros de respuesta de los acelerogramas obtenidos cumplan con los requisitos de amplitudes y rangos de periodo definidos en el reglamento NSR-10 y presentados posteriormente en este informe en el capítulo 3.

Para poder aplicar el método del análisis dinámico cronológico es necesario contar con al menos tres acelerogramas diferentes, todos ellos consistentes con la amenaza del lugar bajo análisis. Aunque aparentemente es un requisito simple, la selección de los acelerogramas para su uso en el análisis dinámico es algo compleja, pues el número de acelerogramas reales registrados en el país con valores importantes de aceleración es bajo. El reglamento permite utilizar acelerogramas sintéticos cuando no es posible contar con un número adecuado de acelerogramas reales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que para la generación de registros sintéticos se requiere de conocimientos de sismología, conocimientos que solo una minoría de los ingenieros calculistas poseen.

## 1.4 SELECCIÓN DE SEÑALES PARA USO EN ANÁLISIS DINÁMICO EN COLOMBIA

La disponibilidad de información relacionada con los registros acelerográficos en Colombia está a cargo de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC). Esta entidad tiene sus inicios en el año 1993 donde se inició el registro de sismos con 17 acelerógrafos dispuestos en una línea Este-Oeste (Bahía Solano-Villavicencio). En años posteriores se complementó la red por medio de la instalación de más acelerógrafos. Debido a que la ventana de registro corresponde aproximadamente a 21 años, que es un periodo de tiempo que puede considerarse como “corto” al haber pocos sismos de magnitudes importantes o que correspondan a un periodo de retorno de 475 años (periodo consistente con la definición de la amenaza en el reglamento) en este periodo de tiempo, la mayoría de la información con la que se cuenta no tiene las características necesarias para realizar una selección de señales para su uso en análisis dinámico consistentes en evaluaciones contra el tiempo. Para realizar este tipo de selección de señales es necesario contar con una base de datos amplia, que cuente con una mayor cantidad de registros de sismos con magnitudes importantes que tengan aceleraciones significativas. En Colombia se cuentan con pocos registros de sismos con magnitud

importantes, entre ellos el sismo de Armenia en 1999 ( $M_L = 6,2$  y  $d = 14,95$  km), el sismo de Pizarro en 2004 ( $M_L = 6,7$  y  $d = 50$  km) y el sismo de Quetame en 2008 ( $M_L = 5,7$  y  $d = 9$  km).

Debido a los bajos valores de aceleración con los que se cuenta, el uso de los acelerogramas reales colombianos implicaría tener que escalar las señales por factores muy grandes para cumplir los requisitos normativos, lo cual no es apropiado ya que se puede modificar las características propias de un evento natural. La escasez de registros de aceleración compatibles con la amenaza hace que la selección de acelerogramas para el uso en análisis cronológico requiera de una alta inversión de tiempo, puesto que es necesario buscar en fuentes externas registros compatibles con la amenaza que puedan usarse en el país. En este trabajo se realiza una búsqueda para la ciudad de Medellín de sismos de ambientes tectónicos similares cuyos espectros de respuesta cumplan los requisitos del reglamento para la ciudad, teniendo en cuenta que este mismo procedimiento se puede realizar para cualquier locación del país donde se requiera de acelerogramas reales para el análisis sísmico.

Con el fin de poder desarrollar análisis dinámicos cronológicos, es necesario generar una base de datos que incluya una variada gama de acelerogramas que le permitan al usuario de ésta, contar con información confiable que haya sido previamente procesada a la luz de criterios sismológicos y normativos. Estos criterios sismológicos consisten principalmente en los parámetros del movimiento fuerte (aceleración pico efectiva, velocidad pico efectiva y el desplazamiento pico efectivo) y los parámetros sísmicos (magnitud, distancia, clasificación del sitio, etc.).

La selección de señales sísmicas adecuadas para el uso en análisis no es un tema poco tratado, pero aun así no es fácil encontrar bibliografía que se refiera a este tema. Los códigos de diseño mencionan guías en las cuales los diseñadores se pueden basar para realizar dichos análisis pero poco se puede utilizar para la selección de registros apropiados (Bommer y Acevedo, 2004). En la selección de los registros aptos en Colombia basándose en criterios sismológicos como la magnitud y la distancia, Acevedo (2012) explora la base de datos de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) y concluye que: “i) el número de registros de la base de datos no es lo suficientemente amplio para incluir un alto número de parámetros de selección, ii) la información de los *Boletines de movimiento fuerte* no incluye parámetros como mecanismo de falla, y la información sobre la profundidad focal es incompleta, iii) de los registros seleccionados solo en un caso se identifican sismos independientes, por lo que no se atiende el criterio de que *cumplan la mayor gama de frecuencias y aplicaciones posible*”.

El problema de contar con información insuficiente no es reciente en investigaciones relacionadas con eventos sísmicos debido a que encontrar pares de magnitud – distancia (M-d) particulares que puedan representar la amenaza sísmica de un lugar es un problema complejo, y en muchos casos se deben buscar soluciones alternativas a este inconveniente que permitan continuar el curso de la investigación de una forma adecuada. Una solución propuesta es el uso de registros sísmicos de ambientes tectónicos similares (Bommer y Acevedo, 2004), con los cuales se pueda trabajar sin malinterpretar el sentido propio del comportamiento tectónico de una zona determinada.

En este proyecto se pretende realizar la “Selección de acelerogramas reales para su uso en análisis dinámicos para la ciudad de Medellín”. Con esta selección de acelerogramas,

se busca generar una base de datos de acelerogramas que faciliten a los diseñadores el proceso de selección de acelerogramas reales aptos para utilizar el método dinámico de análisis cronológico. La selección se basa en los requisitos presentados en la sección A.2.7.1 del reglamento NSR-10 y se realiza para los tipos de suelo A, B, C, D y E, en el rango de periodos [0,2 s – 2 s] con un intervalo de 0,2 s, para un total de diez periodos.

Como producto final se busca generar grupos de tres acelerogramas para los cinco tipos de suelo mencionados en el rango de diez periodos definido, para un total de 50 grupos de señales que pueden ser empleados en el método dinámico de análisis cronológico.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Generar una base de datos de acelerogramas reales aptos para la realización de análisis dinámicos contra el tiempo para la ciudad de Medellín.

### 1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilación de acelerogramas reales registrados en los ambientes tectónicos que ocurren en Colombia.
- Generación de una base de datos de acelerogramas reales aptos para su uso en análisis dinámico en la ciudad de Medellín.
- Procesamiento de los registros recopilados basándose en criterios sismológicos.
- Generación de una herramienta computacional que permita manipular la información de una forma ágil y sencilla.

## 1.6 ESQUEMA GENERAL DEL INFORME

En este informe se presenta la selección de acelerogramas aptos para su uso en análisis dinámicos consistentes en evaluaciones contra el tiempo siguiendo los requisitos presentados en el reglamento NSR-10. En el capítulo dos se hace una descripción de las bases teóricas utilizadas para el procesamiento de los acelerogramas seleccionados. En el capítulo tres se seleccionan las señales que cumplen con los requisitos presentados en A.2.7.1 del reglamento NSR-10, para esto se hace un procesamiento de la base de datos nacional y una selección de señales de ambientes tectónicos similares. En el capítulo cuatro se explica la herramienta computacional desarrollada para procesar de forma ágil los espectros de los acelerogramas y obtener grupos de tres señales según los requisitos normativos. En los capítulos cinco y seis se hacen la discusión de los resultados y las conclusiones del proyecto. Finalmente, se incluyen tres anexos correspondientes al manual de usuario de la herramienta computacional, la información de los sismos de la base de datos obtenida y el código de la herramienta computacional.



## 2 MARCO TEÓRICO

Como base teórica para la selección de acelerogramas que puedan ser utilizados en procedimientos de análisis dinámico consistentes en evaluaciones contra el tiempo, se hace una breve descripción de los análisis de amenaza sísmica como punto de partida en la determinación del potencial sísmico. Se presenta la base teórica concerniente a los espectros de: respuesta, amenaza uniforme y de diseño, los cuales son el punto de partida para la selección de acelerogramas. Posteriormente, se hace una descripción del análisis modal cronológico, procedimiento para el cual se hace la selección de acelerogramas y por último, se presentan los requisitos requeridos por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) para la selección de acelerogramas.

### 2.1 ANÁLISIS DE AMENAZA SÍSMICA

El uso principal de los análisis de amenaza sísmica es obtener los movimientos del suelo de suelo rígido y afloramientos de roca para el uso en el diseño. La descripción cuantitativa de los movimientos del suelo pueden ser en términos de valores escalares simples (aceleración pico, velocidad pico, desplazamiento pico, valores de respuesta espectral, o la intensidad de Arias) o puede ser en historias de tiempo en aceleración, velocidad y desplazamiento. Típicamente, los movimientos del suelo para diseño son utilizados en análisis geotécnicos y estructurales (Abrahamson, 2000).

La amenaza sísmica es el punto de partida para la selección de acelerogramas para usar en el análisis dinámico cronológico, pues los acelerogramas seleccionados deben ser compatibles con la amenaza del lugar bajo estudio. Existen dos metodologías comúnmente utilizadas para calcular la amenaza sísmica, el Análisis Determinístico de Amenaza Sísmica y el Análisis Probabilístico de Amenaza Sísmica.

#### 2.1.1 ANÁLISIS DETERMINÍSTICO DE AMENAZA SÍSMICA

El análisis determinista de amenaza sísmica (DSHA, por su sigla en inglés) identifica, a partir de las diversas fuentes sísmicas que afectan un lugar, el evento sísmico que pueda producir el mayor efecto (generalmente aceleración) en el lugar bajo estudio. Para el desarrollo de la metodología determinista se siguen cuatro pasos básicos como se presenta en la Figura 2.1, por medio de los cuales se determina la amenaza de una locación definida, (Kramer, 1996; Krinitzsky, 1995):

1. Identificación y caracterización de todas las fuentes sísmicas capaces de producir un sismo de importancia para el sitio de estudio las cuales se hacen por medio de estudios geológicos, de neotectónica y paleosismología. De este modo se definen el tipo de fallas y sus características físicas, además se recopila información acerca de las magnitudes registradas de cada una de las fallas para la determinación del sismo máximo creíble (MCE, por su sigla en inglés).
2. Luego de tener un conocimiento apropiado de la zona de estudio, se procede a determinar la distancia mínima de la falla al sitio de estudio la cual puede ser la

distancia perpendicular que une al sitio con la falla ó la distancia que une al sitio con un extremo de la falla.

3. Determinación del sismo de control; en este caso el MCE, que consiste en el sismo más grande que puede ser razonablemente esperado a ocurrir en cada fuente sísmica. Su determinación se hace por medio de estudios geológicos, de neotectónica y paleosismología.
4. Luego de conocer el MCE, se procede a determinar su efecto en la zona por medio del uso de las ecuaciones de atenuación en términos de los parámetros de movimiento del suelo (aceleración máxima esperada), de este modo se puede conocer el efecto de los diferentes movimientos en la zona de estudio.

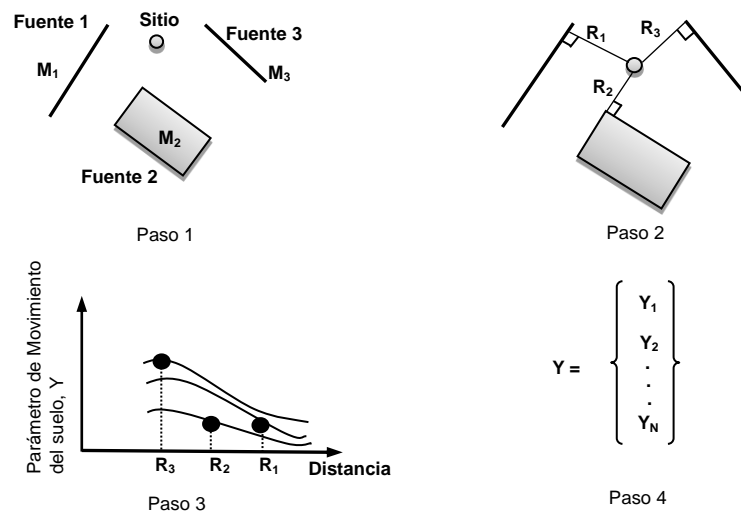


Figura 2.1 Pasos para el cálculo de la amenaza sísmica determinista. (Modificado de: Kramer, 1996)

### 2.1.2 ANÁLISIS PROBABILISTA DE AMENAZA SÍSMICA

El análisis probabilista de la amenaza sísmica (PSHA, por su sigla en inglés) es una metodología que tiene en cuenta los posibles escenarios sísmicos que se puedan presentar en un sitio determinado. El resultado obtenido es un valor de aceleración asociado a una probabilidad de excedencia y a un periodo de retorno que generalmente corresponde a 475 años. Esta metodología se puede describir en un procedimiento de cuatro pasos como se presenta en la Figura 2.2, cada uno de los cuales se asemeja al procedimiento del análisis determinístico descrito posteriormente (Kramer, 1996):

1. El primer paso, identificación y caracterización de las zonas sísmicas, es idéntico al primer paso del análisis determinístico, excepto que la distribución de probabilidad de locaciones de ruptura potencial son asignadas a cada fuente. Estas distribuciones luego se combinan con la geometría de una fuente para obtener la distribución de probabilidad correspondiente de distancia de la fuente al sitio. El DSHA, de otro lado, implícitamente asume que la probabilidad de

ocurrencia es 1 en los puntos de cada fuente más cercana al sitio, y cero en cualquier otra parte.

2. Seguido, la sismicidad o distribución temporal de recurrencia sísmica debe ser caracterizada. Una relación de recurrencia, la cual especifica el índice promedio en el cual un sismo de una magnitud dada será excedido, se utiliza para caracterizar la sismicidad de cada fuente. La relación de recurrencia puede tener en cuenta el sismo de máximo tamaño, pero no se limita a la consideración de ese sismo, como lo hace generalmente.
3. El movimiento del suelo producido en el sitio por sismos de cualquier tamaño posible en cualquier punto posible debe ser determinado con el uso de relaciones de predicción. La incertidumbre inherente en la relación de predicción también es considerada en el PSHA.
4. Finalmente, las incertidumbres en la localización del sismo, tamaño del sismo, y el parámetro de predicción del movimiento del suelo son combinados de manera probabilística para obtener la probabilidad que el parámetro del movimiento del suelo será excedido durante un periodo particular de tiempo.

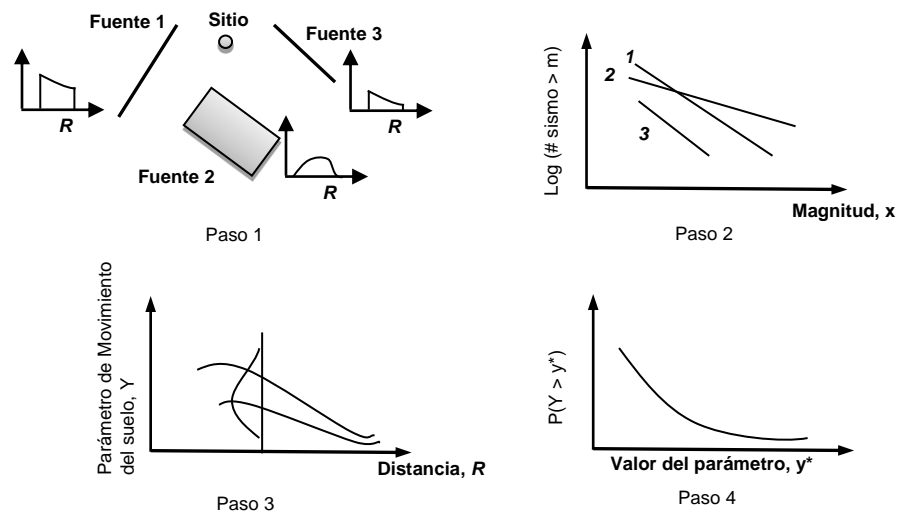


Figura 2.2 Pasos para el cálculo de la amenaza sísmica determinista. (Modificado de: Kramer, 1996)

En la metodología PSHA no se obtiene un evento específico que determina la amenaza, es decir, la amenaza no está caracterizada por un evento con una magnitud y una distancia dada (M-d). El no conocer dicho evento dificulta un poco la selección de acelerogramas consistentes con la amenaza, como se discutirá más adelante en el capítulo 3. Sin embargo, como parte del desarrollo de un estudio de amenaza sísmica probabilístico se puede realizar la *desagregación de la amenaza*, lo cual identifica los eventos que más contribuyen a la amenaza.

En la realización de la desagregación sísmica se tiene en cuenta que el método probabilista de amenaza sísmica suma las contribuciones de los pares M-d para obtener como resultado un valor final de aceleración que tiene una probabilidad determinada de

ser excedida en un periodo de tiempo. En este proceso, la amenaza para un periodo de retorno dado y en un periodo específico se divide en grupos de magnitud y distancia. Posteriormente, la contribución relativa a la amenaza de cada grupo es calculada por la división la probabilidad de excedencia de cada grupo por la probabilidad de excedencia de todos los grupos (Chen y Scawthorn, 2003). Es importante anotar que la desagregación se debe hacer en el momento de realizar el estudio de amenaza sísmica, es decir, a partir de los resultados de un estudio de amenaza sísmica en términos solo de parámetros como la aceleración o la velocidad pico efectiva, no es posible obtener los eventos que más contribuyen a la amenaza. Este es el caso del reglamento NSR-10, en donde no se presenta la desagregación, por lo tanto no es posible definir el escenario sísmico en términos de parámetros como la magnitud y la distancia, hecho que dificulta la selección de acelerogramas para usar en el procedimiento cronológico.

## 2.2 ESPECTRO DE RESPUESTA

El espectro de respuesta es un diagrama de máxima respuesta (máximo desplazamiento, máxima velocidad, máxima aceleración o el valor máximo de cualquier otra magnitud de interés) a una función específica de excitación, para todos los sistemas posibles con un grado de libertad como se presenta en la Figura 2.3. La abscisa del espectro es la frecuencia natural (o periodo) del sistema y la ordenada, la respuesta máxima (Paz, 1992). Los espectros de respuesta proveen un medio conveniente para resumir la respuesta pico de todos los posibles sistemas de un grado de libertad a una componente particular de un movimiento del suelo. También, provee un enfoque práctico para aplicar el conocimiento de dinámica de estructuras al diseño de estructuras y desarrollo de los requisitos de fuerza lateral en códigos (Chopra, 2007).

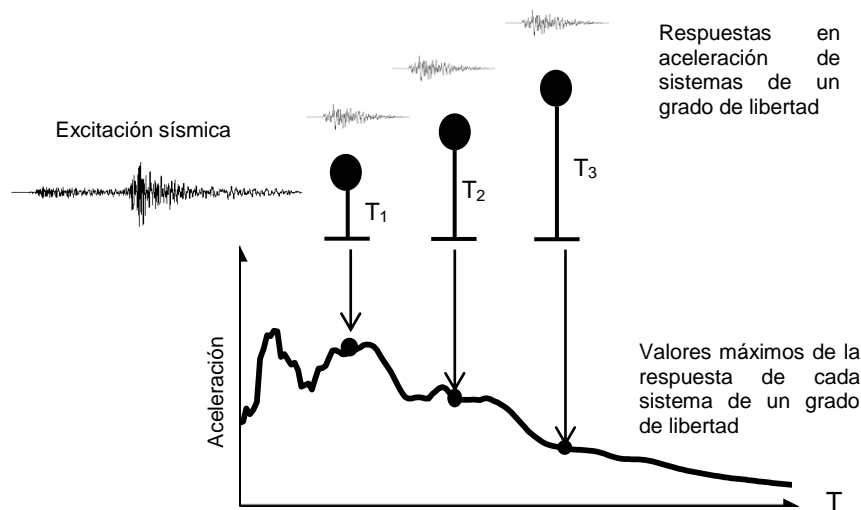


Figura 2.3 Cálculo de espectro de respuesta de aceleraciones

En el reglamento de diseño NSR-10, una de las aplicaciones del espectro de respuesta enfocado al diseño de estructuras se encuentra en la sección "A.2.7-FAMILIAS DE ACELEROGRAMAS" que establece los requisitos que deben cumplir los espectros de respuesta de los acelerogramas seleccionados para ser utilizados en análisis cronológicos con respecto al espectro de diseño objetivo. Estos requisitos que se basan en criterios de amplitud espectral y ventanas de periodo se presentan con mayor detalle en el capítulo 3.

La representación más típica de la amenaza en los códigos de diseño es mediante el espectro de amenaza uniforme, definido para un periodo de retorno de 475 años. Otra forma de definir la amenaza es mediante el uso de acelerogramas, los cuales usualmente deben ser consistentes con la amenaza representada en el espectro. A continuación se mencionan brevemente las características del espectro de amenaza uniforme que se utiliza para el diseño de estructuras definido por el reglamento NSR – 10.

### 2.3 ESPECTRO DE AMENAZA UNIFORME

El espectro de amenaza uniforme (EAU) es un espectro envolvente correspondiente a sismos de diferentes fuentes (Bommer *et al.*, 2000). El EAU se obtiene a partir de un análisis de amenaza sísmica probabilista, por medio de la curva de amenaza, la cual representa la variación del nivel de parámetro de movimiento fuerte considerado con la frecuencia anual de excedencia ( $q$ ) como se presenta en la Figura 2.4.

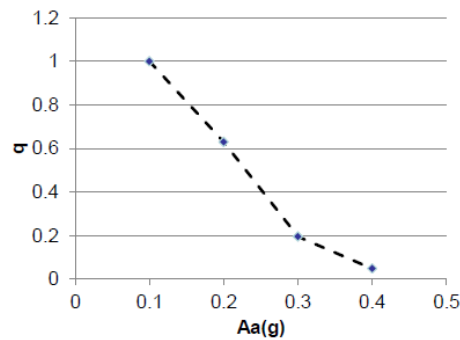


Figura 2.4 Curva de amenaza (Tomado de: Acevedo (2012), notas de clase)

Teniendo en cuenta que la curva de amenaza se obtiene para un periodo definido, se deben obtener las curvas para los diferentes periodos y de este modo tomar los valores del parámetro de movimiento fuerte seleccionado (generalmente la aceleración) para construir el espectro de amenaza uniforme con una frecuencia anual de excedencia igual en todos los casos.

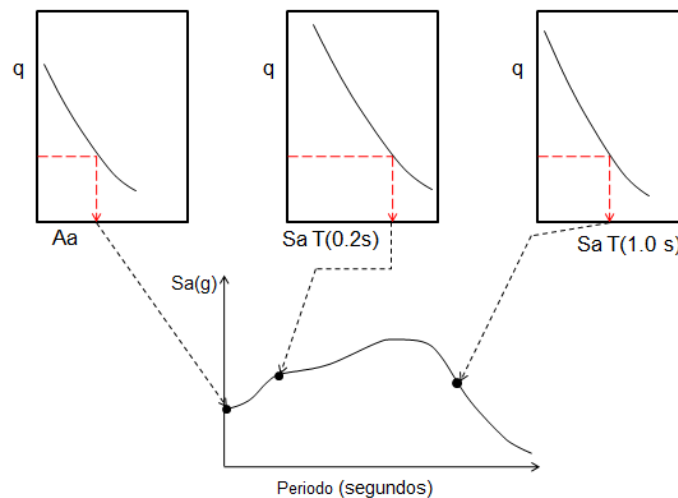


Figura 2.5 Construcción del espectro de amenaza uniforme. (Modificado de: Acevedo (2012), notas de clase)

Como se puede observar en la Figura 2.6 el contenido frecuencial de los sismos varía dependiendo de características como la magnitud y la distancia. García (1998) dice “Desde el punto de vista cualitativo, la magnitud, que es una medida de la energía que se libera en la fuente afecta directamente la amplitud de las ondas sísmicas, por lo tanto a mayor magnitud en la fuente se presentan proporcionalmente mayores aceleraciones. En la medida que las ondas sísmicas viajan, los registros que se obtienen van a presentar en sus espectros un decrecimiento en la región de periodos cortos, lo cual se manifiesta en un corrimiento del pico del espectro hacia la derecha, o sea hacia la zona de periodos largos. Mirando desde el punto de vista de las tres regiones del espectro, puede decirse que, en la medida que el registro se obtenga a mayor distancia, la zona de mayores valores dentro del espectro pasa de la zona con aceleraciones aproximadamente constantes, a la región con velocidades aproximadamente constantes y posteriormente a la zona con desplazamiento aproximadamente constantes.”

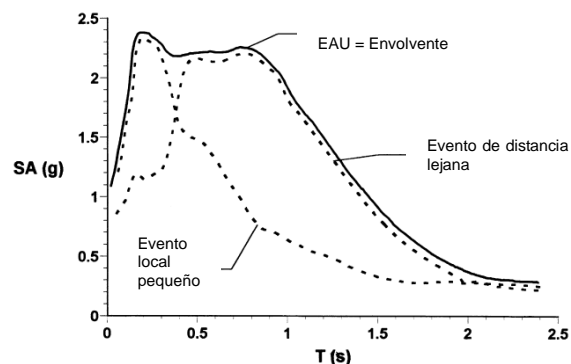


Figura 2.6 Ilustración esquemática del espectro de amenaza uniforme (EAU) como envolvente de espectros de fuentes sísmicas individuales. (Bommer et al., 2000b)

## 2.4 ESPECTRO DE DISEÑO

Como se define en la NSR-10 el espectro de diseño, “es el espectro correspondiente a los movimientos sísmicos de diseño”; es el medio por el cual se representan los efectos sísmicos en el diseño sismo resistente de estructuras. El espectro más utilizado es el que utiliza como parámetro de respuesta máxima la aceleración, ya que esta es el punto de partida del diseño basado en fuerzas y corresponde a un espectro de amenaza uniforme definido para un periodo de retorno de 475 años, lo que equivale a una probabilidad de excedencia de un 10% en un periodo de 50 años.

### 2.4.1 ESPECTRO DE DISEÑO PARA COLOMBIA

Para la definición del espectro de diseño se deben tener especificados los siguientes parámetros:

- Aceleración espectral  $S_a$
- Aceleración pico  $A_a$
- Velocidad pico  $A_v$
- Periodo de la estructura  $T$
- Tipos de perfil de suelo
- Coeficiente  $F_a$
- Coeficiente  $F_v$
- Coeficiente de importancia  $I$

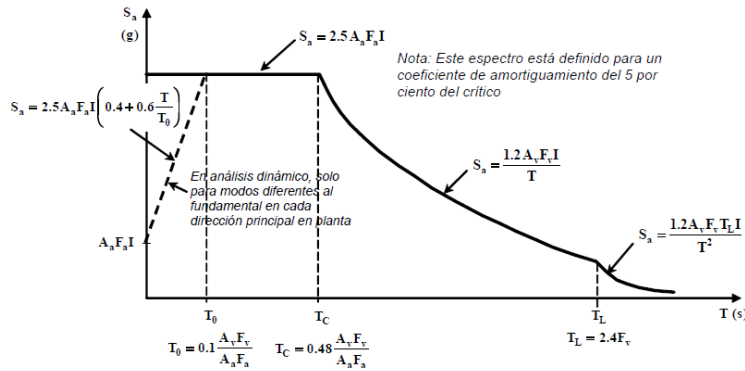


Figura 2.7 Espectro de diseño definido en el reglamento NSR-10.

## 2.4.2 ESPECTROS DE DISEÑO PARA MEDELLÍN

La amenaza sísmica de la ciudad de Medellín está clasificada como intermedia según la NSR-10. Esta clasificación está dada según el valor de la aceleración pico ( $A_a = 0.15$ ).

Para el caso de Medellín el espectro está definido de acuerdo a los parámetros específicos establecidos para la ciudad. Estos parámetros son:

- Aceleración pico  $A_a = 0.15$
- Velocidad pico  $A_v = 0.2$
- Tipos de perfil de suelo:
- Coeficiente  $F_a$
- Coeficiente  $F_v$
- Coeficiente de importancia  $I$

## 2.5 ANÁLISIS MODAL CRONOLÓGICO

El análisis modal cronológico es un análisis dinámico por medio del cual se obtiene la solución de sistemas de varios grados de libertad cuando se les somete a una excitación en su base, el cual corresponde a la respuesta de una estructura que se ve sometida a un sismo (García, 1998). Para el diseño de estructuras en Colombia la excitación en la base corresponde a acelerogramas reales o sintéticos que representen los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar.

El análisis tiempo-historia (análisis modal cronológico) es a menudo requerido para estructuras complejas, incluyendo edificios con irregularidades en planta o elevación, edificios para los cuales los modos superiores son susceptibles a ser excitados y edificios diseñados para una ductilidad alta. El propósito de utilizar acelerogramas reales en análisis geotécnicos y estructurales es que ellos pueden ser empleados con la seguridad de que representan las características genuinas de un sismo (Bommer, 2000).

## 2.6 REQUISITOS NORMATIVOS PARA LA SELECCIÓN DE SEÑALES ACELEROGRÁFICAS

Con respecto a la simulación de señales Bommer y Ruggeri (2002) señalan que el grado de conocimiento de sismología para realizar la simulación de señales es importante. Para

tal fin se deben utilizar el método de la teoría del rayo, funciones empíricas de Green y métodos estocásticos. Estos métodos necesitan tener definido un escenario sísmico, al menos en términos de la magnitud y la distancia. Estos requisitos hacen que la opción presentada en el literal “b” de la sección A.2.7.1 del reglamento NSR-10 no sea una opción fácil de elegir.

Otro aspecto importante mencionado por Bommer y Ruggeri (2002) es la selección de los acelerogramas basándose en su semejanza con el espectro de diseño, ya que este es un espectro de amenaza uniforme el cual no corresponde a un único evento sísmico porque es una envolvente de varios sismos que pueden afectar el sitio.

#### 2.6.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ACELEROGRAMAS

La selección de acelerogramas se basa en un conjunto de criterios simológicos y espectrales. Bommer y Acevedo (2004) mencionan los parámetros sismológicos para ser utilizados como criterios de selección: magnitud, distancia, tipo de suelo, mecanismo de ruptura, etc. La NSR-10 especifica que la selección de las señales se debe basar principalmente en los parámetros ya mencionados:

- (a) Debe utilizarse, para efectos de diseño, la respuesta ante la componente horizontal de un mínimo de tres (3) acelerogramas diferentes, (véase A.5.5), todos ellos representativos de los movimientos esperados del terreno teniendo en cuenta que deben provenir de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar, pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posible. Si se utilizan siete o más acelerogramas, en vez del mínimo de tres prescritos anteriormente, se puede utilizar el valor promedio de los valores obtenidos de todos los acelerogramas empleados en vez de considerar los valores máximos de los análisis individuales.
- (b) Cuando se considere que no es posible contar con el número requerido de registros reales con las condiciones descritas en (a), se permite suplir la diferencia por medio de registros sintéticos simulados adecuados para representar los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar.
- (c) Los espectros de respuesta de los acelerogramas empleados, apropiadamente escalados en consistencia con la amenaza, no pueden tener individualmente ordenadas espectrales, para cualquier período de vibración en el rango comprendido entre  $0.8T$  y  $1.2T$ , donde  $T$  es el período de vibración fundamental inelástico esperado de la estructura en la dirección bajo estudio, menores que el 80% de las ordenadas espectrales del movimiento esperado del terreno definidas en A.2.6, y el promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados, en el rango comprendido entre  $0.2T$  y  $1.5T$ , no debe ser menor que las ordenadas espectrales en el mismo rango de períodos para el movimiento esperado del terreno definido en A.2.6.

Los requisitos presentados en el literal (c) se representan gráficamente en la Figura 2.8 (a) y (b).

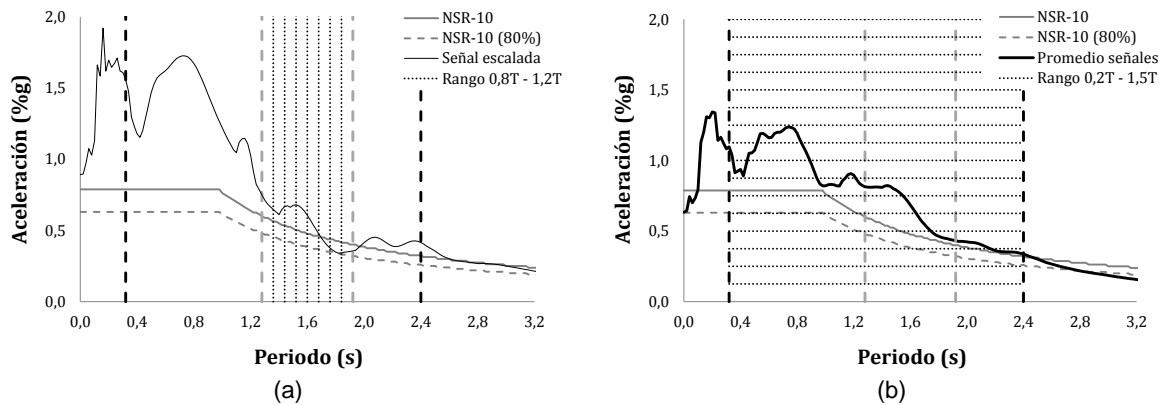


Figura 2.8 Requisitos establecidos en el reglamento NSR-10 para la selección de señales para ser usadas en análisis dinámicos consistentes en evaluaciones contra el tiempo. (a) Requisito para los espectros de los acelerogramas individuales (Rango 0,8T – 1,2T). (b) Requisito para la combinación de espectros de acelerogramas a ser empleados (Rango 0,2T – 1,5T).

- (d)** Cuando en el Capítulo A.5 estos registros se utilizan en análisis tridimensionales, deben utilizarse las dos componentes horizontales del mismo registro las cuales se deben escalar con el mismo factor de escala. En este caso, en vez del promedio mencionado en (c) se debe utilizar la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores.

A continuación se mencionan algunos parámetros del movimiento fuerte del suelo que fueron utilizados en esta investigación para la selección de señales sísmicas adecuadas para su uso en análisis dinámicos cronológicos.

## 2.7 PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO FUERTE DEL SUELO

Los parámetros del movimiento del suelo son esenciales para describir las características importantes del movimiento fuerte del suelo en una forma cuantitativa compacta (Kramer, 1996) y se pueden obtener en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia. Los parámetros obtenidos directamente del registro de eventos sísmicos por medio de acelerógrafos son la aceleración pico, la velocidad pico y el desplazamiento pico, que son parámetros de amplitud que caracterizan el movimiento del terreno. Otros parámetros relacionados con la fase fuerte del movimiento sísmico que también son comúnmente utilizados en propósitos ingenieriles son la intensidad de Arias y la duración, que se obtienen en el dominio de la frecuencia. A continuación se hace una breve descripción de estos parámetros al ser importantes en el desarrollo de este proyecto.

### *ACELERACIÓN PICO EFECTIVA*

La medida de amplitud más comúnmente utilizada es la aceleración horizontal pico ( $A_a$ ). La aceleración pico para una componente del movimiento dada es simplemente el máximo valor (absoluto) obtenido de un acelerograma de esa componente. Las aceleraciones horizontales han sido comúnmente utilizadas para describir los movimientos del suelo porque tienen una relación directa con las fuerzas inerciales; ciertamente, las fuerzas dinámicas inducidas sobre ciertas estructuras (cuando son muy rígidas) tienen una relación cercana con la aceleración pico efectiva. Las aceleraciones

verticales han recibido menos atención en la ingeniería sísmica que las aceleraciones horizontales, principalmente porque los márgenes de seguridad contra fuerzas verticales inducidas por la gravedad usualmente proveen una resistencia adecuada a las fuerzas dinámicas inducidas por aceleraciones verticales en sismos.

Los movimientos del suelo con aceleraciones pico altas son usualmente, pero no siempre, más destructivos que los movimientos con una aceleración pico baja. Aceleraciones pico que duran por un periodo de tiempo corto pueden causar poco daño a muchos tipo de estructuras. Aunque la aceleraciones pico es un parámetro muy útil, no provee información del contenido frecuencial o la duración del movimiento; es por esto que debe ser complementado por medio de información adicional para caracterizar el movimiento del suelo de forma más precisa (Kramer, 1996).

#### *VELOCIDAD PICO*

La velocidad horizontal pico es otro parámetro útil para la caracterización de la amplitud del movimiento del suelo y representa el valor máximo (absoluto) obtenido a partir de una señal de velocidades (que se obtiene a partir de la integración de una señal de aceleraciones). Debido a que la velocidad es menos sensible a las componentes de alta frecuencia del movimiento del suelo, la velocidad horizontal pico puede representar de una forma más precisa la amplitud del movimiento del suelo en las frecuencias intermedias que la aceleración horizontal pico. Para estructuras o instalaciones que son sensibles a cargas en este rango de frecuencia intermedia, la velocidad horizontal pico puede proveer una indicación más precisa del potencial de daño que la aceleración horizontal pico (Kramer, 1996).

#### *DESPLAZAMIENTO PICO*

Los desplazamientos pico están generalmente asociados con los componentes de baja frecuencia del movimiento del suelo y representa el valor máximo (absoluto) obtenido a partir de una señal de desplazamientos. Ellos son a menudo difíciles de determinar de una forma precisa debido a errores de procesamiento en el filtrado e integración de acelerogramas y debido al ruido de largo periodo. Como resultado, el desplazamiento pico es comúnmente menos utilizado como una medida del movimiento del suelo que la aceleración o la velocidad pico (Kramer, 1996).

#### *INTENSIDAD DE ARIAS*

La intensidad de Arias es un procedimiento mediante el cual se puede establecer la duración de la fase intensa de un sismo  $T_d$ , teniendo en cuenta que los sismos se pueden simular mediante procesos aleatorios de potencia uniformemente distribuida por unidad de tiempo. La duración  $T_d$  se define como la duración de un proceso equivalente de igual energía total que el proceso real, donde su potencia es constante por unidad de tiempo e igual a la potencia máxima esperada del proceso real (Botero, 2011).

La intensidad de Arias se puede obtener por medio de la Ecuación 2-1.

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a_{(t)}]^2 dt \quad \text{Ecuación 2-1}$$

donde:

$I_a$  = intensidad de Arias.  
 $a_{(t)}$  = función que define las amplitudes de la aceleración.  
 $g$  = aceleración de la gravedad.

### *DURACIÓN*

La acción de un evento sísmico sobre una estructura se da por medio de fuerzas que se invierten en cortos periodos de tiempo. Esta inversión de fuerzas puede generar daños en las estructuras si se presenta de forma prolongada, lo que podría no suceder si la acción sísmica se da por medio de la aplicación de una fuerza importante durante un tiempo corto. Es por esto que la duración es un parámetro de importancia para ser considerado en el ámbito estructural. En esta investigación no se utilizó el parámetro de duración explícitamente para caracterizar las señales; sin embargo, al estar directamente relacionada la intensidad de Arias con la duración se consideró indirectamente.



### 3 SELECCIÓN DE SEÑALES

Para la selección de acelerogramas que puedan ser utilizados en procedimientos de análisis dinámico consistentes en evaluaciones contra el tiempo, se hizo una búsqueda de registros acelerográficos que cumplieran los requisitos presentados en el literal A.2.7.1.c del reglamento NSR-10; donde se establecen los intervalos de periodos estructurales en los que los acelerogramas individuales seleccionados deben superar el 80% de las ordenadas espectrales del espectro de diseño objetivo, y el promedio de las ordenadas espectrales de la combinación de mínimo tres acelerogramas debe superar el 100% del espectro de diseño objetivo.

Acevedo (2012) analizó las características de acelerogramas registrados por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) reportados entre los años 1993 y 2009. A partir de esta información se buscó identificar los sismos en roca y suelo que pudieran ser de utilidad para esta investigación, seleccionando aquellos que tuvieran una aceleración horizontal pico efectiva mayor al 5% de la gravedad. Posterior a esta identificación, se determinaron los periodos estructurales en el intervalo de 0,2 s a 2 s, en los que la información de la RNAC contaba con los registros mínimos (3) requeridos en el reglamento NSR-10 para realizar análisis dinámicos.

Para los periodos en donde la base de datos es insuficiente se procedió a buscar eventos registrados en ambientes tectónicos similares que permitieran completar la base de datos inicial y, que en el rango de periodos de [0,2 s - 2 s] se cumpliera con el número mínimo de registros. Una vez identificados los grupos de acelerogramas correspondientes a cada periodo se seleccionaron grupos de tres acelerogramas que cumplen lo presentado en A.2.7.1.c para el rango de periodos establecido [0,2 s - 2 s]. Finalmente, se buscaron combinaciones de señales en las que se incluyó al menos un sismo colombiano, con el fin de generar grupos de señales que contengan información nacional.

#### 3.1 FUENTES DE INFORMACIÓN

Como primer paso en la identificación de registros acelerográficos se inició una búsqueda en la base de datos analizada en Acevedo (2012). Esta base de datos consiste en acelerogramas registrados por la RNAC y presentados en los boletines de los años 1993-1995, 1996 a 2009 y 1999 sismo de Armenia. En total se recopilaron 2960 registros con un valor de magnitud asociado. Se buscaron sismos que presentaran una aceleración horizontal cercana o mayor al 5% de la gravedad para roca y suelo. Se seleccionó el 5% como límite inferior debido a los bajos valores de aceleración presentados en la base de datos. Mediante este criterio se encontraron 44 registros en la base de datos de la RNAC y adicionalmente se incluyó un registro correspondiente al sismo de Mistrató (1972) y tres registros del sismo de Murindó (1992), suministrados por la Universidad EAFIT; para un total de 48 registros de eventos sísmicos.

En total para la base de datos nacional de registros sísmicos el 29,17% (14) corresponden a sismos registrados en roca (equivalentes a perfiles de suelo A y B del reglamento NSR-10) y 70,83% (34) corresponden a sismos registrados en suelo (equivalentes a perfiles de suelo C, D y E del reglamento NSR-10).

La Figura 3.1 presenta la distribución de los 48 eventos seleccionados según Magnitud vs. Distancia, Aceleración horizontal máxima registrada vs. Distancia, Intensidad de Arias vs.

Magnitud y Aceleración máxima espectral ( $A_{m\acute{a}x}$ )/ Aceleración horizontal pico efectiva ( $A_a$ ) vs. Magnitud.

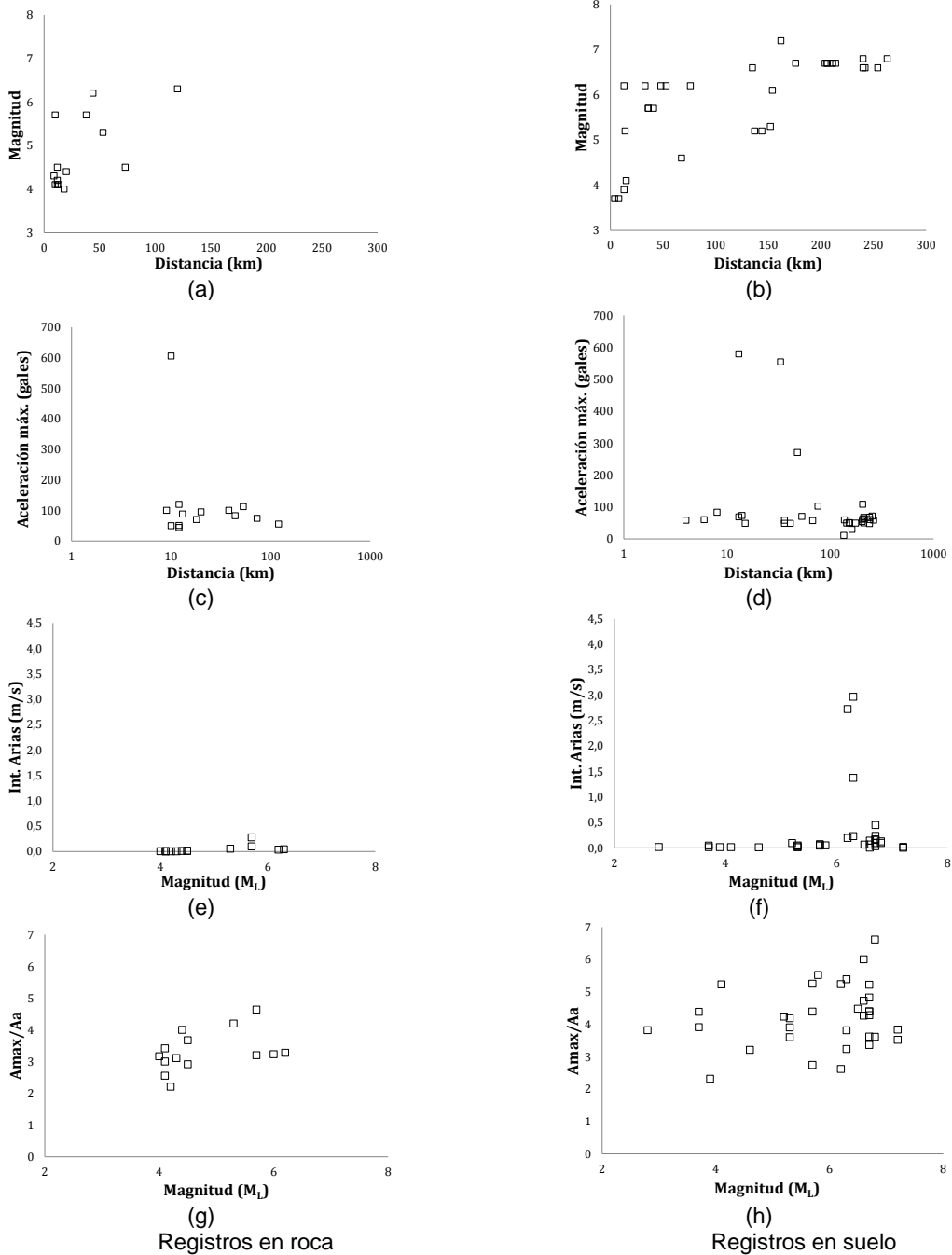


Figura 3.1 Eventos registrados en suelo y roca suministrados por la RNAC.

En la base de datos nacional se pudo observar que la información con respecto a los sismos en roca es escasa y no se pudo contar con sismos de fuente lejana, a diferencia de los sismos en suelo que sí presentan una variedad importante en la distribución de distancias y se contó con sismos de fuente cercana, intermedia y lejana (Figura 3.1a y 3.1b).

En cuanto a las aceleraciones de los sismos se pudo observar que tanto para roca como para suelo la mayoría de los registros presentaban aceleraciones relativamente bajas, con valores menores a los 150 gales (Figura 3.1c y 3.1d), por lo que se evidencia la necesidad de tener sismos con aceleraciones mayores para complementar la base de datos.

Por medio del análisis de los parámetros sísmicos de los acelerogramas se encontró que la intensidad de Arias se encuentra en un rango de [0-0,3 m/s] para roca y de [0-3 m/s] para suelo; en cuanto a la relación  $A_{m\acute{a}x}/A_a$  se obtuvo un rango de [2-5] para roca y de [2-7] para suelo (Figura 3.1e, 3.1f, 3.1g y 3.1h). Por medio de la intensidad de Arias obtenida para los sismos en roca y suelo, y la relación entre la aceleración máxima espectral ( $A_{m\acute{a}x}$ ) y  $A_a$  (aceleración horizontal pico efectiva) se establecieron parámetros de comparación que sirvieron en el momento de la búsqueda de sismos de ambientes tectónicos similares (ver numeral 3.2.2).

## 3.2 PROCESAMIENTO DE REGISTROS ACELEROGRÁFICOS

En esta sección se procesó la información de la base de datos recopilada (48 registros) con respecto a los requisitos individuales de señales presentados en A.2.7.1.c del reglamento NSR-10. Se identificaron los intervalos de periodo estructural para los cuales los acelerogramas de la base de datos no cumplieron estos requisitos y fue necesario complementar con sismos de ambientes tectónicos similares. Una vez identificadas las señales aptas para el análisis dinámico, se procedió a la elección de los grupos de tres señales para cada periodo del intervalo [0,2 s-2 s].

### 3.2.1 PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE EVENTOS SÍSMICOS NACIONALES

Se hizo un análisis de las señales nacionales recopiladas con respecto a lo presentado en el capítulo A.2.7 del reglamento NSR-10, en el cual los parámetros que rigen el análisis son la aceleración espectral y el periodo.

Se buscó identificar las señales que cumplieran con lo presentado en A.2.7.1.c, “Los espectros de respuesta de los acelerogramas empleados, apropiadamente escalados en consistencia con la amenaza, no pueden tener individualmente ordenadas espectrales, para cualquier periodo de vibración en el rango comprendido entre  $0,8T$  y  $1,2T$ , donde  $T$  es el periodo de vibración fundamental inelástico esperado de la estructura en la dirección bajo estudio, menores que el 80% de las ordenadas espectrales del movimiento esperado del terreno definidas en A.2.6”. Este requisito se presentó de manera gráfica en la Figura 2.8.a, la cual se presenta nuevamente por efectos de claridad como Figura 3.2.

Para hacer esta identificación se evaluaron periodos para estructuras en el rango de [0,2 s-2 s] cada 0,2 s para un total de diez periodos, donde se buscó abarcar una amplia gama de edificaciones; este procedimiento se realizó para los perfiles de suelo tipo A, B, C, D y E del reglamento NSR-10. Debido a que los espectros de diseño del reglamento NSR-10 para perfiles de suelo tipo A y B tienen ordenadas espectrales similares, se hizo una preselección de sismos para el perfil de suelo tipo B (al tener valores de aceleración más altos) y estos sismos se evaluaron para el perfil de suelo tipo A. Este mismo procedimiento se siguió para los suelos D y E en donde el espectro de referencia es el del suelo E. Para el perfil de suelo tipo C se evaluaron los sismos de manera independiente.

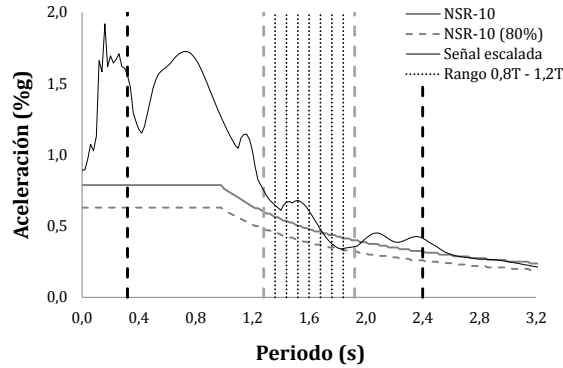


Figura 3.2 Requisitos establecidos en el reglamento NSR-10 para la selección de señales para ser usadas en análisis dinámicos consistentes en evaluaciones contra el tiempo. Requisito para los espectros de los acelerogramas individuales (Rango  $0,8T - 1,2T$ ).  $T = 1,60$  s.

Con el fin de seleccionar acelerogramas con espectros lo más cercano posible al espectro objetivo (espectro de diseño del reglamento NSR-10) se establecieron unos valores máximos y mínimos de aceleraciones en los espectros de las señales seleccionadas. Siguiendo las recomendaciones de Bommer y Acevedo (2004) en cuanto a limitar los factores de escalamiento de señales reales para no alterar significativamente el fenómeno físico, se seleccionó un límite superior e inferior de escalamiento. El límite máximo de escalamiento se estableció al doble de las aceleraciones del espectro de referencia (100%NSR-10) para cada ordenada espectral, es decir 200% NSR-10. El límite mínimo se seleccionó con referencia al 80% de las aceleraciones del espectro objetivo en el intervalo de periodos  $0,8T-1,2T$  según A.2.7.1.c, buscando un factor máximo de 2,5, lo que equivale a una relación máxima de 0,4 ( $1/2,5$ ) entre el espectro de la señal seleccionada y el espectro de referencia (80%NSR-10). Con respecto al espectro del reglamento al 100%, el límite mínimo corresponde al 32% de las ordenadas espectrales. La Figura 3.3 presenta de manera gráfica los criterios de escalamiento establecidos.

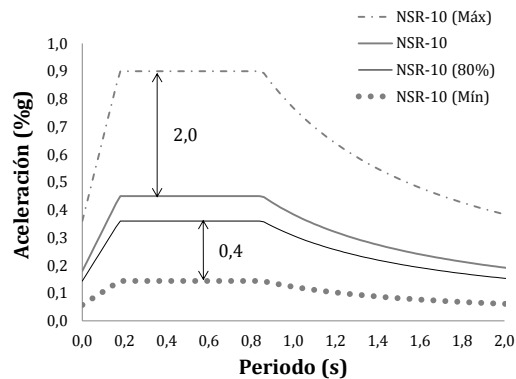


Figura 3.3 Límites máximo y mínimo de aceleraciones espectrales establecidos para la selección de señales.

A continuación se presenta el análisis de las 48 señales de la base de datos, de las cuales 14 corresponden a roca (perfil de suelo tipo A y B) y 34 corresponden a suelo (perfiles de suelo tipo C, D y E).

Se hizo una comparación entre los espectros máximo (200%NSR-10) y mínimo (32%NSR-10) del perfil de suelo tipo B y los espectros de las señales recopiladas, donde se pudo observar que el 71,43% (10) no cumplen el requisito de aceleración y periodo, es decir, en algún periodo del rango entre  $0,8T$  y  $1,2T$  el espectro de la señal es menor que

el espectro mínimo (Figura 3.4). De estas señales, una presenta una aceleración menor que la mínima en todo el intervalo (Figura 3.4.a), mientras que las nueve restantes cumplen parcialmente este requisito (Figura 3.4.b). De las señales en roca, el 28,57% (4) cumplen los requisitos de aceleración para algunos periodos del intervalo 0,2 s a 2 s y periodo de A.2.7.1.c para el perfil de suelo tipo B (Tabla 3.1 y Figura 3.4.c).

La Tabla 3.1 presenta las señales en roca que se compararon con el espectro del perfil de suelo tipo B del reglamento NSR-10. Sombreados se indican los periodos en los que cada señal cumple los requisitos de A.2.7.1.c, mencionados anteriormente.

Tabla 3.1. Registros para perfil de suelo tipo B que cumplen el criterio presentado en A.2.7.1.c.

Información del sismo					Periodos									
Sismo	Fecha	Estaciones	M <sub>L</sub>	d (km)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70	0										
La Ururia	22/01/95	CSTRC	5,70	38,00										
Quindío	25/01/99	PEREROB	6,20	44,00										
Mistrató	23/11/79	F. Minas (Med.)	6,30	120,00*										

d : Distancia hipocentral; M<sub>L</sub>=Magnitud local; \* Distancia epicentral

En la Figura 3.4 se presentan los sismos analizados con respecto a los requisitos de aceleración y periodo de A.2.7.1.c para perfil de suelo tipo B.

Para las señales comparadas con el espectro del perfil de suelo tipo C se pudo observar que el 52,94% (18) no cumplen los requisitos de aceleración y periodo al presentar valores de aceleración menores al límite mínimo durante el rango de periodos 0,8T y 1,2T. De estas señales, tres no superan el límite mínimo de aceleración establecido para este proyecto (Figura 3.5.a) y 15 cumplen parcialmente el requisito de aceleración (Figura 3.5.b) al no superar las ordenadas espectrales del límite mínimo en el rango de periodos de 0,8T y 1,2T. Como se muestra en la Figura 3.5.c, solo el 47,06% (16) cumplen con ambos requisitos de aceleración y periodo (ver Tabla 3.2) para algunos periodos del intervalo [0,2 s – 2 s].

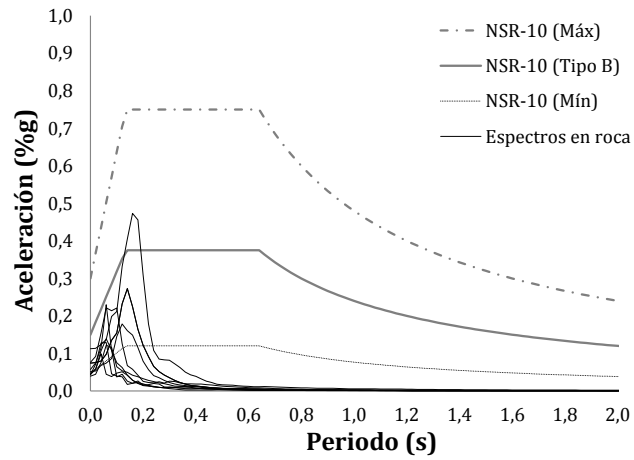
La Tabla 3.2 presenta las señales suelo tipo C que se compararon con el espectro respectivo del reglamento NSR-10. Sombreados se indican los periodos en los que cada señal cumple los requisitos de A.2.7.1.c, mencionados anteriormente.

En la Figura 3.5 se presentan los sismos analizados con respecto a los requisitos de aceleración y periodo de A.2.7.1.c para perfil de suelo tipo C.

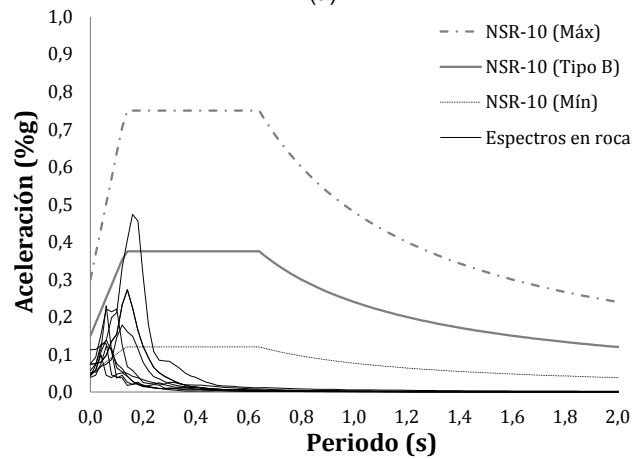
Para las señales en suelo tipo E se pudo observar que el 85,29% (29) no cumplen ninguno de los requisitos de aceleración y periodo al presentar valores de aceleración menores al límite mínimo en el rango de periodos 0,8T y 1,2T. De estas señales, 13 no superan el límite mínimo de aceleración establecido para este proyecto (Figura 3.6.a) y 16 cumplen parcialmente el requisito de aceleración (Figura 3.6.b) al no superar las ordenadas espectrales del límite mínimo en el rango de periodos de 0,8T y 1,2T. Como se muestra en la Figura 3.6.c solo el 14,71% (5) cumplen con ambos requisitos de aceleración y periodo (ver Tabla 3.3) para algunos periodos del intervalo [0,2 s – 2 s].

La Tabla 3.3 presenta las señales en suelo tipo E que se compararon con el espectro respectivo del reglamento NSR-10. Sombreados se indican los periodos en los que cada señal cumple los requisitos de A.2.7.1.c, mencionados anteriormente.

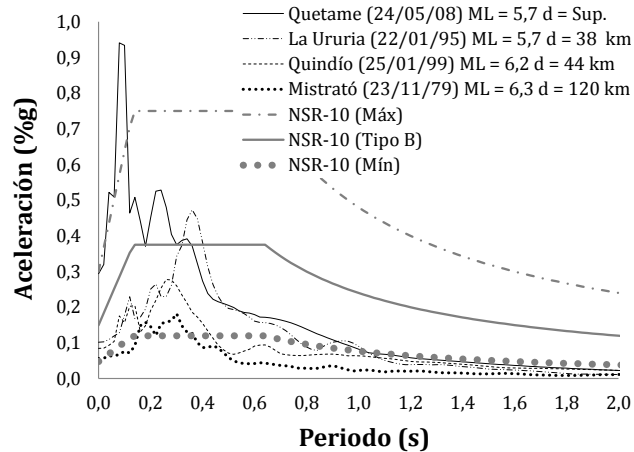
En la Figura 3.6 se presentan los sismos analizados con respecto a los requisitos de aceleración y periodo de A.2.7.1.c para perfil de suelo tipo E.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4 Comparación de espectros en perfil de suelo tipo B (límites máximo y mínimo) con los espectros recopilados en la base de datos. (a) Sismos que no cumplen requisitos de aceleración en todos los periodos. (b) Sismos que cumplen parcialmente el requisito de aceleración. (c) Sismo cumplen los requisitos de aceleración y periodo.

Tabla 3.2. Registros en suelo que cumplen el criterio presentado en A.2.7.1.c para los espectros en suelo C

Información del sismo					Periodos									
Sismo	Fecha	Estaciones	M <sub>L</sub>	d (km)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Génova	02/09/97	CMAN1	6,80	263,00										
Génova	11/12/97	CMAN1	6,60	254,00										
Armenia (1)	25/01/99	CARME	6,20	14,95										
Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30	28,85										
Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30	39,20										
Armenia (4)	25/01/99	CMAN1	6,30	79,40										
Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70	206,00										
Océano P. (2)	15/11/04	RACO3	6,70	206,00										
Océano P. (3)	15/11/04	RAC11	6,70	214,00										
Océano P. (4)	15/11/04	RAC10	6,70	211,00										
Océano P. (5)	15/11/04	CCAL5	6,70	204,00										
Toro	08/03/05	CVERS	5,20	14,00										
Océano P.	10/09/07	CGUAP	6,20	53,64										
Quetame	24/05/08	CUSAQ	5,70	41,00										
Quetame (1)	07/06/08	CQUET2	3,70	7,89										
Quetame (2)	07/06/08	CQUET2	3,70	4,17										

d : Distancia hipocentral; M<sub>L</sub>=Magnitud local

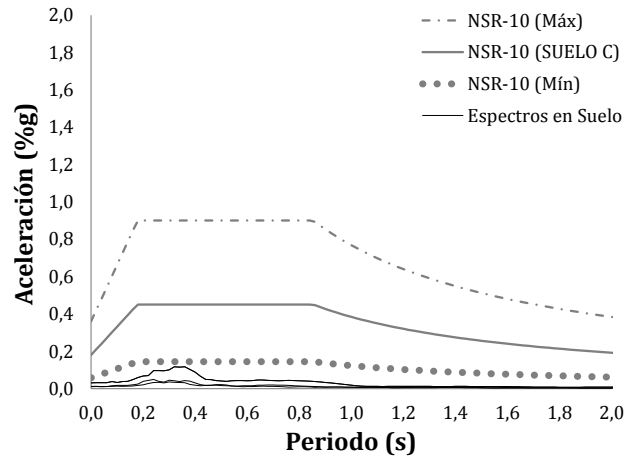
Tabla 3.3. Registros en suelo que cumplen el criterio presentado en A.2.7.1.c para los espectros en suelo E

Información del sismo					Periodos									
Nombre	Fecha	Estación	M <sub>L</sub>	d (km)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Armenia (1)	25/01/99	CARME	6,20	14,95										
Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30	28,85										
Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30	39,20										
Armenia (4)	25/01/99	CMAN1	6,30	79,40										
Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70	206,00										

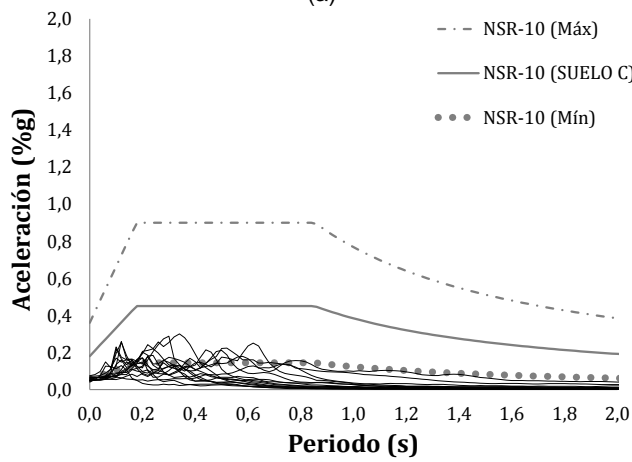
d : Distancia hipocentral; M<sub>L</sub>=Magnitud local

De los sismos en roca y suelo que cumplen los requisitos establecidos en el reglamento NSR-10 solo dos sismos son adecuados (Armenia y Océano Pacífico) para periodos mayores a 1,4 s, lo que evidencia un vacío importante en los registros de fuente lejana y magnitud importante que hasta el momento se dispone de la base de datos de la RNAC.

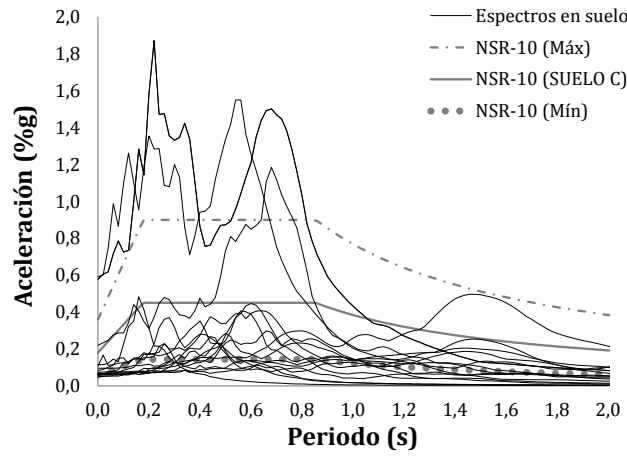
De las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se puede observar que en pocos periodos se disponen de acelerogramas que cumplan el requisito de A.2.7.1.a en cuanto a que “Debe utilizarse, para efectos de diseño, la respuesta ante la componente horizontal de un mínimo de tres (3) acelerogramas diferentes, (véase A.5.5), todos ellos representativos de los movimientos esperados del terreno teniendo en cuenta que deben provenir de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar, pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posible”. Esto hace necesario complementar la información con acelerogramas de sismos de ambientes tectónicos similares. La Figura 3.7 reúne los sismos en roca y suelo de la base de datos recopilada que cumplen los requisitos de A.2.7.1.c en cuanto a los criterios de aceleración y periodo para espectros individuales.



(a)

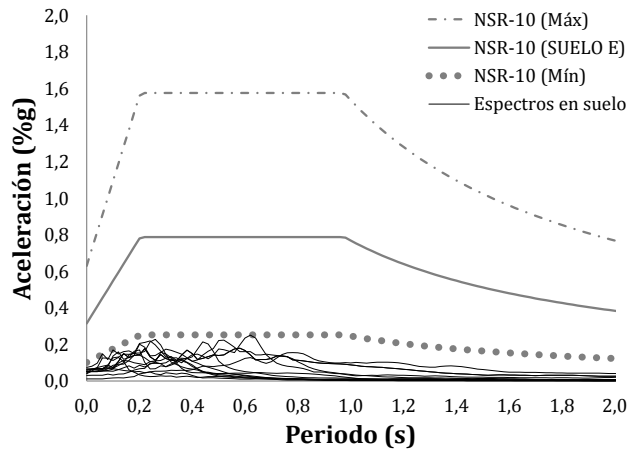


(b)

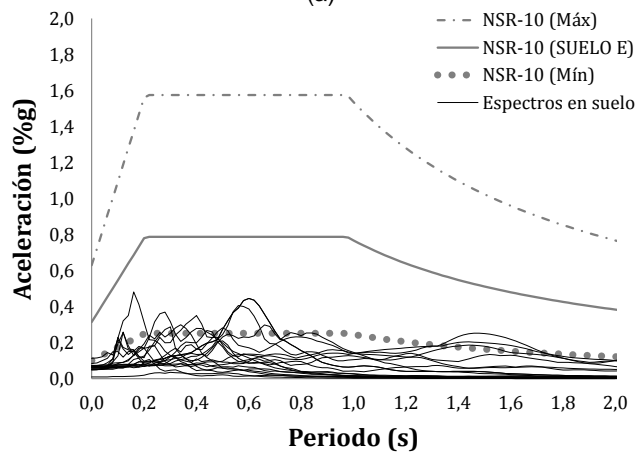


(c)

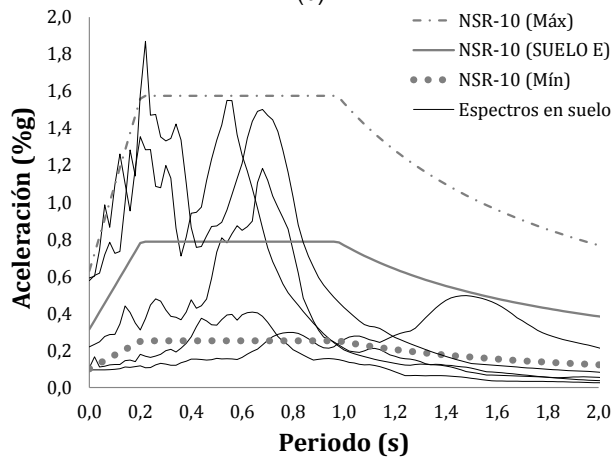
Figura 3.5 Comparación de espectros en perfil de suelo tipo C (límites máximo y mínimo) con los espectros recopilados en la base de datos. (a) Sismos que no cumplen requisitos de aceleración en todos los periodos. (b) Sismos que cumplen parcialmente el requisito de aceleración. (c) Sismo cumplen los requisitos de aceleración y periodo.



(a)

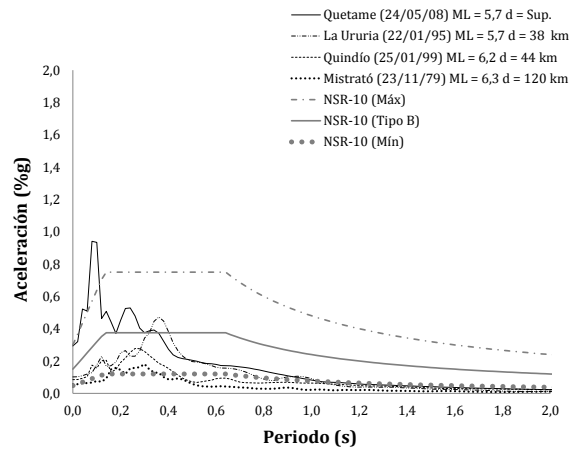


(b)

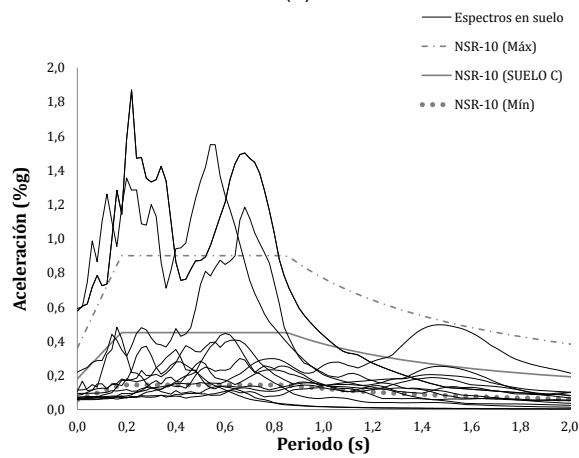


(c)

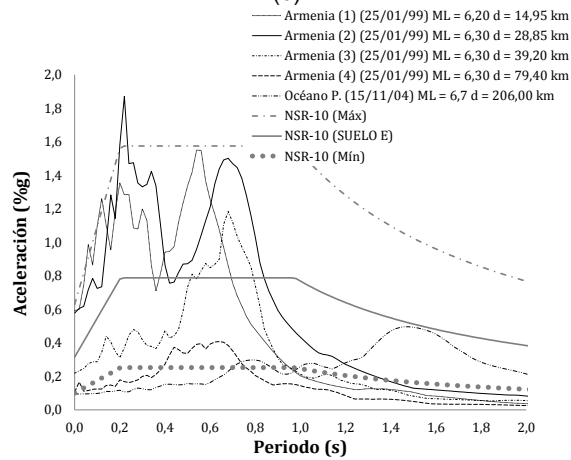
Figura 3.6 Comparación de espectros en perfil de suelo tipo E (límites máximo y mínimo) con los espectros recopilados en la base de datos. (a) Sismos que no cumplen requisitos de aceleración en todos los periodos. (b) Sismos que cumplen parcialmente el requisito de aceleración. (c) Sismo cumplen los requisitos de aceleración y periodo.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7 Espectros recopilados en la base de datos que cumplen los requisitos de aceleración y periodo.  
 (a) Comparación en suelo tipo B. (b) Comparación en suelo tipo C. (c) Comparación en suelo tipo E.

### 3.2.2 BÚSQUEDA Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE AMBIENTES TECTÓNICOS INTERNACIONALES SIMILARES

Debido a que las señales obtenidas de la RNAC no cumplen los requisitos de A.2.7.1.c en algunos periodos del intervalo [0,2 s–2 s] para roca y suelo, se hizo necesario realizar una búsqueda de sismos en ambientes tectónicos similares para complementar la base de datos nacional y poder contar con al menos 3 acelerogramas como se menciona en A.2.7.1.a.

Esta búsqueda se basó en criterios sismológicos como magnitud, fuente sísmica y distancia que permitieron establecer una similitud entre el ambiente tectónico de Colombia y Estados Unidos (California) de donde se tomaron los sismos para complementar la base de datos. Se eligió California debido a que las ecuaciones de atenuación empleadas en el estudio de microzonificación sísmica realizado para algunos municipios del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2009) fueron desarrolladas con información de este estado.

Para la identificación de los rangos de periodos en los que es necesario complementar la información se hizo uso del análisis de la base de datos nacional realizado para los sismos en roca y suelo (ver numeral 3.2.1). En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se presenta la identificación de los periodos en los que es necesario complementar la información.

Para facilitar la búsqueda de los acelerogramas se utilizaron las ecuaciones de atenuación Boore *et al.* (1997), Abrahamson y Silva (1997) y Youngs *et al.* (1997), empleadas en el estudio de microzonificación sísmica realizado para algunos municipios del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2009). Se buscó determinar pares de magnitud y distancia (M-d) que sirvieran como punto de partida en la selección de señales, comparando los espectros de las ecuaciones con el espectro objetivo del reglamento NSR-10. Para cada periodo de estudio [0,2 s–2 s] se obtuvieron pares magnitud y distancia (M-d) que se emplearon como base para realizar la búsqueda.

Para seleccionar las parejas de magnitud y distancia (M-d) para roca y suelo se graficaron los espectros de cada ecuación de atenuación con los espectros referencia, es decir, el espectro definido para roca y suelo (100%NSR-10), los límites máximo (200%NSR-10) y mínimo (32%NSR-10) establecidos en este proyecto (ver numeral 3.2.1).

La Tabla 3.4 presenta los pares magnitud y distancia para roca obtenidos por medio de las ecuaciones de atenuación para el perfil de suelo tipo B.

Tabla 3.4 Pares de magnitud y distancia (M-d) para la búsqueda de señales para perfil de suelo tipo B en el intervalo 0,2 s-2 s.

Ecuación de atenuación	Periodo (s)									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>Boore <i>et al.</i> (1997)</b>	6,0-12	6,3-12	6,9-12	7,1-12	7,1-12	7,1-12	7,1-12	7,1-12	7,1-12	7,1-12
<b>Abrahamson y Silva (1997)</b>	5,6-16	6,3-15	6,4-15	7,1-20	7,1-20	7,1-20	7,1-20	7,1-20	7,1-20	7,1-20
<b>Youngs <i>et al.</i> (1997)</b>	7,1-60	7,4-60	7,8-60	7,8-60	7,8-60	7,8-60	7,8-60	7,8-60	7,8-60	7,8-60

En la Figura 3.8 se presentan gráficamente los pares magnitud y distancia (M-d) para los periodos (0,2 s–2 s) de las ecuaciones de atenuación para el perfil de suelo tipo B:

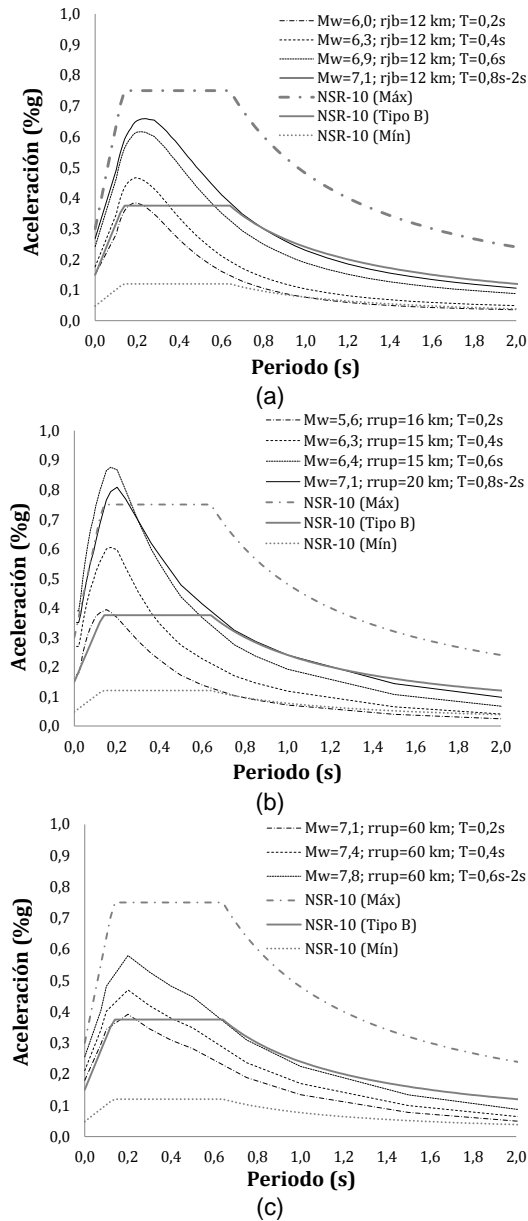


Figura 3.8 Comparación de las ecuaciones de atenuación con el espectro del perfil de suelo tipo B del reglamento NSR-10 para los periodos 0,2 s-2 s. (a) Boore *et al.* (1997). (b) Abrahamson y Silva (1997). (c) Youngs *et al.* (1997)

La Tabla 3.5 presenta los pares magnitud y distancia (M-d) para el perfil de suelo tipo C obtenidos por medio de las ecuaciones de atenuación.

Tabla 3.5 Pares de magnitud y distancia (M-d) para la búsqueda de señales para el perfil de suelo tipo C en el intervalo 0,2 s-2 s.

Ecuación de atenuación	Periodo (s)									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>Boore <i>et al.</i> (1997)</b>	5,9-10	6,2-10	6,7-10	7,1-10	7,2-10	7,2-10	7,2-10	7,2-10	7,2-10	7,2-10
<b>Abrahamson y Silva (1997)</b>	5,5-10	6,2-12	6,7-11	6,7-17	6,9-17	6,9-17	6,9-17	6,9-17	6,9-17	6,9-17
<b>Youngs <i>et al.</i> (1997)</b>	5,9-40	6,3-40	6,6-40	7,4-40	7,6-40	7,6-40	7,8-40	N/A	N/A	N/A

N/A: No aplica.

En la Figura 3.9 se presentan gráficamente los pares magnitud y distancia (M-d) para los periodos (0,2 s–2 s) de las ecuaciones de atenuación para el perfil de suelo tipo C:

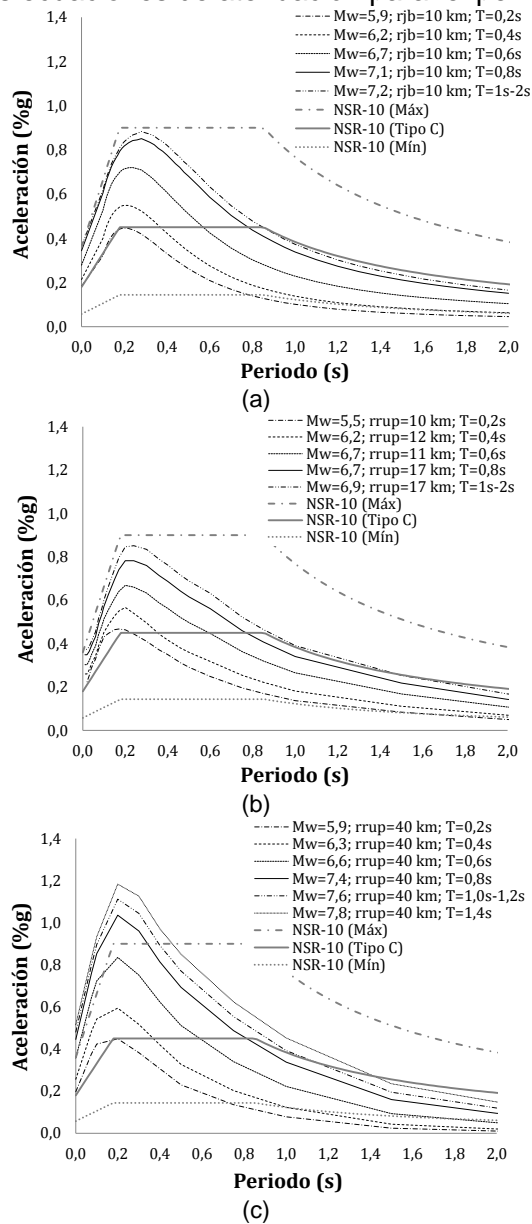


Figura 3.9 Comparación de las ecuaciones de atenuación con el espectro para el perfil de suelo tipo C del reglamento NSR-10 para los periodos 0,2s-0,6. (a) Boore *et al.* (1997). (b) Abrahamson y Silva (1997). (c) Youngs *et al.* (1997).

La Tabla 3.6 presenta los pares magnitud y distancia (M-d) para el perfil de suelo tipo E obtenidos por medio de las ecuaciones de atenuación.

Tabla 3.6 Pares de magnitud y distancia (M-d) para la búsqueda de señales para el perfil de suelo tipo E en el intervalo 0,2 s-2 s.

Ecuación de atenuación	Periodo (s)									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
<b>Boore <i>et al.</i> (1997)</b>	6,2-10	6,3-10	6,6-10	6,9-10	7,2-10	7,2-10	7,2-10	7,2-10	7,2-10	7,2-10
<b>Abrahamson y Silva (1997)</b>	6,3-10	6,3-10	6,3-10	6,3-10	6,3-10	6,3-10	6,3-10	6,3-10	6,3-10	6,3-10
<b>Youngs <i>et al.</i> (1997)</b>	6,8-40	7,3-40	7,7-40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

N/A: No aplica.

En la Figura 3.10 se presentan gráficamente los pares magnitud y distancia (M-d) para los periodos (0,2 s–2 s) de las ecuaciones de atenuación para el perfil de suelo tipo E:

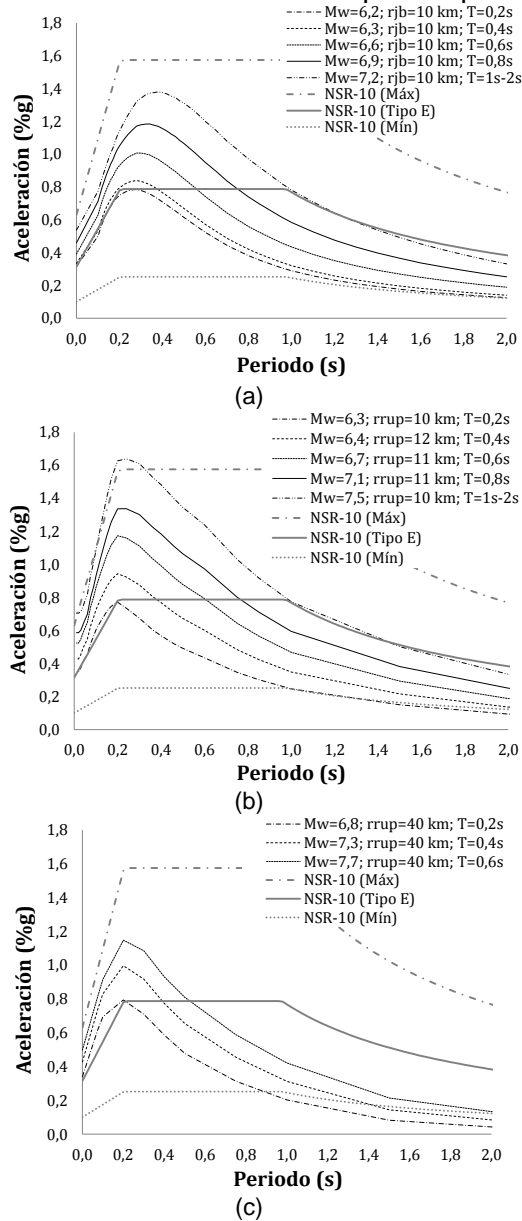


Figura 3.10 Comparación de las ecuaciones de atenuación con el espectro para el perfil de suelo tipo E del reglamento NSR-10 para los periodos 0,2s-0,6. (a) Boore *et al.* (1997). (b) Abrahamson y Silva (1997). (c) Youngs *et al.* (1997)

Teniendo como punto de partida los pares magnitud y distancia (M-d) obtenidos de las ecuaciones de atenuación, se seleccionaron ocho (8) sismos para los perfiles de suelo tipo A y B, tres (3) sismos para el perfil de suelo tipo C y nueve (9) para los perfiles de suelo tipo D y E. Los sismos seleccionados se presentan en las tablas 3.7, 3.9 y 3.11.

En la Tabla 3.7 se presentan los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares en perfil de suelo tipo B para complementar la base de datos nacional. Las fuentes de información de donde se obtuvieron los acelerogramas son: Instituto de investigación en ingeniería, Universidad de Costa Rica (INII-UCR), United States Geological Survey (USGS), University of Southern California (USC), Earthquake research department -

Turkey (ERD), California Division of Mines and Geology (CDMG) y California Strong Motion Instrumentation Program (CSMIP).

Tabla 3.7 Selección de sismos en perfil de suelo tipo A y B de ambientes tectónicos similares para complementar la base de datos nacional.

Sismo	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Falla	Fuente
Big Bear (1), E.E.U.U	28/06/92	22170	6,40	48,20	L	CSMIP
Big Bear (2), E.E.U.U	28/06/92	11613	6,40	114,20	L	CSMIP
Coalinga, E.E.U.U	09/07/83	TSM	5,20	10,40	I	CSMIP
Northridge, E.E.U.U	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	I	USC
Whittier Narrows (1), E.E.U.U	01/10/87	0141	6,00	21,90	I	USGS
Whittier Narrows (2), E.E.U.U	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	I	USC
Kocaeli, Turquía	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	L	ERD
Loma prieta, E.E.U.U	18/10/89	47379 Gilroy Array #1	6,93	33,55	IR	CDMG

L : Lateral; IR : Inversa con componente de rumbo; I : Inversa; d : Distancia hipocentral; M<sub>w</sub> : Magnitud momento

Para los sismos en roca se verificó si se cumplió lo establecido en A.2.7.1.c, haciendo la comparación con el espectro de diseño correspondiente al perfil de suelo tipo B (ver Tabla 3.8).

Tabla 3.8 Sismos para perfiles de suelo tipo A y B seleccionados de ambientes tectónicos similares

Información del sismo					Periodos									
Sismo	Fecha	Estaciones	M <sub>w</sub>	d (km)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Big Bear (1), E.E.U.U	28/06/92	22170	6,40	48,20										
Big Bear (2), E.E.U.U	28/06/92	11613	6,40	114,20										
Coalinga, E.E.U.U	09/07/83	TSM	5,20	10,40										
Northridge, E.E.U.U	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65										
Whittier Narrows (1), E.E.U.U	01/10/87	0141	6,00	21,90										
Whittier Narrows (2), E.E.U.U	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36										
Kocaeli, Turquía	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68										
Loma prieta, E.E.U.U	18/10/89	47379 Gilroy Array #1	6,90	33,55										

d : Distancia hipocentral; M<sub>w</sub> : Magnitud momento

En la Figura 3.11 se presentan los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares para sismos en perfiles de suelo tipo A y B.

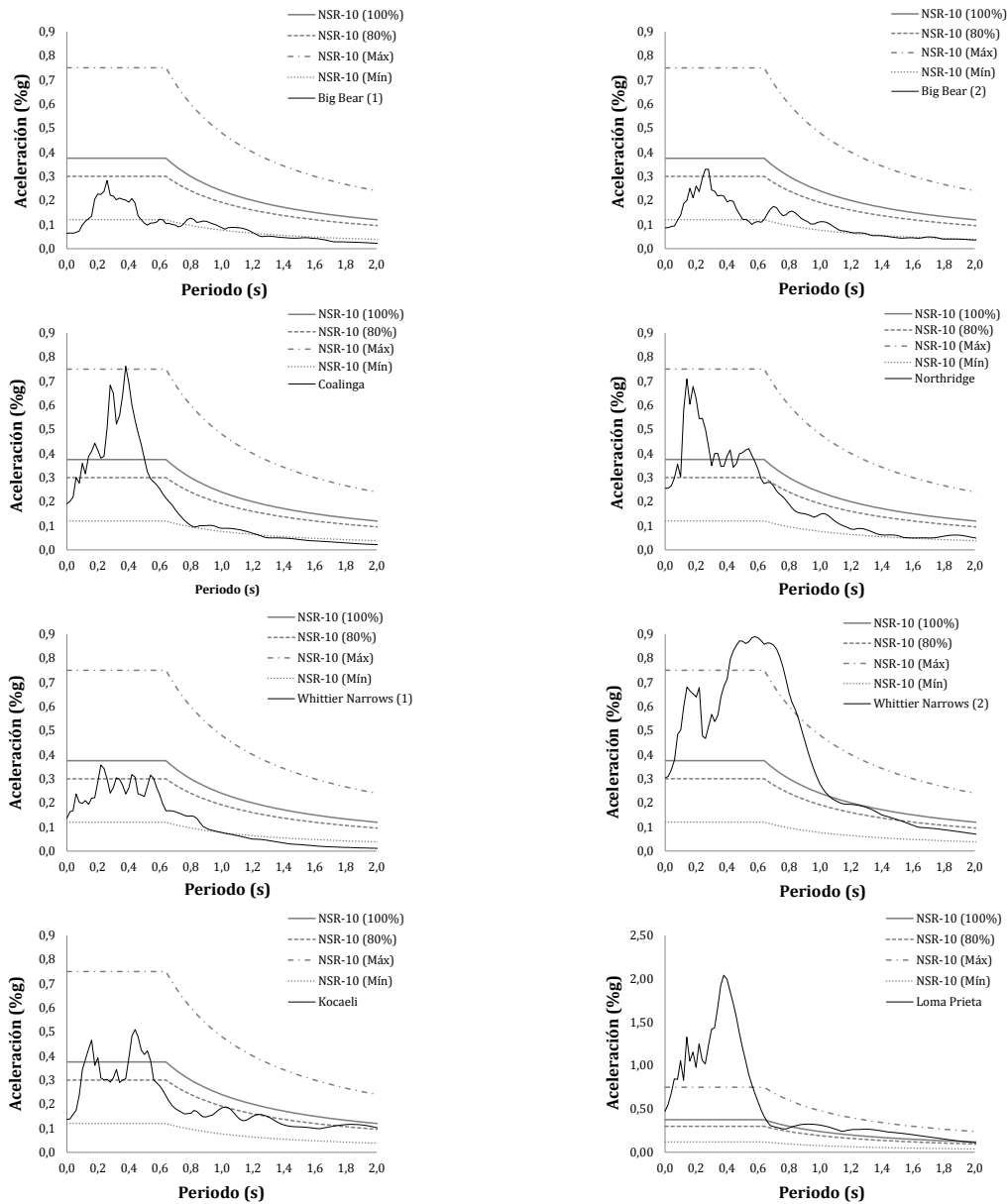


Figura 3.11 Comparación del espectro de roca del reglamento NSR-10 y los espectros de los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares.

En la Tabla 3.9 se presentan los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares para el perfil de suelo tipo C para complementar la base de datos nacional.

Tabla 3.9 Selección de sismos para perfil de suelo tipo C de ambientes tectónicos similares para complementar la base de datos nacional

Sismo	Fecha	Estación	$M_w$	d (km)	Falla	Fuente
Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	---	INII-UCR
Cape Mendocino, E.E.U.U	25/04/92	89324 Rio Dell Overpass - FF	7,01	24,55	I	CDMG
Northridge (1), E.E.U.U	17/01/94	90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58	I	USC

I : Inversa; d : Distancia hipocentral;  $M_w$  : Magnitud momento

Para los sismos en suelo se verificó si se cumplía lo establecido en A.2.7.1.c, haciendo la comparación con el espectro de diseño correspondiente al perfil de suelo tipo C. (ver Tabla 3.10)

Tabla 3.10 Sismos para perfil en suelo tipo C seleccionados de ambientes tectónicos similares

Información del sismo					Periodos									
Sismo	Fecha	Estaciones	M <sub>w</sub>	d (km)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50										
Cape Mendocino	25/04/92	89324 Rio Dell Overpass - FF	7,01	24,55										
Northridge (1)	17/01/94	90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58										

d : Distancia hipocentral; M<sub>w</sub> : Magnitud momento

En la Figura 3.12 se presentan los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares para el perfil de suelo tipo C.

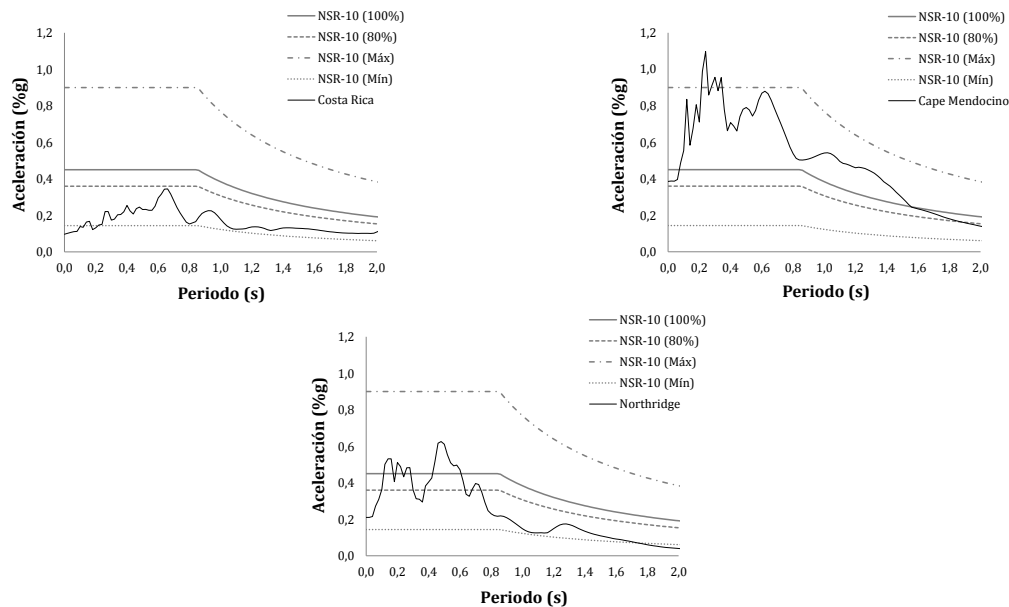


Figura 3.12 Comparación de los espectros para perfil de suelo tipo C del reglamento NSR-10 y los espectros de los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares.

En la Tabla 3.11 se presentan los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares para el perfil de suelo tipo E para complementar la base de datos nacional, en la Tabla 3.12 se presentan los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares para sismos en perfiles de suelo tipo D y E y en la Figura 3.13 se presentan los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares para el perfil de suelo tipo D y E.

Por medio de estos sismos se completó la base de datos en el rango de periodos de estudio y se cumplió el requisito de A.2.7.a en cuanto a que “Debe utilizarse, para efectos de diseño, la respuesta ante la componente horizontal de un mínimo de tres (3) acelerogramas diferentes, (véase A.5.5), todos ellos representativos de los movimientos esperados del terreno teniendo en cuenta que deben provenir de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar, pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posible.”

Las tablas 3.13, 3.14 y 3.15 presentan la base de datos completa con sismos (en roca y suelo) nacionales y de ambientes tectónicos similares (internacionales), donde se muestra que para cada periodo en el intervalo de estudio [0,2 s-2 s] se tiene un grupo de al menos tres acelerogramas.

Tabla 3.11 Selección de sismos para perfil de suelo tipo D y E de ambientes tectónicos similares para complementar la base de datos nacional

Sismo	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Falla	Fuente
Big Bear, E.E.U.U	28/06/92	22561	6,40	12,90	L	CSMIP
Chalfant, E.E.U.U	21/07/86	54428 Zack Brothers Ranch	6,20	17,47	L	CDMG
Coalinga (1), E.E.U.U	02/05/83	46314 Cantua Creek School	6,36	30,41	IR	CDMG
Coalinga (2), E.E.U.U	02/05/83	1162 Pleasant Valley P.P. - Yard	6,36	10,99	IR	USBR
Coalinga, E.E.U.U	22/07/83	1162 Pleasant Valley P.P. - Yard	5,77	17,79	I	USBR
Morgan Hill, E.E.U.U	24/04/84	57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20	L	CDMG
Northridge (2), E.E.U.U	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	I	USC
Superstition Hills, E.E.U.U	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	L	CDMG
Imperial Valley, E.E.U.U	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	L	USGS

L : Lateral; IR : Inversa con componente de rumbo; I : Inversa; d : Distancia hipocentral; M<sub>w</sub> : Magnitud momento

Tabla 3.12 Sismos para perfiles de suelo tipo D y E seleccionados de ambientes tectónicos similares

Información del sismo					Periodos									
Sismo	Fecha	Estaciones	M <sub>w</sub>	d (km)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Big Bear, E.E.U.U	28/06/92	22561	6,40	12,90										
Chalfant, E.E.U.U	21/07/86	54428 Zack Brothers Ranch	6,20	17,47										
Coalinga (1), E.E.U.U	02/05/83	46314 Cantua Creek School	6,36	30,41										
Coalinga (2), E.E.U.U	02/05/83	1162 Pleasant Valley P.P. - Yard	6,36	10,99										
Coalinga, E.E.U.U	22/07/83	1162 Pleasant Valley P.P. - Yard	5,77	17,79										
Morgan Hill, E.E.U.U	24/04/84	57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20										
Northridge (2), E.E.U.U	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42										
Superstition Hills, E.E.U.U	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94										
Imperial Valley, E.E.U.U	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08										

d : Distancia hipocentral; M<sub>w</sub> : Magnitud momento

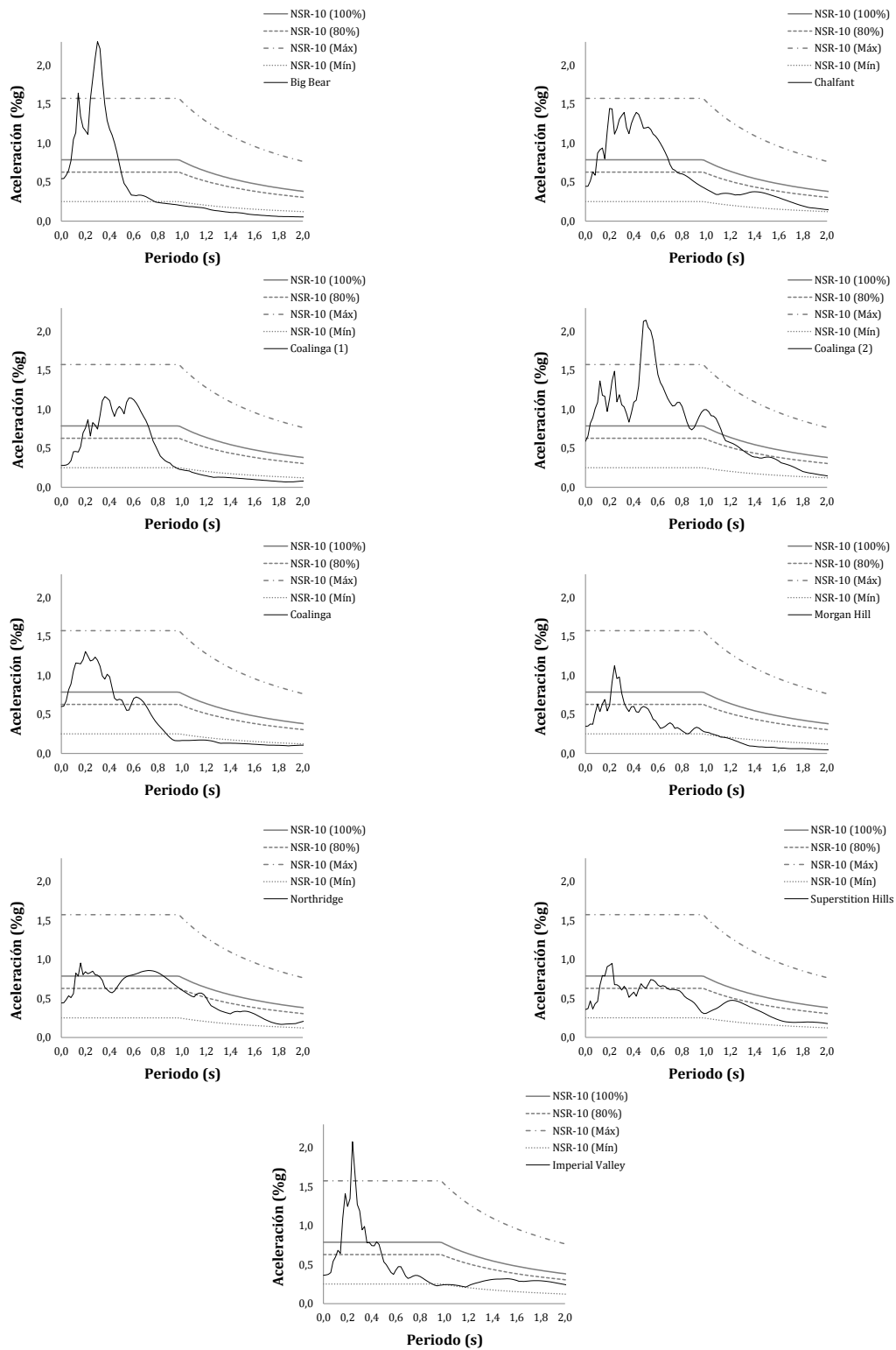


Figura 3.13 Comparación de los espectros en perfil de suelo tipo E del reglamento NSR-10 y los espectros de los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares

Tabla 3.13 Compilación de sismos para perfil de suelo tipo A y B de la base de datos nacional y de ambientes tectónicos similares

Información del sismo					Periodos									
Sismo	Fecha	Estaciones	M <sub>w</sub>	d (km)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	0										
La Uruia	22/01/95	CSTRC	5,70*	38,00										
Quindío	25/01/99	PEREROB	6,20*	44,00										
Mistrató	23/11/79	F. Minas (Med.)	6,30*	120,00 <sup>+</sup>										
Big Bear (1), E.E.U.U	28/06/92	22170	6,40	48,20										
Big Bear (2), E.E.U.U	28/06/92	11613	6,40	114,20										
Coalinga, E.E.U.U	09/07/83	TSM	5,20	10,40										
Northridge, E.E.U.U	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65										
Whittier Narrows (1), E.E.U.U	01/10/87	0141	6,00	21,90										
Whittier Narrows (2), E.E.U.U	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36										
Kocaeli, Turquía	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68										
Loma prieta, E.E.U.U	18/10/89	47379 Gilroy Array #1	6,90	33,55										

\* Magnitud M<sub>L</sub>; <sup>+</sup> Distancia epicentral ; d : Distancia hipocentral; M<sub>w</sub> : Magnitud momento

Tabla 3.14 Compilación de sismos perfil de suelo tipo C de la base de datos nacional y de ambientes tectónicos similares

Información del sismo					Periodos									
Sismo	Fecha	Estaciones	M <sub>w</sub>	d (km)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Génova	02/09/97	CMAN1	6,80*	263,00										
Génova	11/12/97	CMAN1	6,60*	254,00										
Armenia (1)	25/01/99	CARME	6,20*	14,95										
Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30*	28,85										
Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20										
Armenia (4)	25/01/99	CMAN1	6,30*	79,40										
Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00										
Océano P. (2)	15/11/04	RACO3	6,70*	206,00										
Océano P. (3)	15/11/04	RAC11	6,70*	214,00										
Océano P. (4)	15/11/04	RAC10	6,70*	211,00										
Océano P. (5)	15/11/04	CCAL5	6,70*	204,00										
Toro	08/03/05	CVERS	5,20*	14,00										
Océano P.	10/09/07	CGUAP	6,20*	53,64										
Quetame	24/05/08	CUSAQ	5,70*	41,00										
Quetame (1)	07/06/08	CQUET2	3,70*	7,89										
Quetame (2)	07/06/08	CQUET2	3,70*	4,17										
Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50										
Cape Mendocino	25/04/92	CDMG 89324 Rio Dell Overpass - FF	7,01	24,55										
Northridge (1)	17/01/94	USC 90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58										

\* Magnitud M<sub>L</sub>; d : Distancia hipocentral; M<sub>w</sub> : Magnitud momento

Tabla 3.15 Compilación de sismos para suelos tipo D y E de la base de datos nacional y de ambientes tectónicos similares

Información del sismo					Periodos									
Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Armenia (1)	25/01/99	CARME	6,20*	14,95										
Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30*	28,85										
Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20										
Armenia (4)	25/01/99	CMAN1	6,30*	79,40										
Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00										
Big Bear, E.E.U.U	28/06/92	22561	6,40	12,90										
Chalfant, E.E.U.U	21/07/86	54428 Zack Brothers Ranch	6,20	17,47										
Coalinga (1), E.E.U.U	02/05/83	46314 Cantua Creek School	6,36	30,41										
Coalinga (2), E.E.U.U	02/05/83	1162 Pleasant Valley P.P. – Yard	6,36	10,99										
Coalinga, E.E.U.U	22/07/83	1162 Pleasant Valley P.P. – Yard	5,77	17,79										
Morgan Hill, E.E.U.U	24/04/84	57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20										
Northridge (2), E.E.U.U	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42										
Superstition Hills, E.E.U.U	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94										
Imperial Valley, E.E.U.U	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08										

\* Magnitud M<sub>L</sub>; d : Distancia hipocentral; M<sub>w</sub> : Magnitud momento

La Figura 3.14 presenta la distribución de la base de datos con sismos nacionales y de ambientes tectónicos similares según Magnitud vs. Distancia y Aceleración horizontal máxima registrada vs. Distancia, en donde se observan los rangos de magnitud en donde se complementa la información. También se presentan los gráficos de Intensidad de Arias vs. Magnitud y  $A_{m\acute{a}x}/A_a$  vs. Magnitud.

Por medio de pares M-d de fuente cercana, intermedia y lejana (Figura 3.14.a y 3.14b) para los sismos en roca y suelo se complementó el rango de periodos solicitado por A.2.7.1.c (ver tablas 3.13, 3.14 y 3.15). En cuanto a los valores de aceleración se observó un comportamiento similar entre ambos grupos de sismos (ver Figura 3.14.c y 3.14d).

Finalmente, por medio de la intensidad de Arias vs. Magnitud y la relación de  $A_{m\acute{a}x}/A_a$  vs. Magnitud se observó un comportamiento satisfactorio en cuanto a la relación de los espectros al encontrarse dentro de los rangos esperados (ver numeral 3.1).

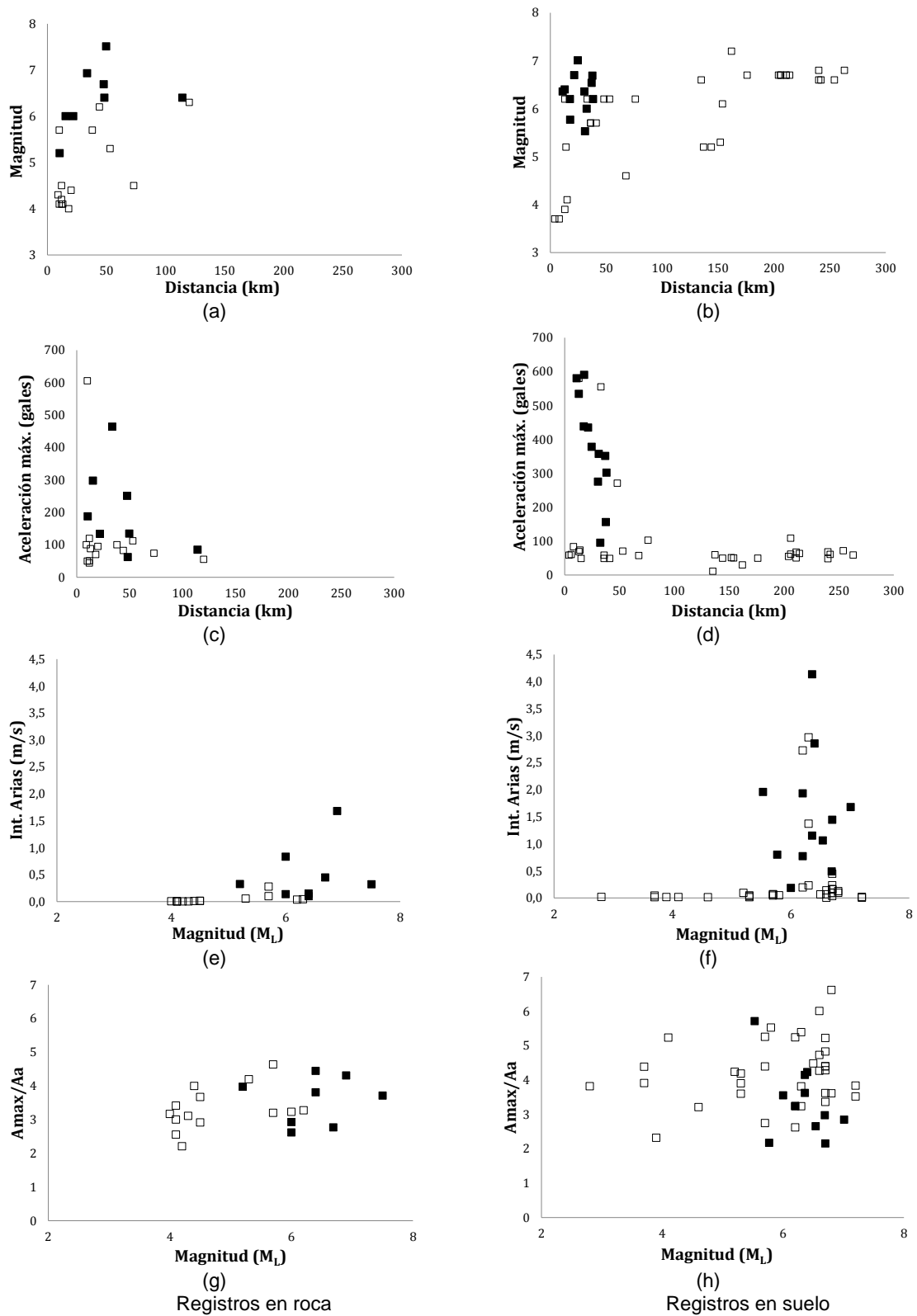


Figura 3.14 Base de datos completa que recopila sismos nacionales y de ambientes tectónicos similares. El punto abierto representa sismos nacionales y el punto cerrado representa sismos de ambientes tectónicos similares.

### 3.3 SELECCIÓN DE SEÑALES

En este capítulo se realizó la selección de señales para todos los tipos de suelo (A, B, C, D y E) que cumplen los requisitos presentados en A.2.7.1.c a partir de la base de datos generada para este proyecto (numeral 3.3.1). Adicionalmente, se presentan las combinaciones que incluyen al menos un sismo colombiano (numeral 3.3.2) las cuales no son necesariamente la mejor opción.

#### 3.3.1 SELECCIÓN DE SEÑALES CON MENOR DISPERSIÓN

Para cada periodo según el análisis anterior se cuenta con al menos tres señales que cumplen el requisito del 80% de la aceleración (ver tablas Tabla 3.13, Tabla 3.14 y Tabla 3.15). En la selección de las señales se tomaron en cuenta criterios sismológicos como el ambiente tectónico, la distancia, la magnitud, además, de parámetros como la aceleración máxima horizontal y el periodo estructural.

Teniendo en cuenta que para algunos periodos se contó con más de 3 señales, en este numeral se buscó identificar de cada grupo de señales la mejor combinación de tres señales que generaran un espectro de respuesta promedio que cumpliera con los requisitos de A.2.7.1.c y que a su vez fuera lo más cercano posible al espectro establecido por el reglamento NSR-10 y con la menor dispersión entre las señales. Para tal fin se desarrolló una herramienta computacional que se describe en el capítulo 4.

Por medio de la herramienta computacional se obtuvo la mejor combinación de señales para cada periodo en el intervalo  $[0,2 \text{ s}-2 \text{ s}]$ . Las tablas 3.16 a 3.20 presentan los grupos de 3 señales seleccionadas para los perfiles de suelo tipo A, B, C, D, y E. El factor de escala de cada señal se representa por medio de la variable  $F_e$ .

En las figuras 3.15 a 3.19 se presentan los espectros de los acelerogramas seleccionados por medio de la herramienta computacional; estos espectros están escalados por el valor mostrado en las tablas 3.16 a 3.20. También se presenta el promedio de los 3 espectros y se puede apreciar que se cumple lo establecido en A.2.7.1.c en cuanto a que “el promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados, en el rango comprendido entre  $0.2T$  y  $1.5T$ , no debe ser menor que las ordenadas espectrales en el mismo rango de períodos para el movimiento esperado del terreno definido en A.2.6.”

Tabla 3.16 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo A

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	0,00	1,00
	La Ururia	22/01/95	CSTRC	5,70*	38,00	1,54
	Whittier Narrows (1)	01/10/87	0141	6,00	21,90	1,31
0,4	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,00
	Whittier Narrows (1)	01/10/87	0141	6,00	21,90	1,44
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,10
0,6	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,30
	Whittier Narrows (1)	01/10/87	0141	6,00	21,90	2,01
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,72
0,8	Big Bear (2)	28/06/92	11613	6,40	114,20	2,38
	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,30
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,52
1,0	Big Bear (2)	28/06/92	11613	6,40	114,20	2,46
	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,48
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,78
1,2	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,77
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,75
	Whittier Narrows (2)	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	1,00
1,4	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,96
	Whittier Narrows (2)	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	1,00
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,65
1,6	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,96
	Whittier Narrows (2)	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	1,02
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,70
1,8	Whittier Narrows (2)	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	1,12
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,70
	Loma Prieta	18/10/89	47379 Gilroy Array #1	6,90	33,55	1,00
2,0	Whittier Narrows (2)	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	1,32
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,80
	Loma Prieta	18/10/89	47379 Gilroy Array #1	6,90	33,55	1,00

\* Magnitud M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

Tabla 3.17 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo B

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	0,00	1,00
	Coalinga	09/07/83	TSM	5,20	10,40	1,20
	Whittier Narrows (1)	01/10/87	0141	6,00	21,90	2,05
0,4	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,10
	Whittier Narrows (1)	01/10/87	0141	6,00	21,90	1,93
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,45
0,6	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,75
	Whittier Narrows (1)	01/10/87	0141	6,00	21,90	2,33
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	2,15
0,8	Big Bear (2)	28/06/92	station 11613	6,40	114,20	2,48
	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	1,77
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	2,06
1,0	Big Bear (2)	28/06/92	station 11613	6,40	114,20	2,37
	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	2,22
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	2,37
1,2	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	2,21
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	2,44
	Whittier Narrows (2)	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	1,00
1,4	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	2,45
	Whittier Narrows (2)	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	1,19
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	2,19
1,6	Northridge	17/01/94	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,69	47,65	2,45
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	2,47
	Loma Prieta	18/10/89	47379 Gilroy Array #1	6,90	33,55	1,00
1,8	Whittier Narrows (2)	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	1,57
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	2,47
	Loma Prieta	18/10/89	47379 Gilroy Array #1	6,90	33,55	1,00
2,0	Whittier Narrows (2)	01/10/87	90019 San Gabriel - E Grand Ave	6,00	15,36	2,06
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,95
	Loma Prieta	18/10/89	47379 Gilroy Array #1	6,90	33,55	1,04

\* Magnitud M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

Tabla 3.18 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo C

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	2,43
	Toro	27/06/05	CVERS	5,20*	14,00	2,36
	Northridge (1)	17/01/94	90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58	2,20
0,4	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	1,60
	Quetame (1)	07/06/08	CQUET2	3,70*	7,89	2,43
	Northridge (1)	17/01/94	90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58	1,71
0,6	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,39
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,37
	Northridge (1)	17/01/94	90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58	2,10
0,8	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,03
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,35
	Northridge (1)	17/01/94	USC 90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58	2,20
1,0	Océano P. (4)	15/11/04	RAC10	6,70*	211,00	2,42
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,35
	Cape Mendocino	25/04/92	89324 Rio Dell Overpass - FF	7,01	24,55	1,20
1,2	Océano P. (4)	15/11/04	RAC10	6,70*	211,00	2,20
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,26
	Cape Mendocino	25/04/92	89324 Rio Dell Overpass - FF	7,01	24,55	1,00
1,4	Océano P. (4)	15/11/04	RAC10	6,70*	211,00	2,34
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,42
	Cape Mendocino	25/04/92	89324 Rio Dell Overpass - FF	7,01	24,55	1,00
1,6	Océano P. (4)	15/11/04	RAC10	6,70*	211,00	2,48
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,18
	Cape Mendocino	25/04/92	89324 Rio Dell Overpass - FF	7,01	24,55	1,03
1,8	Océano P. (3)	15/11/04	RAC11	6,70*	214,00	2,31
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,15
	Cape Mendocino	25/04/92	89324 Rio Dell Overpass - FF	7,01	24,55	1,22
2,0	Océano P. (3)	15/11/04	RAC11	6,70*	214,00	2,46
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,32
	Cape Mendocino	25/04/92	89324 Rio Dell Overpass - FF	7,01	24,55	1,22

\* Magnitud M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

Tabla 3.19 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo D

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	2,31
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,10
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,30
0,4	Morgan Hill	24/04/84	57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20	1,20
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,10
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,20
0,6	Morgan Hill	24/04/84	57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20	1,40
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,00
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,20
0,8	Morgan Hill	24/04/84	57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20	1,78
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,00
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,23
1,0	Chalfant	21/07/86	54428 Zack Brothers Ranch	6,20	17,47	1,03
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,10
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,28
1,2	Chalfant	21/07/86	54428 Zack Brothers Ranch	6,20	17,47	1,14
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,40
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,79
1,4	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	1,38
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,20
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,51
1,6	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,25
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,28
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	1,33
1,8	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,25
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,16
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	1,50
2,0	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,25
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,28
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	1,47

\* Magnitud M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

Tabla 3.20 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo E

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Coalinga (1)	02/05/83	46314 Cantua Creek School	6,36	30,41	2,17
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,90
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,90
0,4	Coalinga	22/07/83	1162 Pleasant Valley P.P. - Yard	5,77	17,79	1,00
	Morgan Hill	24/04/84	57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20	1,55
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,43
0,6	Morgan Hill	24/04/84	57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20	1,95
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,40
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,64
0,8	Morgan Hill	24/04/84	57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20	2,50
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,70
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,94
1,0	Coalinga (2)	02/05/83	1162 Pleasant Valley P.P. - Yard	6,36	10,99	1,00
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,72
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	2,06
1,2	Chalfant	21/07/86	54428 Zack Brothers Ranch	6,20	17,47	1,99
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	2,46
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	2,47
1,4	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,22
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	2,03
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,88
1,6	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,40
	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	2,01
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,88
1,8	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	2,01
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,88
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	2,46
2,0	Northridge (2)	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	2,01
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	2,07
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	2,38

\* Magnitud M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

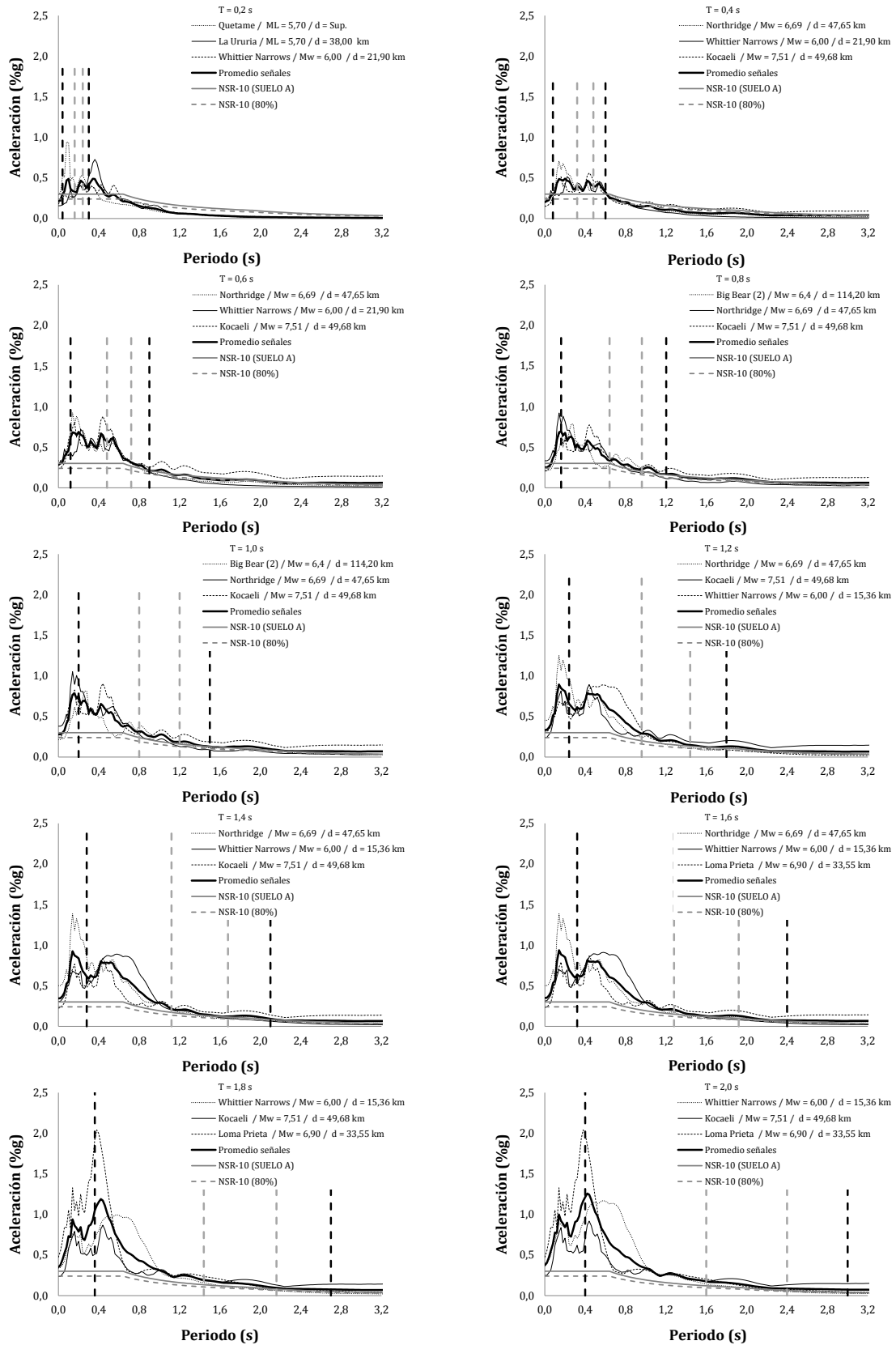


Figura 3.15 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo A a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c

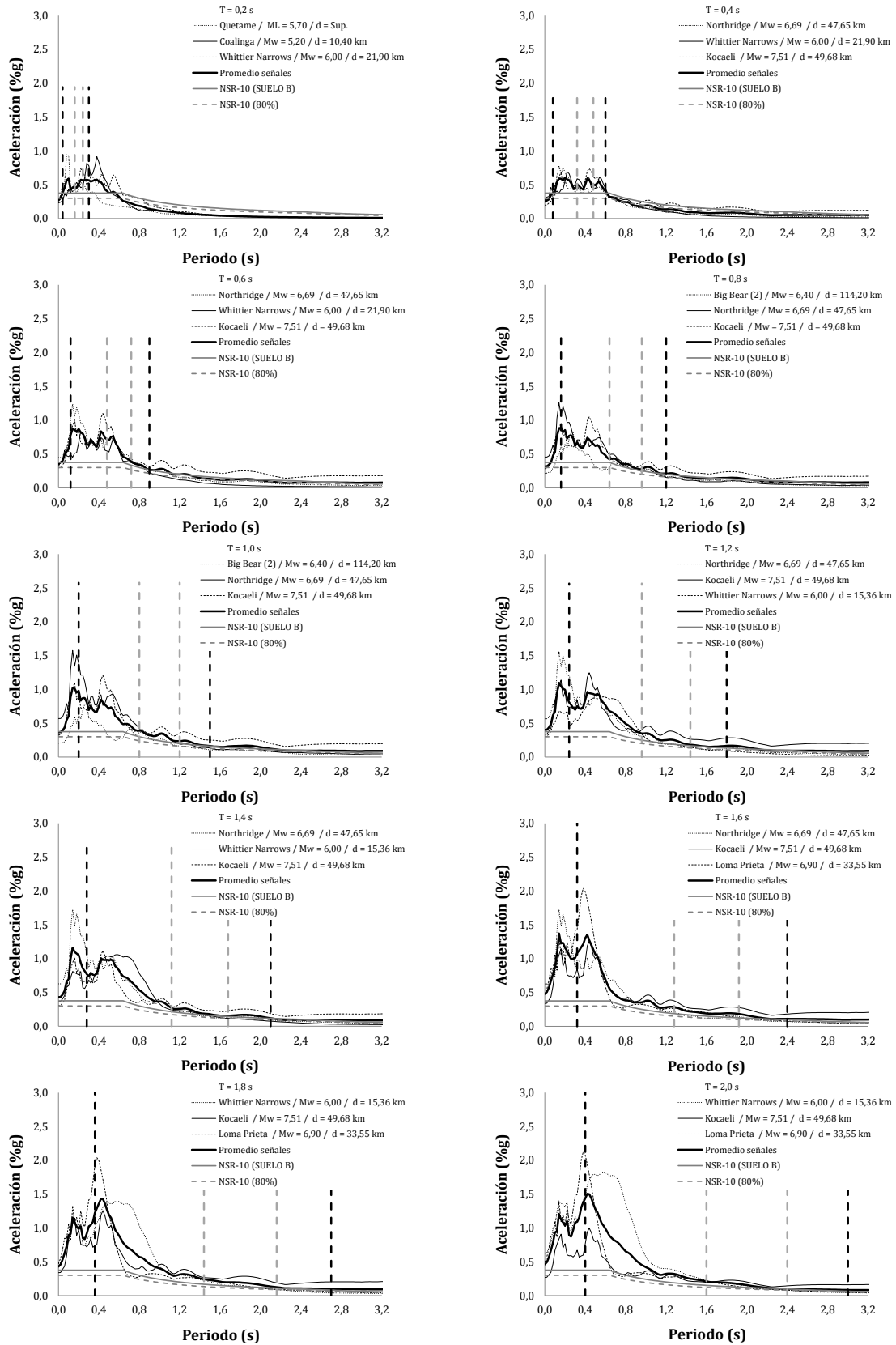


Figura 3.16 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo B a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c

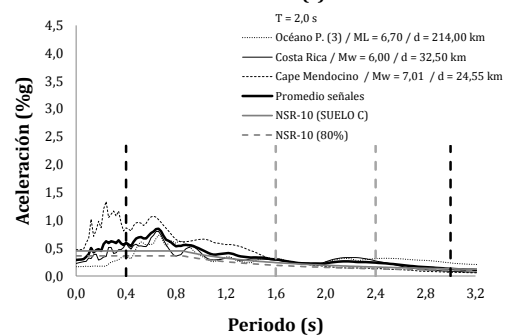
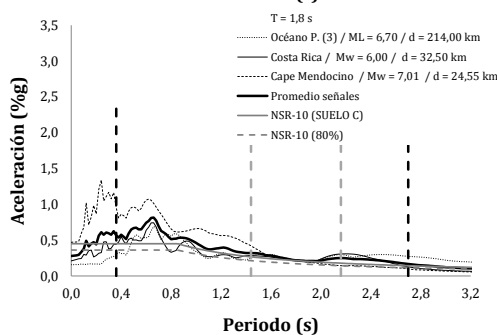
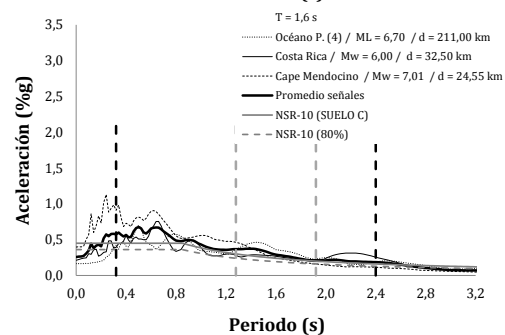
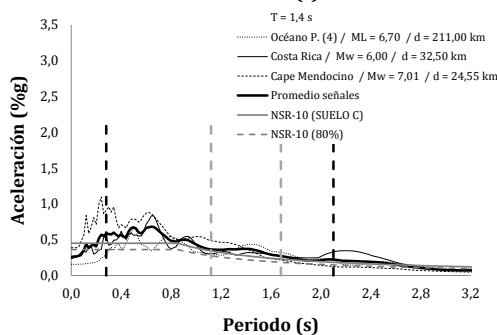
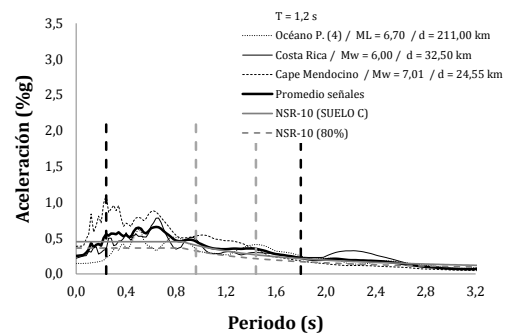
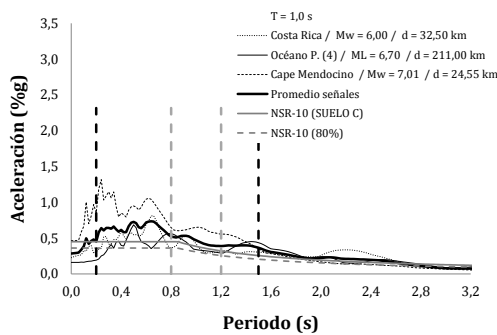
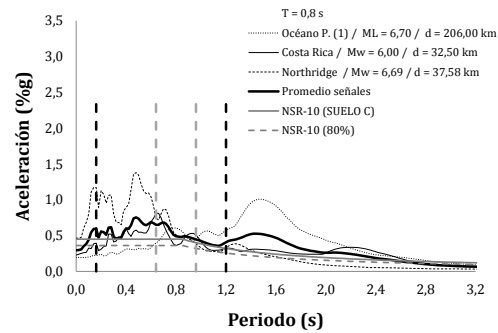
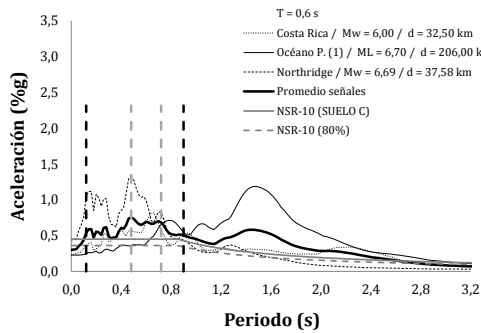
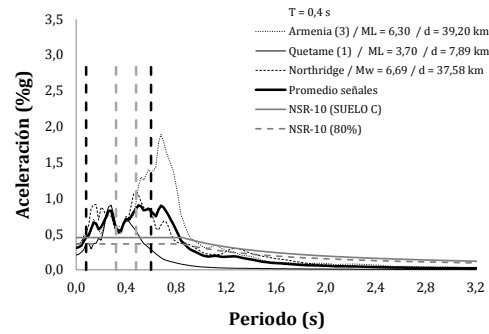
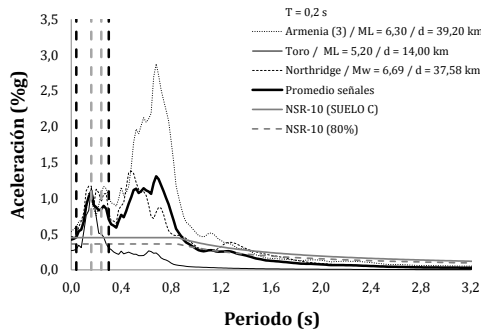


Figura 3.17 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo C a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c

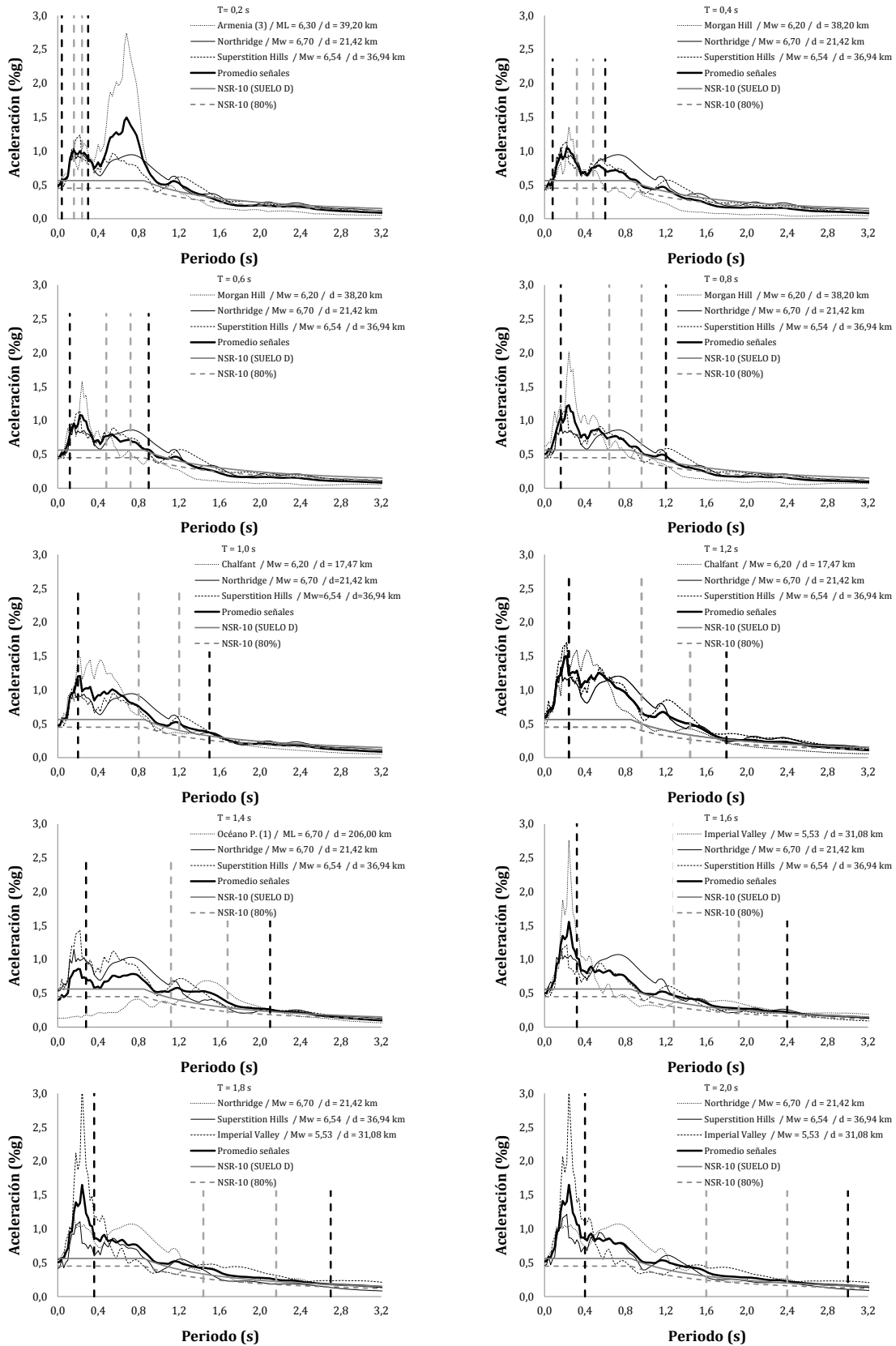


Figura 3.18 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo D a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c

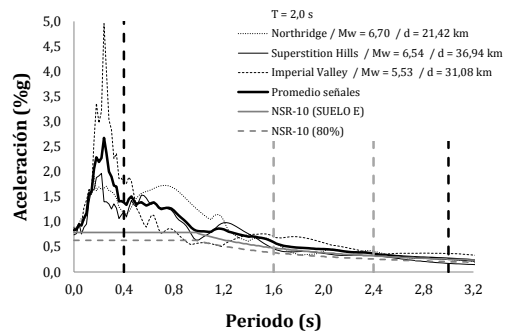
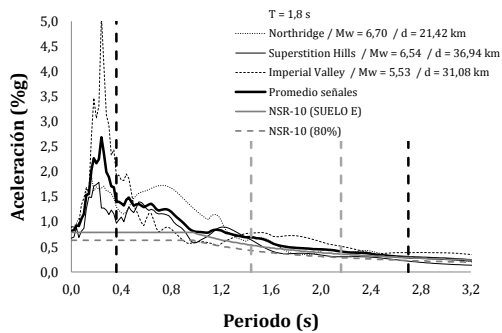
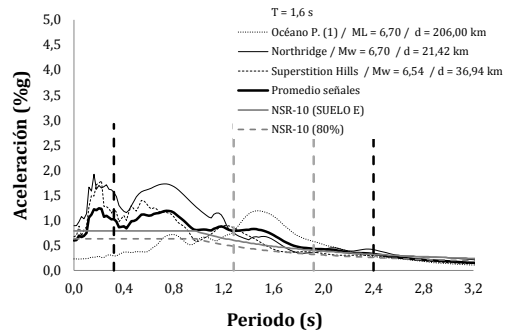
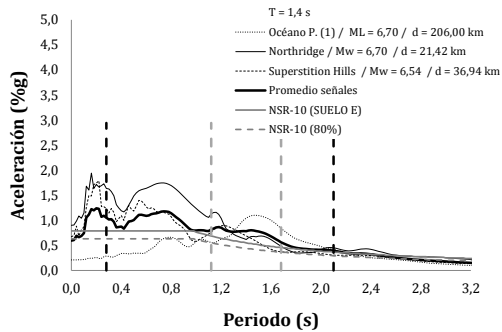
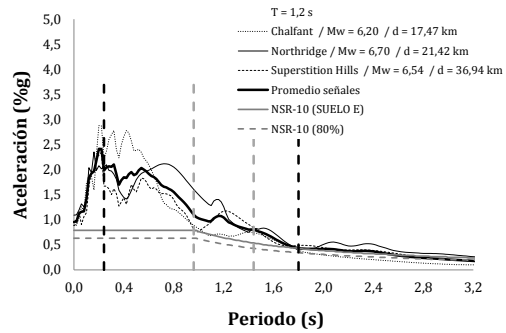
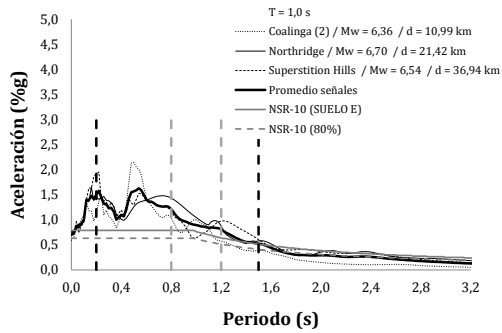
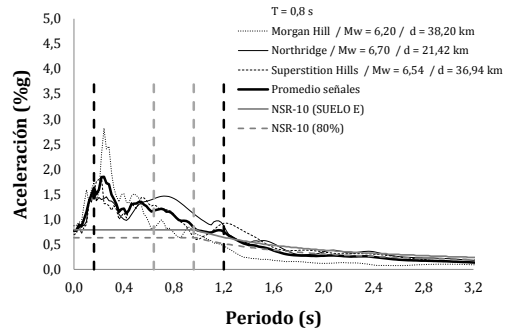
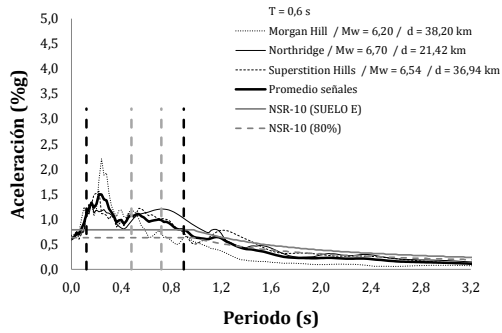
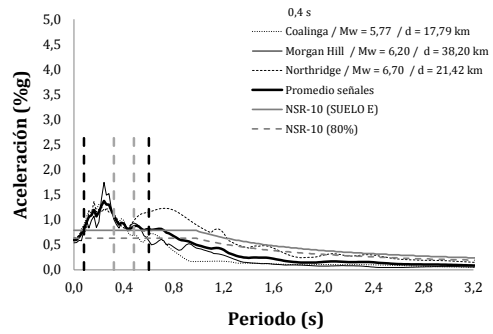
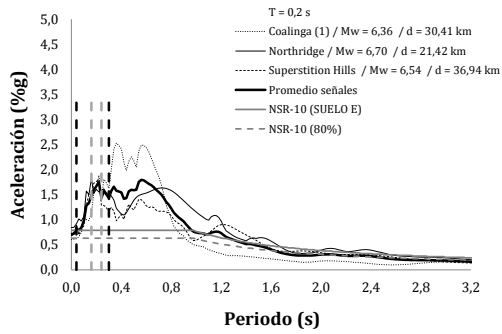


Figura 3.19 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo E a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c

### 3.3.2 SELECCIÓN DE SEÑALES QUE INCLUYEN SISMOS COLOMBIANOS

Por medio de la herramienta computacional se obtuvo la mejor combinación de señales para cada periodo en el intervalo [0,2 s-2 s] que incluyen sismos colombianos con el fin de generar una opción de diseño que cuente con señales con las características del ambiente sísmico del país. Se debe tener en cuenta que estas combinaciones presentan una dispersión mayor que las presentadas en la sección 3.3.1 pero con la diferencia de contar con información del ambiente tectónico nacional.

Las tablas 3.21, 3.22, 3.23, 3.24 y 3.25 presentan los grupos de 3 señales que cumplen lo requerido en A.2.7.1.c para señales en los perfiles de suelo tipo A, B, C, D, y E. Los periodos del intervalo [0,2 s - 2 s] que no se encuentren en las siguientes tablas no cuentan con sismos colombianos que cumplan los requisitos establecidos en A.2.7.1.c.

Tabla 3.21 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo A (se incluye al menos un sismo colombiano)

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	Sup.	1,00
	La Uruia	22/01/95	CSTRC	5,70*	38,00	1,82
	Quindío	25/01/99	PEREROB	6,20*	44,00	2,02
0,4	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	Sup.	1,14
	La Uruia	22/01/95	CSTRC	5,70*	38,00	1,73
	Whittier Narrows	01/10/87	0141	6,00	21,90	1,85
0,6	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	Sup.	1,81
	La Uruia	22/01/95	CSTRC	5,70*	38,00	2,23
	Whittier Narrows	01/10/87	0141	6,00	21,90	2,30
0,8	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	Sup.	1,89
	Big Bear (2)	28/06/92	11613	6,40	114,20	2,38
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	1,65

\* Magnitud M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

Tabla 3.22 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo B (se incluye al menos un sismo colombiano)

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	Sup.	1,30
	La Uruia	22/01/95	CSTRC	5,70*	38,00	2,27
	Quindío	25/01/99	PEREROB	6,20*	44,00	2,29
0,4	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	Sup.	1,42
	La Uruia	22/01/95	CSTRC	5,70*	38,00	2,16
	Whittier Narrows	01/10/87	0141	6,00	21,90	2,32
0,6	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	Sup.	2,09
	La Uruia	22/01/95	CSTRC	5,70*	38,00	2,39
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	2,46
0,8	Quetame	24/05/08	CQUET003	5,70*	Sup.	2,15
	Big Bear (2)	28/06/92	11613	6,4	114,2	2,48
	Kocaeli	17/08/99	99999 Gebze	7,51	49,68	2,38

\* Magnitud M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

Tabla 3.23 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo C (se incluye al menos un sismo colombiano)

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	2,43
	Toro	08/03/05	CVERS	5,20*	14,00	2,36
	Northridge	17/01/94	90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58	2,20
0,4	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	2,50
	Quetame (1)	30/06/05	CQUET2	3,70*	7,89	2,43
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,40
0,6	Armenia (4)	25/01/99	CMAN1	6,30*	79,40	2,40
	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,39
	Northridge	17/01/94	90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58	1,99
0,8	Armenia (4)	25/01/99	CMAN1	6,30*	79,40	2,35
	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,40
	Northridge	17/01/94	90033 LA - Cypress Ave	6,69	37,58	2,02
1,0	Armenia (1)	25/01/99	CARME	6,20*	14,95	1,96
	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	1,87
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,35
1,2	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	2,26
	Océano P. (5)	15/11/04	CCAL5	6,70*	204,00	2,32
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,48
1,4	Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30*	28,85	1,66
	Océano P. (5)	15/11/04	CCAL5	6,70*	204,00	2,20
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,20
1,6	Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30*	28,85	1,81
	Océano P. (5)	15/11/04	CCAL5	6,70*	204,00	2,36
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,18
1,8	Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30*	28,85	2,03
	Océano P. (3)	15/11/04	RAC11	6,70*	214,00	2,31
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,32
2,0	Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30*	28,85	2,29
	Océano P. (3)	15/11/04	RAC11	6,70*	214,00	2,46
	Costa Rica	22/12/90	AU2	6,00	32,50	2,15

\* Magnitud M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

Tabla 3.24 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo D (se incluye al menos un sismo colombiano)

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	2,31
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,10
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,30
0,4	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	1,23
	Coalinga	22/07/83	1162 Pleasant Valley P.P. - yard	5,77	17,79	1,00
	Morgan Hill	24/04/84	CDMG 57382 Gilroy Array #4	6,20	38,20	1,00
0,6	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	1,00
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,10
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,20
1,0	Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30*	28,85	1,18
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,20
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,41
1,4	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	1,38
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,20
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,51
1,6	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	1,30
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,50
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	1,11
1,8	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	1,24
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,37
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	1,50
2,0	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,25
	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	1,55
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	1,68

\* Magnitud M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

Tabla 3.25 Grupos de señales seleccionados a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c para perfiles de suelo tipo E (se incluye al menos un sismo colombiano)

Periodo	Nombre	Fecha	Estación	M <sub>w</sub>	d (km)	Fe
0,2	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	2,43
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,80
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	2,00
0,4	Armenia (1)	25/01/99	CARME	6,20*	14,95	1,00
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,54
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,71
0,6	Armenia (3)	25/01/99	CAST	6,30*	39,20	1,50
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,50
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,85
1,0	Armenia (2)	25/01/99	FLAN	6,30*	28,85	1,89
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	1,94
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	2,26
1,4	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,22
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	2,03
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,88
1,6	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,40
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	2,01
	Superstition Hills	24/11/87	1335 El centro imp. Co. Cent	6,54	36,94	1,88
1,8	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,29
	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	2,01
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	2,46
2,0	Northridge	17/01/94	90006 Sun Valley – Roscoe Blvd	6,70	21,42	2,41
	Océano P. (1)	15/11/04	RACO6	6,70*	206,00	2,29
	Imperial Valley	15/10/79	5058 El Centro Array #11	5,53	31,08	2,38

\* Magnitud

M<sub>L</sub>

d : Distancia hipocentral

En las figuras 3.20 a 3.24 se presentan los sismos seleccionados por medio de la herramienta computacional; estos espectros están escalados por el valor mostrado en las tablas 3.21 a 3.25. También se presenta el promedio de los 3 espectros y se puede apreciar que se cumple lo presentado en A.2.7.1.c en cuanto a que “el promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados, en el rango comprendido entre 0.2T y 1.5T, no debe ser menor que las ordenadas espectrales en el mismo rango de períodos para el movimiento esperado del terreno definido en A.2.6.”

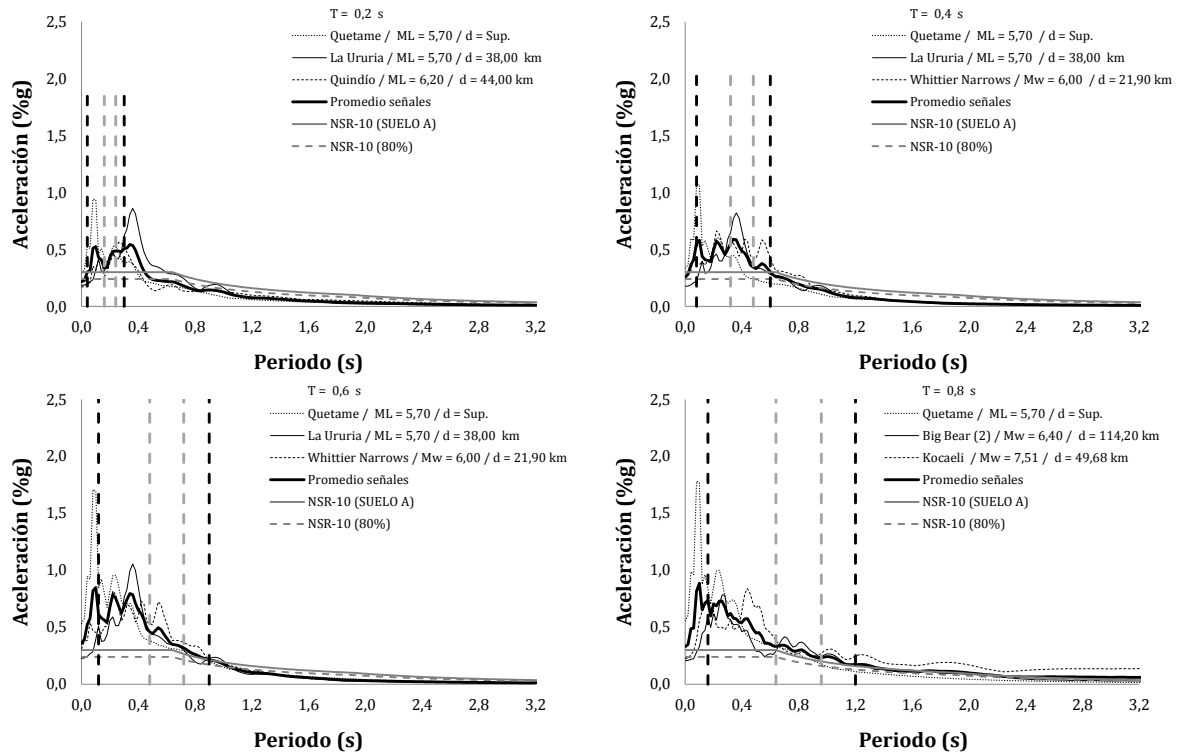


Figura 3.20 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo A a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c

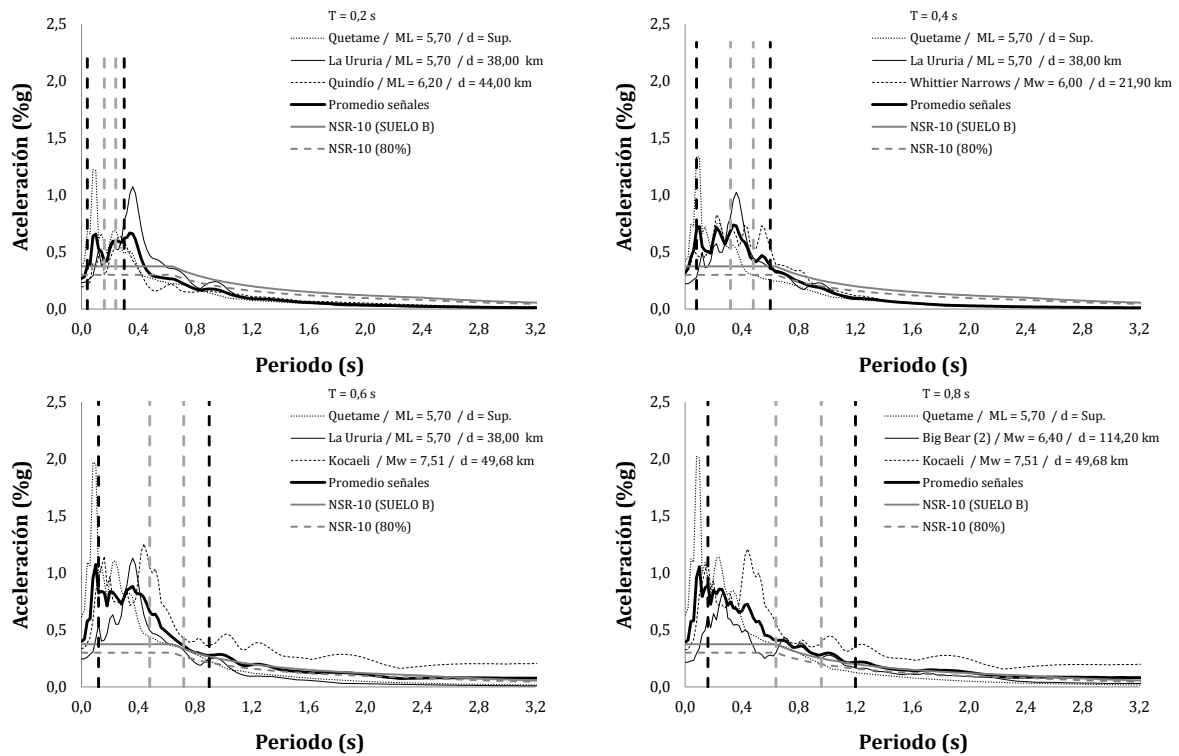


Figura 3.21 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo B a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c

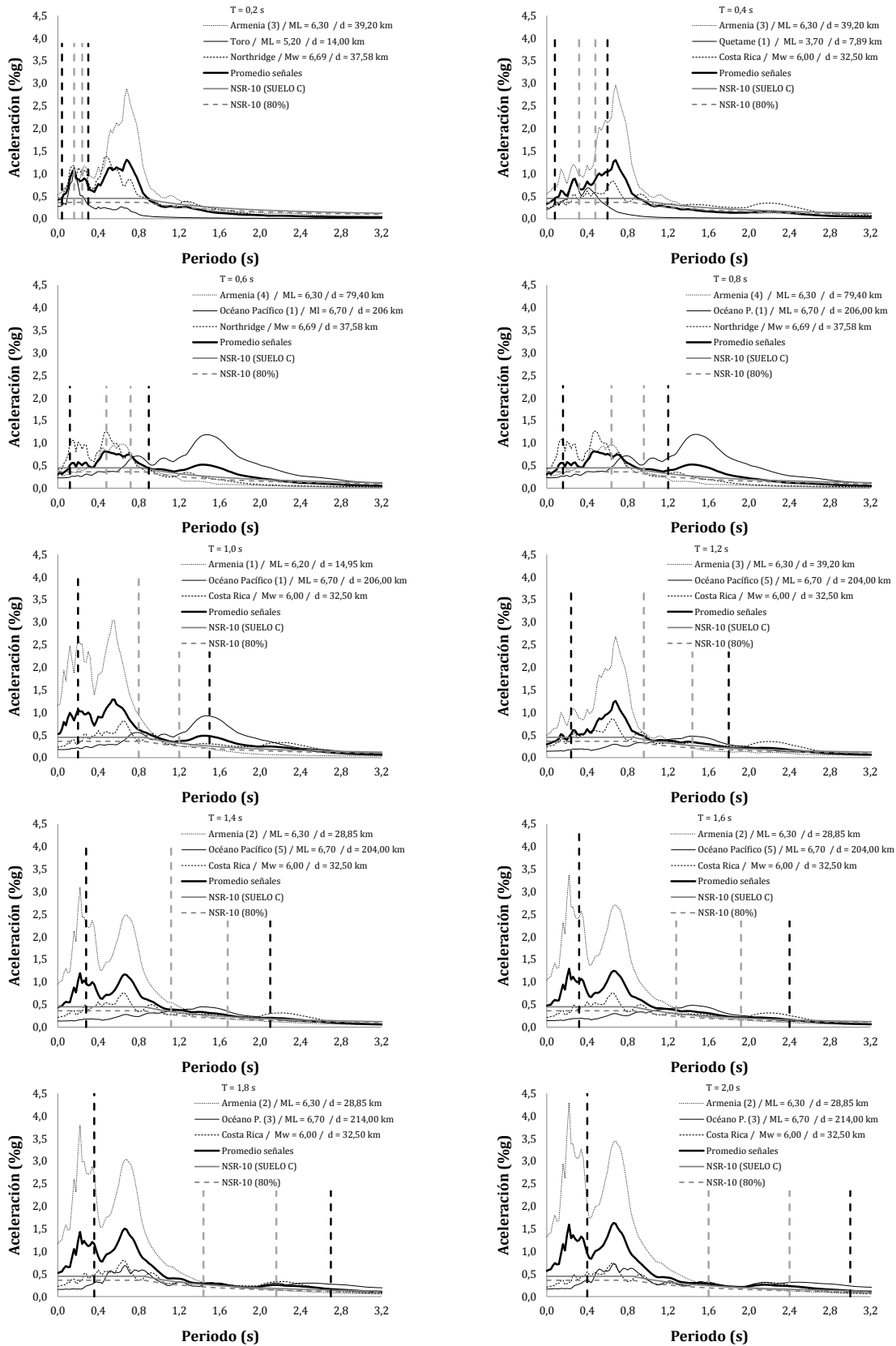


Figura 3.22 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo C a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c

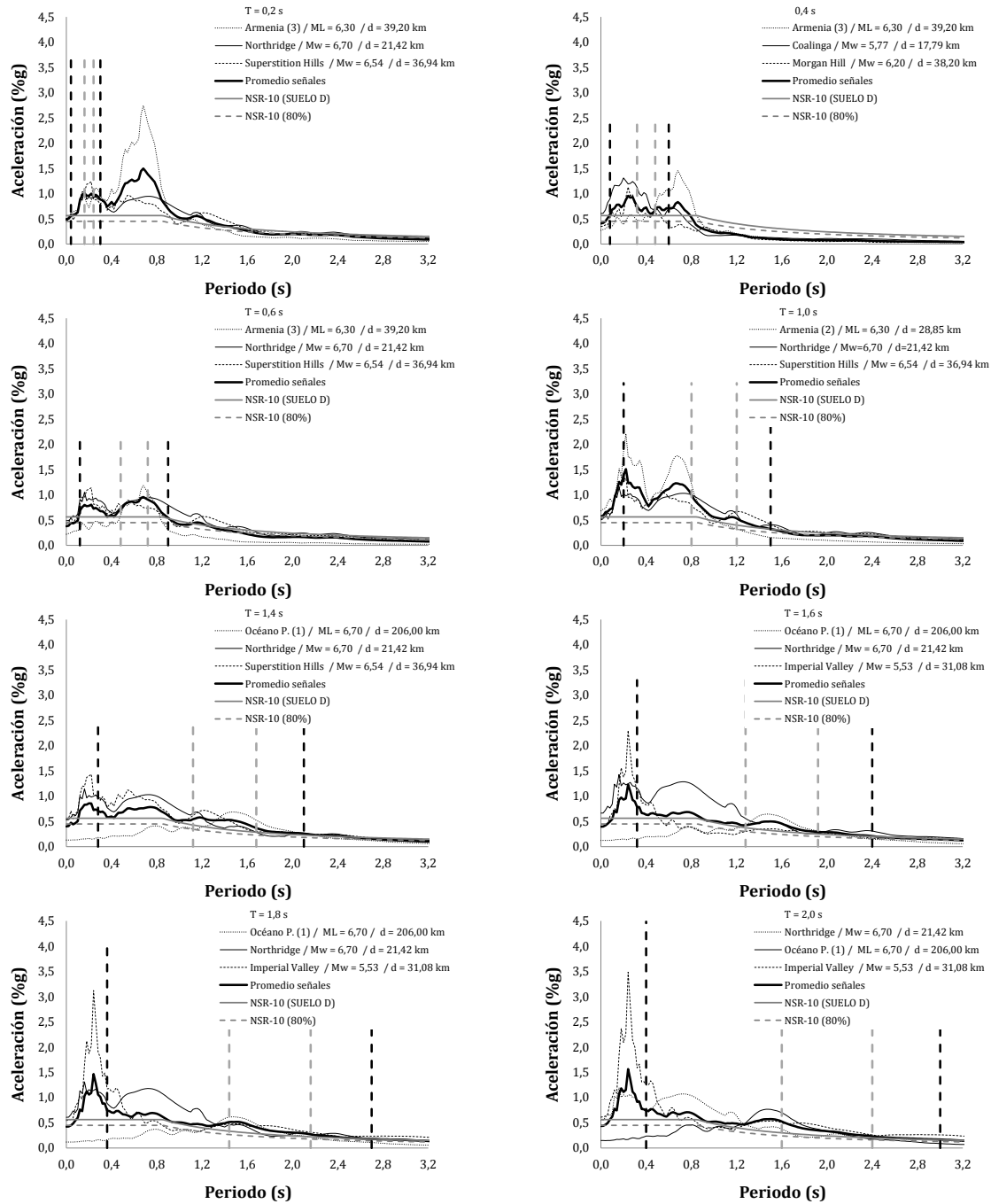


Figura 3.23 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo D a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c

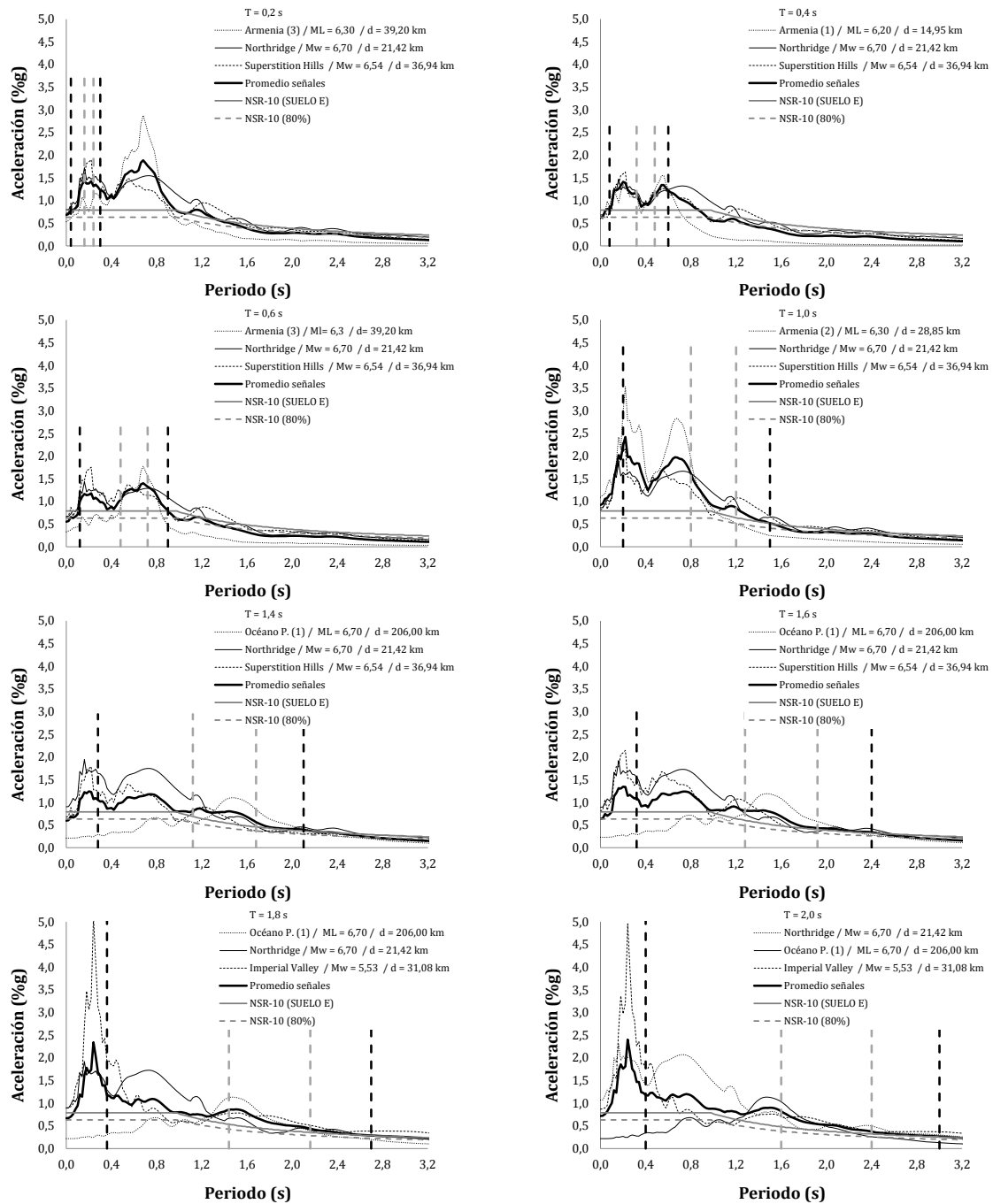


Figura 3.24 Grupos de señales seleccionados para el perfil de suelo tipo E a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c



## 4 HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Para la selección de señales aptas para la realización de análisis dinámicos se desarrolló una herramienta computacional que permitiera procesar de forma ágil los espectros de los acelerogramas pre-seleccionados para cada periodo estructural en el intervalo [0,2 s – 2 s]. Esta herramienta sigue un algoritmo de siete pasos (Figura 4.1) para seleccionar combinaciones de tres espectros que cumplan los requisitos presentados en A.2.7.1.c para señales individuales (rango 0,8T – 1,2T) y el promedio de los tres espectros (rango 0,2T – 1,5T). Para ilustrar el proceso del algoritmo se presenta un ejemplo con cinco señales correspondiente a la selección de señales para el periodo estructural T = 1,0 s y un perfil de suelo tipo A.

### 4.1 DESCRIPCIÓN

Se generó una herramienta computacional en lenguaje Matlab con el fin de seleccionar la mejor combinación de señales para cada periodo del intervalo de estudio [0,2 s – 2 s] entre las señales recopiladas de la base de datos nacional y del ambiente tectónico similar para la realización de análisis dinámicos. El programa, a partir de un grupo de señales, genera grupos de tres acelerogramas que cumplan con los requisitos presentados en A.2.7.1.c en cuanto a señales individuales y el promedio de estas. Por medio de un factor de peso calculado a partir de dos criterios definidos para este proyecto se selecciona la mejor combinación de señales y los factores de escalamiento asociados a esta combinación.

A continuación se presenta el diagrama de flujo de la herramienta desarrollada, al igual que un ejemplo ilustrativo.

### 4.2 DIAGRAMA DE FLUJO

En la Figura 4.1 se presenta el algoritmo que sigue el programa para seleccionar la mejor combinación de señales que cumplen los requisitos de A.2.7.1.c. A continuación se describe la nomenclatura usada en el diagrama de flujo mencionado.

#### Nomenclatura

$i$	= número de espectros de acelerogramas ingresados por el usuario.
$F_{1i}$	= factor de escala para cumplir el requisito de espectros individuales en el rango 0,8T – 1,2T.
$F_{2i}$	= factor de escala para cumplir el requisito de promedio de espectros (3) en el rango 0,2T – 1,5T.
$j$	= número de combinación de espectros (grupos de tres acelerogramas).
$k$	= combinaciones adicionales generadas para cada combinación $j$ a partir del escalamiento de cada espectro de la combinación $j$ por medio de los vectores [1 : $F_{2i}$ ].
$m$	= sumatoria de la resta de las ordenadas espectrales elevadas al cuadrado de la combinación $k$ y el espectro objetivo (100%NSR-10) en el rango de periodos 0,2T – 1,5T.
$m_j$	= sumatoria de la resta de las ordenadas espectrales elevadas al cuadrado entre cada señal $j$ de la combinación $k$ y el espectro promedio en el rango de periodos 0,2T – 1,5T.
$Sa_{ERP}(T)$	= aceleración espectral del espectro de respuesta promedio (ERP) de la combinación $k$ en el periodo T.
$Sa_{ED}(T)$	= aceleración espectral del espectro de diseño (ED) en el periodo T.
$Sa_{ERI}(T)$	= aceleración espectral del espectro de respuesta individual (ERI) de la combinación $k$ en el periodo T.

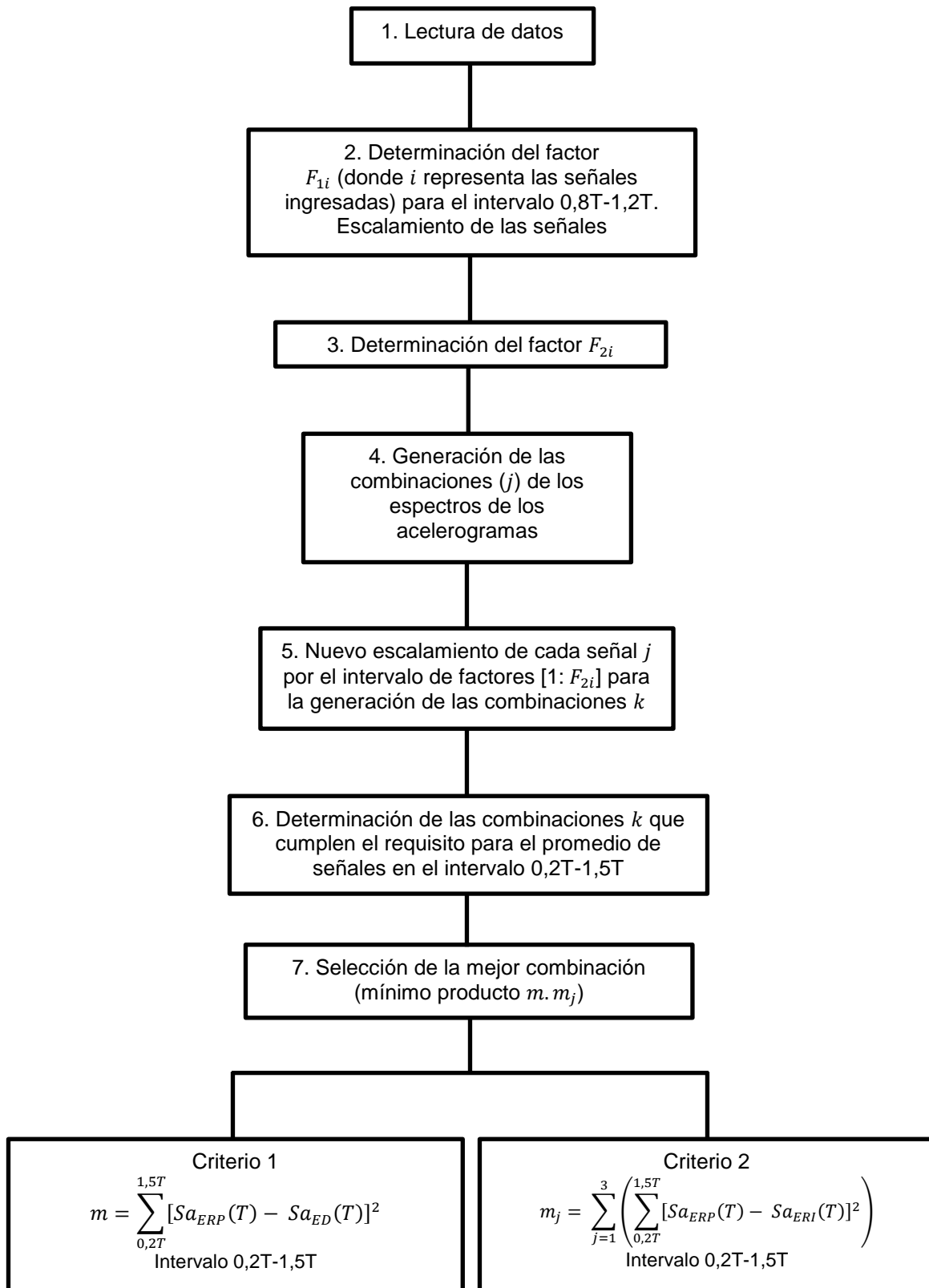


Figura 4.1 Diagrama de flujo de la herramienta computacional

En los numerales 4.2.1 a 4.2.7 se detalla cada paso contenido en el diagrama de flujo de la Figura 4.1.

#### 4.2.1 PASO 1

Se leen los datos de entrada del archivo de Excel con nombre "Input". Estos datos son:

- Periodo estructural de evaluación
- Espectros de los acelerogramas del grupo ( $i$ )
- Espectro objetivo (Norma NSR-10)
- Factor de escala máximo permitido ( $F_{m\acute{a}x}$ )

#### 4.2.2 PASO 2

Se comparan los espectros de cada señal con el espectro de diseño del reglamento NSR-10 para determinar el factor de escala necesario ( $F_{1i}$ ) para que el espectro de la señal supere o iguale el 80% de las ordenadas del espectro objetivo en el rango de periodos  $0,8T$  a  $1,2T$  según A.2.7.1.c. Posteriormente se escalan las señales por el factor determinado para cada una de ellas y de este modo se asegura que cada señal iguala o supera el 80% de las ordenadas del espectro objetivo en el rango de periodos  $0,8T$  a  $1,2T$ .

#### 4.2.3 PASO 3

Por medio del factor máximo de escala ingresado por el usuario ( $F_{m\acute{a}x}$ ) y el factor  $F_{1i}$  calculado para cada señal en el paso 2, se calcula el factor  $F_{2i}$  ( $F_{m\acute{a}x}/F_{1i}$ ). Este factor es el mayor valor al que se puede escalar nuevamente la señal sin que se supere el factor máximo establecido por el usuario, es decir,  $F_{1i} * F_{2i} = F_{m\acute{a}x}$ . Con el valor de  $F_{m\acute{a}x}$  se definen diferentes factores de escalamiento para cada señal que varían desde  $F_{1i}$  hasta  $F_{m\acute{a}x}$  (o el rango equivalente para  $F_{2i}$  entre 1 y  $F_{m\acute{a}x}/F_{1i}$ ).

#### 4.2.4 PASO 4

A partir del número de señales ingresadas por el usuario se generan las posibles combinaciones que se pueden dar entre ellas. Para esto se emplea la fórmula del coeficiente binomial,  $C$ , para obtener combinaciones sin importar el orden:

$$j = C \left( \frac{i}{r} \right) = \frac{i!}{r!(i-r)!} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

dónde:

$i$  = número de señales

$r$  = tamaño de las combinaciones (3)

$j$  = número de combinaciones

A manera ilustrativa, si se ingresan 5 señales ( $i = 5$ ), existen 10 combinaciones ( $j$ ) de grupos de tres señales ( $r = 3$ ).

#### 4.2.5 PASO 5

En el paso 4 se generaron  $j$  combinaciones de grupos de tres señales. Teniendo en cuenta que el espectro de cada señal  $i$  puede escalarse desde  $F_{1i}$  hasta  $F_{m\acute{a}x}$ , se generan vectores  $[1 : F_{2i}]$  con un incremento de 0,1 para escalar cada señal  $i$  de cada combinación  $j$ .

Luego de este nuevo escalamiento de señales por los vectores  $[1 : F_{2i}]$ , el escalamiento final de cada señal  $i$  se resume en  $[F_{1i} : F_{m\acute{a}x}]$ . Con las señales escaladas se generan nuevas combinaciones  $k$  para cada combinación  $j$ . Es decir, para cada combinación  $j$  (grupo de tres señales) se generan  $k$  subgrupos, en donde las mismas tres señales presentan diferentes factores de escala.

El número total de combinaciones a analizar corresponde a la sumatoria de las combinaciones  $k$  en las  $j$  combinaciones (Ecuación 4-2).

$$\sum_1^j k = \#combinaciones\ analizadas \quad \text{Ecuación 4-2}$$

#### 4.2.6 PASO 6

Del total de las combinaciones (Ecuación 4-2) se seleccionan los promedios de los tres espectros que cumplen el requisito de A.2.7.1.c en el intervalo 0,2T-1,5T, el cual dice que “el promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados, en el rango comprendido entre 0.2T y 1.5T, no debe ser menor que las ordenadas espectrales en el mismo rango de períodos para el movimiento esperado del terreno definido en A.2.6.”

#### 4.2.7 PASO 7

Se selecciona la mejor combinación  $k$  por medio de la elección del menor valor proveniente del producto de los factores  $m$  y  $m_j$  calculados a partir de los siguientes criterios.

- Criterio 1

Para el intervalo 0,2T-1,5T se determina la combinación que presente un espectro promedio más cercano al espectro objetivo. Para tal fin se definió la variable  $m$  como la sumatoria de la resta elevada al cuadrado de las ordenadas del espectro de diseño objetivo ( $Sa_{ED}(T)$ , 100%NSR-10) y las ordenadas del espectro de respuesta promedio,  $Sa_{ERP}(T)$  como se presenta en la Ecuación 4-3. Debido a que las ordenadas del espectro promedio siempre están por encima del espectro objetivo, un valor menor de  $m$  indica mayor cercanía entre los espectros. En la Figura 4.2 se presenta de forma gráfica este criterio.

$$m = \sum m_T = \sum_{0,2T}^{1,5T} [Sa_{ERP}(T) - Sa_{ED}(T)]^2 \quad \text{Ecuación 4-3}$$

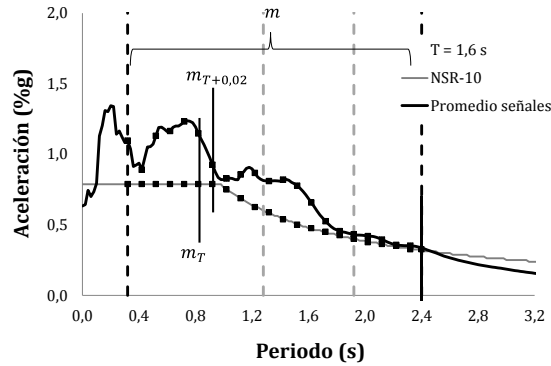


Figura 4.2 Rango  $0,2T - 1,5T$  en el que se determina  $m_T$  para cada periodo y  $m$  para el intervalo completo.

- Criterio 2

Con el fin de obtener señales que no presenten una variación significativa entre ellas, lo cual podría implicar espectros de señales individuales muy alejadas del espectro objetivo, se selecciona la combinación  $k$  con la menor sumatoria generada por la ecuación (Ecuación 4-4) con respecto a la comparación del promedio de las tres señales a lo largo del rango de periodos  $0,2T - 1,5T$  y cada una de las señales que conforman el grupo.

$$m_j = \sum_{j=1}^3 \left( \sum_{0,2T}^{1,5T} [Sa_{ERP}(T) - Sa_{ERI}(T)]^2 \right) \quad \text{Ecuación 4-4}$$

### 4.3 APLICACIÓN DEL PROGRAMA

Con el fin de ilustrar el algoritmo presentado en el numeral 4.2, se hace un ejemplo con 5 señales en perfil de suelo tipo A y un periodo de  $T = 1,0$  s.

#### 4.3.1 PASO 1

Los datos de entrada para el ejemplo son:

- Periodo estructural de evaluación ( $T = 1,0$  s)
- Espectros de los acelerogramas del grupo ( $i = 5$ )

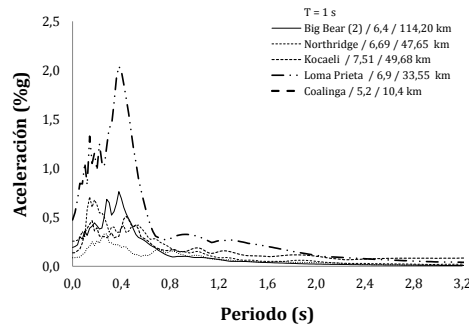


Figura 4.3 Espectros de los acelerogramas a ser analizados según los requisitos presentados en A.2.7.1.

- Espectro objetivo (Norma NSR-10)

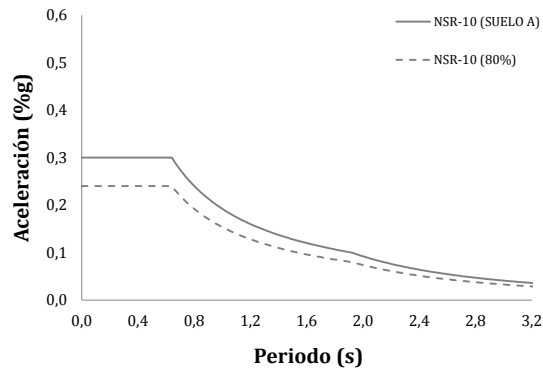


Figura 4.4 Espectros para el perfil de suelo tipo A al 80% y al 100%.

- Factor de escala máximo permitido ( $F_{m\acute{a}x} = 2,5$ )

#### 4.3.2 PASO 2

Se determina el factor de escala  $F_{1i}$  y se escalan los espectros (Figura 4.5) para asegurar que cada señal iguale o supere el 80% de las ordenadas del espectro objetivo en el rango de periodos  $0,8T$  a  $1,2T$  según A.2.7.1.c.

Tabla 4.1 Factor de escala  $F_{1i}$  calculado para cada espectro de los acelerogramas.

Periodo	Nombre	$F_{1i}$
1,0	Big Bear (2)	1,90
	Coalinga	1,97
	Northridge	1,48
	Kocaeli	1,18
	Loma Prieta	0,68

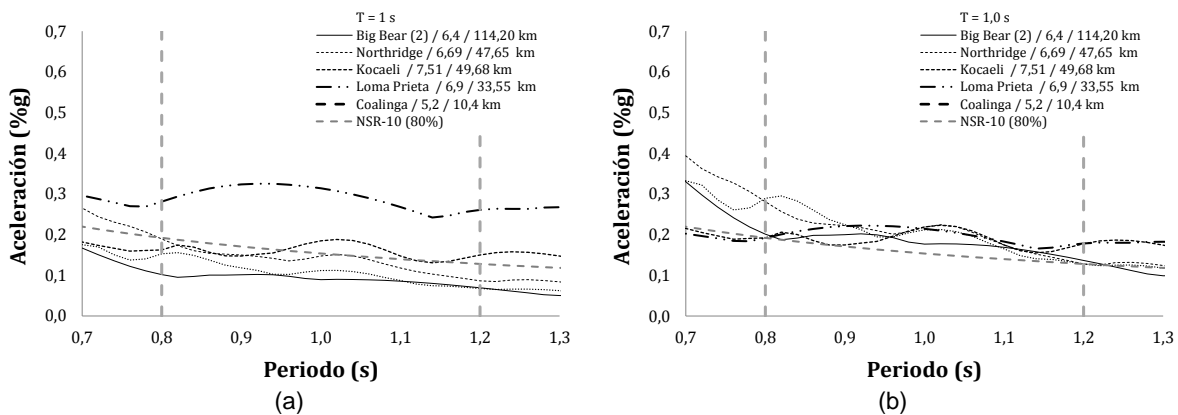


Figura 4.5 (a) Espectros sin escalar. (b) Escalamiento de los espectros por el factor  $F_{1i}$  calculado en este paso. Se puede observar que en la figura (b) todas las señales igualan o sobrepasan las ordenadas del 80% del espectro de diseño en el intervalo  $0,8T$ - $1,2T$  para el perfil de suelo tipo A.

#### 4.3.3 PASO 3

Se calcula el factor  $F_{2i}$  correspondiente al valor al que se pueden escalar las señales sin que se supere el factor máximo ingresado por el usuario ( $F_{m\acute{a}x}$ ). Posterior a la obtención

del factor  $F_{2i}$  se procede a hacerle una corrección para expresarlo en una única cifra decimal.

Tabla 4.2 Determinación del factor  $F_{2i}$  por medio de los factores  $F_{máx}$  y  $F_{1i}$  para cada uno de los espectros

Periodo	Nombre	$F_{1i}$	$F_{máx}$	$F_{2i} (F_{máx}/F_{1i})$	$F_{2i} \text{ (Corregido)}$
1,0	Big Bear (2)	1,90	2,50	1,319	1,30
	Coalinga	1,97	2,50	1,266	1,20
	Northridge	1,48	2,50	1,686	1,60
	Kocaeli	1,18	2,50	2,112	2,10
	Loma Prieta	0,68	2,50	3,660	3,60

#### 4.3.4 PASO 4

Se determina el número de combinaciones de las señales (sin repetición) según la Ecuación 4-1.

$$i = 5$$

$$r = 3$$

$$j = \frac{5!}{3!(5-3)!} = 10$$

Por lo tanto, para un grupo inicial de cinco señales se obtienen 10 posibles combinaciones sin que haya repeticiones entre ellas.

#### 4.3.5 PASO 5

Se generan los vectores  $F_{2i}$  para cada señal.

Tabla 4.3 Cálculo de los vectores [1 : F2i]

Periodo	# Sismo	Nombre	$F_{2i} \text{ (Corregido)}$	[1 : $F_{2i}$ ]
1,0	1	Big Bear (2)	1,30	[1,00 : 0,10 : 1,30]
	2	Coalinga	1,20	[1,00 : 0,10 : 1,20]
	3	Northridge	1,60	[1,00 : 0,10 : 1,60]
	4	Kocaeli	2,10	[1,00 : 0,10 : 2,10]
	5	Loma Prieta	3,60	[1,00 : 0,10 : 3,60]

Por medio de los vectores [1 :  $F_{2i}$ ] se calculan las combinaciones  $k$  para cada combinación  $j$ . En la Tabla 4.4 se presentan las combinaciones  $j$  y el número de combinaciones  $k$  correspondiente.

Tabla 4.4 Combinaciones  $j$  y sus correspondientes combinaciones  $k$

# Combinación $j$	Señales			# combinaciones $k$
1	1	2	3	84
2	1	2	4	144
3	1	2	5	192
4	1	3	4	336
5	1	3	5	448
6	1	4	5	768
7	2	3	4	252
8	2	3	5	336
9	2	4	5	576
10	3	4	5	1344
<b>Total</b>				<b>4480</b>

#### 4.3.6 PASO 6

De las 4480 combinaciones  $k$  calculadas en el paso 5 se seleccionan las combinaciones  $j$  cuyos promedios cumplan el requisito presentado en A.2.7.1.c (para promedio de señales). En la Tabla 4.5 se presentan las combinaciones  $k$  que cumplen los requisitos antes mencionados, y se puede observar que de la combinación  $j = 1$  ninguna combinación  $k$  de un total de 84 es seleccionada, para la combinación  $j = 2$  son seleccionadas 76 combinaciones  $k$  de un total de 144, para la combinación  $j = 3$  son seleccionadas 192 combinaciones  $k$  de un total de 192. De forma similar para el resto de combinaciones.

Tabla 4.5 Selección de las combinaciones  $j$  que cumplen los requisitos presentados en A.2.7.1.c

# Combinación $j$	Señales			# combinaciones $k$ (iniciales)	# combinaciones $k$ (finales)
	1	2	3		
1	1	2	3	84	0
2	1	2	4	144	76
3	1	2	5	192	192
4	1	3	4	336	222
5	1	3	5	448	448
6	1	4	5	768	763
7	2	3	4	252	158
8	2	3	5	336	336
9	2	4	5	576	565
10	3	4	5	1344	1344
<b>Total</b>				<b>4480</b>	<b>4104</b>

#### 4.3.7 PASO 7

Se selecciona la combinación  $k$  con el menor factor de peso calculado por medio del producto  $m * m_j$ . De las 4480 combinaciones  $k$  iniciales que se calculan a partir de las combinaciones  $j$ , se obtuvo que la combinación con el menor factor de peso tiene un valor de 2,5689.

La Tabla 4.6 presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 4.6 Selección de la combinación  $k$  que cumple los criterios 1 y 2

Combinación $j$	Señales			# combinaciones $k$	$m$	$m_j$	Factor de peso
4	1	3	4	336	1,9376	1,3258	2,5689

Por medio del factor de peso se pudo concluir que la combinación  $k$  a ser seleccionada es la correspondiente a la combinación  $j$  (1, 3, 4) como se presenta en la Tabla 4.7 y la Figura 4.6.

Tabla 4.7 Combinación  $j$  seleccionada por medio del producto  $m * m_j$

Periodo	Nombre	$m$	$m_j$	Factor de peso	$F_{1i}$	$F_{2i}$	Fe
1,0	Big Bear (2)	1,9376	1,3258	2,5689	1,90	1,30	2,46
	Northridge				1,48	1,00	1,48
	Kocaeli				1,18	1,50	1,78

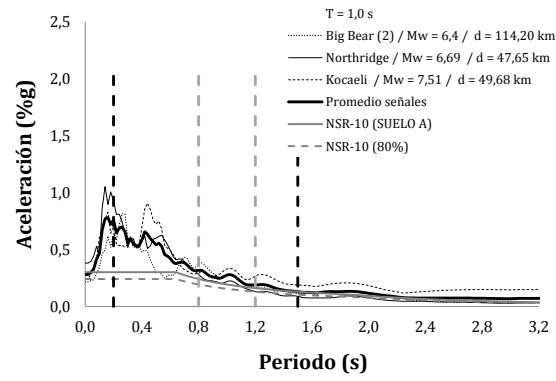


Figura 4.6 Señales seleccionadas para el perfil de suelo tipo A a partir de los criterios presentados en A.2.7.1.c



## 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se hizo un análisis de la información de la base de datos recopilada en el proyecto, siendo evidente la escasez de datos disponibles que cumplan los requisitos presentados en A.2.7.1.c. También, se realizó una comparación del reglamento NSR-10 con códigos de diseño sísmo resistente de diferentes países, con el fin de establecer posibles diferencias en cuanto a los requisitos establecidos para la selección de acelerogramas aptos para ser utilizados en análisis dinámico consistente en evaluaciones contra el tiempo; en la comparación se observaron diferencias importantes. Finalmente, se comparó la selección presentada en la sección 3.3.1 (combinaciones que no tienen como requisito incluir sismos colombianos) con la realizada en la sección 3.3.2 (combinaciones que incluyen al menos un sismo colombiano) para mostrar gráficamente las diferencias entre las dos selecciones.

### 5.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

Luego de analizar y procesar la información disponible en el país, se evidenció que la información que realmente cumple los requisitos presentados en A.2.7.1 para ser utilizada en procedimientos de análisis dinámico consistentes en evaluaciones contra el tiempo es escasa. Esto se pudo observar a medida que se seleccionaban las señales sísmicas para los perfiles de suelo B, C y E (teniendo el perfil de suelo tipo B como base para el A y el suelo tipo E como base para el D, ver el numeral 3.2.1) de la base de datos recopilada, ya que la cantidad de registros pre-seleccionados para el análisis equivalía a menos del 50% de las señales con las que se contaba inicialmente. La Tabla 5.1 muestra el número inicial de señales y la cantidad de ellas que cumplieron los requisitos de A.2.7.1.c para señales individuales, requisito que menciona que las ordenadas espectrales del espectro de respuesta de cada acelerograma no deben ser menores al 80% del espectro de diseño objetivo. Es importante anotar que el requisito mencionado es el primero de los dos requisitos que deben cumplir las señales, por lo que se habla de una pre-selección de señales. En la Tabla 5.1 se especifican los periodos estructurales (rango de periodos útiles) para los cuales se pre-seleccionaron las señales de la base de datos que cumplieron con el requisito de A.2.7.1.c.

Tabla 5.1 Información inicial e información que cumplió los requisitos de A.2.7.1.c para señales individuales

<b>Perfil de suelo</b>	<b># Señales iniciales</b>	<b>Señales pre-seleccionadas</b>	<b>Rango de periodos útiles</b>
B y A	14	4	0,2 - 0,8
C	34	13	0,2 - 2,0
E y D	34	5	0,2- 0,6; 1,0; 1,4 - 2,0

Teniendo en cuenta que la base de datos se compone de 48 señales de las cuales 14 corresponden a roca (perfil de suelo tipo A y B) y 34 corresponden a suelo (perfiles de suelo tipo C, D y E) se amplía a continuación la información presentada en la Tabla 5.1.

Para el perfil de suelo tipo B inicialmente se contó con 14 señales pero fueron de utilidad cuatro y únicamente en el periodo 0,2 s se pudieron generar grupos de 3 señales (Tabla 3.1); en el resto de periodos no se pudo conformar grupos (al contar con menos de tres señales o ninguna). Para el perfil de suelo tipo C inicialmente se contó con 34 señales pero fueron de utilidad 13 y en el rango de periodos 0,2 s – 2 s se pudieron generar grupos de 3 señales (Tabla 3.2). Para el perfil de suelo tipo E inicialmente se contó con 34

señales pero fueron de utilidad cinco y en ningún periodo se pudieron generar grupos de 3 señales (Tabla 3.3). Para todos los perfiles de suelo fue necesario complementar la información para poder generar grupos de señales que cumplieran con los requisitos del reglamento en términos de ordenadas espectrales individuales y del promedio del grupo (A.2.7.1.c). La base de datos se complementó con registros de aceleración de sismos de ambientes tectónicos similares. En total se seleccionaron ocho (8) acelerogramas para los perfiles de suelo tipo A y B, tres (3) acelerogramas para el perfil de suelo tipo C y nueve (9) para los perfiles de suelo tipo D y E.

Teniendo en cuenta lo anterior se presenta en la Tabla 5.2 el número de combinaciones (grupos de tres señales seleccionadas en 3.3.1) que cumplen los requisitos presentados en A.2.7.1.c (donde se requiere que el promedio de los espectros de los acelerogramas tenga ordenadas espectrales que no sean menores a 100% del espectro objetivo) y que están conformadas por al menos un acelerograma nacional en los diferentes perfiles de suelo para los diez intervalos de periodos estructurales desde 0,2 s a 2 s. En total para cada perfil de suelo hay 10 combinaciones, cada una corresponde a un grupo de 3 señales.

Tabla 5.2 Número de combinaciones conformadas por al menos un sismo nacional

Perfil de suelo	Grupos con señales nacionales
A	1/10
B	1/10
C	9/10
D	1/10
E	2/10

En la Tabla 5.2 se puede observar que para el perfil de suelo tipo C una cantidad mayor de combinaciones cuentan con sismos nacionales que los otros perfiles de suelo. Esto se debe a que la información utilizada para los perfiles de suelo tipo C, D y E es la misma (34 señales) al estar clasificada en la RNAC como “suelo”, por lo tanto, debido a que el perfil de suelo tipo C tiene menores ordenadas espectrales, permite que el requisito de aceleraciones para señales individuales sea menos exigente que para los perfiles de suelo tipo D y E. De este caso se resalta la importancia de contar con una consistencia entre la clasificación de la información entre los registros de la RNAC y la presentada en el reglamento NSR-10.

Debido a la reducción significativa de información luego de analizar los espectros según los requisitos presentados en A.2.7.1.c, se hizo nuevamente la comparación entre los parámetros de los acelerogramas (nacionales e internacionales) según los parámetros de magnitud, distancia, aceleración máxima, intensidad de Arias y relación entre la aceleración espectral máxima y la aceleración pico efectiva ( $A_{m\acute{a}x}/A_a$ ). La comparación se presenta en la Figura 5.1, en donde se observa que el número de señales es menor que cuando se consideraron la totalidad de acelerogramas recopilados en la base de datos inicial (ver Figura 3.14). De esta nueva comparación se puede observar que los sismos en roca y suelo tienden a ubicarse en un rango de magnitudes entre 5 y 7 principalmente, a excepción del sismo de Quetame con magnitud  $M_L=3,7$  que presenta aceleraciones importantes debido a la corta distancia a la que fue registrado. Los sismos con magnitudes menores a 5 no cumplen con los requisitos de aceleración requeridos por el reglamento para la ciudad de Medellín (excluyendo a Quetame) aunque para ciudades con una amenaza sísmica menor podrían ser de utilidad. En cuanto a distancia se

observa que en su mayoría, tanto para roca como suelo, los sismos se ubican en un rango de 0 a 50 km.

También se puede observar que aunque la información nacional se redujo, los parámetros sísmicos mantienen una similitud importante (como se había confirmado en 3.2.2) que concuerda con lo requerido en A.2.7.1.a donde se menciona que los sismos deben ser “representativos de los movimientos esperados del terreno teniendo en cuenta que deben provenir de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar, pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posible”.

## 5.2 REQUISITOS NORMATIVOS

Los requisitos presentados en A.2.7.1 (a) y (c) en el reglamento NSR-10 para uso en análisis dinámicos se discuten en este numeral. La discusión se centró principalmente en las consecuencias de aplicar dichos requisitos en la selección de grupos de señales. En general los criterios del reglamento hacen que la selección de señales sea un procedimiento exigente, principalmente por el amplio intervalo de periodos en el cual se deben cumplir los requisitos del reglamento.

Adicionalmente, se hace una comparación de diferentes códigos que incluyen requisitos para la selección de acelerogramas aptos para el uso en el análisis dinámico consistente en evaluaciones contra el tiempo, con el fin de establecer diferencias importantes del código colombiano en cuanto a este tema con respecto a los demás códigos.

### 5.2.1 DISCUSIÓN DE LOS REQUISITOS EXIGIDOS EN A.2.7.1

El reglamento NSR-10 menciona en la sección A.2.7.1.(a) las características que deben tener los acelerogramas utilizados para efectos de diseño mencionando: “todos ellos representativos de los movimientos esperados del terreno teniendo en cuenta que deben provenir de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar, pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posible”. Desafortunadamente, el reglamento no presenta información adicional que oriente al ingeniero en la correcta selección de los acelerogramas. La amenaza sísmica está representada en el reglamento NSR-10 mediante un espectro elástico de aceleración, el cual depende de la aceleración pico efectiva,  $A_a$ , la velocidad pico efectiva,  $A_v$ , las características de la estratificación del suelo,  $F_a$  y  $F_v$ , y el coeficiente de importancia (que representa la importancia de la estructura y por lo tanto su nivel de desempeño ante un sismo) que definen su forma espectral como se presenta en la Figura 2.7 y que por comodidad se repite como Figura 5.2.

El espectro del reglamento es un espectro de amenaza uniforme (EAU), definido para un periodo de retorno de 475 años, lo que equivale a una probabilidad de excedencia de un 10% en un periodo de 50 años. Lo anterior quiere decir que los valores de aceleración para cada periodo corresponden a una probabilidad constante.

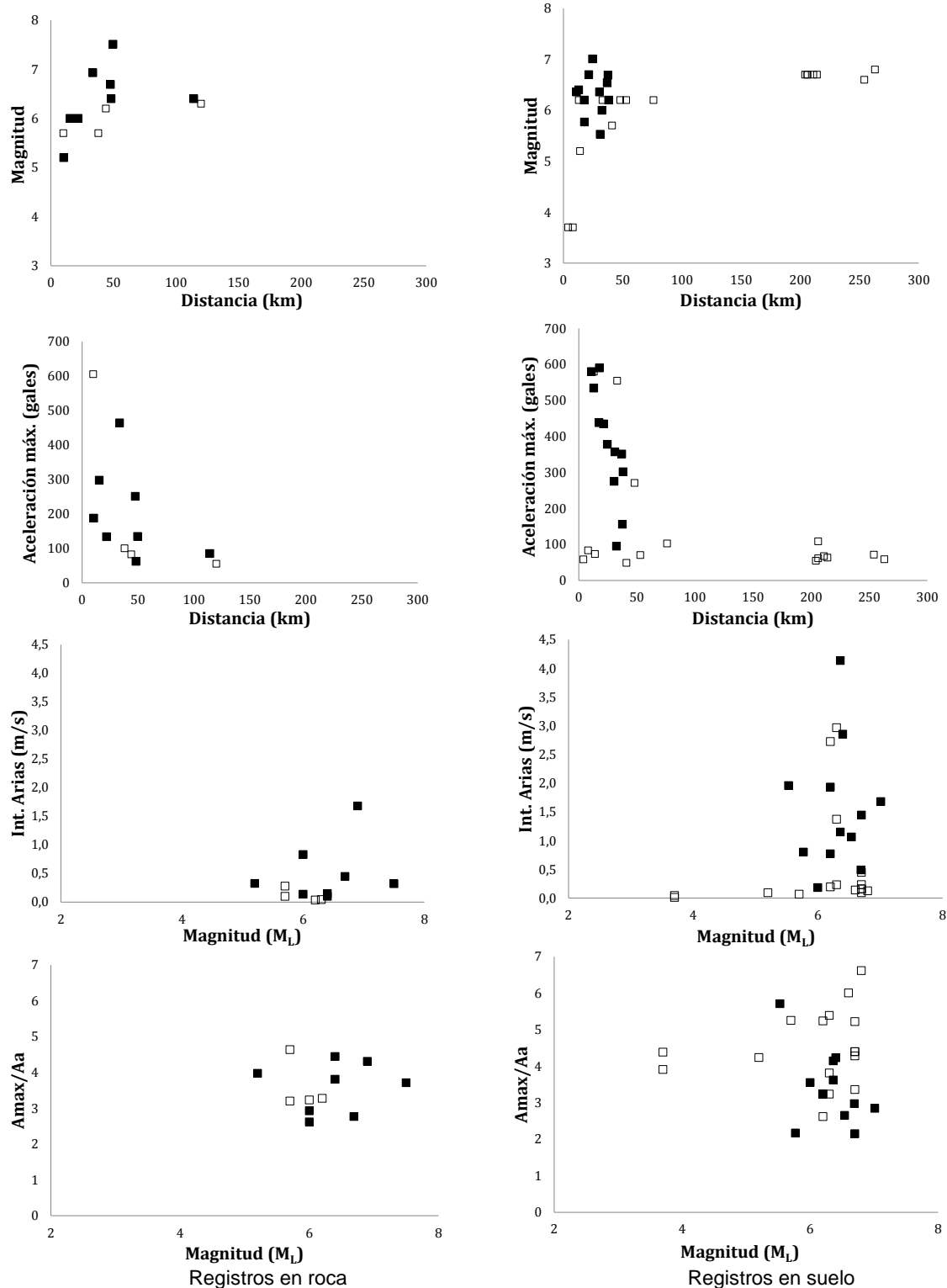


Figura 5.1 Sismos nacionales y de ambientes tectónicos similares que cumplen los requisitos de A.2.7.1(c) para señales individuales. El punto abierto representa sismos nacionales y el punto cerrado representa sismos de ambientes tectónicos similares.

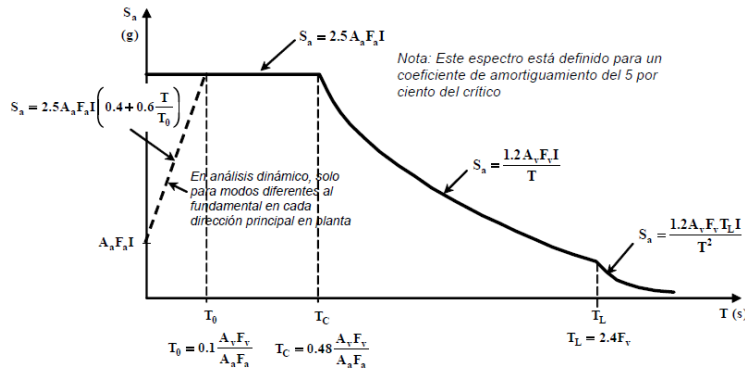


Figura 5.2 Espectro de diseño definido en el reglamento NSR-10.

El espectro de aceleración permite encontrar el valor de la aceleración que representa la acción sísmica para un periodo estructural dado, y corresponde a la ordenada espectral para dicho periodo. Este valor de aceleración no tiene asociado un escenario sísmico, el cual se define como mínimo con los parámetros de magnitud y distancia, y, adicionalmente con los parámetros de movimiento fuerte: profundidad focal, tipo de falla, directividad, etc. Lo anterior implica que a pesar de que el ingeniero conozca el valor de aceleración esperado, no tiene el conocimiento de que condiciones puedan generar un movimiento del terreno que produzca dicha aceleración y, por lo tanto, no tiene la información inicial necesaria para realizar de manera rigurosa el proceso de selección de acelerogramas.

En el proceso de realización de un estudio de amenaza sísmica probabilístico como es el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 2009), se permite realizar la desagregación de la amenaza. Teniendo en cuenta que el método probabilista de amenaza sísmica suma las contribuciones de los pares M-d para obtener como resultado un valor final de aceleración que tiene una probabilidad determinada de ser excedida en un periodo de tiempo, en la desagregación, la amenaza para un periodo de retorno dado y en un periodo específico se divide en grupos de magnitud y distancia. Posteriormente, la contribución relativa a la amenaza de cada grupo es calculada por la división de la probabilidad de excedencia de cada grupo por la probabilidad de excedencia de todos los grupos (Chen y Scawthorn, 2003).

Este procedimiento no lo puede hacer el usuario del reglamento, sino desde el momento en que se realiza el estudio de amenaza. Sería muy útil para la selección de los acelerogramas contar con los resultados de la desagregación, pues se tendrían pares de magnitud-distancia (M-d) a partir de los cuales se podría iniciar la búsqueda de los acelerogramas para usar en el procedimiento de análisis dinámico consistente en evaluaciones contra el tiempo. En el caso de Medellín se tiene el estudio de microzonificación sísmica (que debe ser actualizado según el reglamento NSR-10) y los resultados de la desagregación de la misma, donde se obtiene que los pares de magnitud y distancia que más aportan a la amenaza son de  $M_L=6,5$  con un intervalo de distancias definido entre 10 – 30 km.

Bommer y Acevedo (2004) mencionan que: “en vista del grado de aproximación en la especificación de acciones sísmicas en códigos de diseño sísmico, sería factible presentar simplemente, en forma tabular, los pares magnitud-distancia definiendo los escenarios sísmicos de control para cada zona sísmica. Una extensión útil a esto sería que el código proveyera una lista de registros adecuados que correspondan a estos

escenarios”, lo cual sería la forma más adecuada para direccionar este proceso de selección de señales. En la sección A.2.7.1.c se mencionan los requisitos de periodo que deben cumplir el promedio de los espectros de respuesta de los acelerogramas, donde se menciona que “el promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados, en el rango comprendido entre  $0.2T$  y  $1.5T$ , no debe ser menor que las ordenadas espectrales en el mismo rango de periodos para el movimiento esperado del terreno definido en A.2.6”.

Al exigir que las ordenadas espectrales del promedio de las señales no sea menor que el espectro objetivo, que es un espectro de amenaza uniforme (ver 2.3), se pretende que el promedio de registros reales correspondientes a un fenómeno físico de la naturaleza supere las ordenadas espectrales en un rango exigente ( $0,2T - 1,5T$ ) de una envolvente utilizada como representación de la amenaza sísmica que tiene en cuenta las características de una amplia gama de espectros que se pueden presentar en la zona de estudio como se observa en la Figura 5.3. Esto hace que el promedio de los espectros deba cumplir con aceleraciones en periodos que los espectros de respuesta reales no contienen.

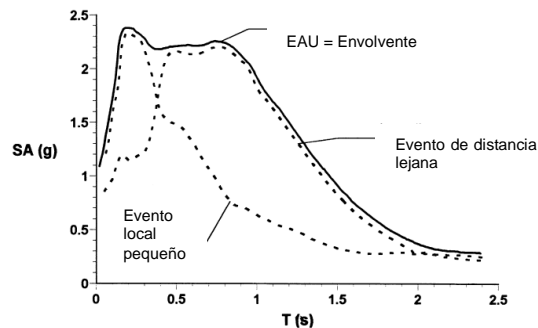


Figura 5.3 Ilustración esquemática del espectro de amenaza uniforme (EAU) como envolvente de espectros de fuentes sísmicas individuales (Bommer *et al.*, 2000b).

Para ilustrar las diferencias en la forma espectral entre los espectros de respuesta de acelerogramas reales con el espectro de diseño, se normalizaron tres espectros de la base de datos recopilada con respecto a la aceleración pico efectiva de cada uno como se muestra en la Figura 5.4. De esta forma se puede apreciar claramente que los contenidos frecuenciales (o su inverso el periodo) son muy diferentes como para hacer que los espectros superen el espectro de diseño en rangos de periodo amplios.

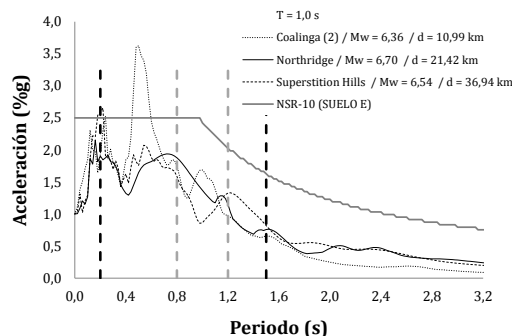


Figura 5.4 Espectros de respuesta normalizados con respecto a su aceleración pico efectiva

Como se puede observar en la Figura 5.5, el rango de periodos en los que el promedio de los espectros de respuesta deben superar las ordenadas del espectro de diseño aumenta

significativamente a medida que el periodo ( $T$ ) varía desde 0,2 s a 2 s. De este modo, mientras que para un periodo de 0,2 s esta ventana de periodos equivale a 0,26 s, para un periodo de 2 s es igual a 2,6 s. Una consecuencia de la exigencia en este requisito, se da en que el promedio de los tres espectros supera el espectro objetivo (100%NSR-10) ampliamente en la mayoría de ordenadas espectrales en el rango de periodos  $0,2T - 2T$  (Figura 5.6). En esta figura se presenta el promedio de las tres señales seleccionadas para un periodo  $T = 1,0$  s y un perfil de suelo tipo E (presentada en 3.3.1).

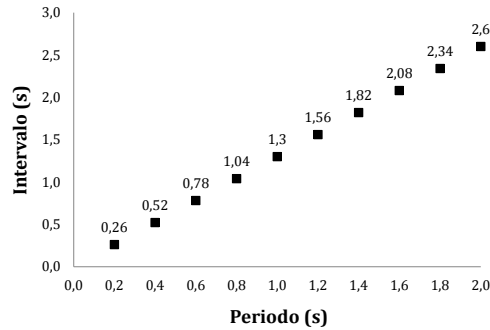


Figura 5.5 Intervalo de tiempo para cada periodo del rango  $[0,2T - 1,5T]$  en el que el promedio de los espectros de respuesta deben superar las ordenadas espectrales del espectro de diseño.

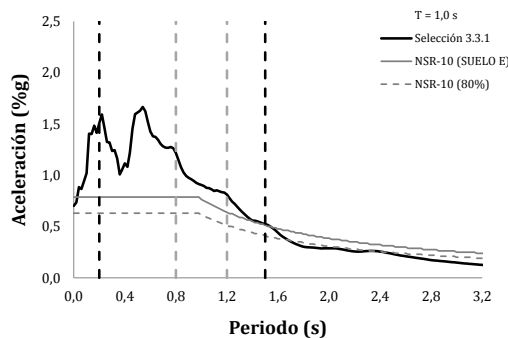


Figura 5.6 Promedios de espectros seleccionados en 3.3.1 para el perfil de suelo tipo E

Otro aspecto que hace exigentes los requisitos presentados en A.2.7.1.c para el promedio de los espectros de respuesta es mantener constantes las ordenadas espectrales del espectro de diseño en el rango de periodos  $T = 0$  y  $T_0$  (periodo de vibración donde inicia la zona de aceleraciones constantes), ya que obliga a utilizar factores de escala más altos debido a que en periodos bajos los espectros de respuesta tienen ordenadas espectrales bajas. Este comportamiento se puede observar en las tablas 3.16 a 3.20. Este requisito, además de ser exigente, no es consistente con el fenómeno físico ya que la aceleración inicial de un espectro de respuesta corresponde a la aceleración pico efectiva que en el caso del espectro de diseño inicia en  $2,5A_aF_aI$ . En la Figura 5.6 se muestra que en los periodos iniciales, los espectros tienen un comportamiento ascendente, lo cual el reglamento representa de una manera similar para modos de vibración diferentes al fundamental (Figura 5.2) siendo consistente con el fenómeno físico.

## 5.2.2 DISCUSIÓN DE LOS REQUISITOS EXIGIDOS EN DIFERENTES CÓDIGOS

En Tabla 5.3 se presentan los requisitos establecidos en diferentes códigos de diseño con el fin de establecer diferencias con el reglamento NSR-10. La tabla indica el número de acelerogramas necesario para el análisis y los requisitos exigidos por cada norma, tanto

para cada señal individual como para el grupo de señales. Se buscó tener claridad en las posibles diferencias que se puedan tener con las otras normas en cuanto al procesamiento requerido de los espectros de los acelerogramas.

Mediante la comparación se encontraron diferencias en cuanto al procesamiento requerido de los espectros de los acelerogramas. En el requisito concerniente a los espectros individuales algunos códigos requieren que los espectros se acerquen o superen un valor de referencia (Argentina, Europa). El código argentino requiere además que las áreas del espectro objetivo y el del acelerograma sean iguales en el rango de periodos 0,05 s y el periodo de la estructura, y que las aceleraciones del espectro del acelerograma no sean menores que el 70% del espectro objetivo, a diferencia del reglamento colombiano que exige superar el 80% del espectro objetivo en un rango de periodos establecido (0,2T - 1,5T) y no hace comparación de áreas. El código neozelandés especifica que los espectros de respuesta deben ser escalados por el factor  $k_1$  para igualar las ordenadas del espectro objetivo en el rango de periodos 0,4T a 1,3T (donde T es el mayor periodo traslacional de la estructura en la dirección de estudio y  $T \geq 0,4$  s) y además especifica el rango de valores para dicho factor de escala ( $0,33 < k_1 < 3,0$ ), lo cual no se presenta en el reglamento colombiano.

En la selección de señales se encontró que el factor  $F_1$  (por medio del cual se garantiza que los espectros de respuesta individuales tengan ordenadas espectrales mayores al 80% de las ordenadas del espectro objetivo en el rango de periodos 0,8T - 1,2T) se encuentra en el rango  $1,0 < F_1 < 2,5$ , lo cual es consistente con los criterios presentados en el código neozelandés en cuanto a espectros individuales.

En cuanto al promedio de los espectros las diferencias son amplias en cuanto a intervalos de evaluación y el valor de aceleración que debería superar dicho promedio. En E.E.U.U. (SEAOC Blue Book) exige un valor de aceleración más exigente para el mismo rango de periodos del reglamento colombiano; por otra parte, en Europa el requisito en cuanto a ordenadas espectrales es menos exigente que los demás códigos al exigir que sea el 90% del espectro objetivo lo que debe igualar el espectro de respuesta analizado, con la diferencia del rango de periodos que es más exigente que los demás 0,2T<sub>1</sub> a 2T<sub>1</sub> (donde T<sub>1</sub> es el periodo fundamental de la estructura en la dirección en la cual el acelerograma será aplicado). El código ASCE (E.E.U.U.) presenta el mismo requisito para el promedio de espectros de respuesta que el reglamento colombiano y el código neozelandés indica que los espectros deben ser escalados por el factor  $k_2$  en el rango de periodos 0,4T a 1,3T (donde T es el mayor periodo traslacional de la estructura en la dirección de estudio y  $T \geq 0,4$  s) y establece los rangos de valores que debe tener este factor ( $1,0 < k_2 < 1,3$ ).

En cuanto a promedio de espectros de respuesta se encontró que el factor  $F_2$  (por medio del cual se garantiza que las ordenadas espectrales del promedio de los espectros de respuesta no son menores al 100% del espectro objetivo en el rango de periodos 0,2T - 1,5T) se encuentra en el rango de periodos  $1,0 < F_2 < 2,2$ , lo cual difiere de los requisitos presentados en el código neozelandés. Se debe tener en cuenta que en los requisitos del código colombiano el segundo factor de escala ( $F_2$ ) influye en el promedio de los espectros de respuesta, mientras que en el código neozelandés se busca que al menos un registro de la familia de espectros tenga un mayor contenido de energía que el espectro objetivo al ser escalado por  $k_2$ .

Tabla 5.3 Requisitos de diferentes códigos que incluyen el análisis dinámico consistente en evaluaciones contra el tiempo

País	Año	Número	Requisito señal individual	Requisito grupo de señales
Argentina	1991	-	La aceleración máxima de los acelerogramas será por lo menos igual al producto $\gamma_d * a_s$ . $\gamma_d$ es el coeficiente de riesgo y $a_s$ es la ordenada al origen del espectro de pseudoaceleraciones.	En el rango de periodos 0,05 s y el periodo de la estructura, el espectro del acelerograma debe tener la misma área que el espectro de diseño objetivo escalado por $\gamma_d$ . Las ordenadas del espectro del acelerograma no puede ser menor al 70% del espectro de diseño amplificado por $\gamma_d$
Australia	1993	-	Los acelerogramas deben ser representativos de las condiciones sísmicas. Los espectros de respuesta o la combinaciones de éstos se deben aproximar el espectro objetivo	-
Colombia	2010	3 / 7 <sup>+</sup>	Los espectros individuales escalados no deben ser menores al 80% del espectro de diseño en el intervalo 0,8T y 1,2T (donde T es el periodo de vibración fundamental inelástico esperado de la estructura en la dirección bajo estudio)	El promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados no debe ser menor al 100% del espectro de diseño en el intervalo 0,2T – 1,5T
Costa Rica	2002	3	-	El promedio de los espectros de los acelerogramas se debe aproximar a los valores del coeficiente sísmico C (coeficiente utilizado para la determinación de las fuerzas sísmicas)
E.E.U.U. (ASCE)	2010	3 (2) **	-	El promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados no debe ser menor al 100% del espectro de diseño en el intervalo 0,2T – 1,5T (donde T es el período de vibración fundamental inelástico esperado de la estructura en la dirección bajo estudio)
E.E.U.U. (Seaac Blue Book)	1999	3 (2) **	La raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada par de componentes no debe ser menor que 1,4 veces el espectro de diseño con un 5% de amortiguamiento para periodos desde 0,2T a 1,5T	-
Europa	2004	3	Es conveniente que el promedio de los acelerogramas en el periodo T = 0 s no sea menor que $a_g * S$ (Donde $a_g$ es la aceleración pico efectiva y S es el factor del suelo)	Es conveniente que las ordenadas espectrales del promedio de los espectros no sea menor al 90% del espectro de respuesta elástico con un 5% de amortiguamiento en el intervalo 0,2T <sub>1</sub> y 2T <sub>1</sub> (donde T <sub>1</sub> es el periodo fundamental de la estructura en la dirección en la cual el acelerograma será aplicado)
México	2004	4	Las intensidades deben ser compatibles con los criterios presentados en el reglamento	-
Nueva Zelanda	2004	3 (2) **	Se deben escalar los espectros por el factor $k_1$ (factor de escala del registro) hasta alcanzar el espectro objetivo en el rango de periodos de interés (0,4T a 1,3T). El factor $k_1$ debe estar en el rango $0.33 < k_1 < 3.0$	Se deben escalar los registros por el factor de escala $k_2$ (factor de escala de familia) con el fin de asegurar que en el rango de periodos de interés (0,4T a 1,3T) al menos un registro supera en contenido de energía el espectro objetivo. El factor $k_2$ debe estar en el rango $1 < k_2 < 1,3$
Perú	2006	5	Los registros deberán normalizarse de manera que la aceleración máxima corresponda al valor máximo esperado en el sitio	-

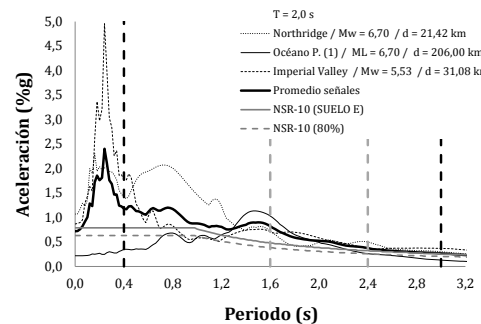
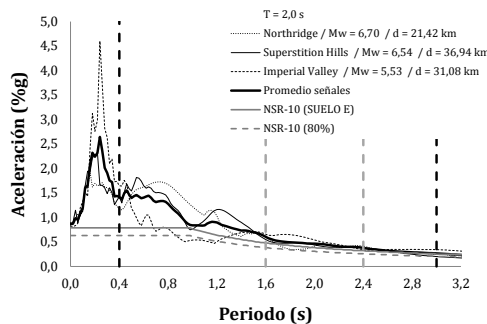
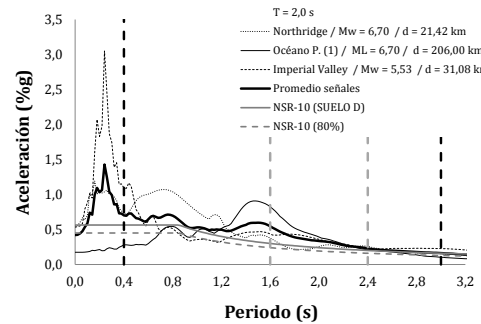
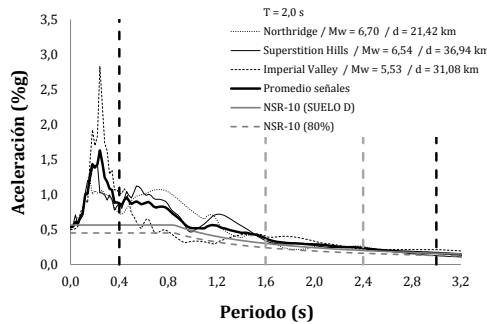
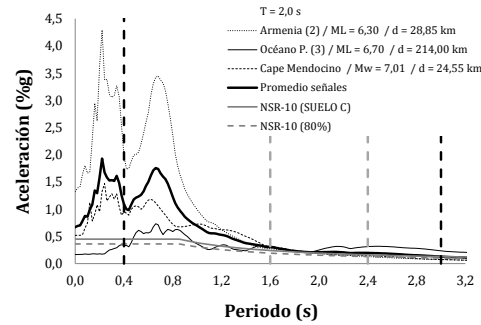
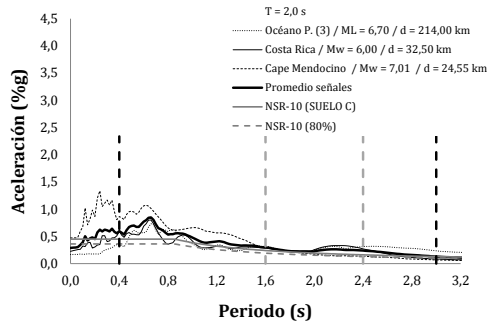
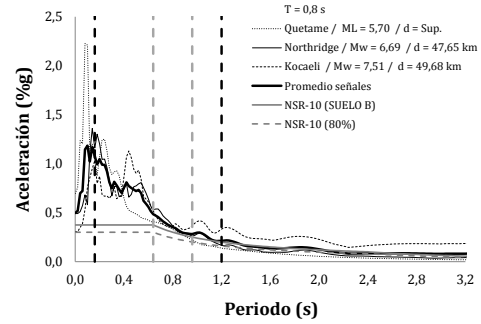
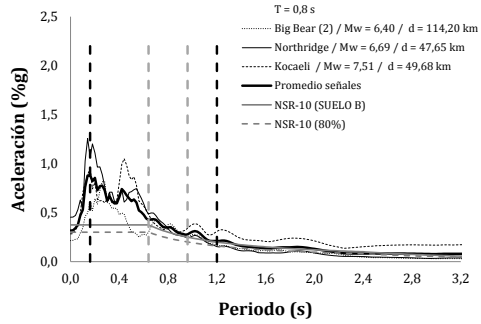
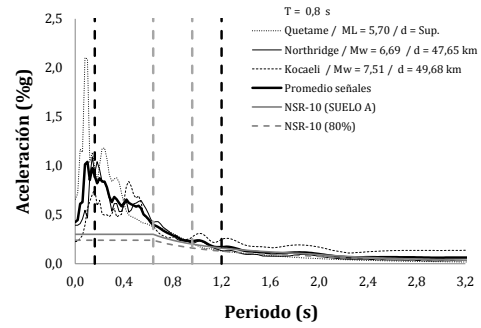
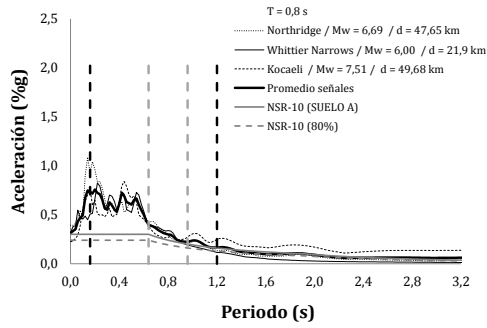
\*\* Se utilizan tres grupos de acelerogramas, cada uno con un par de componentes.

+ Se utilizan como mínimo tres acelerogramas para tomar la envolvente de los resultados del análisis y siete para tomar el promedio de los resultados.

### 5.3 COMPARACIÓN ENTRE SELECCIONES DE SEÑALES

Debido a que la mayoría de los acelerogramas registrados en el país presentan valores bajos de aceleración con respecto a los valores del espectro de diseño del reglamento NSR-10, en la mayoría de los grupos de señales seleccionados no hay registros colombianos, como se mostró en la selección del numeral 3.3.1. En la sección 3.3.2 se realizó una selección de señales con el requisito de que al menos un acelerograma perteneciera a un sismo colombiano. Esta última selección se realizó puesto que un acelerograma registrado en el país es representativo de las condiciones sísmicas colombianas.

Al comparar los resultados de ambas selecciones, en general se obtuvo que la selección de señales que no tiene como requisito incluir sismos colombianos (3.3.1) generó señales de mejor calidad al tener aceleraciones menores y con menos dispersión entre ellas. Esta tendencia de no tener sismos colombianos en la selección está correlacionada con las bajas aceleraciones de los sismos acelerogramas colombianos, la poca cantidad de señales con la que se contó, la poca cantidad de esos sismos que corresponden al nivel de amenaza esperado para un periodo de retorno de 475 años. Esto se puede observar en la Figura 5.7, en donde se comparan gráficamente los grupos de señales obtenidos bajo los dos criterios mencionados.



Selección 3.3.1

Selección 3.3.2

Figura 5.7 Comparación de promedios de espectros seleccionados en 3.3.1 y 3.3.2 para todos los perfiles de suelo.



## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó la selección de señales para su utilización en procedimientos de análisis dinámico consistentes en evaluaciones contra el tiempo para la ciudad de Medellín, siguiendo los requisitos presentados en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, para los espectros de respuesta de acelerogramas individuales y el promedio de los mismos como se indica en el capítulo A.2.7 del reglamento.

Para este proceso de selección se realizó una recopilación inicial de acelerogramas cuya aceleración máxima tuviera un valor cercano o mayor al 5% de la gravedad para formar una base de datos preliminar que pudiera ser analizada con respecto a lo presentado en la NSR-10. Por medio de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) se recopilaron 44 acelerogramas y cuatro (4) por medio de la universidad EAFIT, para un total de 48 acelerogramas correspondientes a sismos registrados en el país; de estos 48 acelerogramas que conformaron la base de datos preliminar, 34 se registraron en suelo y 14 en roca.

Para la base de datos preliminar (48 registros) se realizaron las verificaciones requeridas en A.2.7.1.c para espectros de acelerogramas individuales, que menciona que el 80% de las ordenadas espectrales de los espectros de respuesta comparadas con el espectro objetivo (NSR-10) no deben ser menores en el rango de periodos comprendido entre  $0,8T - 1,2T$ , donde  $T$  es el período de vibración fundamental inelástico esperado de la estructura en la dirección bajo estudio. El espectro objetivo corresponde a los espectros definidos por la NSR-10 para la ciudad de Medellín en los diferentes perfiles de suelo definidos en el reglamento (Tipo A, B, C, D, y E). Con el fin de abarcar una amplia gama de estructuras, el periodo de evaluación se tomó en el intervalo  $0,2 \text{ s} - 2 \text{ s}$  (con incrementos de  $0,2 \text{ s}$ ) para un total de diez periodos estructurales evaluados.

De esta primera verificación se encontró que la información disponible en el país es escasa y que los registros disponibles en Colombia no están clasificados por perfiles de suelo como lo presenta el reglamento NSR-10, sino que la clasificación se da como “roca” y “suelo”. Por lo anterior, fue necesario realizar la verificación entre los perfiles de suelo tipo A y B con los sismos clasificados como “roca”, y los perfiles tipo C, D y E con los sismos clasificados como “suelo”. Luego de esta comparación se obtuvo que para los perfiles de suelo tipo A y B, solo cuatro (4) espectros cumplen con lo estipulado en el reglamento y para los suelos tipo C, D y E, solo cumplen 16 espectros.

Debido a que los requisitos del reglamento NSR-10 indican que se debe contar con un mínimo de tres (3) acelerogramas para el periodo en análisis, se observó que la información obtenida de la primera verificación no es suficiente para la realización del análisis dinámico en el rango de periodos establecido  $[0,2 \text{ s} - 2 \text{ s}]$  como se puede observar en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3, y fue necesario complementar la información disponible (20 acelerogramas en total, cuatro acelerogramas en roca y 16 en suelo) con acelerogramas de sismos con “magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar” como se menciona en el reglamento NSR-10.

En total se complementó la información disponible en el país con 20 acelerogramas de ambientes tectónicos similares que igualmente cumplen los requisitos exigidos por el

reglamento NSR-10 para espectros de acelerogramas individuales, de los cuales ocho acelerogramas fueron utilizados en los perfiles de suelo tipo A y B, tres en perfil de suelo tipo C y nueve para los perfiles de suelo tipo D y E.

Para verificar que los acelerogramas seleccionados podían ser comparados con los acelerogramas colombianos, se realizó un análisis de algunos parámetros sísmicos de los acelerogramas. Se encontró que la intensidad de Arias de la mayoría de los sismos registrados por la RNAC corresponde a valores bajos de energía debido que las magnitudes de los sismos nacionales no son altas, mientras que los sismos seleccionados de ambientes tectónicos similares presentaron valores más altos (un comportamiento esperado debido a sus magnitudes altas). Como se puede observar en la Figura 5.1, en roca, para sismos nacionales se obtuvieron valores de intensidad de Arias en el rango [0-0,3 m/s] y para los sismos de ambientes tectónicos similares de [0-2,0 m/s], mientras que en suelo, para los sismos nacionales y sismos de ambientes tectónicos similares se obtuvieron valores de intensidad de Arias en el rango [0-3,0 m/s]. Para los sismos nacionales en suelo se observó una similitud con los sismos de ambientes tectónicos similares, mientras que para los sismos en roca no se observó esta similitud al contar con pocos acelerogramas.

En cuanto a la relación  $A_{m\acute{a}x}/A_a$  (donde  $A_{m\acute{a}x}$  corresponde a la aceleración espectral máxima y  $A_a$  la aceleración pico efectiva) se obtuvo para los sismos nacionales y de ambientes tectónicos similares un rango de [2-5] para roca y de [2-7] para suelo como se puede observar en la Figura 5.1. En cuanto a esta comparación se encontró una similitud importante entre los sismos nacionales y de ambientes tectónicos similares.

También se observó que los sismos en roca y suelo que cumplen con el requisito del reglamento en cuanto a señales individuales (requisito A.2.7.1.c) tienden a ubicarse en un rango de magnitudes entre 5 y 7 principalmente, a excepción del sismo de Quetame con magnitud  $M_L=3,7$  que presenta aceleraciones importantes debido a la corta distancia a la que fue registrado. Los sismos de la base de datos con magnitudes menores a 5 no cumplen con los requisitos de aceleración requeridos por el reglamento para la ciudad de Medellín (excluyendo a Quetame) aunque para ciudades con una amenaza sísmica menor podrían ser de utilidad. En cuanto a distancia se observa que en su mayoría, tanto para roca como suelo, los sismos se ubican en un rango de 0 a 50 km.

Seguido a la comparación de los acelerogramas se procedió a realizar la selección de los grupos de tres acelerogramas para los diferentes perfiles de suelo en el rango de periodos [0,2 s – 2 s]. Para realizar esta selección se generó una herramienta computacional que permitiera optimizar el proceso de selección de modo que las señales fueran escaladas por el menor factor de escala posible cumpliendo los requisitos normativos, obteniendo grupos de tres señales cuyo promedio estuviera lo más cercano posible del espectro objetivo del reglamento y que presentaran la menor dispersión entre ellas. Se debe tener en cuenta que el mejor grupo de señales no lo define los menores factores de escala, puesto que esto no asegura que el espectro de respuesta en todas las ordenas consideradas sea cercano al espectro objetivo y además exista poca dispersión entre los espectros de respuesta de cada combinación (ver criterios de selección en el capítulo 4).

Para el escalamiento de las señales se eligió un factor de escala máximo de 2,5 ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtenido por medio de la multiplicación de los factores  $F_1$  (por medio del cual se garantiza que los espectros de respuesta individuales tengan ordenadas espectrales mayores al 80% de las ordenadas del espectro objetivo en el rango de periodos 0,8T – 1,2T) y  $F_2$  (por

medio del cual se garantiza que las ordenadas espectrales del promedio de los espectros de respuesta no son menores al 100% del espectro objetivo en el rango de periodos  $0,2T - 2T$ ).

Con respecto a los factores de escala a ser utilizados en el proceso de selección de los acelerogramas, el reglamento no proporciona los límites que deberían tener estos con el fin de procesar los espectros para que no se tienda a modificar las características propias del fenómeno físico subyacente en cada espectro de respuesta. Con respecto al tema de escalamiento de señales el reglamento colombiano presenta un atraso si se compara con códigos como el neozelandés que indica los límites de los factores de escalamiento permitidos en el procesamiento de las señales; debido a que este código indica que se deben tener en cuenta dos factores de escalamiento  $k_1$  (espectros individuales) y  $k_2$  (factor de escala de familia).

En los grupos de señales seleccionados en este proyecto para los diferentes tipos de suelo (A, B, C, D y E), el factor  $F_1$  se ubicó en el rango  $1,0 < F_1 < 2,5$  y el factor  $F_2$  en el rango  $1,0 < F_2 < 2,2$ . Se debe tener en cuenta que la multiplicación de  $F_1$  y  $F_2$  no superó el valor máximo de escalamiento ( $F_{\text{máx}} = 2,5$ ). Con respecto a espectros de respuesta individuales el rango obtenido para el factor  $F_1$  es consistente con los criterios presentados en el código neozelandés para el factor  $k_1$  ( $0,33 < k_1 < 3,0$ ). Sin embargo, el rango obtenido para el factor  $F_2$  difiere de los requisitos presentados en el código neozelandés para el factor  $k_2$  ( $1,0 < k_2 < 1,3$ ). Se debe tener en cuenta que en los requisitos del código colombiano el segundo factor de escala ( $F_2$ ) influye en el promedio de los espectros de respuesta, mientras que en el código neozelandés se busca que al menos un registro de la familia de espectros tenga un mayor contenido de energía que el espectro objetivo al ser escalado por  $k_2$ .

En total, con los 20 acelerogramas nacionales (cuatro acelerogramas en roca y 16 en suelo) y los 20 acelerogramas de ambientes tectónicos similares se obtuvieron 50 combinaciones en grupos de tres (3) acelerogramas, que corresponden a los cinco perfiles de suelo A, B, C, D y E y los diez periodos del rango 0,2 s a 2 s (ver 3.3.1). De estas 50 combinaciones se observó que los sismos colombianos incluidos en los grupos no eran una cantidad importante debido a que las aceleraciones son bajas y el número de acelerogramas para cada periodo de evaluación (rango de periodos 0,2 s a 2 s) no era significativo; tampoco se obtuvieron combinaciones conformadas únicamente con sismos colombianos debido a la poca cantidad y calidad de los mismos.

Si bien, ninguna combinación de las 50 obtenidas fue conformada únicamente por sismos colombianos, en el perfil de suelo tipo C la mayoría de combinaciones incluyen al menos un sismo colombiano, lo que corresponde a un comportamiento anómalo teniendo en cuenta que en los perfiles de suelo tipo D y E no ocurrió algo similar. Esto se debió a que los sismos en suelo de la base de datos (34 en total) fueron analizados para los perfiles de suelo tipo C, D y E, y al ser el perfil de suelo C el espectro objetivo que presenta menores aceleraciones permitió incluir más sismos que los otros perfiles de suelo. Por medio de este comportamiento en la selección se evidenció la necesidad de tener registros acelerográficos en los que la clasificación del suelo corresponda a la presentada en el reglamento NSR-10 para tener la capacidad de hacer análisis más detallados y no generales como ocurrió en este caso en particular.

Debido a los resultados obtenidos en la primera selección de señales donde la mayoría de sismos correspondían a los seleccionados en ambientes tectónicos similares (ver 3.3.1),

se procedió a generar combinaciones alternas que como requisito inicial fuera tener al menos un sismo colombiano (ver 3.2.2); por medio de este requisito se contó con la ventaja que las combinaciones tendían a representar de una forma apropiada el ambiente tectónico nacional y, con la desventaja de presentar una mayor dispersión entre señales y un promedio más alejado del espectro objetivo del reglamento como se puede observar en la Figura 5.7. Para determinar las ventajas o desventajas de contar con acelerogramas del país en los grupos de tres acelerogramas seleccionados es recomendable realizar análisis de estructuras que permitan tener un punto de vista cuantitativo relativo a este tema.

Un aspecto que hace exigentes los requisitos presentados en A.2.7.1.c para los espectros de respuesta es mantener constantes las ordenadas espectrales del espectro de diseño en el rango de periodos  $T = 0$  y  $T_0$  (donde  $T_0$  es el periodo de vibración donde inicia la zona de aceleraciones constantes). Al exigir que las ordenadas espectrales de los espectros de respuesta no sean menores que las del espectro objetivo, que es un espectro de amenaza uniforme (EAU), se pretende que el promedio de registros reales correspondientes a un fenómeno físico de la naturaleza supere las ordenadas espectrales en un rango de periodos de una envolvente utilizada como representación de la amenaza sísmica que tiene en cuenta las características de una amplia gama de espectros que se pueden presentar en la zona de estudio como se observa en la Figura 5.3. Esto hace que el promedio de los espectros deba cumplir con aceleraciones en periodos que los espectros de respuesta reales (al ser sismos de fuente lejana o cercana) no contienen debido a sus características particulares.

Debido a que el espectro del reglamento NSR-10 (en todos los perfiles de suelo) inicia en una meseta cuya ordenada espectral corresponde a 2,5 veces la aceleración pico efectiva ( $2,5A_a$ ) mientras que espectros de respuesta inician en el valor de la aceleración pico efectiva, esto influye directamente en el valor de los factores de escalamiento de los espectros, generando un aumento significativo en los periodos iniciales (ver 5.2.1). Esta diferencia genera que los espectros de respuesta deban ser escalados con factores de escala altos para igualar sus ordenadas espectrales con las ordenadas espectrales del espectro objetivo.

En cuanto al requisito para el promedio de espectros en el cual se debe superar el espectro objetivo en el rango de periodos del intervalo  $0,2T-1,5T$ , se observó que el tamaño de este intervalo presenta un comportamiento directamente proporcional con respecto al periodo estructural como se observa en la Figura 5.5, que obliga al promedio de los espectros de respuesta a igualar o superar las ordenadas espectrales del espectro objetivo en ventanas de periodo amplias (ver 5.2.1). Teniendo en cuenta que las características de los espectros de respuesta varían dependiendo si el sismo se clasifica como de fuente cercana o lejana y el espectro objetivo es un espectro de amenaza uniforme que representa una envolvente de diferentes escenarios sísmicos, se presentan casos en que las ventanas de periodo amplias obligan a que el promedio de espectros que corresponden a sismos de fuente cercana deban superar al espectro objetivo en ordenadas espectrales que corresponden a sismos de fuente lejana.

Baker (2011) presenta una metodología diferente a la presentada en el reglamento NSR-10. A partir del espectro objetivo (que es un EAU) se busca para un periodo específico (el periodo fundamental) que el espectro del grupo de acelerogramas cumplan dicho valor de aceleración para el periodo seleccionado, pero para los demás periodos el espectro de respuesta debe ajustarse con un espectro de respuesta promedio condicionado, el cual

tiene valores de aceleración un poco menor que el EAU, porque decae a amplitudes relativamente bajas en periodos que difieren ampliamente del periodo específico seleccionado inicialmente. El espectro promedio condicionado presenta características similares a los espectros de eventos sísmicos reales.

Otros requisitos que no están definidos claramente en el reglamento NSR-10 que permitirían uniformizar y agilizar el proceso de selección de acelerogramas son los correspondientes a la definición de escenarios sísmicos y los límites para los factores de escala. Con respecto a la definición de escenarios sísmicos el reglamento da una descripción general de las características de los movimientos del terreno de los cuales se obtienen los acelerogramas seleccionados, mas no indica información como los pares magnitud – distancia (M-d). En la metodología del análisis probabilística de la amenaza sísmica en la cual se basan el reglamento y el estudio de microzonificación local, los pares M-d pueden ser obtenidos por medio de la desagregación sísmica. Este procedimiento no lo puede hacer el usuario del reglamento, sino que debe ser hecho desde el momento en que se realiza el estudio de amenaza. Sería muy útil para la selección de los acelerogramas contar con los resultados de la desagregación, pues se tendrían pares de magnitud-distancia (M-d) a partir de los cuales se podría iniciar la búsqueda de los acelerogramas para usar en el procedimiento de análisis dinámico consistente en evaluaciones contra el tiempo. En el caso de Medellín se tiene el estudio de microzonificación sísmica (que debe ser actualizado según el reglamento NSR-10) y los resultados de la desagregación de la misma, donde se obtiene que los pares de magnitud y distancia que más aportan a la amenaza son de  $M_L=6,5$  con un intervalo de distancias definido entre 10 – 30 km.

Con respecto a uno de los requisitos mencionados en el Euro-código, se exige que el promedio de las señales tenga un valor de aceleración mayor a  $a_g * S$  en el periodo  $T=0$  (Donde  $a_g$  es la aceleración pico efectiva y S es el factor del suelo). Con respecto a los promedios obtenidos en esta selección de señales y los requisitos normativos colombianos, se obtuvo que se supera el valor establecido de  $A_a * I$  (para los diferentes tipo de suelo) en todos los promedios de los grupo de señales en el periodo  $T=0$ .

Si bien, el reglamento colombiano debe complementar la definición de los requisitos para la selección de acelerogramas para realizar procedimientos de análisis dinámico consistentes en evaluaciones contra el tiempo, es evidente el avance con respecto a otros códigos sísmicos que no los tienen contemplados. Esto se evidencia principalmente en los rangos de periodos establecidos que deben cumplir los espectros de respuesta individuales y el promedio de los mismos con respecto al espectro objetivo, que son similares a los establecidos en códigos sísmicos como el de Nueva Zelanda y E.E.U.U.



## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamson, N.A. "State of the practice of seismic hazard evaluation," Proceedings of GeoEng, 2000, Melbourne, 19-24 November 2000, vol. 1, 659-685.
- Acevedo A. B. (2012). Criterios sismológicos para seleccionar acelerogramas reales de la red nacional de acelerógrafos de Colombia para su uso en análisis dinámicos, Revista EIA, 17, 57 – 70.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009. Bogotá: AIS, 2009.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10. Bogotá: AIS, 2010.
- Baker, J. (2011). "Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection," Journal of Structural Engineering, Vol. 137, No. 3, March 1, pp. 322 – 331.
- Bommer JJ, Scott SG, Sarma SK. Time-history representation of seismic hazard. Proceedings Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, Paris, 1998.
- Bommer, J. J. and A. B. Acevedo, 2004. "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis," Journal of Earthquake Engineering, (8), 1 – 50.
- Bommer, J.J y D.M. Boore. Engineering Seismology, un capítulo de la Encyclopedia of Geology, 499-515, 2004
- Bommer, J.J. Acevedo, A.B. and Douglas, J. [2003a] "The selection and scaling of real earthquake accelerograms for use in seismic design and assessment," Proceedings of ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit, American Concrete Institute.
- Bommer, J.J. and Ruggeri, C. 2002. The specification of acceleration time-histories in seismic design codes," European Earthquake Engineering 16(1), 3 - 17.
- Bommer, J.J., Scott, S.G., Sarma, S.K., 2000. Hazard - consistent earthquake scenarios. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19: pp. 219– 231.
- Botero, J. C. Dinámica de estructuras: Sistemas de un grado de libertad. Medellín: Fondo editorial universidad EAFIT, 2011 p.
- Chen, W., Scawthorn, C. 2003. Earthquake Engineering Handbook. CRC Press pp. 1447.
- Chopra, A. K., (1995). Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ, USA, 729 p.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2005); Censo General 2005 - República de Colombia, Bogotá.
- García, L. E., Dinámica Estructural aplicada al diseño sísmico, Bogotá, Universidad de los Andes.
- Kramer SL. Geotechnical earthquake engineering. Englewood Cliffs,NJ: Prentice-Hall, 1996.
- Krinitzsky E., 1995. Deterministic versus probabilistic seismic hazard analysis for critical structures. Engineering Geology 40: pp. 1 – 7.
- Mora H., Kellogg J., Freymueller J., Dixon T. and Leffler L., 1995. Crustal deformation along the wide North Andean plate boundary – CASA (Central and South American) GPS measurements, XXI General Assembly, IUGG, Boulder, USA, A44, Abstract, 94 pp.

Paz, M. 1991. Structural Dynamics – Theory and Computation, 3<sup>rd</sup>. Edition, Van Nostrand – Reinhold, New York, NY, USA, 626.

Romeo, R., Prestininzi, A., 2000. “Probabilistic versus deterministic seismic hazard analysis: an integrated approach for siting problems,” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20, pp. 75 – 84.

# ANEXOS

Se adjuntan tres anexos al presente informe. El Anexo A es el manual de usuario de la herramienta computacional desarrollada. El Anexo B es un anexo digital (que se entregan en medio magnético, CD, adjunto al informe escrito) que corresponde a las señales seleccionadas en las 50 combinaciones obtenidas en esta investigación para los diferentes tipo de suelo (ver capítulo 3). El último anexo, Anexo C, corresponde al código de la herramienta computacional desarrollada en este proyecto (ver capítulo 4) y al igual que el anexo dos se entrega en medio digital.

## ANEXO A: MANUAL DE USUARIO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Para la selección de señales aptas para la realización de análisis dinámicos se desarrolló una herramienta computacional que permitiera procesar de forma ágil los espectros de los acelerogramas pre-seleccionados para cada periodo estructural en el intervalo [0,2 s – 2 s]. Esta herramienta sigue un algoritmo de siete pasos (Figura 4.1) para seleccionar combinaciones de tres espectros que cumplan los requisitos presentados en A.2.7.1.c para señales individuales (rango 0,8T – 1,2T) y el promedio de los tres espectros (rango 0,2T – 1,5T). Para ilustrar el proceso del algoritmo se presenta un ejemplo con cinco señales correspondiente a la selección de señales para el periodo estructural  $T = 1,0$  s y un perfil de suelo tipo A.

### DESCRIPCIÓN

Se generó una herramienta computacional en lenguaje Matlab con el fin de seleccionar la mejor combinación de señales para cada periodo del intervalo de estudio [0,2 s – 2 s] entre las señales recopiladas de la base de datos nacional y del ambiente tectónico similar para la realización de análisis dinámicos. El programa, a partir de un grupo de señales, genera grupos de tres acelerogramas que cumplan con los requisitos presentados en A.2.7.1.c en cuanto a señales individuales y el promedio de estas. Por medio de un factor de peso calculado a partir de dos criterios definidos para este proyecto se selecciona la mejor combinación de señales y los factores de escalamiento asociados a esta combinación.

A continuación se presenta el diagrama de flujo de la herramienta desarrollada, el procedimiento de ingreso de datos al programa y un ejemplo ilustrativo.

### DIAGRAMA DE FLUJO

En la Figura 4.1 se presenta el algoritmo que sigue el programa para seleccionar la mejor combinación de señales que cumplen los requisitos de A.2.7.1.c. A continuación se describe la nomenclatura usada en el diagrama de flujo mencionado.

## Nomenclatura

- $i$  = número de espectros de acelerogramas ingresados por el usuario.
- $F_{1i}$  = factor de escala para cumplir el requisito de espectros individuales en el rango  $0,8T - 1,2T$ .
- $F_{2i}$  = factor de escala para cumplir el requisito de promedio de espectros (3) en el rango  $0,2T - 1,5T$ .
- $j$  = número de combinación de espectros (grupos de tres acelerogramas).
- $k$  = combinaciones adicionales generadas para cada combinación  $j$  a partir del escalamiento de cada espectro de la combinación  $j$  por medio de los vectores  $[1 : F_{2i}]$ .
- $m$  = sumatoria de la resta de las ordenadas espectrales elevadas al cuadrado de la combinación  $k$  y el espectro objetivo (100%NSR-10) en el rango de periodos  $0,2T - 1,5T$ .
- $m_j$  = sumatoria de la resta de las ordenadas espectrales elevadas al cuadrado entre cada señal  $j$  de la combinación  $k$  y el espectro promedio en el rango de periodos  $0,2T - 1,5T$ .
- $Sa_{ERP}(T)$  = aceleración espectral del espectro de respuesta promedio (ERP) de la combinación  $k$  en el periodo  $T$ .
- $Sa_{ED}(T)$  = aceleración espectral del espectro de diseño (ED) en el periodo  $T$ .
- $Sa_{ERI}(T)$  = aceleración espectral del espectro de respuesta individual (ERI) de la combinación  $k$  en el periodo  $T$ .

## INGRESO DE INFORMACIÓN A LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

El ingreso de la información a la herramienta computacional se hace por medio de un archivo en formato xlsx que tiene la ventaja de ser un formato ampliamente utilizado y fácil de manejar. Este archivo de entrada de datos debe estar nombrado como "Input" para que sea reconocido por el código de la herramienta computacional. El archivo "Input" tiene dos pestañas nombradas como "Señal (es)" y "Espectro", en las que se ingresa la información de los espectros de las señales y el espectro de diseño al 100%, respectivamente.

El ingreso de la información de los espectros de los acelerogramas al archivo "Input" se debe hacer en la pestaña "Señal (es)" como se indica en la secuencia de pasos siguiente.

1. **Celda B9:** Se ingresa el valor numérico del periodo de interés  $T$ , que es el período de vibración fundamental inelástico esperado de la estructura en la dirección bajo estudio. Ejemplo:  $T = 1$  s. Ver Figura 0.1.

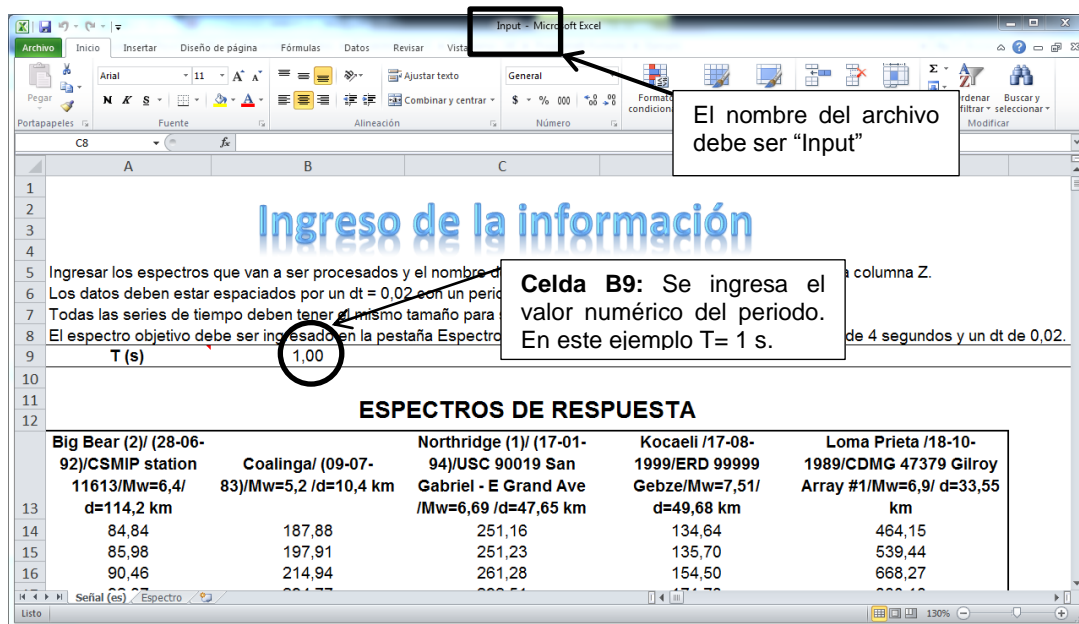


Figura 0.1 Ingreso del periodo al archivo de entrada "Input" en la pestaña "Señal (es)"

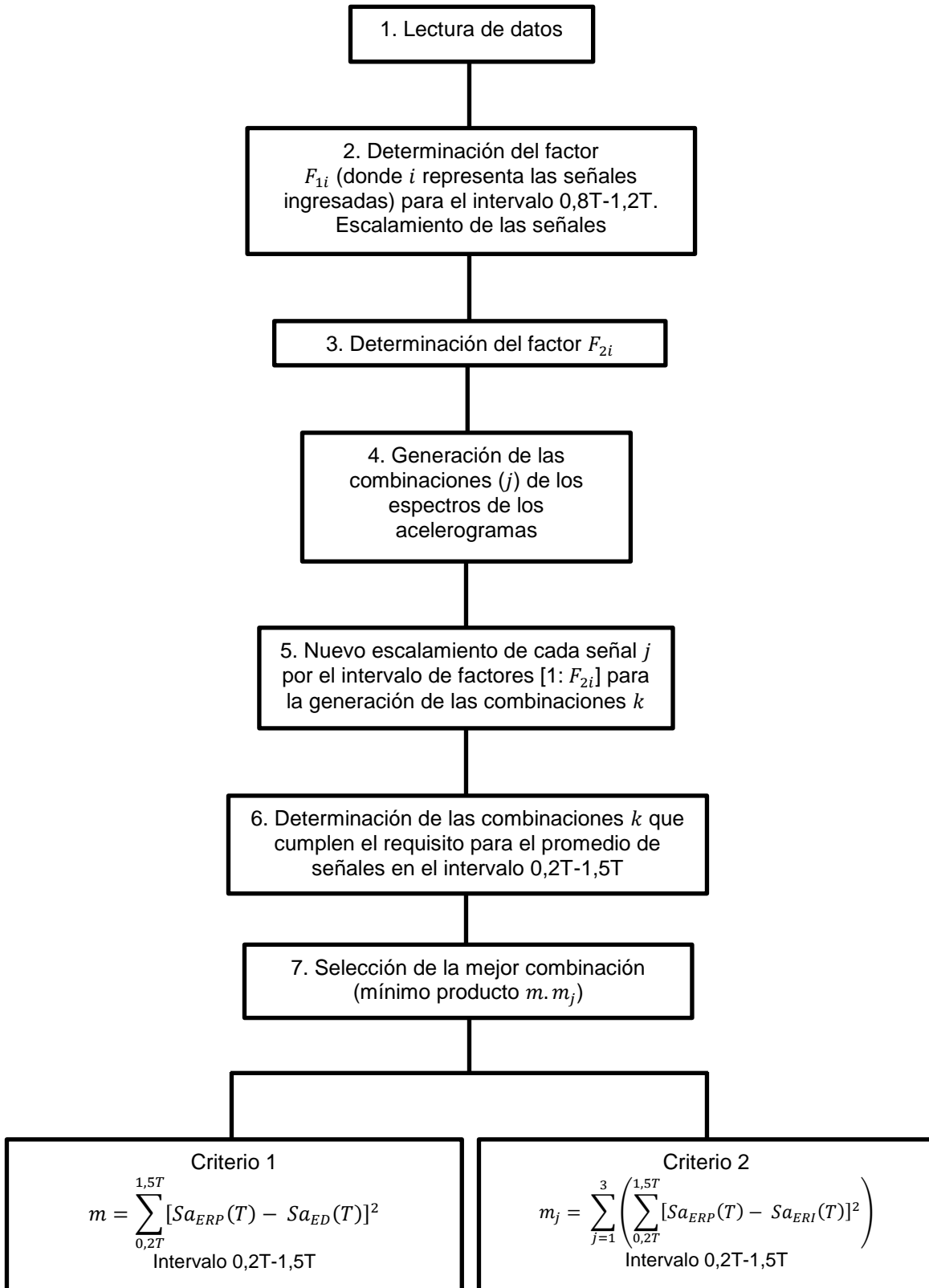


Figura 0.2 Diagrama de flujo de la herramienta computacional

2. **Celdas A13 - Z13:** Este es el rango permitido por el programa para ingresar la descripción de los sismos con los que ese desea trabajar, es decir, la información que permite identificar de forma sencilla el acelerograma con el que se está trabajando. Ejemplo: “Big Bear (2) / (28-06-92) / CSMIP station 11613 / Mw=6,40 / d=114,20 km”. Ver Figura 0.3.

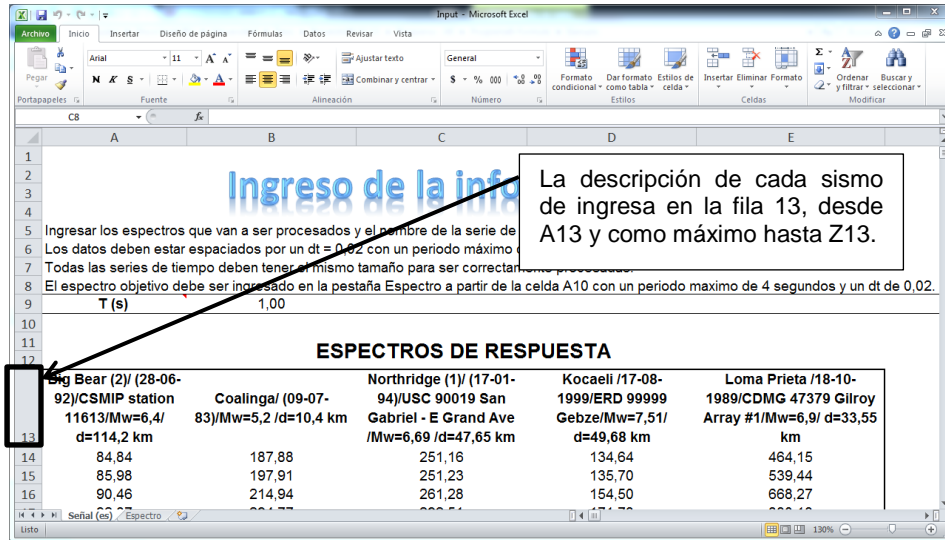


Figura 0.3 Ingreso de la descripción de los sismos al archivo de entrada “Input” en la pestaña “Señal (es)”

3. **Celdas A14 – Z14:** Este es el rango permitido por el programa para ingresar la información numérica de los espectros de los acelerogramas de las señales. Se deben ingresar a partir de las celdas ubicadas en la fila 14 del archivo hasta la fila 214. En total los espectros deben tener 201 datos organizados en una sola fila, para esto los espectros deben tener un incremento 0,02 s en un rango de periodos comprendido entre [0 s – 4 s]. Las unidades deber ser en  $\text{cm/s}^2$  (gal). Ver Figura 0.4.

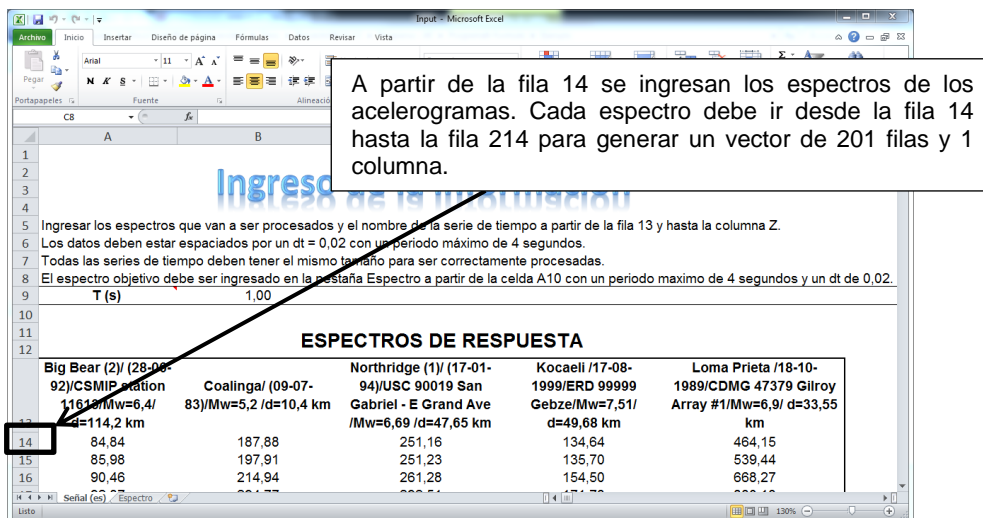


Figura 0.4 Ingreso de los espectros de los acelerogramas al archivo de entrada “Input” en la pestaña “Señal (es)”

El ingreso de la información del espectro de diseño al archivo “Input” se debe hacer en la pestaña “Espectro” como se indica a continuación.

1. **Celda A8:** En esta celda se ingresa la descripción del espectro de diseño como el tipo de suelo para identificarlo fácilmente. Ejemplo: “NSR-10 Tipo A”. Ver Figura 0.5.

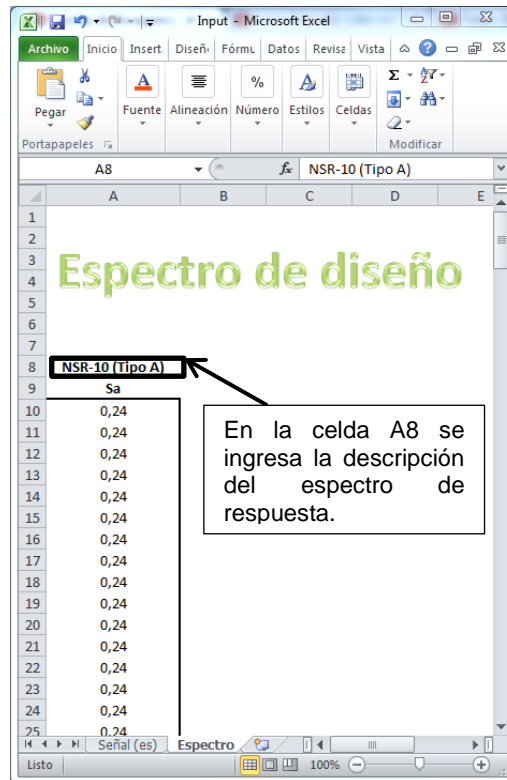


Figura 0.5 Ingreso de la descripción del espectro de diseño al archivo de entrada “Input” en la pestaña “Espectro”

2. En la celda A9 está la descripción de los valores de aceleración del espectro de diseño. Esta celda no debe ser modificada.
3. **Celda A10:** A partir de esta celda se ingresan los valores de aceleración (como una fracción de la aceleración de la gravedad) del espectro de diseño del perfil de suelo que se está evaluando como se muestra en la Figura 0.6. Este espectro debe tener un incremento de 0,02 para que sea comparable con los espectros de diseño ingresados en la pestaña “Señal (es)”. En total debe ser un vector de 201 filas y 1 columna. Ver Figura 0.6.

Luego de ingresar los datos al archivo “Input”, el siguiente paso es ejecutar la herramienta computacional. Para esto se debe tener el archivo “Input” en la misma carpeta como se muestra en la Figura 0.7 y se siguen los siguientes pasos:

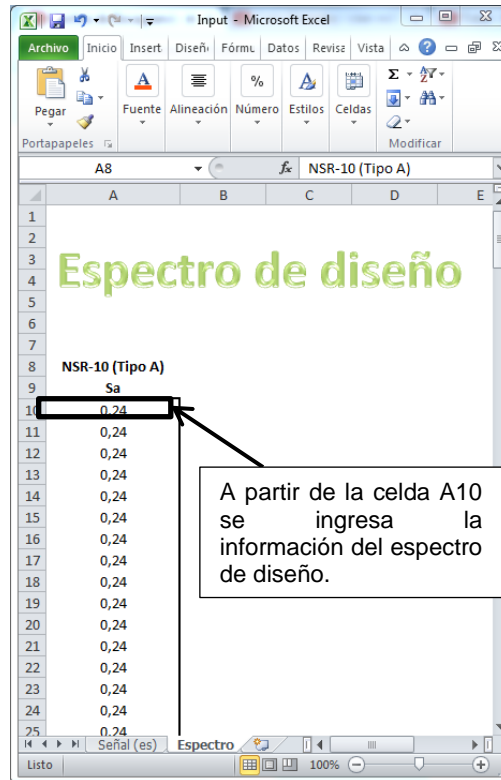


Figura 0.6 Ingreso de la descripción del espectro de diseño al archivo de entrada “Input” en la pestaña “Espectro”

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
AE	13/02/2014 05:42 a...	Archivo M	15 KB
AE1	13/02/2014 05:14 a...	Archivo M	2 KB
AE2	13/02/2014 05:18 a...	Archivo M	4 KB
AE3	13/02/2014 05:34 a...	Archivo M	4 KB
AE4	13/02/2014 05:36 a...	Archivo M	11 KB
AE31	13/02/2014 05:34 a...	Archivo M	2 KB
AE41	13/02/2014 05:29 a...	Archivo M	3 KB
AE42	13/02/2014 05:32 a...	Archivo M	5 KB
Input	09/02/2014 05:20 ...	Hoja de cálculo d...	214 KB

Figura 0.7 Ejecución de la herramienta computacional y ubicación del archivo “Input”

1. Se debe abrir el archivo AE.m (programa principal) pulsando doble clic sobre el icono del archivo.
2. Se debe ejecutar el programa pulsando el botón “Run” del programa Matlab como se indica en la Figura 0.8.

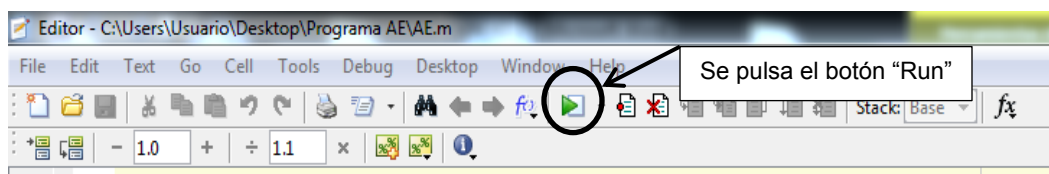


Figura 0.8 Ejecución de la herramienta computacional

3. Una vez el programa se ejecuta, genera un archivo en formato xlsx con el nombre "Selección". En la pestaña "Selección" de este archivo se encuentran las señales escaladas con su respectiva descripción como se presenta en la Figura 0.9.

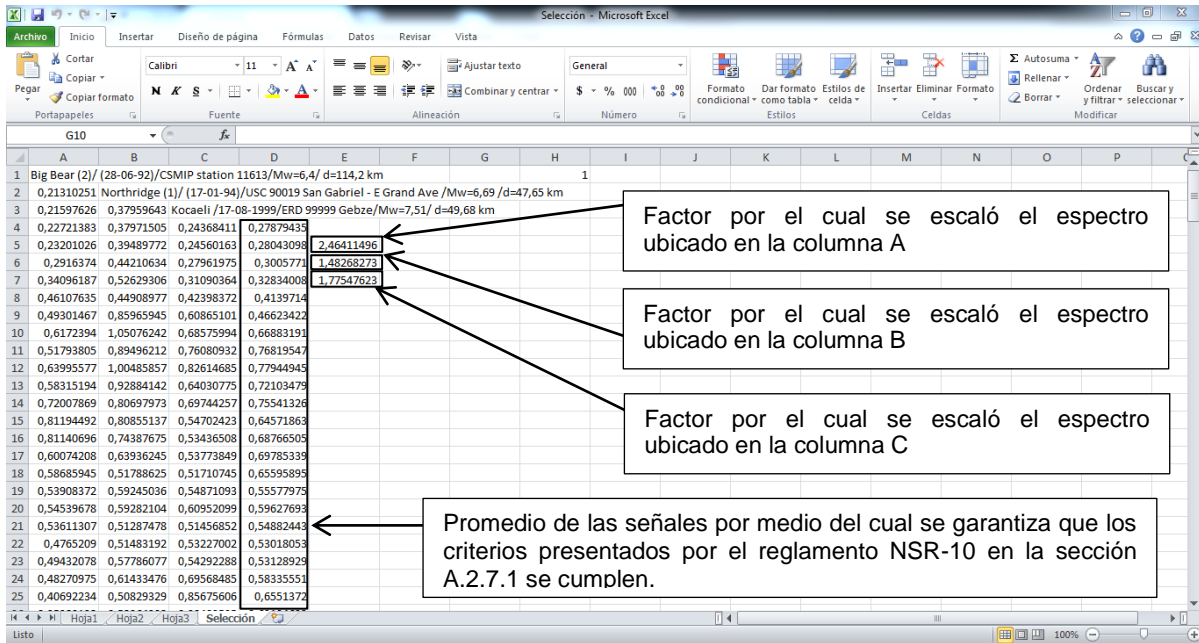


Figura 0.9 Archivo de salida "Selección"

En la Figura 0.9 se observa que en la salida de los datos, los valores de los factores de escala son entregados por el programa y en ningún momento es un dato de entrada para el usuario. Este valor tiene unos límites máximos y mínimos definidos en esta investigación, y se presentan en el capítulo 3.

Un ejemplo "paso a paso" de los cálculos de la herramienta computacional se presenta con detalle en el capítulo 4 de este documento.

## ANEXO B: BASE DE DATOS

El anexo dos es la base de datos de los sismos seleccionados en las 50 combinaciones seleccionadas en esta investigación teniendo en cuenta los diferentes tipo de suelo y los rangos de periodo establecidos para este fin (ver capítulo 3). Este anexo se adjunta en medio digital y la información se encuentra en la carpeta “Base de datos”.

## ANEXO C: HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

El anexo tres corresponde a la herramienta computacional. Se entrega en medio digital y se encuentra en la carpeta denominada "Programa AE". Consta de un programa principal, siete subrutinas y el archivo de entrada de datos.