



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL

COMPARACIÓN ENTRE ESPECTROS DE SITIO Y ESPECTROS DE DISEÑO
PARA LAS ZONAS SÍSMICAS IIIb, IIIc Y IIId DEL DISTRITO FEDERAL

TESINA

PARA OBTENER EL GRADO DE
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA CIVIL
(GEOTECNIA)

PRESENTA:

JOSÉ CARLOS GARCÍA TORRES

TUTOR:

DR. HÉCTOR RAÚL AGUILAR BECERRIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, SEPTIEMBRE 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

Recibí notificación para formar parte del jurado para el examen del alumno: JOSÉ CARLOS GARCÍA TORRES.

ESPECIALIZACIÓN EN GEOTECNIA PLAN 11-3156.

| | JURADO | FIRMA | FECHA |
|-------------|-----------------------------------|-------|-------------|
| PRESIDENTE: | M. EN I. AGUSTIN DEMENEGHI COLINA | | 9/sep/2011 |
| VOCAL: | DR. HÉCTOR RAÚL AGUILAR BECERRIL | | 26/sep/2011 |
| SECRETARIO: | M. EN I. FERNANDO MONROY MIRANDA | | 27/sep/2011 |
| SUPLENTE: | DR. RIGOBERTO RIVERA CONSTANTINO | | 8/sep/2011 |
| SUPLENTE: | ING. GERMAN LÓPEZ RINCÓN | | 8-sep-2011 |

A mi madre

*Por tu constante apoyo y por ser mi principal motivación
para poder lograr este objetivo.
Gracias por todo lo que has hecho por mí.*

José Carlos García Torres

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Ingeniería por la oportunidad de pertenecer a esta comunidad universitaria, de la cual me siento orgulloso.

A mi tutor Dr. Héctor Raúl Aguilar Becerril por el tiempo y apoyo proporcionados para la elaboración de este trabajo.

Al M. en I. Marco Antonio Macías Castillo por las enseñanzas y consejos brindados durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería.

A mis profesores de la Facultad de Ingeniería por su vocación, dedicación y por todo lo que aportaron a mi formación. Un agradecimiento especial al M. en I. Agustín Deméneghi Colina por sus valiosos conocimientos y comentarios aportados durante mis estudios.

A mi familia por su incondicional apoyo, constante motivación y estar conmigo en todo momento.

A todos mis amigos y compañeros que hicieron más agradable la realización de mis estudios.

ÍNDICE

| | PÁGINA |
|--|---------------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| I. ZONIFICACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL PARA FINES DE DISEÑO POR SISMO Y UBICACIÓN DE ESTACIONES ACCELEROMÉTRICAS | 6 |
| I.1 Zonificación del Distrito Federal para fines de Diseño por Sismo | 7 |
| I.2 La Red Acelerográfica de la Ciudad de México RACM | 9 |
| II. ESTACIONES ACCELEROMÉTRICAS SELECCIONADAS EN LAS ZONAS SÍSMICAS IIIb, IIIc y III d | 14 |
| II.1 Estaciones acelerométricas seleccionadas en las zonas sísmicas IIIb, IIIc y III d | 15 |
| III. MÉTODO β DE NEWMARK PARA EL CÁLCULO DE ESPECTROS DE RESPUESTA | 19 |
| III.1 Ecuación de Equilibrio Dinámico | 20 |
| III.2 Espectro de Respuesta | 23 |
| III.3 Método β de Newmark para el cálculo de Espectros de Respuesta | 27 |
| IV. CÁLCULO DE ESPECTROS DE RESPUESTA EN LAS ZONAS SÍSMICAS IIIb, IIIc Y III d | 29 |
| IV.1 Programa de computadora | 30 |
| IV.2 Cálculo de Espectros de Respuesta en las zonas sísmicas IIIb, IIIc y III d | 32 |
| V. DETERMINACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO CONFORME A LA NORMATIVIDAD SÍSMICA DEL DISTRITO FEDERAL | 38 |
| V.1 Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo | 39 |
| V.2 Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo | 41 |
| VI. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA Y ESPECTROS DE DISEÑO | 47 |
| VI.1 Comparación de los Espectros de Respuesta calculados y los Espectros de Diseño de las Normas para Diseño por Sismo | 48 |
| VI.2 Comparación de los Espectros de Respuesta calculados y los Espectros de Diseño del Apéndice A de las Normas para Diseño por Sismo | 52 |

| | |
|--|-----------|
| VII. CONCLUSIONES | 63 |
| ANEXOS | 65 |
| ANEXO 1. FORMATO DEL ARCHIVO ESTÁNDAR DE ACELERACIÓN | 66 |
| ANEXO 2. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA <i>EspectroR</i> PARA UN REGISTRO ACELEROMÉTRICO EN UN FORMATO ESTÁNDAR DE ACELERACIÓN | 70 |
| ANEXO 3. ADAPTACIÓN DEL PROGRAMA <i>EspectroR</i> Y EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA <i>EspectroRF</i> PARA UN REGISTRO ACELEROMÉTRICO EN UN FORMATO ESTÁNDAR DE ACELERACIÓN | 73 |
| REFERENCIAS | 77 |

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El riesgo sísmico en la ciudad de México fue analizado desde una perspectiva geotécnica por el Dr. Emilio Rosenblueth en la década de los años 90's (Rosenblueth y Ovando, 1990, 1991). Rosenblueth estableció que la sismicidad en el valle de México queda controlada por las siguientes principales fuentes (Hartmut, *et al*, 1991, Fig. 1).

Temblores locales. Se originan dentro de la cuenca o en sus inmediaciones. En el siglo XX se registraron sismos no destructivos de este tipo con magnitudes intermedias o bajas, pero posiblemente en el pasado hayan ocurrido otros más grandes. En años recientes han ocurrido varios sismos pequeños en las lomas del poniente de la ciudad de México.

Temblores originados en la placa Norteamericana. El gran temblor de 1912, originado en el graben de Acambay a unos 70 [km] al noroeste de la capital es uno de estos. Este graben sigue amenazando a la ciudad, aunque se ha estimado que el periodo de retorno de los macrosismos que origina es del orden de un milenio.

Temblores de subducción de la placa de Cocos bajo la de Norteamérica. Son los que mayores estragos han causado en la capital. Los temblores de Guerrero de 1909, 1957 y 1979 se originaron ahí, así como los de Michoacán de 1911 y los tristemente célebres de septiembre de 1985. Cerca de la placa de Rivera (Fig. 1) tuvieron lugar los temblores de Colima de 1932 y 2002, así como el de Manzanillo de 1995. El temblor de Manzanillo en 1932 es el de mayor magnitud que se haya registrado en nuestro país con $M=8.5$.

Temblores de la placa de Cocos. Se originan a profundidades intermedias, entre 50 y 100 [km] con magnitudes que disminuyen conforme se alejan del litoral. Han alcanzado magnitudes en la escala de Richter de 8.0 cerca de la costa y alrededor de 6.5 bajo la cuenca de México. Estos temblores ocurren por fallamiento normal en la placa de Cocos subducida bajo la placa continental. Los temblores del Golfo de México como los de Orizaba (o Cd. Serdán) de 1973 y el de Tehuacán de 1999 tienen este origen.

Los sismos que se originan en cada una de estas fuentes son diferentes y sus efectos se manifiestan de diferente manera a las zonas de lomas, transición y lacustres de la ciudad.

Los temblores de subducción son ricos en frecuencias bajas (periodos largos) mientras que los otros concentran su energía en frecuencias más altas (periodos cortos). Esto explica por qué los temblores de subducción son los que más afectan a la zona de las arcillas lacustres. Por otro lado, si se presentara otro en la falla de Acambay, por ejemplo, las zonas de terrenos firmes o las de transición podrían ser las más dañadas.

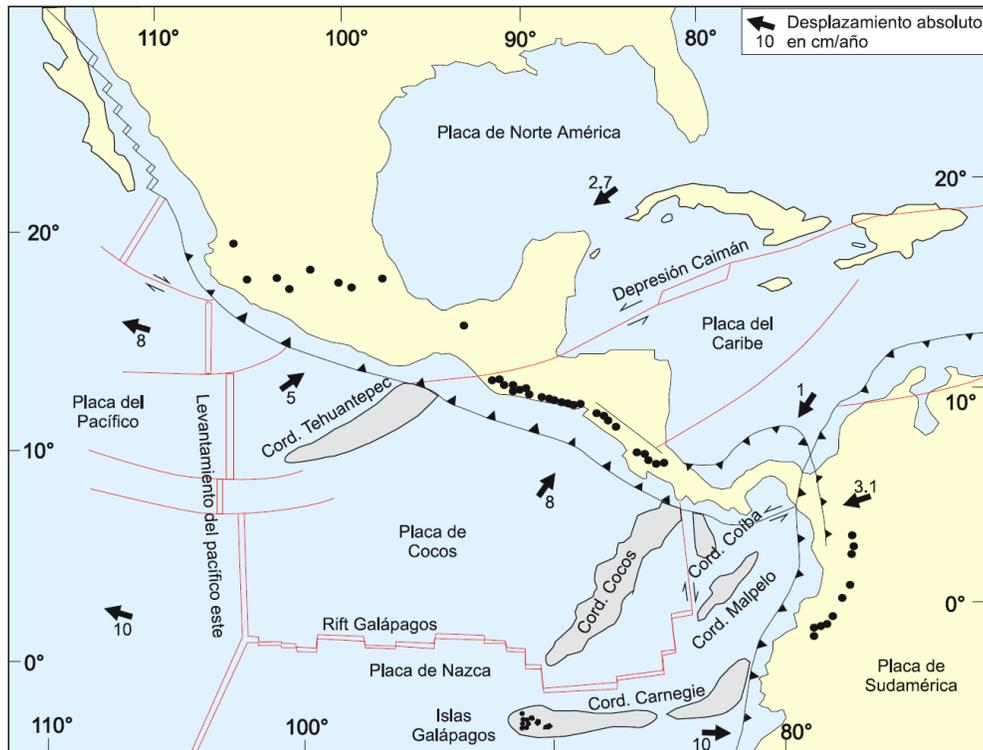


Figura 1 Sismo tectónica de la República Mexicana (ref 1)

Es bien sabido que hay una relación estrecha entre la intensidad sísmica en un sitio, las condiciones locales del subsuelo, la magnitud, la distancia epicentral y la naturaleza de las fuentes sísmicas. Todos estos aspectos han sido objeto de investigaciones cuya importancia volvió a evidenciarse después de los sismos de 1985. Algunas de las implicaciones prácticas de estas pesquisas se han reflejado en las Normas Técnicas Complementarias para el diseño Sísmico de Edificios. En particular, la zonificación sísmica del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (Fig. 2) ejemplifica cómo algunas de las investigaciones geotécnicas llevadas a cabo desde 1986 han incidido en la práctica de la ingeniería sísmica de nuestra ciudad. Los espectros de diseño para cada una de estas zonas toman en cuenta todas las fuentes que contribuyen al peligro sísmico y, asimismo, las condiciones geotécnicas particulares de cada una de ellas. Una importante aportación a la práctica ha sido la inclusión en estas normas de los mapas de iso-períodos naturales del terreno, obtenidos a partir del

registro de vibraciones ambientales (ruido ambiental), los cuales permiten conocer puntualmente las características dinámicas promedio del subsuelo del valle (Kobayashi *et al*, 1986 y Lermo *et al*, 1988).

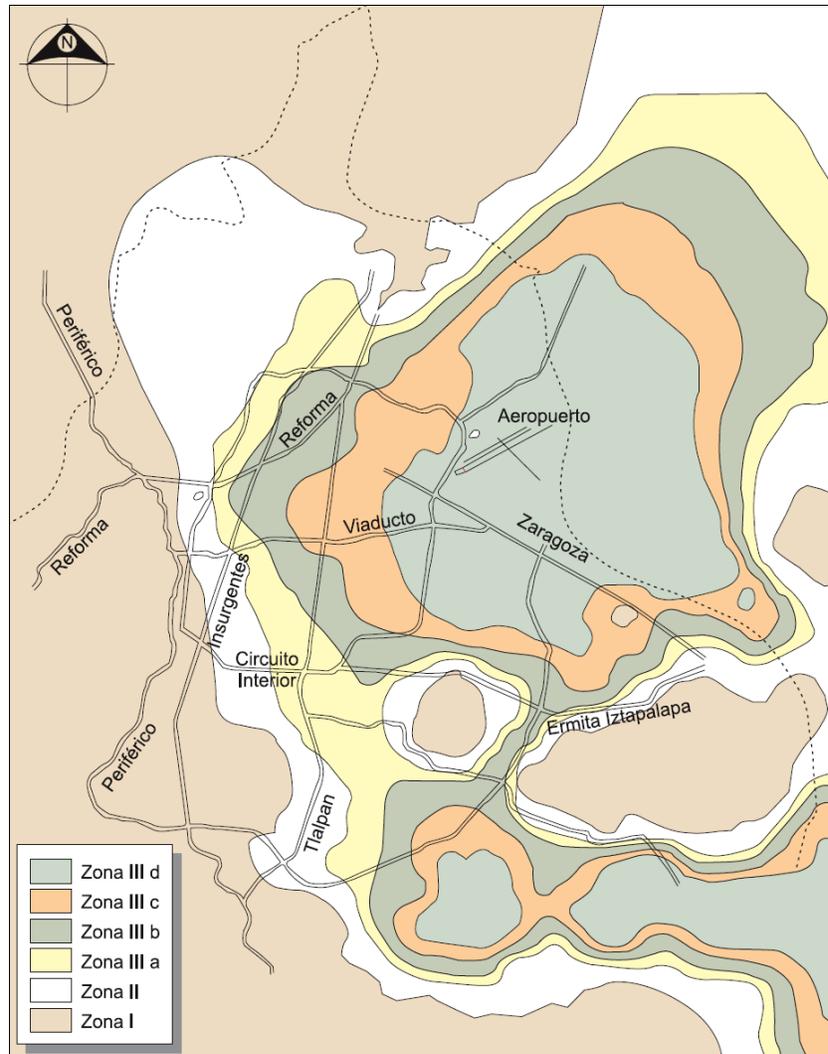


Figura 2 Propuesta de zonificación del D. F. para fines de diseño por sismo, propuesta del año 2001 (ref 1)

Sin duda, el factor que más influye en la intensidad sísmica local es el subsuelo. De ahí que los estudios sobre las características y propiedades dinámicas de las arcillas del valle de México sean tan importantes. Como en muchas otras áreas de la geotecnia, destacan en este campo los trabajos pioneros de Marsal y Mazari (1959) y de Zeevaert (1971). Posteriormente muchos otros investigadores han aportado su trabajo para avanzar en este tema. Una parte importante de este esfuerzo se refiere a estudios experimentales de campo y de laboratorio,

pero también se han afinado modelos analíticos para calcular la respuesta sísmica de los depósitos arcillosos de la cuenca.

El objetivo de este trabajo es calcular espectros de respuesta obtenidos de registros acelerométricos históricos, capturados en sitios ubicados en las zonas sísmicas IIIb, IIIc y III d del Distrito Federal, y compararlos con los espectros de diseño establecidos en las vigentes Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.

Se calcularán espectros de respuesta aplicando el método β de Newmark a partir del uso de registros acelerométricos históricos capturados en estaciones de la Red Acelerométrica del Valle de México. Los espectros se compararán con los espectros de diseño establecidos en las Normas para Diseño por Sismo. Adicionalmente, para cada sitio se comparará su espectro de respuesta con el espectro de diseño obtenido al aplicar el criterio fijado en el Apéndice A de la misma norma, a partir del conocimiento del periodo dominante de vibración del suelo.

En el capítulo I de este documento se describe la zonificación del Distrito Federal para fines de Diseño por Sismo, así como también la distribución de las estaciones acelerométricas con registros capturados durante el sismo del 25 de abril de 1989. La distribución de las estaciones e información más detallada de éstas correspondientes a las zonas sísmicas IIIb, IIIc y III d se presentan en el capítulo II. Posteriormente en el capítulo III se proporciona información elemental del Método β de Newmark para el cálculo de Espectros de respuesta partiendo del concepto de la ecuación de equilibrio dinámico. Se describe el programa utilizado para determinar los espectros de respuesta, así como los valores obtenidos en el capítulo IV. En el capítulo V se aborda la construcción de los espectros de diseño sísmico de acuerdo al criterio del cuerpo de las normas y con el Apéndice A. La comparación de los espectros de sitio y espectros de diseño se presenta en el capítulo VI, donde también se integran las observaciones para cada condición en estudio. Finalmente se incluyen las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I.

ZONIFICACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL PARA FINES DE DISEÑO POR SISMO Y UBICACIÓN DE ESTACIONES ACELEROMÉTRICAS

I. ZONIFICACIÓN DEL DISTRITO FEDERAL PARA FINES DE DISEÑO POR SISMO Y UBICACIÓN DE ESTACIONES ACCELEROMÉTRICAS

I.1 Zonificación del Distrito Federal para fines de Diseño por Sismo

Los Profesores Raúl J. Marsal y Marcos Mazari presentaron en su libro *El subsuelo de la Ciudad de México* (1959) la primera zonificación de los suelos del Valle. Una década después, en la Quinta Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Reséndiz *et al* (1970) actualizaron la información del subsuelo, incorporando los sondeos realizados en la práctica profesional por varias empresas geotécnicas. Posteriormente, en un simposio sobre El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, se volvió a actualizar esa información (Del Castillo, 1978). El plano de Marsal y Mazari se incorporó a las Normas Técnicas para el Diseño de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal desde hace varias décadas y los nuevos conocimientos sobre el subsuelo se han tomado en cuenta en las versiones posteriores. Los planos de zonificación han evolucionado abarcando áreas que en un principio no se incluían en el plano de Marsal y Mazari, en respuesta al crecimiento de la ciudad. La última versión del plano de zonas geotécnicas se incorporó a las Normas Técnicas durante el transcurso del año 2004 y entró en vigor en octubre de ese año (ref 1).

Como lo define el artículo 170 del Capítulo VIII del Título Sexto del vigente Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, para fines de Diseño y Construcción de Cimentaciones, el Distrito Federal se divide en tres zonas con las siguientes características generales:

- a) Zona I. Lomas, formada por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados;
- b) Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 [m] de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros; y
- c) Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente

por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 [m].

Para los efectos de Diseño por Sismo se consideran las zonas del Distrito Federal que fija el artículo 170 del Capítulo VIII del Título Sexto del vigente Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Adicionalmente, la zona III se ha dividido en cuatro subzonas (IIIa, IIIb, IIIc y IIId), según se indica en la Fig. I.1 (ref 3):

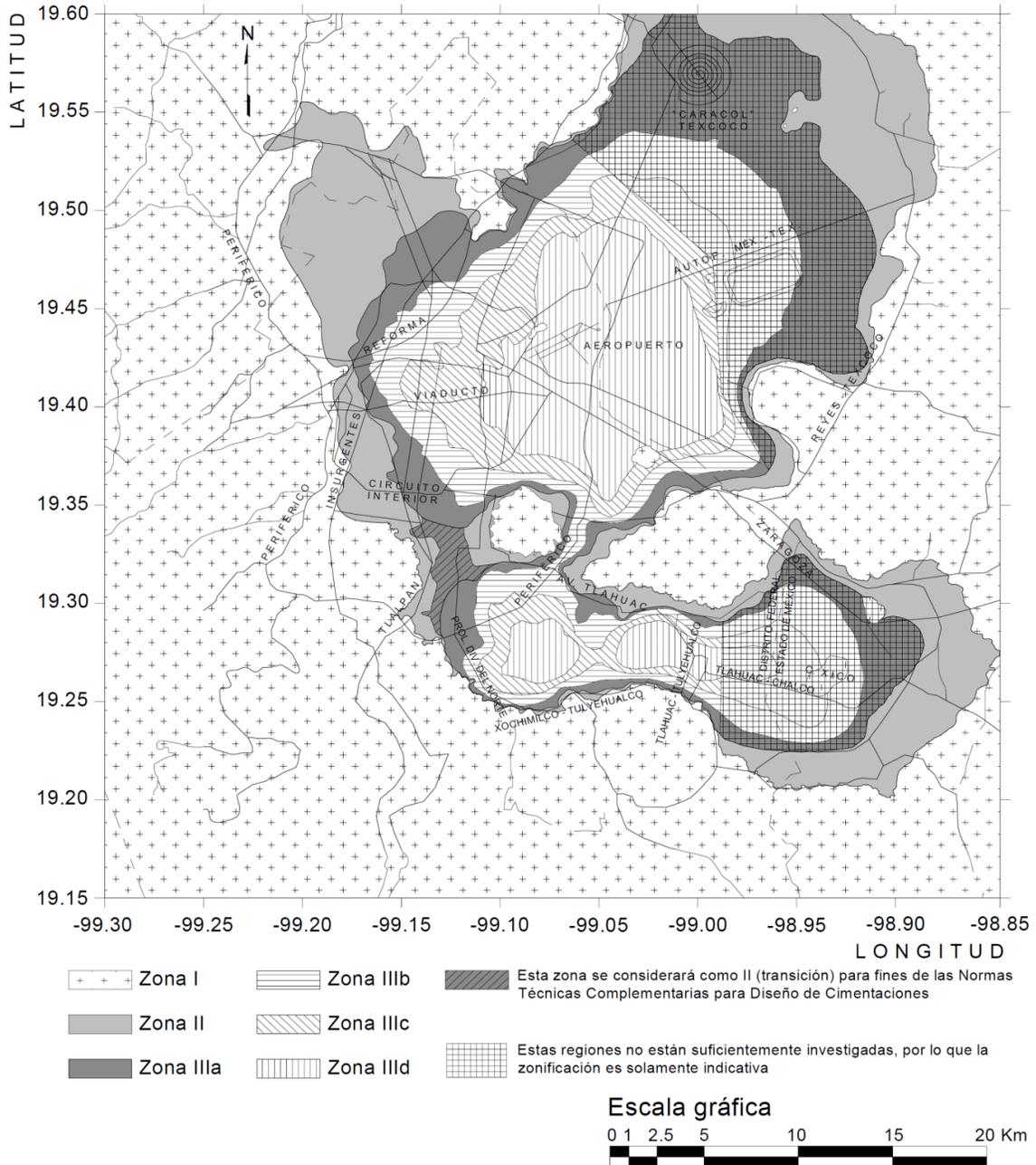


Figura I.1 Zonificación del D. F. para fines de Diseño por Sismo

I.2 La Red Acelerográfica de la Ciudad de México RACM

En enero de 1986, después de evaluar la magnitud del desastre que causaron los sismos de septiembre de 1985 en la ciudad de México, expertos en ingeniería sísmica y geofísica propusieron, ante el CONACyT, ejecutar diversas investigaciones básicas y desarrollos tecnológicos útiles para mitigar la vulnerabilidad de la zona urbana del valle de México, ante este peligro natural.

En 1987 el CIRES inició el desarrollo de la Red Acelerográfica de la ciudad de México, RACM, que cuenta con 78 aparatos: 29 equipos SSA-1 Kinometrics, instalados originalmente por la Fundación ICA (FICA), más 35 equipos DCA-333 Terratech y 7 sensores subterráneos. En 1997, el 100% de los equipos Terra Technology fueron renovados con el sistema de registro digital RAD-851; desarrollado en el CIRES para asegurar la función de este recurso tecnológico y dar continuidad a su servicio de medición acelerométrica.

Con el sistema RAD-851, en 1997, el CIRES logró renovar la totalidad de los acelerógrafos DCA333, después de que en 1995 fueron descontinuados por el fabricante, dando de ésta forma continuidad al registro de los sismos que eventualmente afectan al valle de México.

Los acelerógrafos de la RACM, renovados con el sistema RAD-851, registran la información en una tarjeta tipo PCMCIA con capacidad para almacenar hasta 34 minutos de datos. Cuentan con memoria de pre-evento ajustable para registrar hasta 58 segundos antes del sismo y post-evento de hasta 100 segundos posteriores al momento en que la aceleración del sismo sea menor que el nivel de disparo seleccionado.

Para recuperar en el sitio los acelerogramas registrados, se utiliza una computadora portátil, misma que permite revisar y/o cambiar los parámetros de operación y verificar la calibración de los sensores; algunas de estas estaciones cuentan con línea telefónica y son interrogadas vía módem.

Los acelerogramas sísmicos, se difunden para promover actividades de investigación sobre factores de diseño y riesgo sísmico en el DF; mediante la publicación de boletines, presentaciones en congresos y seminarios, así como en el grupo de instituciones que contribuyen en la conservación y actualización de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes y que a la fecha ha editado, con el apoyo de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS), los volúmenes 1 y 2 en formato CD-ROM. Estos discos reúnen los resultados de las diferentes instituciones mexicanas dedicadas al registro de la información sísmica y presentan un total de 13,545 acelerogramas obtenidos en el período 1960 a 1999.

Adicionalmente, el CIRES difunde un boletín en menos de 24 horas a la Secretaría de Obras y Servicios (SOS) del Gobierno del Distrito Federal (GDF), después de haberse sentido un sismo

en el valle de México. Asimismo, entrega bimestralmente un reporte de las actividades de servicio, operación y conservación realizadas en cada estación de la RACM, así como la información acelerométrica que haya sido obtenida durante ese período. Uno de los objetivos principales del CIRES, es tener los resultados a disposición de los investigadores y especialistas en ingeniería sísmica de México y del extranjero (ref 4). En la Fig. I.2 se indica la distribución actual de las estaciones de la RACM.

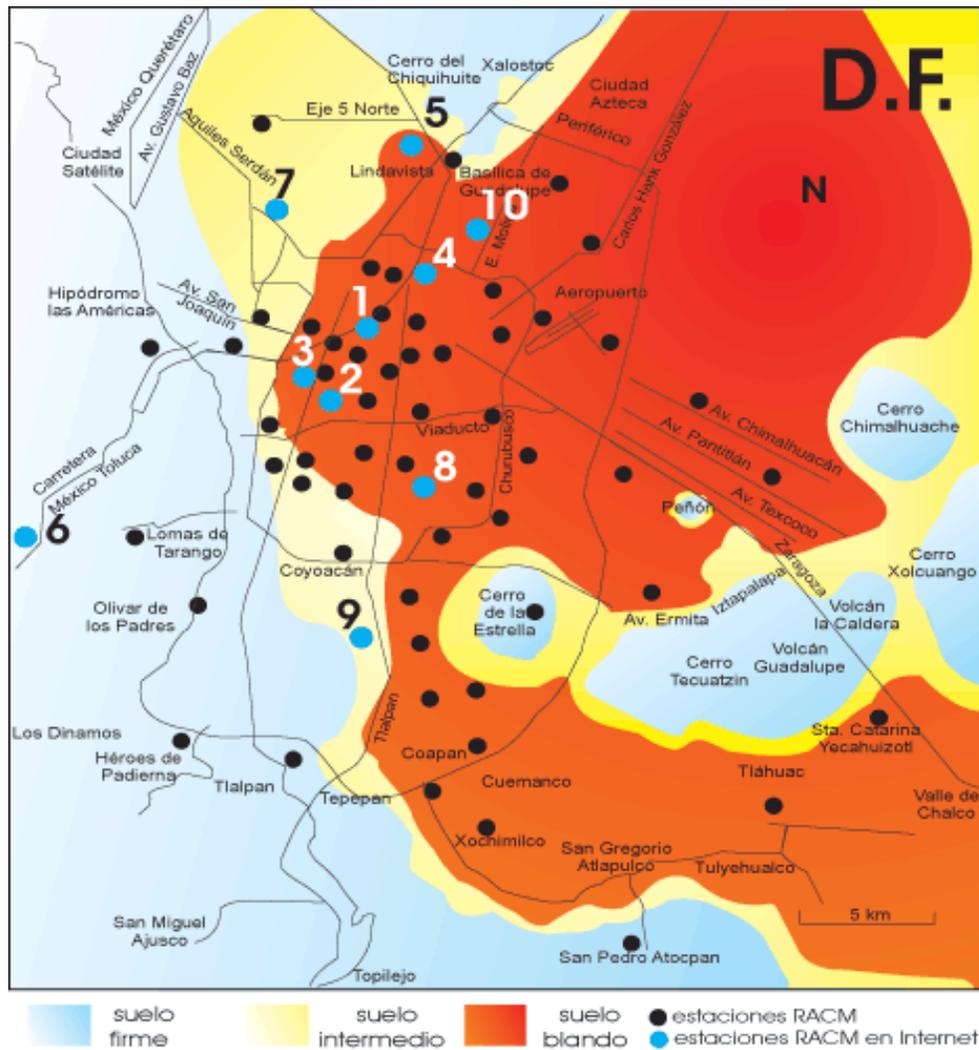


Figura I.2 Distribución de las estaciones de la RACM (ref 5)

Para efectos de este trabajo se eligió el sismo del 25 de abril de 1989 (M=6.9) originado en la zona de subducción de la costa del Estado de Guerrero. Se escogió este sismo por ser el más intenso desde 1985 y porque fue ampliamente registrado por la RACM (ref 6).

Los registros acelerométricos, en un formato estándar de aceleración (ver Anexo 1), se obtuvieron de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes CD-ROM vol. 2 (ref 7) y en la tabla I.1 se indica información de cada una de las estaciones que tienen registro acelerométrico del sismo del 25 de abril de 1989. La distribución de estas estaciones de la RACM para este sismo se indica en la Fig. I.3.

Tabla I.1 Estaciones acelerométricas con registro del sismo del 25 de abril de 1989

| INSTITUCIÓN | CLAVE DE ESTACIÓN | NOMBRE DE ESTACIÓN | UBICACIÓN | COORDENADAS GEOGRÁFICAS | | REGISTRO |
|-------------|-------------------|--|--|-------------------------|------------|--------------|
| | | | | LATITUD N | LONGITUD W | |
| FICA | AL01 | ALAMEDA | Alameda Central | 19.4356 | 99.1453 | AL018904.251 |
| CIRES | AP68 | APATLACO | Apatlaco y San Lorenzo | 19.3809 | 99.1068 | AP688904.251 |
| FICA | AU11 | AUTODROMO | Autódromo Hermanos Rodríguez | 19.3919 | 99.0869 | AU118904.251 |
| CIRES | AU46 | ANGEL URRAZA | Ángel Urzaa y Coyoacán | 19.3832 | 99.1681 | AU468904.251 |
| FICA | BA49 | BUENOS AIRES | Esc. Sec. No. 102 | 19.4097 | 99.1450 | BA498904.251 |
| FICA | BL45 | BALDERAS | Esc. Prim. "Centro Revolución" | 19.4253 | 99.1481 | BL458904.251 |
| FICA | BO39 | BONDOJITO | Esc. Prim. "Miguel Lanz Duret" | 19.4653 | 99.1047 | BO398904.251 |
| FICA | CA59 | CANDELARIA | Deportivo Venustiano Carranza | 19.4258 | 99.1183 | CA598904.251 |
| I de I-UNAM | CDAO | CENTRAL DE ABASTOS OFICINAS | Rio Churubusco y Apatlaco | 19.3720 | 99.0960 | CDAO8904.251 |
| CIRES | CE18 | CERRO DE LA ESTRELLA | Calle 3 y Carril | 19.3398 | 99.0847 | CE188904.251 |
| FICA | CE23 | CETIS | CETIS No. 54 | 19.4619 | 99.0642 | CE238904.251 |
| CIRES | CE32 | CETIS 57 | Av. Tepalcates y Verduzco | 19.3858 | 99.0537 | CE328904.251 |
| CIRES | CH84 | CULHUACAN | Ejido de Culhuacán y Ejido de Santa Úrsula | 19.3300 | 99.1254 | CH848904.251 |
| FICA | CI05 | CIBELES | Esc. Prim. "Alberto Correa" | 19.4186 | 99.1653 | CI058904.251 |
| FICA | CJ03 | C.U. JUAREZ | Antonio M. Anza y Orizaba, Col. Roma | 19.4097 | 99.1567 | CJ038904.251 |
| FICA | CO47 | COYOACAN | Esc. Prim. "Centro Escolar Alemán" | 19.3714 | 99.1703 | CO478904.251 |
| CIRES | CO56 | CORDOBA | Córdoba No. 68, Col. Roma | 19.4215 | 99.1590 | CO568904.251 |
| CIRES | CP28 | CERRO DEL PEÑON | Peñon de los Baños | 19.4385 | 99.0839 | CP288904.251 |
| CIRES | CS78 | COLINAS DEL SUR | Calzada de los Corceles s/n, Colinas del Sur | 19.3656 | 99.2262 | CS788904.251 |
| I de I-UNAM | CU01 | IDEI LABORATORIO INSTRUMENTACION SISMICA | Instituto de Ingeniería, UNAM | 19.3300 | 99.1830 | CU018904.251 |
| CIRES | CU80 | CUEMANCO | Periférico Sur, Cuemanco | 19.2938 | 99.1037 | CU808904.251 |
| I de I-UNAM | DFRO | ROMA | Manzanillo y Quintana Roo | 19.4050 | 99.1660 | DFRO8904.251 |
| I de I-UNAM | DFVG | PREPARATORIA #7 (LA VIGA) | Calzada de la Viga, entre Adolfo Gurrión y San Pablo | 19.4190 | 99.1260 | DFVG8904.251 |
| CIRES | DM12 | DEPORTIVO MOCTEZUMA | Oriente 168 y Norte 25 | 19.4312 | 99.0963 | DM128904.251 |
| CIRES | DR16 | DEPORTIVO REYNOSA | Eje 5 Norte y San Pablo | 19.5005 | 99.1829 | DR168904.251 |
| FICA | DX37 | XOTEPINGO | DGCOH | 19.3322 | 99.1439 | DX378904.251 |
| CIRES | EO30 | ESPARZA OTEO | Pensylvania y Georgia | 19.3885 | 99.1772 | EO308904.251 |

Tabla I.1 (continuación)

| INSTITUCIÓN | CLAVE DE ESTACIÓN | NOMBRE DE ESTACIÓN | UBICACIÓN | COORDENADAS GEOGRÁFICAS | | REGISTRO |
|-------------|-------------------|--------------------------------|--|-------------------------|------------|--------------|
| | | | | LATITUD N | LONGITUD W | |
| FICA | ES57 | ESCANDON | Esc. Prim. "Miguel F. Martínez" | 19.4017 | 99.1775 | ES578904.251 |
| CIRES | FJ74 | FUNDACION JAVIER BARROS SIERRA | Carretera al Ajusco, No. 203 | 19.2990 | 99.2100 | FJ748904.251 |
| CIRES | GA62 | GARIBALDI | Eje Central No. 10, Centro | 19.4385 | 99.1401 | GA628904.251 |
| FICA | GR27 | GRANJAS | Esc. Sec. No. 55 | 19.4747 | 99.1797 | GR278904.251 |
| CIRES | HJ72 | HOSPITAL JUAREZ | Jesús María, Centro | 19.4251 | 99.1301 | HJ728904.251 |
| CIRES | IB22 | IBERO | Cerro Crestón y Cerro Mezontepec | 19.3450 | 99.1297 | IB228904.251 |
| FICA | JA43 | JAMAICA | Centro Cultural "José Ma. Pino Suárez" | 19.4053 | 99.1250 | JA438904.251 |
| CIRES | JC54 | JARDINES DE COYOACAN | Dalias e Iris | 19.3130 | 99.1272 | JC548904.251 |
| FICA | LI33 | LICONSA | Planta LICONSA Tláhuac | 19.3064 | 98.9631 | LI338904.251 |
| CIRES | LI58 | LIVERPOOL | Liverpool No. 40, Col. Juárez | 19.4263 | 99.1569 | LI588904.251 |
| FICA | LV17 | LINDAVISTA | Parque Deportivo Miguel Alemán, Av. Lindavista | 19.4931 | 99.1275 | LV178904.251 |
| CIRES | ME52 | MARIANO ESCOBEDO | Mariano Escobedo y Lago Alberto | 19.4383 | 99.1820 | ME528904.251 |
| FICA | MI15 | MIRAMONTES | Glorieta Miramontes | 19.2834 | 99.1253 | MI158904.251 |
| CIRES | MT50 | MARISCAL TITO | Reforma y Gandhi | 19.4253 | 99.1900 | MT508904.251 |
| FICA | MY19 | MEYEHUALCO | Deportivo Santa Cruz Meyehualco | 19.3461 | 99.0433 | MY198904.251 |
| CIRES | NZ20 | NEZAHUALCOYOTL | Carmelo Pérez y La Escondida | 19.4027 | 99.0000 | NZ208904.251 |
| FICA | NZ31 | NEZAHUALCOYOTL | Esc. Normal ENEM No. 52 | 19.4167 | 99.0247 | NZ318904.251 |
| CIRES | PA34 | SAN PEDRO ATOCPAN | Esc. Prim. "Álvaro Obregón" | 19.2016 | 99.0491 | PA348904.251 |
| CIRES | PD42 | PALACIO DE LOS DEPORTES | Río Churubusco y Añil | 19.4055 | 99.0997 | PD428904.251 |
| CIRES | PE10 | PLUTARCO ELIAS CALLES | Plutarco Elías Calles y Santiago | 19.3809 | 99.1318 | PE108904.251 |
| CIRES | RM48 | RODOLFO MENENDEZ | Loreto y San Ildefonso | 19.4359 | 99.1280 | RM488904.251 |
| I de I-UNAM | SCT2 | SCT B-2 | Estacionamiento en el Edificio de SCT | 19.3930 | 99.1470 | SCT28904.251 |
| FICA | SI53 | SAN SIMON | Esc. Prim. "Pedro Ascencio" | 19.3753 | 99.1483 | SI538904.251 |
| FICA | SP51 | SECTOR POPULAR | Esc. Prim. "Alberto Mazferrer" | 19.3656 | 99.1189 | SP518904.251 |
| I de I-UNAM | SXVI | SISMEX VIVEROS | Viveros de Coyoacan | 19.3580 | 99.1710 | SXVI8904.251 |
| I de I-UNAM | TACY | TACUBAYA | Observatorio de Tacubaya | 19.4030 | 99.1940 | TACY8904.251 |
| FICA | TE07 | TECAMACHALCO | Laboratorios SARH | 19.4269 | 99.2217 | TE078904.251 |
| CIRES | TL08 | TLATELOLCO | Unidad Nonoalco - Tlatelolco | 19.4500 | 99.1336 | TL088904.251 |
| FICA | TL55 | TLATELOLCO | Deportivo 5 de Mayo | 19.4536 | 99.1425 | TL558904.251 |
| I de I-UNAM | TLHB | TLAHUAC BOMBAS | Caseta DDF, Tláhuac | 19.2790 | 99.0080 | TLHB8904.251 |
| FICA | TP13 | TLALPAN | Esc. Prim. "1ro. de Mayo" | 19.2922 | 99.1708 | TP138904.251 |
| CIRES | UC44 | UNIDAD COLONIA IMSS | Villalongín No. 117 | 19.4337 | 99.1654 | UC448904.251 |
| FICA | VG09 | VALLE GOMEZ | Esc. Sec. No. 104 | 19.4539 | 99.1225 | VG098904.251 |
| FICA | VM29 | VILLA DEL MAR | Jardín de Niños "Valentín Z. Orozco" | 19.3811 | 99.1253 | VM298904.251 |
| CIRES | XP06 | XOCHIPILLI | 5 de Febrero y Lucas Alamán, Centro | 19.4198 | 99.1353 | XP068904.251 |

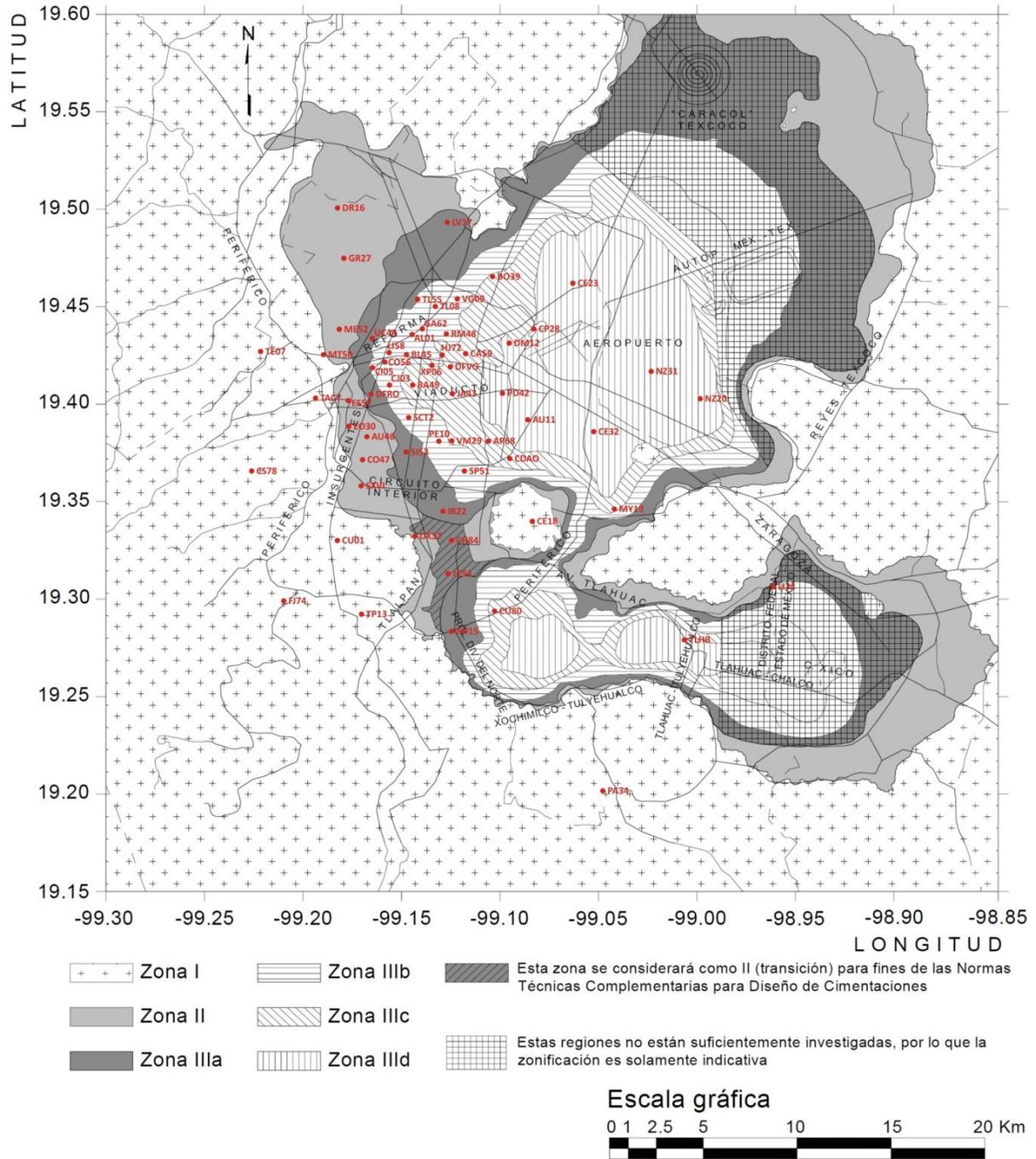


Figura I.3 Zonificación del DF para fines de diseño por sismo y ubicación de estaciones de la RACM con registro del sismo del 25 de abril de 1989

CAPÍTULO II.

ESTACIONES ACELEROMÉTRICAS SELECCIONADAS EN LAS ZONAS SÍSMICAS IIIb, IIIc y III d

II. ESTACIONES ACELEROMÉTRICAS SELECCIONADAS EN LAS ZONAS SÍSMICAS IIIb, IIIc y IIId

II.1 Estaciones acelerométricas seleccionadas en las zonas sísmicas IIIb, IIIc y IIId

Para fines de este trabajo se eligieron las estaciones acelerométricas que registraron el sismo del 25 de abril de 1989 ($M=6.9$) y que están ubicadas en las zonas sísmicas IIIb, IIIc y IIId del Distrito Federal. En las tablas II.1 a II.6 se incluye información relevante relacionada con la estación y del registro acelerométrico, de igual manera, una visión general de la ubicación de las estaciones acelerométricas se presenta en la figura II.1. Se destaca que el periodo dominante de vibración del suelo correspondiente a cada estación acelerométrica se obtuvo de la referencia 9.

Tabla II.1 Estaciones acelerométricas con registro del sismo del 25 de abril de 1989 para la zona sísmica IIIb

| CLAVE DE ESTACIÓN | NOMBRE DE ESTACIÓN | COORDENADAS GEOGRÁFICAS | | COORDENADAS UTM | | PERIODO (s) |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------|----------------------|----------------|-------------|
| | | LATITUD N | LONGITUD W | DATUM ITRF92 ZONA 14 | | |
| | | | | x | y | |
| AL01 | ALAMEDA | 19.4356 | 99.1453 | 484747.411557 | 2149033.206759 | 2.0 |
| BL45 | BALDERAS | 19.4253 | 99.1481 | 484452.506398 | 2147893.728436 | 2.3 |
| CI05 | CIBELES | 19.4186 | 99.1653 | 482646.140598 | 2147153.994092 | 1.9 |
| CJ03 | C.U. JUAREZ | 19.4097 | 99.1567 | 483548.109760 | 2146168.337914 | 1.9 |
| CO56 | CORDOBA | 19.4215 | 99.1590 | 483307.837402 | 2147474.266039 | 2.4 |
| GA62 | GARIBALDI | 19.4385 | 99.1401 | 485293.533549 | 2149353.649028 | 2.1 |
| LI58 | LIVERPOOL | 19.4263 | 99.1569 | 483528.784055 | 2148005.199459 | 2.3 |
| PE10 | PLUTARCO ELIAS CALLES | 19.3809 | 99.1318 | 486159.923501 | 2142979.350377 | 2.3 |
| RM48 | RODOLFO MENENDEZ | 19.4359 | 99.1280 | 486563.473036 | 2149064.961531 | 2.4 |
| SCT2 | SCT B-2 | 19.3930 | 99.1470 | 484564.937024 | 2144319.537241 | 2.0 |
| SP51 | SECTOR POPULAR | 19.3656 | 99.1189 | 487513.365047 | 2141285.384024 | 2.2 |
| TL08 | TLATELOLCO | 19.4500 | 99.1336 | 485976.835154 | 2150625.620652 | 2.0 |
| TL55 | TLATELOLCO | 19.4536 | 99.1425 | 485042.985725 | 2151024.722796 | 1.9 |
| VG09 | VALLE GOMEZ | 19.4539 | 99.1225 | 487142.242147 | 2151056.302040 | 2.6 |

Tabla II.2 Información adicional de las estaciones acelerométricas con registro del sismo del 25 de abril de 1989 para la zona sísmica IIIb

| CLAVE DE ESTACIÓN | REGISTRO | INTERVALO DE MUESTREO (s) | ORIENTACIÓN | | | MÁXIMA ACELERACIÓN (cm/s ²) | | |
|-------------------|--------------|---------------------------|-------------|---------|---------|---|---------|---------|
| | | | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 |
| AL01 | AL018904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 45.95 | 9.74 | 37.52 |
| BL45 | BL458904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 42.73 | 19.12 | 52.51 |
| CI05 | CI058904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 54.34 | 14.52 | 45.82 |
| CJ03 | CJ038904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 40.72 | 10.14 | 37.68 |
| CO56 | CO568904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 73.00 | 30.63 | 39.10 |
| GA62 | GA628904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 52.60 | 13.87 | 45.43 |

Tabla II.2 (continuación)

| CLAVE DE ESTACIÓN | REGISTRO | INTERVALO DE MUESTREO (s) | ORIENTACIÓN | | | MÁXIMA ACELERACIÓN (cm/s ²) | | |
|-------------------|--------------|---------------------------|-------------|---------|---------|---|---------|---------|
| | | | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 |
| LI58 | LI588904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 40.94 | 23.44 | 40.34 |
| PE10 | PE108904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 53.04 | 10.19 | 43.57 |
| RM48 | RM488904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 27.95 | 8.38 | 47.96 |
| SCT2 | SCT28904.251 | 0.010 | (V) | (N90E) | (N00E) | 19.27 | 39.98 | 37.51 |
| SP51 | SP518904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 47.31 | 8.50 | 39.06 |
| TL08 | TL088904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 32.35 | 8.81 | 47.55 |
| TL55 | TL558904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 45.18 | 10.78 | 31.11 |
| VG09 | VG098904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 38.21 | 8.88 | 47.41 |

Tabla II.3 Estaciones acelerométricas con registro del sismo del 25 de abril de 1989 para la zona sísmica IIIc

| CLAVE DE ESTACIÓN | NOMBRE DE ESTACIÓN | COORDENADAS GEOGRÁFICAS | | COORDENADAS UTM | | PERIODO (s) |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------|------------|-----------------|----------------|-------------|
| | | LATITUD N | LONGITUD W | x | y | |
| | | | | | | |
| AP68 | APATLACO | 19.3809 | 99.1068 | 488785.130359 | 2142977.536451 | 3.2 |
| BA49 | BUENOS AIRES | 19.4097 | 99.1450 | 484776.491707 | 2146167.263146 | 2.9 |
| BO39 | BONDOJITO | 19.4653 | 99.1047 | 489011.322786 | 2152316.518065 | 2.7 |
| CA59 | CANDELARIA | 19.4258 | 99.1183 | 487580.943381 | 2147946.636205 | 3.1 |
| CDAO | CENTRAL DE ABASTOS OFICINAS | 19.3720 | 99.0960 | 489918.671734 | 2141992.063598 | 3.3 |
| CU80 | CUEMANCO | 19.2938 | 99.1037 | 489104.879822 | 2133339.549081 | 3.0 |
| DFVG | PREPARATORIA #7 (LA VIGA) | 19.4190 | 99.1260 | 486772.051188 | 2147194.768295 | 3.0 |
| HJ72 | HOSPITAL JUAREZ | 19.4251 | 99.1301 | 486342.127012 | 2147870.072080 | 2.8 |
| JA43 | JAMAICA | 19.4053 | 99.1250 | 486875.935827 | 2145678.746159 | 3.1 |
| MY19 | MEYEHUALCO | 19.3461 | 99.0433 | 495452.184282 | 2139123.941585 | 2.8 |
| VM29 | VILLA DEL MAR | 19.3811 | 99.1253 | 486842.493528 | 2143000.972707 | 2.9 |
| XP06 | XOCHIPILLI | 19.4198 | 99.1353 | 485795.770712 | 2147284.030972 | 2.9 |

Tabla II.4 Información adicional de las estaciones acelerométricas con registro del sismo del 25 de abril de 1989 para la zona sísmica IIIc

| CLAVE DE ESTACIÓN | REGISTRO | INTERVALO DE MUESTREO (s) | ORIENTACIÓN | | | MÁXIMA ACELERACIÓN (cm/s ²) | | |
|-------------------|--------------|---------------------------|-------------|---------|---------|---|---------|---------|
| | | | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 |
| AP68 | AP688904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 32.96 | 9.12 | 33.30 |
| BA49 | BA498904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 54.52 | 14.66 | 58.97 |
| BO39 | BO398904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 33.52 | 12.02 | 37.46 |
| CA59 | CA598904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 29.14 | 9.88 | 46.93 |
| CDAO | CDAO8904.251 | 0.010 | (V) | (N90E) | (N00E) | 9.66 | 34.38 | 28.15 |
| CU80 | CU808904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 50.37 | 9.76 | 53.65 |

Tabla II.4 (continuación)

| CLAVE DE ESTACIÓN | REGISTRO | INTERVALO DE MUESTREO (s) | ORIENTACIÓN | | | MÁXIMA ACCELERACIÓN (cm/s ²) | | |
|-------------------|--------------|---------------------------|-------------|---------|---------|--|---------|---------|
| | | | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 |
| DFVG | DFVG8904.251 | 0.010 | (V) | (N90E) | (N00E) | 7.32 | 32.62 | 33.71 |
| HJ72 | HJ728904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 44.54 | 12.49 | 48.44 |
| JA43 | JA438904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 35.10 | 8.56 | 31.21 |
| MY19 | MY198904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 54.55 | 19.68 | 29.78 |
| VM29 | VM298904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 49.14 | 12.71 | 52.02 |
| XP06 | XP068904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 43.55 | 11.04 | 57.24 |

Tabla II.5 Estaciones acelerométricas con registro del sismo del 25 de abril de 1989 para la zona sísmica IIIId

| CLAVE DE ESTACIÓN | NOMBRE DE ESTACIÓN | COORDENADAS GEOGRÁFICAS | | DATUM ITRF92 ZONA 14 | | PERIODO (s) |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------|----------------------|----------------|-------------|
| | | LATITUD N | LONGITUD W | COORDENADAS UTM | | |
| | | | | x | y | |
| AU11 | AUTODROMO | 19.3919 | 99.0869 | 490875.406585 | 2144193.542326 | 4.6 |
| CE23 | CETIS | 19.4619 | 99.0642 | 493261.818605 | 2151938.208584 | 4.8 |
| CE32 | CETIS 57 | 19.3858 | 99.0537 | 494361.233307 | 2143517.141801 | 4.3 |
| DM12 | DEPORTIVO MOCTEZUMA | 19.4312 | 99.0963 | 489890.824950 | 2148542.724367 | 4.0 |
| NZ20 | NEZAHUALCOYOTL | 19.4027 | 99.0000 | 500000.000000 | 2145386.292716 | 4.7 |
| NZ31 | NEZAHUALCOYOTL | 19.4167 | 99.0247 | 497406.867199 | 2146935.616793 | 5.2 |
| PD42 | PALACIO DE LOS DEPORTES | 19.4055 | 99.0997 | 489532.261580 | 2145699.146136 | 4.3 |
| TLHB | TLAHUAC BOMBAS | 19.2790 | 99.0080 | 499159.414118 | 2131698.672420 | 5.2 |

Tabla II.6 Información adicional de las estaciones acelerométricas con registro del sismo del 25 de abril de 1989 para la zona sísmica IIIId

| CLAVE DE ESTACIÓN | REGISTRO | INTERVALO DE MUESTREO (s) | ORIENTACIÓN | | | MÁXIMA ACCELERACIÓN (cm/s ²) | | |
|-------------------|--------------|---------------------------|-------------|---------|---------|--|---------|---------|
| | | | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 |
| AU11 | AU118904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 19.51 | 6.35 | 20.29 |
| CE23 | CE238904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 25.71 | 7.55 | 17.50 |
| CE32 | CE328904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 20.52 | 7.66 | 19.70 |
| DM12 | DM128904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 25.33 | 7.29 | 23.00 |
| NZ20 | NZ208904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 54.55 | 19.68 | 29.78 |
| NZ31 | NZ318904.251 | 0.005 | (N00E) | (+V) | (N90E) | 54.55 | 19.68 | 29.78 |
| PD42 | PD428904.251 | 0.010 | (N00E) | (+V) | (N90W) | 21.69 | 12.28 | 25.86 |
| TLHB | TLHB8904.251 | 0.010 | (V) | (N90E) | (N00E) | 17.10 | 48.33 | 34.11 |

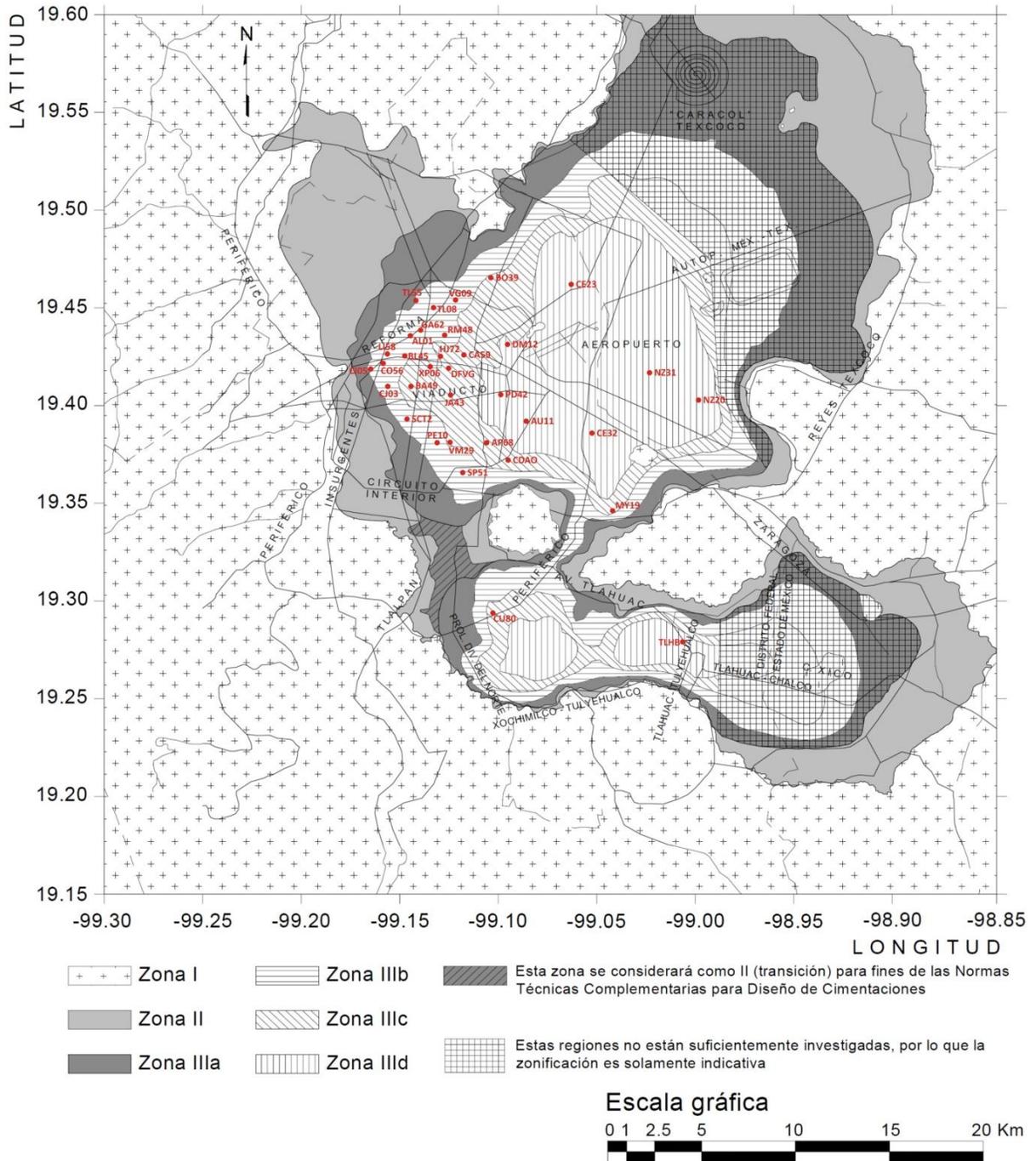


Figura II.1 Zonificación del DF para fines de diseño por sismo y ubicación de estaciones de la RACM con registro del sismo del 25 de abril de 1989 para las zonas sísmicas IIIb, IIIc y IIId

CAPÍTULO III.

MÉTODO β DE NEWMARK PARA EL CÁLCULO DE ESPECTROS DE RESPUESTA

III. MÉTODO β DE NEWMARK PARA EL CÁLCULO DE ESPECTROS DE RESPUESTA

El cálculo de los espectros de respuesta en los sitios de estudio se realizó aplicando el método β de Newmark, que a continuación se describe.

III.1 Ecuación de Equilibrio Dinámico

Sistemas de un grado de libertad. Considérese la figura III.1, la cual está integrada por una masa concentrada (m), un marco que proporciona rigidez (k) al sistema y un amortiguador viscoso (c) que disipa la energía vibratoria del sistema.

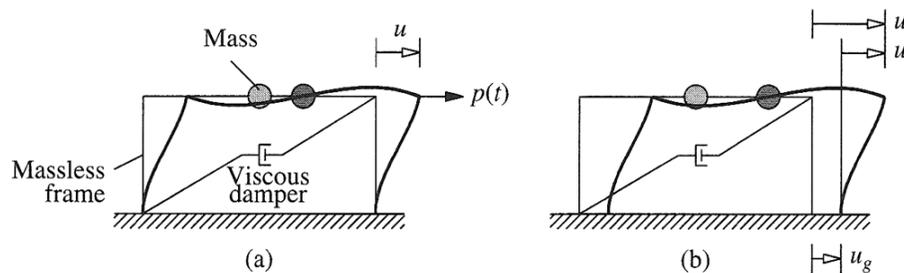


Figura III.1 Sistema de un grado de libertad: a) Fuerza aplicada $p(t)$ y b) Movimiento sísmico inducido

El número de desplazamientos independientes requeridos para definir la posición desplazada de la masa con respecto a su posición original, es denominado el *número de grados de libertad* para un análisis dinámico. Si se considera la figura III.1, que solo tiene libertad de movimiento en la dirección de la excitación, un análisis estático del problema despreciando la deformación axial deberá ser formulado con tres grados de libertad (desplazamiento lateral y dos giros), para determinar la rigidez lateral del marco. Por el contrario, para el análisis dinámico solo tiene un grado de libertad, por lo que es denominado así. En este caso se consideran dos tipos de excitación: 1) fuerza externa en la dirección lateral $p(t)$ y 2) el movimiento sísmico inducido $u_g(t)$ (ref 10).

Según el sistema planteado los desplazamientos en cada instante están relacionados por:

$$u^t(t) = u(t) + u_g(t) \quad (3.1)$$

Donde:

$u^t(t)$ = desplazamiento total del sistema en función del tiempo

$u(t)$ = desplazamiento relativo a la base generado por la deformación del marco en función del tiempo

$u_g(t)$ = desplazamiento de la base originado por el movimiento sísmico en función del tiempo

Considerando el equilibrio dinámico del sistema de la figura III.1b se tiene el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura III.2:

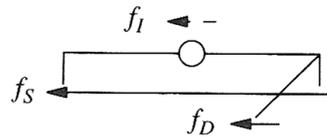


Figura III.2 Diagrama de cuerpo libre del sistema

Con base a lo anterior se tiene:

$$f_I + f_D + f_S = 0 \quad (3.2)$$

Donde:

$$f_I = m\ddot{u}^t \quad (3.2)$$

$$f_D = c\dot{u} \quad (3.3)$$

$$f_S = ku \quad (3.4)$$

m = masa del sistema

\ddot{u}^t = aceleración total del sistema

c = coeficiente de amortiguamiento viscoso

\dot{u} = velocidad

k = rigidez lateral

u = desplazamiento

Sustituyendo (3.2), (3.3) y (3.4) en (3.2)

$$m\ddot{u}^t + c\dot{u} + ku = 0 \quad (3.5)$$

Considerando la ecuación 3.1

$$u^t(t) = u(t) + u_g(t)$$

derivando

$$\dot{u}^t = \dot{u} + \dot{u}_g$$

$$\ddot{u}^t = \ddot{u} + \ddot{u}_g$$

\therefore

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c\dot{u} + ku = 0$$

finalmente

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.6)$$

A la expresión 3.6 se le conoce como *ecuación diferencial de movimiento* para un sistema de un grado de libertad o *ecuación de equilibrio dinámico*. Dividiendo esta ecuación por m se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{m\ddot{u}}{m} + \frac{c\dot{u}}{m} + \frac{ku}{m} &= -\frac{m\ddot{u}_g(t)}{m} \\ \ddot{u} + \frac{c\dot{u}}{m} + \frac{ku}{m} &= -\ddot{u}_g(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Considerando las siguientes definiciones:

$$\Omega = \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{T_n}$$

$$\zeta = \frac{c}{c_r} = \frac{c}{2m\Omega}$$

Ω = frecuencia circular natural de vibración

k = rigidez lateral del sistema

m = masa del sistema

T_n = periodo natural de vibración

ζ = relación de amortiguamiento o fracción de amortiguamiento crítico

c = coeficiente de amortiguamiento viscoso

c_r = coeficiente crítico de amortiguamiento, es denominado de esta forma porque es el valor mínimo de c que impide que el sistema oscile al regresar a su posición original después de haber sufrido un desplazamiento.

Sustituyendo en la ecuación 3.7:

$$\ddot{u} + 2\zeta\Omega\dot{u} + \Omega^2u = -\ddot{u}_g(t) \quad (3.8)$$

De la ecuación 3.8 se deduce que el desplazamiento $u(t)$ del sistema es función de la frecuencia natural Ω y de la relación de amortiguamiento ζ . Por lo que dos sistemas que tengan los mismos valores de T_n y ζ tendrán la misma respuesta al desplazamiento $u(t)$, aún cuando uno de ellos tenga mayor masa o posea mayor rigidez que el otro. La solución de la ecuación (3.8) será establecida más adelante.

La figura III.3 presenta la respuesta del desplazamiento de 3 sistemas, sometidos a un movimiento del terreno $\ddot{u}_g(t)$, con distintos periodos naturales de vibración T_n y un valor de $\zeta = 2\%$. Es evidente la diferencia en la respuesta, entre más grande es el periodo de vibración mayor es la aceleración pico, también en la misma figura, y para el mismo movimiento se ha fijado el periodo de vibración $T_n = 2$ segundos y se ha variado la relación de amortiguamiento ζ , de tal forma que las diferencias en la respuesta de los 3 sistemas están asociadas únicamente a un parámetro. Se observa que entre mayor sea el amortiguamiento la respuesta de los sistemas es menor.

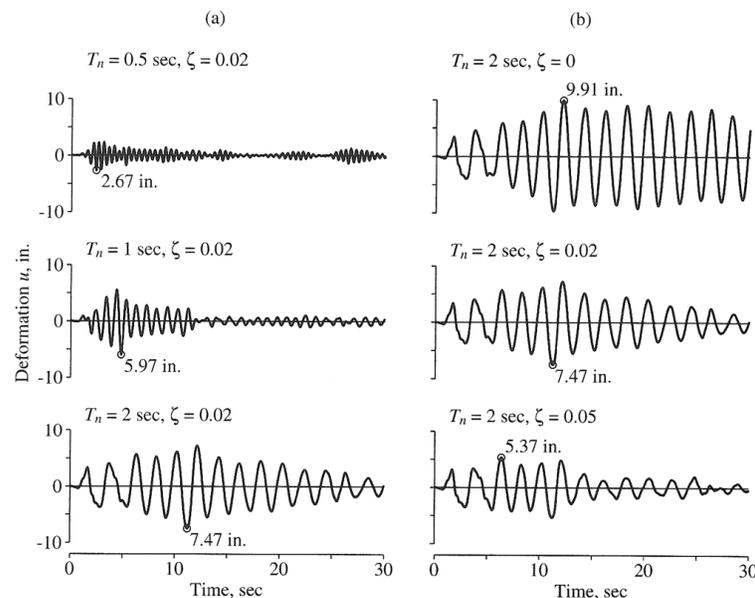


Figura III.3 Respuesta al desplazamiento de sistemas de un grado de libertad (ref 10)

III.2 Espectro de Respuesta

El concepto de Espectro de Respuesta surge como una necesidad para caracterizar los movimientos del terreno bajo la acción sísmica y su efecto en las estructuras, de hecho, es un medio para representar la respuesta máxima de todos los posibles sistemas de un grado de libertad para un movimiento particular del terreno. Por lo que puede ser definido como una gráfica que integra los valores pico de la respuesta a una excitación y que están en función

del período natural de vibración del sistema para una relación de amortiguamiento determinada. Dependiendo de la respuesta deseada se pueden definir diferentes tipos:

$$u_0(T_n, \zeta) = \max u, (t, T_n, \zeta); \quad u_0 = \text{espectro de respuesta de desplazamiento}$$

$$\dot{u}_0(T_n, \zeta) = \max \dot{u}, (t, T_n, \zeta); \quad \dot{u}_0 = \text{espectro de respuesta de velocidad}$$

$$\ddot{u}_0^t(T_n, \zeta) = \max \ddot{u}^t, (t, T_n, \zeta); \quad \ddot{u}_0^t = \text{espectro de respuesta de aceleración}$$

Una forma de explicar el concepto de espectro de respuesta es la consideración de una serie de estructuras de un grado de libertad u osciladores simples, cada uno con diferente periodo de vibración T_n , y con igual relación de amortiguamiento ζ . Estos osciladores son sometidos a un mismo sismo, con el uso de un registro de aceleraciones $\ddot{u}_g(t)$, es de esperarse que cada uno tenga una respuesta diferente la cual puede representarse por medio de la historia de desplazamientos $u(t)$ o de aceleraciones $\ddot{u}(t)$. Una vez realizado el cálculo de la respuesta en los osciladores es posible determinar el máximo en cada uno de ellos y expresarlos en un gráfico en función del periodo de vibración, obteniendo así un espectro de respuesta, es decir, que la respuesta máxima de cada oscilador con periodo T_n representa un punto del espectro como se ilustra en la figura III.4.

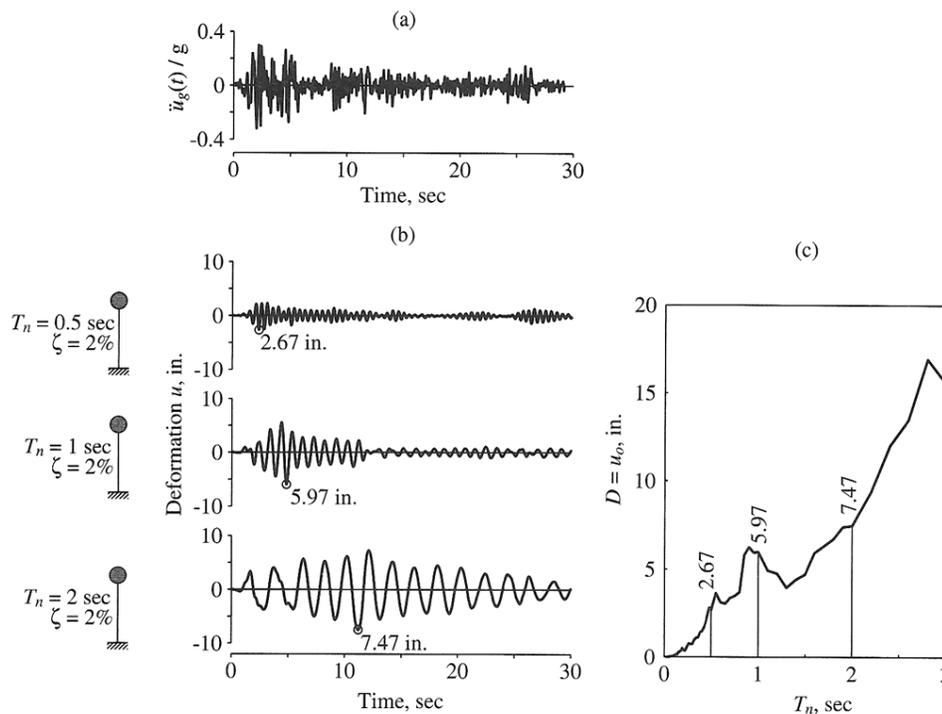


Figura III.4 a) Registro de aceleración del terreno, b) Respuestas de desplazamiento $u(t)$ para diferentes periodos T_n y un valor dado de amortiguamiento ζ y c) Espectro de respuesta de desplazamiento para $\zeta = 2\%$

Básicamente el espectro de respuesta de desplazamiento $u(t)$ es el único necesario para calcular las fuerzas internas y por consiguiente los valores máximos $D = u_0$. Existen diversos tipos de espectros de respuesta, siendo algunos de ellos los llamados pseudo-espectros tanto de velocidad como de aceleración, los cuales son útiles para el estudio de la respuesta misma, la construcción de espectros de diseño, etc.

El espectro de respuesta de pseudo-velocidad V para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural Ω y con un desplazamiento $D = u_0$ producido por un movimiento sísmico del terreno está dado por:

$$V = \Omega D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (3.9)$$

Donde V tiene unidades de velocidad y está relacionado con el valor máximo de la energía de deformación E_{S0} almacenada en el sistema durante un temblor mediante:

$$E_{S0} = \frac{mV^2}{2} \quad (3.10)$$

De lo anterior se puede definir al espectro de respuesta de pseudo-velocidad como una gráfica que relaciona el producto ΩD como una función del período natural del sistema T_n .

El espectro de respuesta de pseudo-aceleración se puede considerar como una cantidad A para un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural Ω relacionada a su desplazamiento máximo $D = u_0$ debido a un movimiento sísmico del terreno.

$$A = \Omega^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (3.11)$$

Donde A tiene unidades de aceleración y se relaciona con el valor cortante máximo en la base V_{b0} .

$$V_{b0} = f_{S0} = mA$$

ó

$$V_{b0} = \frac{A}{g} W = CW$$

W = peso de la estructura

g = aceleración de la gravedad

$$C = \frac{A}{g} = \text{Coeficiente de fuerza cortante}$$

Según lo mencionado se puede considerar al espectro de respuesta de pseudo-aceleración como $\Omega^2 D$, en función del período natural del sistema T_n . La figura III.5 presenta los tres tipos de espectros antes descritos.

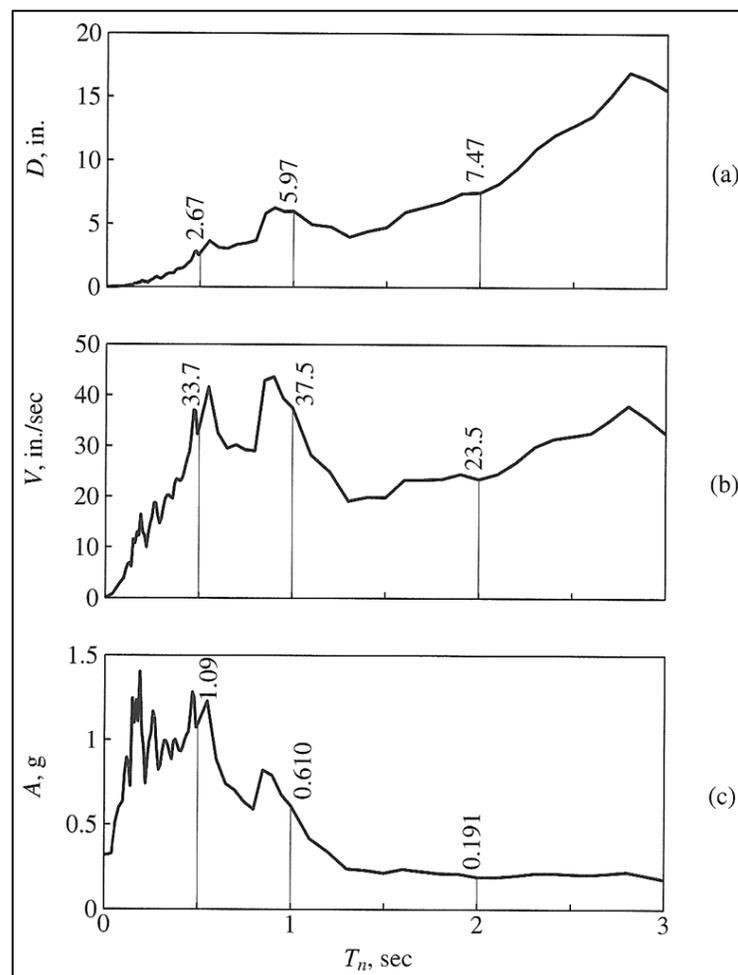


Figura III.5 Espectro de respuesta de: a) desplazamiento, b) pseudo-velocidad y c) pseudo-aceleración

III.3 Método β de Newmark para el cálculo de Espectros de Respuesta

Considerando un sistema de un grado de libertad como el mostrado anteriormente en la figura III.1b y cuya ecuación de movimiento es la ecuación 3.8:

$$\ddot{u} + 2\zeta\Omega\dot{u} + \Omega^2u = -\ddot{u}_g(t)$$

La cual se puede escribir como:

$$\ddot{x} + 2\zeta\Omega\dot{x} + \Omega^2x = -\ddot{y} \quad (3.12)$$

Donde \ddot{x} , \dot{x} y x son aceleración, velocidad y desplazamiento, respectivamente. Así como \ddot{y} es la aceleración para un tiempo t del registro acelerométrico.

Suponiendo que estas tres primeras cantidades se conocen en el instante t y si se utiliza el subíndice $i + 1$ para denotar sus valores en $t + \Delta t$. Se tiene también que cumplir que:

$$\ddot{x}_{i+1} + 2\zeta\Omega\dot{x}_{i+1} + \Omega^2x_{i+1} = -\ddot{y}_{i+1} \quad (3.13)$$

Newmark (1959) propuso emplear las siguientes ecuaciones para calcular \dot{x}_{i+1} y x_{i+1} :

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{x}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{x}_{i+1} \quad (3.14)$$

$$x_{i+1} = x_i + \Delta t\dot{x}_i + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right)(\Delta t)^2\right]\ddot{x}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{x}_{i+1} \quad (3.15)$$

Los parámetros β y γ definen la variación de la aceleración en un incremento de tiempo y determinan tanto la estabilidad como la precisión del método. Los valores típicos de estos parámetros son: $\gamma = 1/2$ y $1/6 \leq \beta \leq 1/4$; donde $\beta = 1/4$ corresponde a una aceleración constante en dicho lapso igual al promedio de \ddot{y}_i y \ddot{y}_{i+1} , mientras una variación lineal de aceleraciones entre \ddot{y}_i y \ddot{y}_{i+1} conduce a $\beta = 1/6$.

Considerando la condición de una aceleración constante ($\gamma = 1/2$ y $\beta = 1/4$) para las ecuaciones 3.14 y 3.15, se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i+1} &= \dot{x}_i + \left[\left(1 - \frac{1}{2}\right)\Delta t\right]\ddot{x}_i + \left(\frac{1}{2}\Delta t\right)\ddot{x}_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} &= \dot{x}_i + \frac{1}{2}\Delta t\ddot{x}_i + \frac{1}{2}\Delta t\ddot{x}_{i+1} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + \Delta t\dot{x}_i + \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\right)(\Delta t)^2\right]\ddot{x}_i + \left[\frac{1}{4}(\Delta t)^2\right]\ddot{x}_{i+1} \\ x_{i+1} &= x_i + \Delta t\dot{x}_i + \frac{1}{4}(\Delta t)^2\ddot{x}_i + \frac{1}{4}(\Delta t)^2\ddot{x}_{i+1} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.16 y 3.17 en 3.13:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{i+1} + 2\zeta\Omega \left[\dot{x}_i + \frac{1}{2}\Delta t \ddot{x}_i + \frac{1}{2}\Delta t \ddot{x}_{i+1} \right] + \Omega^2 \left[x_i + \Delta t \dot{x}_i + \frac{1}{4}(\Delta t)^2 \ddot{x}_i + \frac{1}{4}(\Delta t)^2 \ddot{x}_{i+1} \right] &= -\ddot{y}_{i+1} \\ \ddot{x}_{i+1} \left[1 + 2\zeta\Omega \left(\frac{1}{2}\Delta t \right) + \Omega^2 \left(\frac{1}{4} \right) (\Delta t)^2 \right] & \\ &= -\ddot{y}_{i+1} - 2\zeta\Omega \left[\dot{x}_i + \frac{1}{2}\Delta t \ddot{x}_i \right] - \Omega^2 \left[x_i + \Delta t \dot{x}_i + \frac{1}{4}(\Delta t)^2 \ddot{x}_i \right] \end{aligned}$$

Despejando \ddot{x}_{i+1} :

$$\ddot{x}_{i+1} = -\frac{\ddot{y}_{i+1} + 2\zeta\Omega \left[\dot{x}_i + \frac{1}{2}\Delta t \ddot{x}_i \right] + \Omega^2 \left[x_i + \Delta t \dot{x}_i + \frac{1}{4}(\Delta t)^2 \ddot{x}_i \right]}{\left[1 + 2\zeta\Omega \left(\frac{1}{2}\Delta t \right) + \Omega^2 \left(\frac{1}{4} \right) (\Delta t)^2 \right]} \quad (3.18)$$

La ecuación 3.18 nos permite calcular la aceleración relativa del sistema en un instante $i + 1$, conocidos los valores de \ddot{x} , \dot{x} y x para el instante i . Es considerada aceleración relativa debido a que se trata de la aceleración de la estructura con respecto a su base.

La aceleración absoluta se puede determinar a partir de la ecuación 3.12 de la manera que sigue:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\zeta\Omega\dot{x} + \Omega^2x &= -\ddot{y} \\ \ddot{x} + \ddot{y} &= -2\zeta\Omega\dot{x} - \Omega^2x \end{aligned} \quad (3.19)$$

Donde el primer miembro de la ecuación representa la aceleración absoluta del sistema. La pseudo-aceleración coincide exactamente con la aceleración máxima absoluta de la estructura sólo cuando ésta carece de amortiguamiento; de lo contrario difiere de ella, pero la diferencia no adquiere valores importantes.

De manera similar se puede obtener la pseudo-aceleración:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\zeta\Omega\dot{x} + \Omega^2x &= -\ddot{y} \quad \zeta = 0 \\ \ddot{x} + \ddot{y} &= -\Omega^2x \end{aligned} \quad (3.20)$$

El primer miembro de la ecuación 3.20 representa la pseudo-aceleración del sistema. El valor típico de ζ es de 0.05 en estructuras.

Varios programas de computadora emplean el método de Newmark con $\beta = 1/4$ debido a su sencillez y precisión y a que se aplica fácilmente a estructuras de múltiples grados de libertad, debido a que su autor demostró que con ese valor el método es incondicionalmente estable, es decir que no lleva a resultados espuriamente altos como consecuencia de las aproximaciones numéricas, independientemente del valor de Δt .

CAPÍTULO IV.

CÁLCULO DE ESPECTROS DE RESPUESTA EN LAS ZONAS SÍSMICAS IIIb, IIIc Y IIId

IV. CÁLCULO DE ESPECTROS DE RESPUESTA EN LAS ZONAS SÍSMICAS IIIb, IIIc Y IIId

IV.1 Programa de computadora

Para calcular los espectros de respuesta a partir de los registros acelerométricos en un formato estándar de aceleración (ver Anexo 1), se creó un programa en lenguaje FORTRAN llamado *EspectroR*, el cual utiliza el Método β de Newmark explicado en el Capítulo III, cuyas ecuaciones utilizadas fueron:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta t \dot{x}_i + \frac{1}{4}(\Delta t)^2 \ddot{x}_i + \frac{1}{4}(\Delta t)^2 \ddot{x}_{i+1} \quad (4.1)$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \frac{1}{2} \Delta t \ddot{x}_i + \frac{1}{2} \Delta t \ddot{x}_{i+1} \quad (4.2)$$

$$\ddot{x}_{i+1} = - \frac{\ddot{y}_{i+1} + 2\zeta\Omega[\dot{x}_i + \frac{1}{2} \Delta t \ddot{x}_i] + \Omega^2[x_i + \Delta t \dot{x}_i + \frac{1}{4}(\Delta t)^2 \ddot{x}_i]}{[1 + 2\zeta\Omega(\frac{1}{2}\Delta t) + \Omega^2(\frac{1}{4})(\Delta t)^2]} \quad (4.3)$$

A continuación se presenta el código fuente del programa EspectroR:

```

C
C   PROGRAMA PARA CALCULAR UN ESPECTRO DE RESPUESTA CON METODO BETA DE NEWMARK
C   PROGRAMA PARA TESINA DE JOSE CARLOS GARCIA TORRES
C
      PROGRAM ESPECTROR
      DIMENSION Y(100000,20)
      REAL*8 DI,VI,AI,V,D,A,PI,M,DDT,TMAX,TMAXC,TI
      CHARACTER *30,NDATOS,NRESULTADOS
      CHARACTER *150,Z(109)
100  FORMAT(4F13.6)
101  FORMAT(F13.6)
102  FORMAT(A150)
103  FORMAT(" PROGRAMA PARA CALCULAR EL ESPECTRO DE RESPUESTA"/
1     " DE UN ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACION 2.0"//)
      WRITE(*,103)
      WRITE(*,*)"DAME EL NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS CON EXTENSION"
      READ(*,*)NDATOS
      OPEN(1,FILE=NDATOS,STATUS='OLD')
      WRITE(*,*)"DAME EL NUMERO DE CANALES DEL REGISTRO"
      READ(*,*)NREG
      WRITE(*,*)"DAME EL NUMERO DE CANAL A ANALIZAR"
      READ(*,*)NANA
      WRITE(*,*)"DAME EL DELTA T DEL REGISTRO,EN SEGUNDOS"
      READ(*,101)DDT
      WRITE(*,*)"DAME LA FRACCION DE AMORTIGUAMIENTO CRITICO,EN DECIMAL"
      READ(*,101)X
      WRITE(*,*)"DAME EL PERIODO MAXIMO,EN SEGUNDOS"
      READ(*,*)TMAX
      WRITE(*,*)"DAME EL NOMBRE DEL ARCHIVO DE RESULTADOS CON EXTENSION"
      READ(*,*)NRESULTADOS

```

```

OPEN (2, FILE=NRESULTADOS, STATUS='UNKNOWN')
C SE LEEN LAS 109 LINEAS DEL ENCABEZADO DEL REGISTRO Y SE IMPRIMEN EN PANTALLA
DO N=1,109
READ (1,102,END=20) Z(N)
WRITE (*,102) Z(N)
20 END DO
C SE LEEN LOS DATOS DE ACELERACION
DO K=1,100000
READ (1,*,END=10) (Y(K,Q),Q=1,NREG)
NCONT=(K-1)+1
IF (ABS(Y(K,NANA)).GT.YMAX) YMAX= ABS(Y(K,NANA))
10 END DO
TI=0.0
WRITE (2,*) "EL ARCHIVO DE RESULTADOS ES:"
WRITE (*,*) "EL ARCHIVO DE RESULTADOS ES:"
WRITE (2,*) NRESULTADOS
WRITE (*,*) NRESULTADOS
WRITE (2,*) " PERIODO PSEUDOACEL ACEL.ABSOL ACEL.RELAT"
WRITE (*,*) " PERIODO PSEUDOACEL ACEL.ABSOL ACEL.RELAT"
WRITE (2,*) " [s] [Gal] [Gal] [Gal]"
WRITE (*,*) " [s] [Gal] [Gal] [Gal]"
WRITE (2,100) TI, YMAX, YMAX, YMAX-YMAX
WRITE (*,100) TI, YMAX, YMAX, YMAX-YMAX
NPTOS=NCONT*1.3
DO L=NCONT,NPTOS
Y(L,NANA)=0.0
END DO
C TMAXC, ES EL NUMERO DE PERIODOS PARA ANALIZAR
TMAXC=TMAX*100+1
DO I=2,TMAXC
C T, ES EL PERIODO ESTRUCTURAL
C M, ES OMEGA (FRECUENCIA CIRCULAR)
C DI, ES EL DESPLAZAMIENTO i
C VI, ES LA VELOCIDAD i
C AI, ES LA ACELERACION i
C D, ES EL DESPLAZAMIENTO i+1
C V, ES LA VELOCIDAD i+1
C A, ES LA ACELERACION i+1
T=(I-1)*0.01
PI=4.*ATAN(1.)
M=2*PI/T
DI=0.0
VI=0.0
AI=0.0
DMAX=0.0
VMAX=0.0
AMAX=0.0
AABSMAX=0.0
DO J=1,NPTOS
VI=V+A*DDT*0.5
DI=D+V*DDT+A*DDT*DDT*0.25
A=- (Y(J,NANA)+2*X*M*VI+M*M*DI) / (1+2*X*M*DDT*0.5+M*M*DDT*DDT*0.25)
V=VI+A*DDT*0.5
D=DI+A*DDT*DDT*0.25
AABS=A+Y(J,NANA)

```

```

IF (ABS (A) .GT. AMAX) AMAX=ABS (A)
IF (ABS (AABS) .GT. AABSMAX) AABSMAX=ABS (AABS)
IF (ABS (D) .GT. DMAX) DMAX=ABS (D)
END DO
C PERIODO, PSEUDOACELERACION, ACELERACION ABSOLUTA, ACELERACION RELATIVA
WRITE (2,100) T, DMAX*M*M, AABSMAX, AMAX
WRITE (*,100) T, DMAX*M*M, AABSMAX, AMAX
END DO
CLOSE (1)
CLOSE (2)
END PROGRAM ESPECTROR

```

En el Anexo 2 se presenta un ejemplo de aplicación del programa *EspectroR* para un registro acelerométrico en un formato estándar de aceleración.

IV.2 Cálculo de Espectros de Respuesta en las zonas sísmicas IIIb, IIIc y IIId

Utilizando el programa *EspectroR* para los registros del sismo del 25 de abril de 1989 se obtuvieron los resultados siguientes, para las estaciones acelerométricas correspondientes a las zona sísmicas IIIb, IIIc y IIId como se indica en las figuras IV.1, IV.2 y IV.3, respectivamente. Cabe señalar que se utilizaron los valores de aceleración absoluta y una fracción de amortiguamiento crítico $\zeta = 5\%$ para la construcción de los espectros de respuesta.

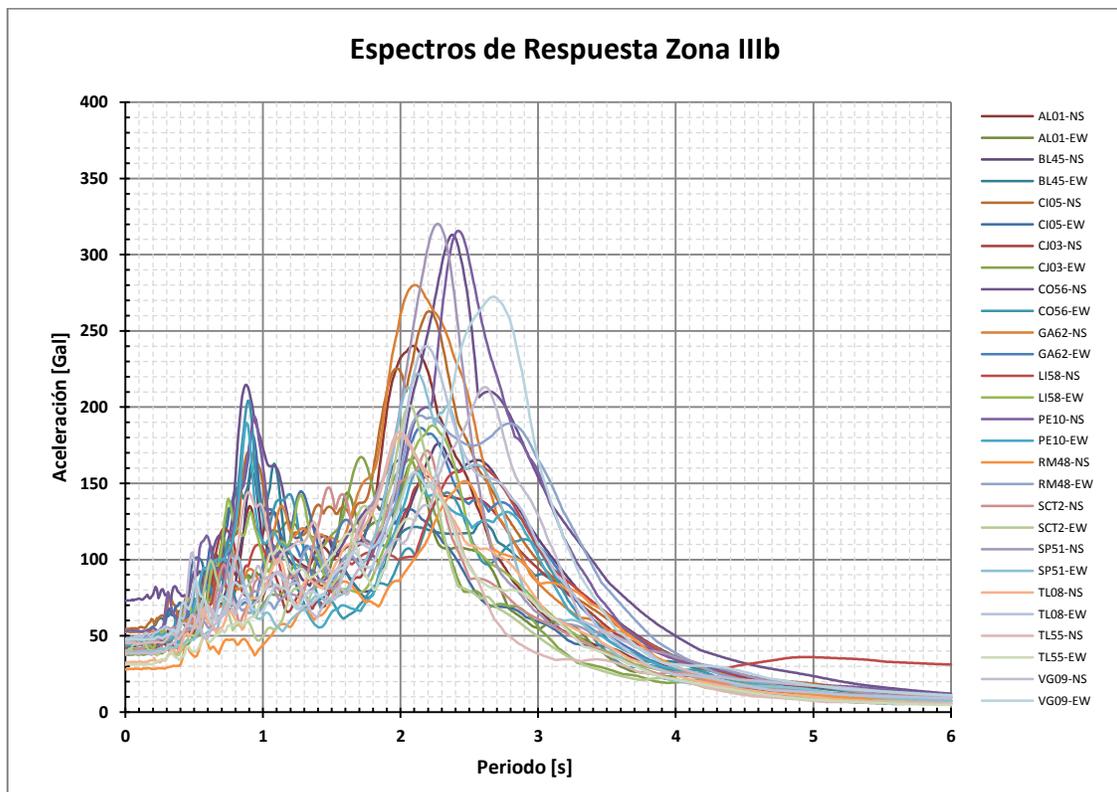


Figura IV.1 Espectros de respuesta calculados para la zona sísmica IIIb

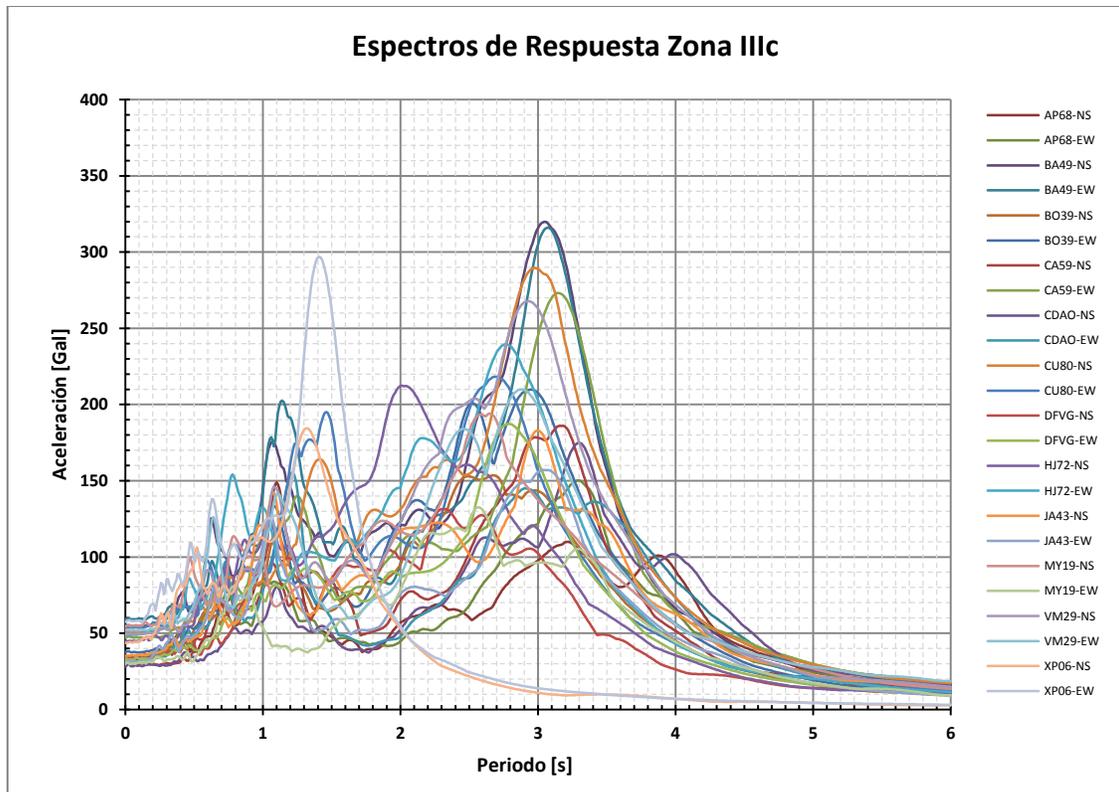


Figura IV.2 Espectros de respuesta calculados para la zona sísmica IIIc

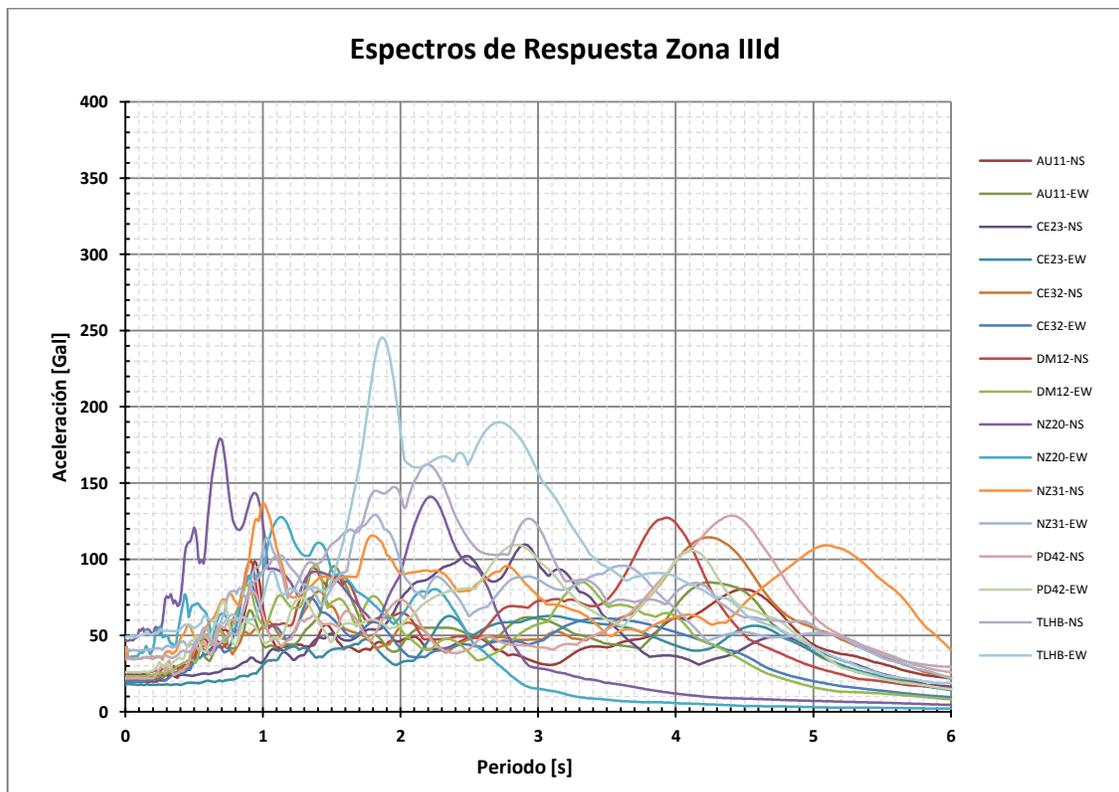


Figura IV.3 Espectros de respuesta calculados para la zona sísmica IIId

La nomenclatura utilizada en las figuras consistió de cuatro caracteres que corresponden a la clave de la estación acelerométrica con registro del sismo del 25 de abril de 1989 y dos caracteres que indican la orientación del canal del registro utilizado: "NS" (norte-sur) o "EW" (este-oeste). La unidad utilizada para la aceleración es el [Gal], 1 [Gal] equivale a 1 [cm/s²], es decir que $g = 981$ [Gal].

Por otra parte, también se utilizaron los registros acelerométricos del sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M=8.1$) y que coincidieron con las estaciones que registraron el sismo del 25 de abril de 1989 ($M=6.9$), con el propósito de obtener un factor de amplificación para escalar los registros del sismo de 1989. La información fue obtenida nuevamente de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes CD-ROM vol. 2 (ref 7). En las tablas IV.1 y IV.2 se indica la información de las únicas tres estaciones que cumplieron estas condiciones.

Tabla IV.1 Estaciones acelerométricas con registro del sismo del 19 de septiembre de 1985

| CLAVE DE ESTACIÓN | NOMBRE DE ESTACIÓN | COORDENADAS GEOGRÁFICAS | | COORDENADAS UTM | | PERIODO (s) | ZONA SÍSMICA |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------|------------|-----------------|----------------|-------------|--------------|
| | | LATITUD N | LONGITUD W | x | y | | |
| | | | | | | | |
| CDAO | CENTRAL DE ABASTOS OFICINAS | 19.3720 | 99.0960 | 489918.671734 | 2141992.063598 | 3.3 | IIIc |
| SCT1 | SCT B-1 | 19.3930 | 99.1470 | 484564.937024 | 2144319.537241 | 2.0 | IIIb |
| TLHB | TLAHUAC BOMBAS | 19.2790 | 99.0080 | 499159.414118 | 2131698.672420 | 5.2 | III d |

Tabla IV.2 Información adicional de las estaciones acelerométricas con registro del sismo del 19 de septiembre de 1985

| CLAVE DE ESTACIÓN | REGISTRO | INTERVALO DE MUESTREO | ORIENTACIÓN | | | MÁXIMA ACELERACIÓN (cm/s ²) | | |
|-------------------|--------------|-----------------------|-------------|---------|---------|---|---------|---------|
| | | (s) | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 |
| CDAO | CDAO8509.191 | 0.010 | (V) | (N90E) | (N00E) | 34.340 | 84.610 | 65.320 |
| SCT1 | SCT18509.191 | 0.010 | (V) | (N90E) | (N00E) | 35.810 | 161.630 | 93.780 |
| TLHB | TLHB8509.191 | 0.030 | (S00E) | (+V) | (N90E) | 135.880 | 23.975 | 106.669 |

El procedimiento para obtener el factor de amplificación fue el calcular el cociente de la máxima aceleración absoluta del registro del sismo del 19 de septiembre de 1985 y la máxima aceleración absoluta del registro del sismo del 25 de abril de 1989, esto realizado por canal y estación correspondiente. Lo anterior indica que se obtuvieron dos factores para cada estación: CDAO, SCT2 y TLHB, correspondientes a las componentes norte-sur y este-oeste de cada registro, dando un total de seis factores o cocientes para ser multiplicados por los valores del registro acelerográfico del canal, estación y zona sísmica correspondiente. Lo anterior quiere decir que los factores obtenidos, por ejemplo, para la estación con clave CDAO se aplicaron a los datos de los registros acelerométricos de todas las estaciones con

registro del sismo de 1989 y que están ubicadas en la zona sísmica correspondiente a la estación CDAO, es decir zona IIIc. Esto se aplicó de manera similar para las estaciones con clave SCT2 y TLHB. Es necesario aclarar que las estaciones SCT B-1 y SCT B-2 corresponden al mismo sitio.

Los datos utilizados para las tres estaciones del sismo de 1989 se indican en la tabla IV.3. Así mismo, en la tabla IV.4 se muestran los factores obtenidos con este procedimiento.

Tabla IV.3 Estaciones acelerométricas con registro del sismo del 25 de abril de 1989

| CLAVE DE ESTACIÓN | NOMBRE DE ESTACIÓN | ZONA SÍSMICA | REGISTRO | ORIENTACIÓN | | | MÁXIMA ACELERACIÓN (cm/s ²) | | |
|-------------------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|---------|---------|---|---------|---------|
| | | | | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 | CANAL 1 | CANAL 2 | CANAL 3 |
| CDAO | CENTRAL DE ABASTOS OFICINAS | IIIc | CDAO8904.251 | (V) | (N90E) | (N00E) | 9.660 | 34.380 | 28.150 |
| SCT2 | SCT B-2 | IIIb | SCT28904.251 | (V) | (N90E) | (N00E) | 19.270 | 39.980 | 37.510 |
| TLHB | TLAHUAC BOMBAS | III d | TLHB8904.251 | (V) | (N90E) | (N00E) | 17.100 | 48.330 | 34.110 |

Tabla IV.4 Factores calculados

| ESTACIÓN | FACTOR SISMO 1985 / SISMO 1989 | | ZONA SÍSMICA |
|----------|--------------------------------|--------|--------------|
| | NS | EW | |
| CDAO | 2.3204 | 2.4610 | IIIc |
| SCT2 | 2.5001 | 4.0428 | IIIb |
| TLHB | 3.9836 | 2.2071 | III d |

Para el cálculo de los espectros de respuesta de los registros acelerométricos del sismo del 25 de abril de 1989 multiplicados por el factor de amplificación correspondiente se hizo una adaptación del programa *EspectroR* para tomar en cuenta este nuevo parámetro y de esta manera se creó el programa *EspectroRF* el cual nos permite aplicar el factor en los cálculos del espectro de respuesta. La modificación del código fuente para este programa se indica en el Anexo 3, así como un ejemplo de aplicación del programa.

Nuevamente se utilizaron los valores de aceleración absoluta y una fracción de amortiguamiento crítico $\zeta = 5\%$ para la construcción de los nuevos espectros de respuesta.

Los espectros de respuesta obtenidos con el programa *EspectroR* para los registros del sismo del 25 de abril de 1989 tomando en cuenta el factor para las estaciones acelerométricas correspondientes a las zonas sísmicas IIIb, IIIc y III d se indican en las figuras IV.4, IV.5 y IV.6, respectivamente.

La nomenclatura utilizada en las figuras consistió nuevamente de cuatro caracteres que corresponden a la clave de la estación acelerométrica con registro del sismo del 25 de abril de 1989, dos caracteres que indican la orientación del canal del registro utilizado: “NS” (norte-sur) o “EW” (este-oeste) y un carácter “F” que indica que a los datos del registro se les aplicó el factor de amplificación. Para el caso de los espectros de respuesta correspondientes a los registros del sismo del 19 de septiembre de 1985 se utilizaron los caracteres “85” después de los caracteres que indican la orientación del canal.

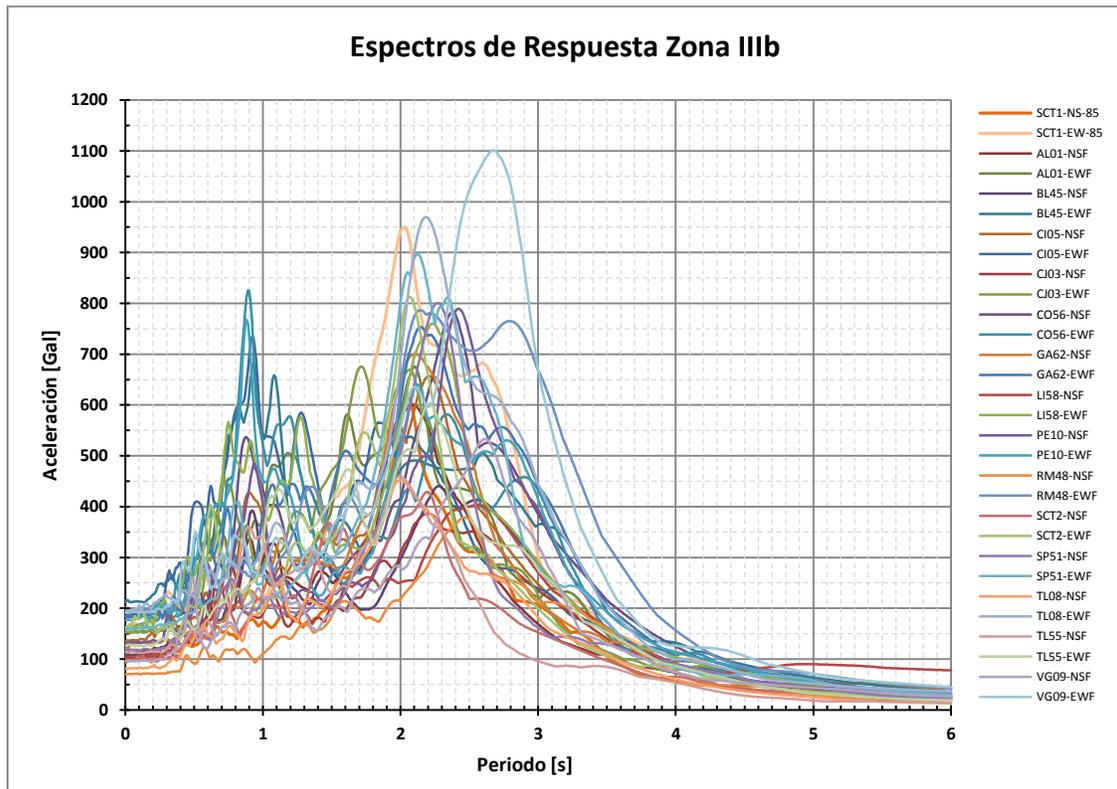


Figura IV.4 Espectros de respuesta calculados para la zona sísmica IIIb, aplicado el factor

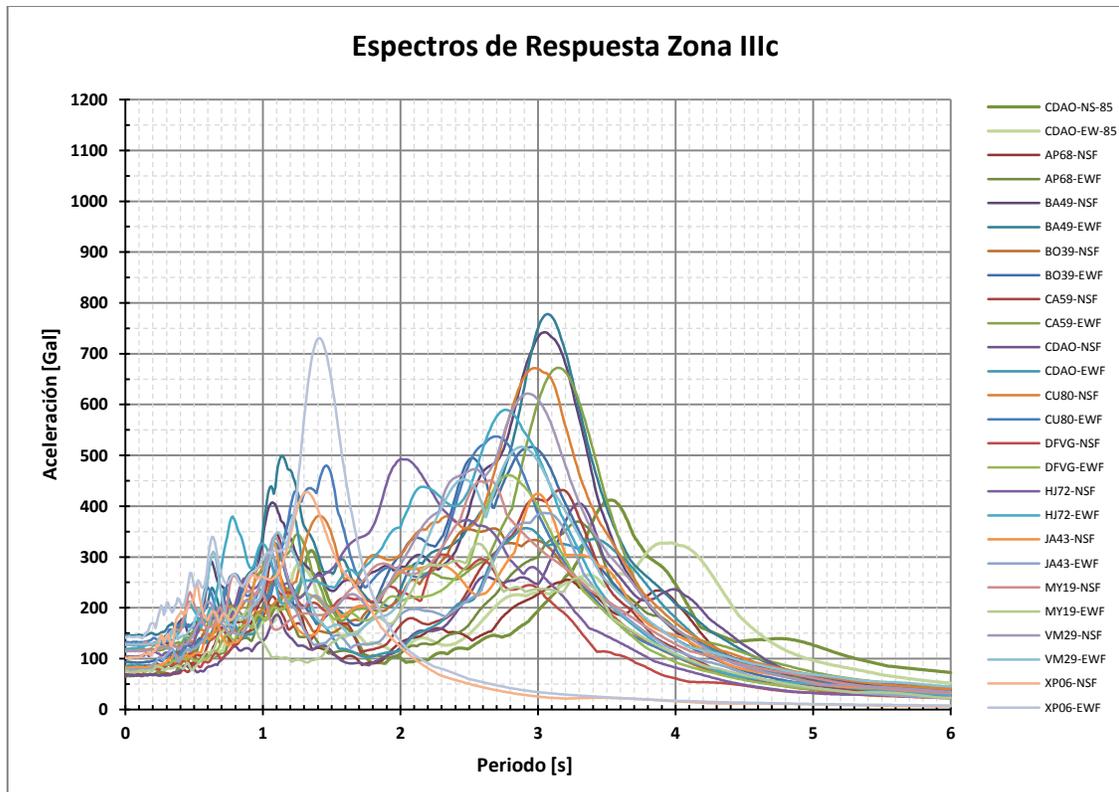


Figura IV.5 Espectros de respuesta calculados para la zona sísmica IIIc, aplicado el factor

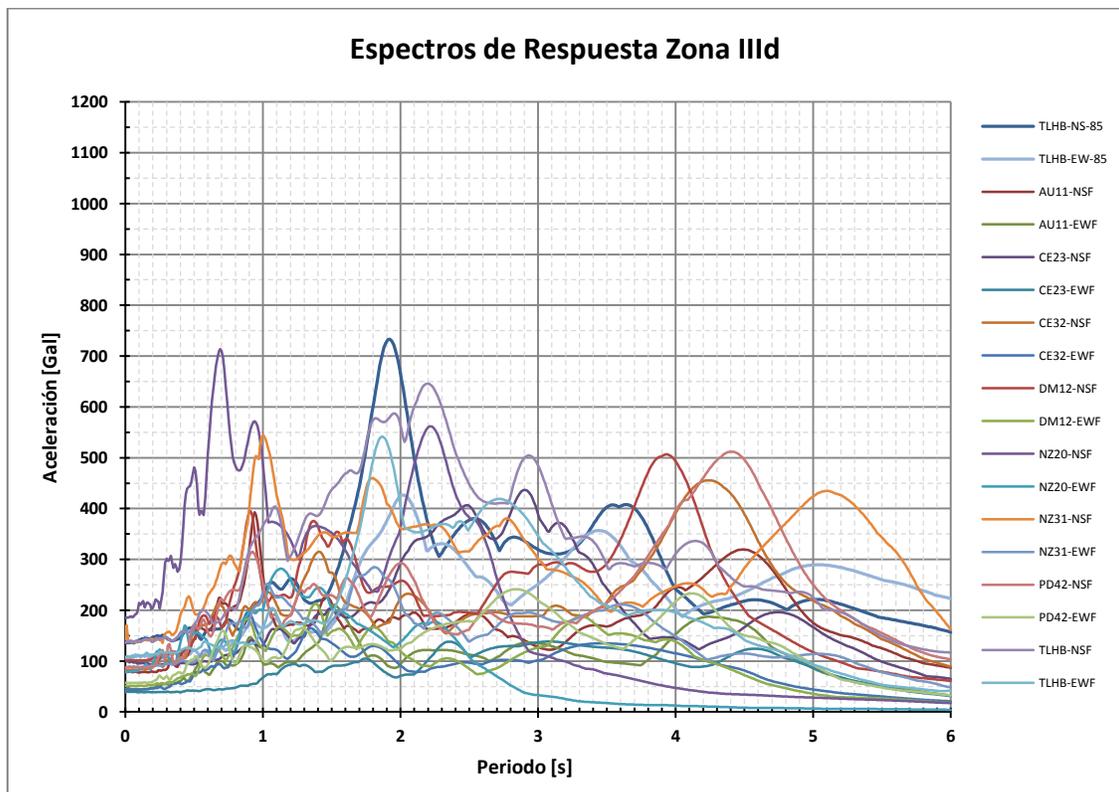


Figura IV.6 Espectros de respuesta calculados para la zona sísmica IIIId, aplicado el factor

CAPÍTULO V.

DETERMINACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO CONFORME A LA NORMATIVIDAD SÍSMICA DEL DISTRITO FEDERAL

V. DETERMINACIÓN DE ESPECTROS DE DISEÑO CONFORME A LA NORMATIVIDAD SÍSMICA DEL DISTRITO FEDERAL

V.1 Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo

De acuerdo con el cuerpo de las Normas para Diseño por Sismo (ref 3), el espectro de aceleraciones para diseño por sismo se obtiene a partir de las expresiones siguientes:

$$a = a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a} ; \quad \text{si } T < T_a \quad (5.1)$$

$$a = c ; \quad \text{si } T_a \leq T \leq T_b \quad (5.2)$$

$$a = qc ; \quad \text{si } T > T_b \quad (5.3)$$

$$\text{donde } q = \left(\frac{T_b}{T} \right)^r \quad (5.4)$$

Los parámetros que intervienen en estas expresiones para fines de este trabajo se obtienen de la tabla V.1.

Tabla V.1 Valores de los parámetros para calcular los espectros de aceleraciones

| Zona | c^* | a_0^* | T_a^{**} | T_b^{**} | r |
|------|-------|---------|------------|------------|-----|
| IIIb | 0.45 | 0.11 | 0.85 | 3.0 | 2.0 |
| IIIc | 0.40 | 0.10 | 1.25 | 4.2 | 2.0 |
| IIId | 0.30 | 0.10 | 0.85 | 4.2 | 2.0 |

* Fracción de la aceleración de la gravedad

** Periodos en segundos

Los espectros de aceleraciones para diseño sísmico determinados con las ecuaciones 5.1 a 5.4 para las zonas sísmicas IIIb, IIIc y IIId se muestran en las figuras V.1, V.2 y V.3 respectivamente.

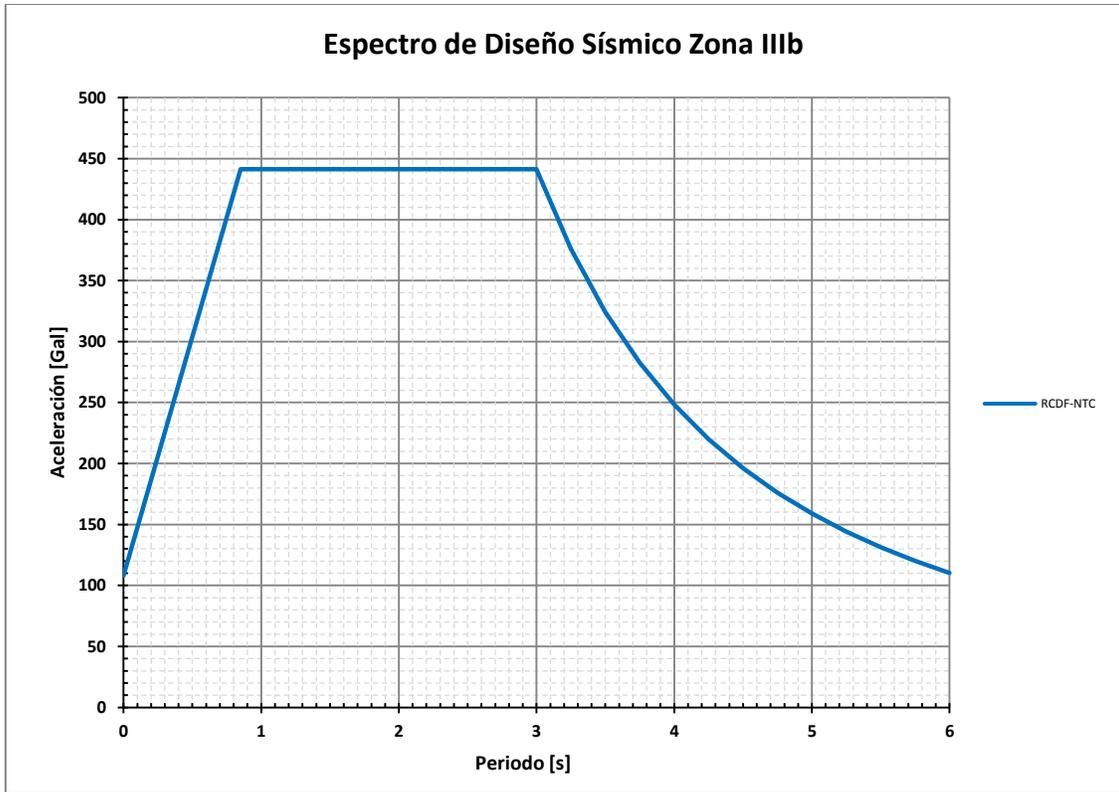


Figura V.1 Espectro de Diseño por Sismo para la zona sísmica IIIb



Figura V.2 Espectro de Diseño por Sismo para la zona sísmica IIIc

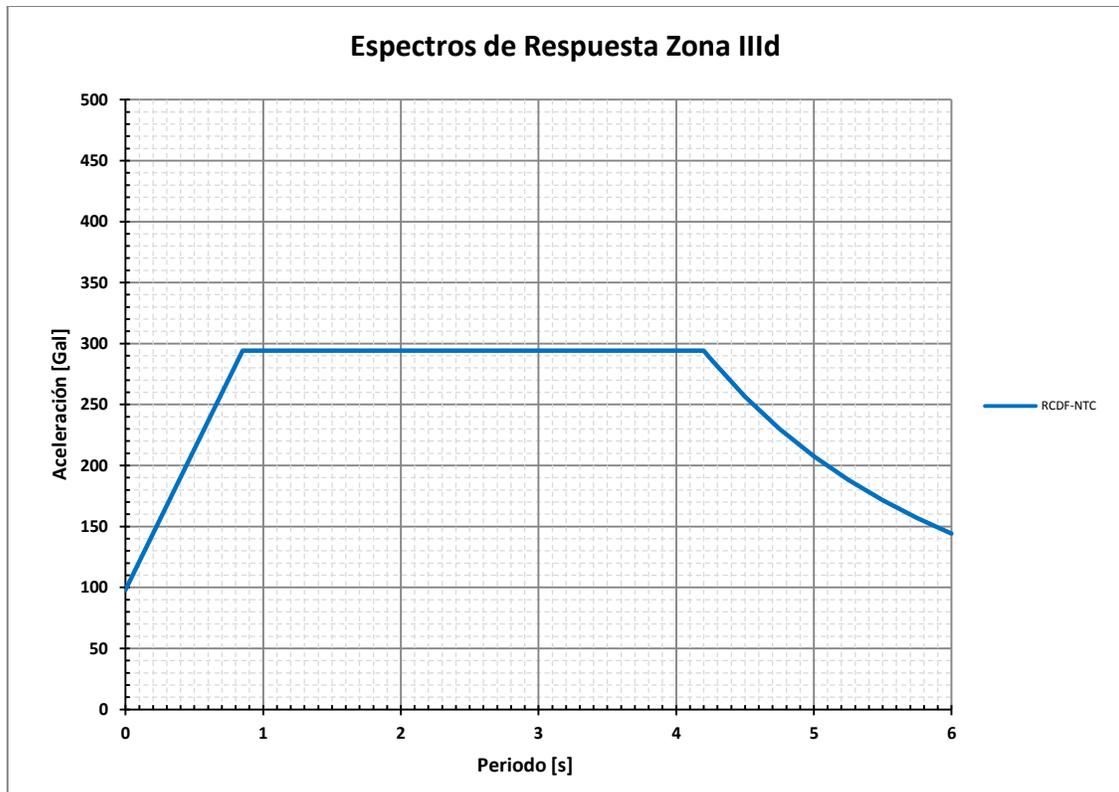


Figura V.3 Espectro de Diseño por Sismo para la zona sísmica IIIId

V.2 Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo

De acuerdo al Apéndice A de las Normas para Diseño por Sismo (ref 3) el espectro de aceleraciones para diseño por sismo se obtiene a partir de las expresiones siguientes:

$$a = \begin{cases} a_0 + (\beta c - a_0) \frac{T}{T_a} & ; \quad \text{si } T < T_a \\ \beta c & ; \quad \text{si } T_a \leq T \leq T_b \\ \beta c p \left(\frac{T_b}{T}\right)^2 & ; \quad \text{si } T \geq T_b \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\text{donde } p = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T}\right)^2 \quad (5.6)$$

El coeficiente de aceleración del terreno, a_0 , el coeficiente sísmico c , el coeficiente k y los periodos característicos T_a y T_b del espectro de aceleraciones se obtienen en función del periodo dominante del sitio, usando las siguientes expresiones:

$$a_0 = \begin{cases} 0.1 + 0.15(T_s - 0.5) & ; \quad \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 1.5 \text{ [s]} \\ 0.25 & ; \quad \text{si } T_s > 1.5 \text{ [s]} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$c = \begin{cases} 0.28 + 0.92(T_s - 0.5) & ; \quad \text{si } 0.5 < T_s \leq 1.5 \text{ [s]} \\ 1.2 & ; \quad \text{si } 1.5 < T_s \leq 2.5 \text{ [s]} \\ 1.2 - 0.5(T_s - 2.5) & ; \quad \text{si } 2.5 < T_s \leq 3.5 \text{ [s]} \\ 0.7 & ; \quad \text{si } T_s > 3.5 \text{ [s]} \end{cases} \quad (5.8)$$

$$T_a = \begin{cases} 0.2 + 0.65(T_s - 0.5) & ; \quad \text{si } 0.5 < T_s \leq 2.5 \text{ [s]} \\ 1.5 & ; \quad \text{si } 2.5 < T_s \leq 3.25 \text{ [s]} \\ 4.75 - T_s & ; \quad \text{si } 3.25 < T_s \leq 3.9 \text{ [s]} \\ 0.85 & ; \quad \text{si } T_s > 3.9 \text{ [s]} \end{cases} \quad (5.9)$$

$$T_b = \begin{cases} 1.35 & ; \quad \text{si } T_s \leq 1.125 \text{ [s]} \\ 1.2T_s & ; \quad \text{si } 1.125 < T_s \leq 3.5 \text{ [s]} \\ 4.2 & ; \quad \text{si } T_s > 3.5 \text{ [s]} \end{cases} \quad (5.10)$$

$$k = \begin{cases} 2 - T_s & ; \quad \text{si } 0.5 < T_s \leq 1.65 \text{ [s]} \\ 0.35 & ; \quad \text{si } T_s > 1.65 \text{ [s]} \end{cases} \quad (5.11)$$

Donde T_s es el periodo dominante más largo del terreno, a está expresada como fracción de la aceleración de la gravedad y β es un factor de reducción por amortiguamiento suplementario, que es igual a uno cuando se ignora la interacción suelo-estructura.

La reducción por sobrerresistencia está dada por el factor:

$$R = \begin{cases} \frac{10}{4 + \sqrt{\frac{T}{T_a}}} & ; \text{ si } T \leq T_a \\ 2 & ; \text{ si } T > T_a \end{cases} \quad (5.12)$$

Los espectros de aceleraciones para diseño sísmico determinados con las ecuaciones 5.5 a 5.12, considerando un factor $R = 1.0$. A partir del conocimiento del periodo dominante de vibración del suelo (ref 9) de las estaciones acelerométricas correspondientes a las zonas sísmicas IIIb, IIIc y III d, los espectros de diseño construidos se muestran en las figuras V.4 a V.6.

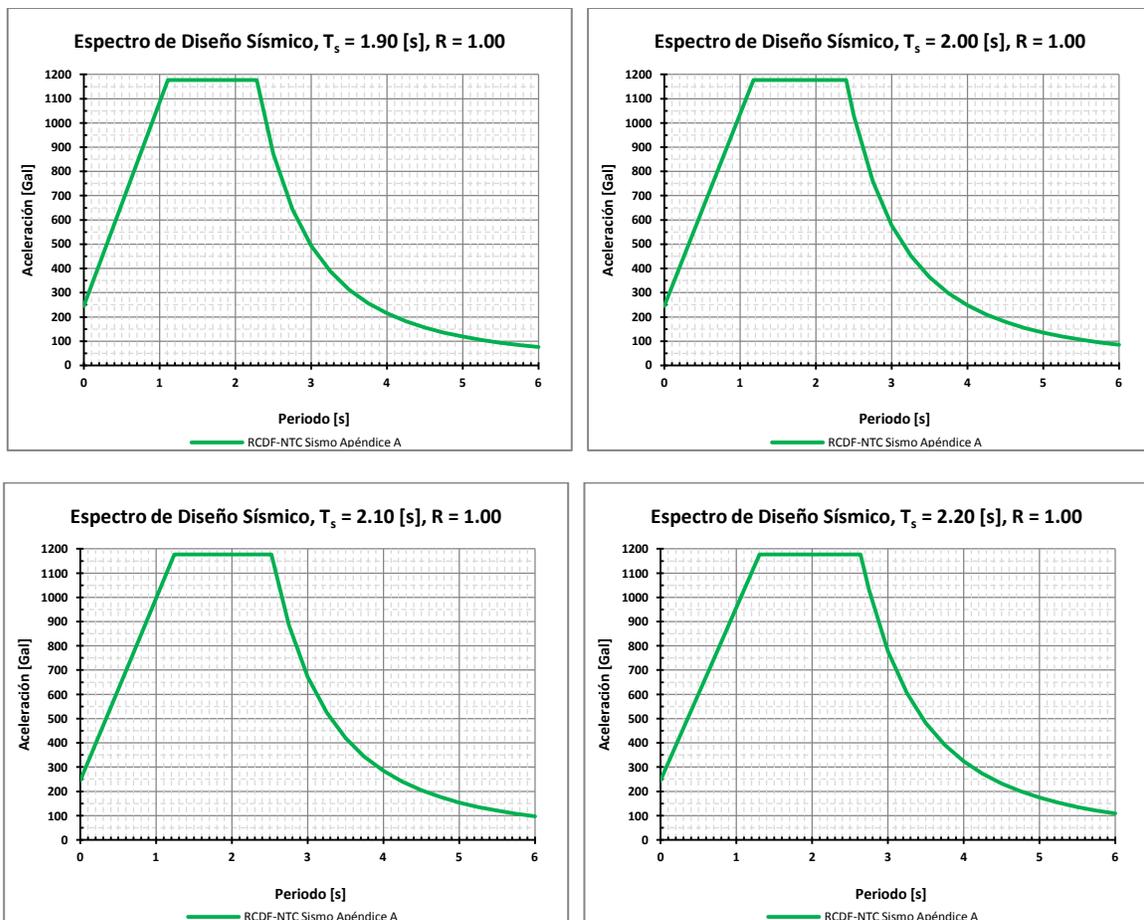


Figura V.4 Espectros de diseño obtenidos del Apéndice A para sitios en la zona sísmica IIIb

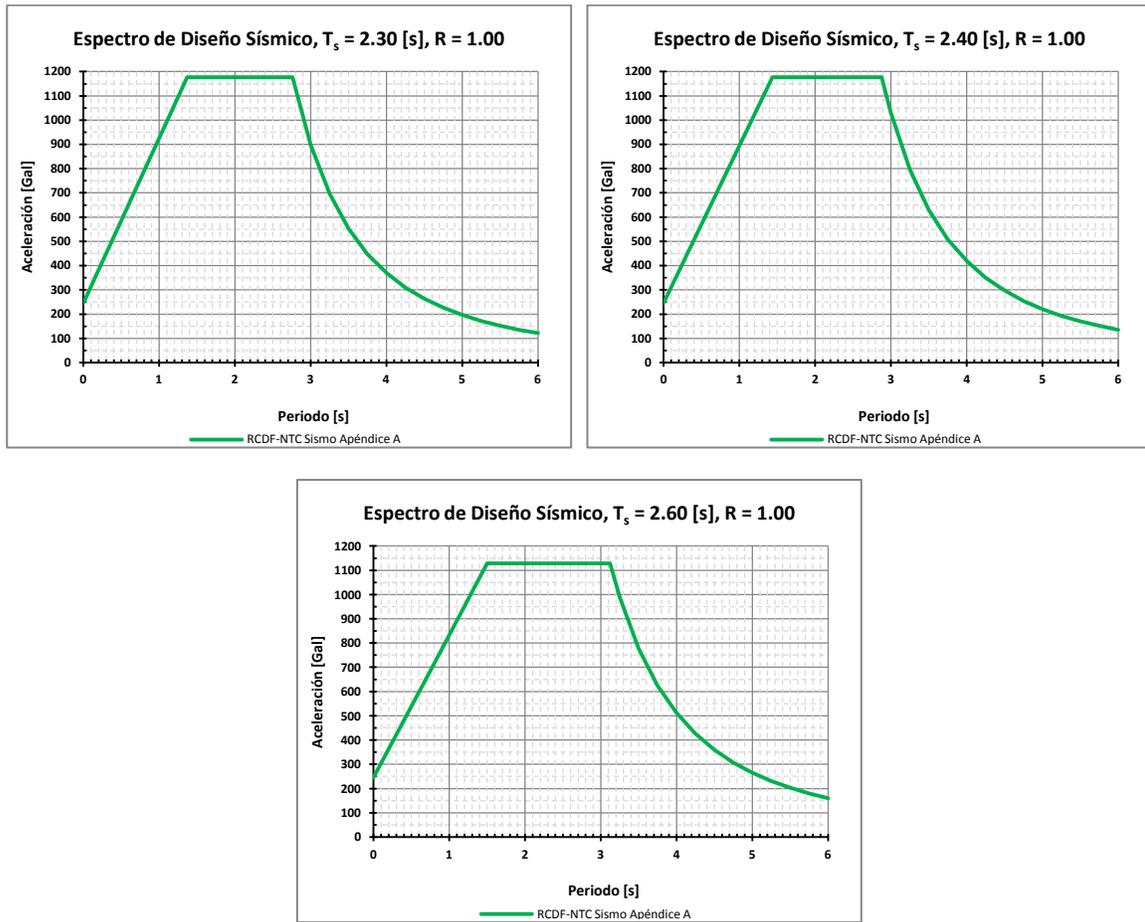


Figura V.4 (continuación)

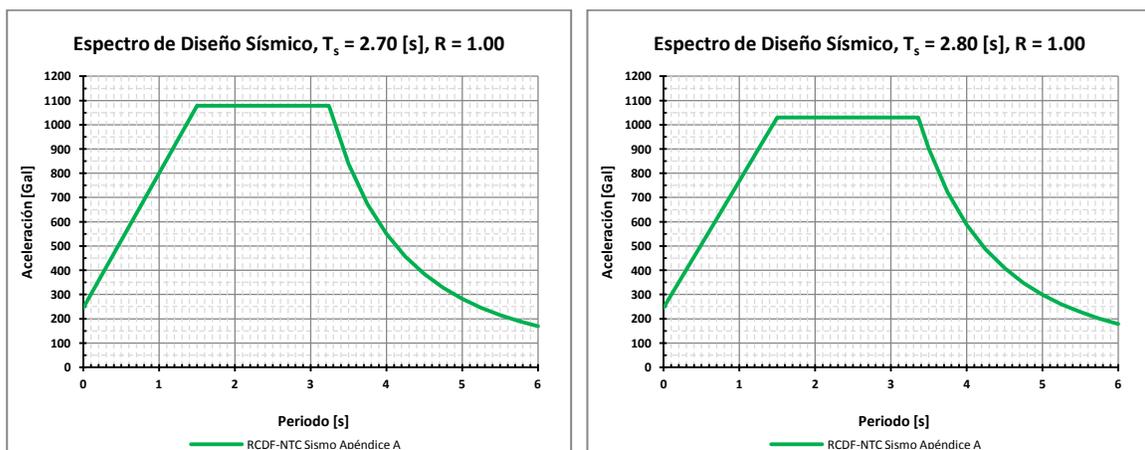


Figura V.5 Espectros de diseño obtenidos del Apéndice A para sitios en la zona sísmica IIIc

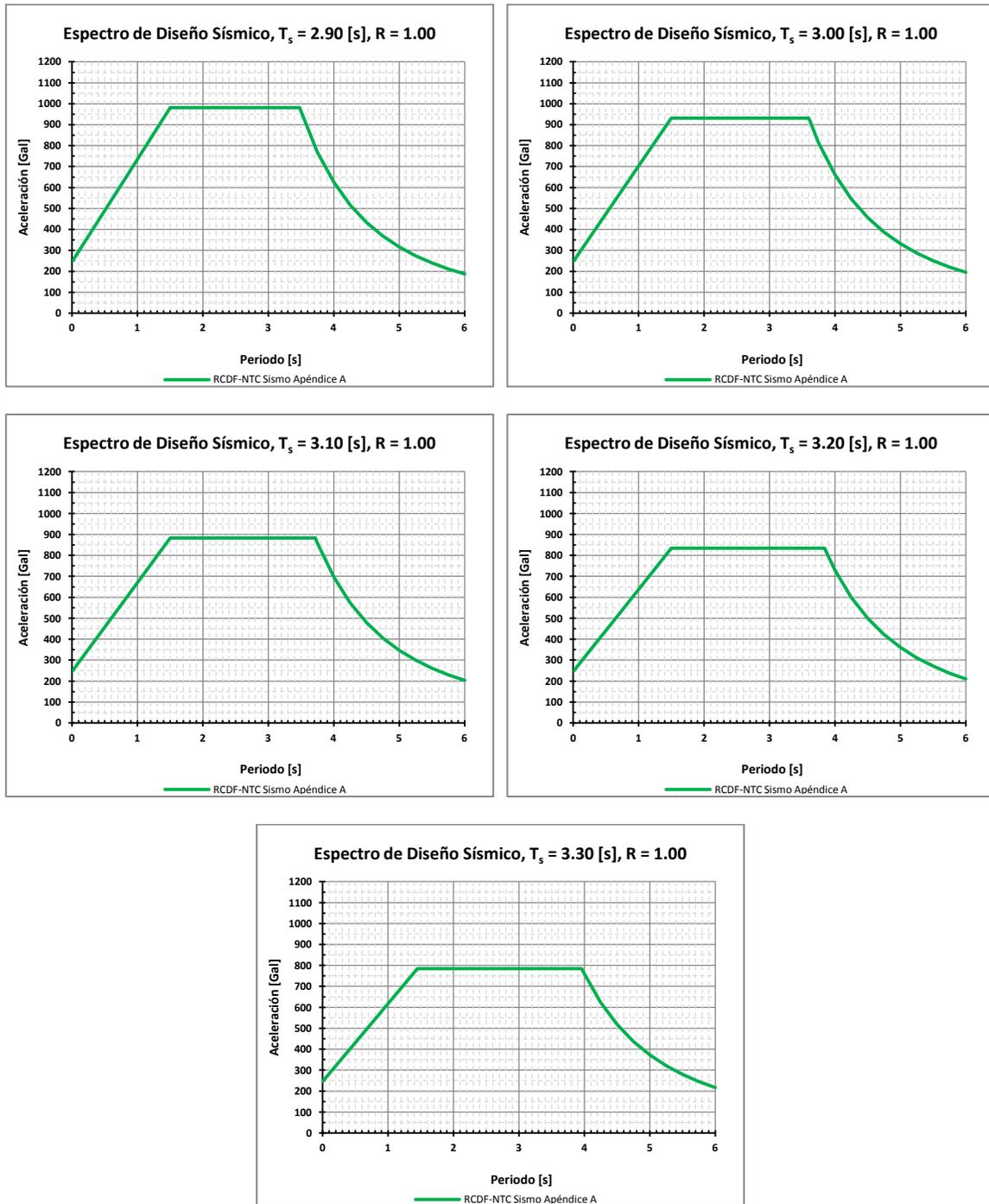


Figura V.5 (continuación)

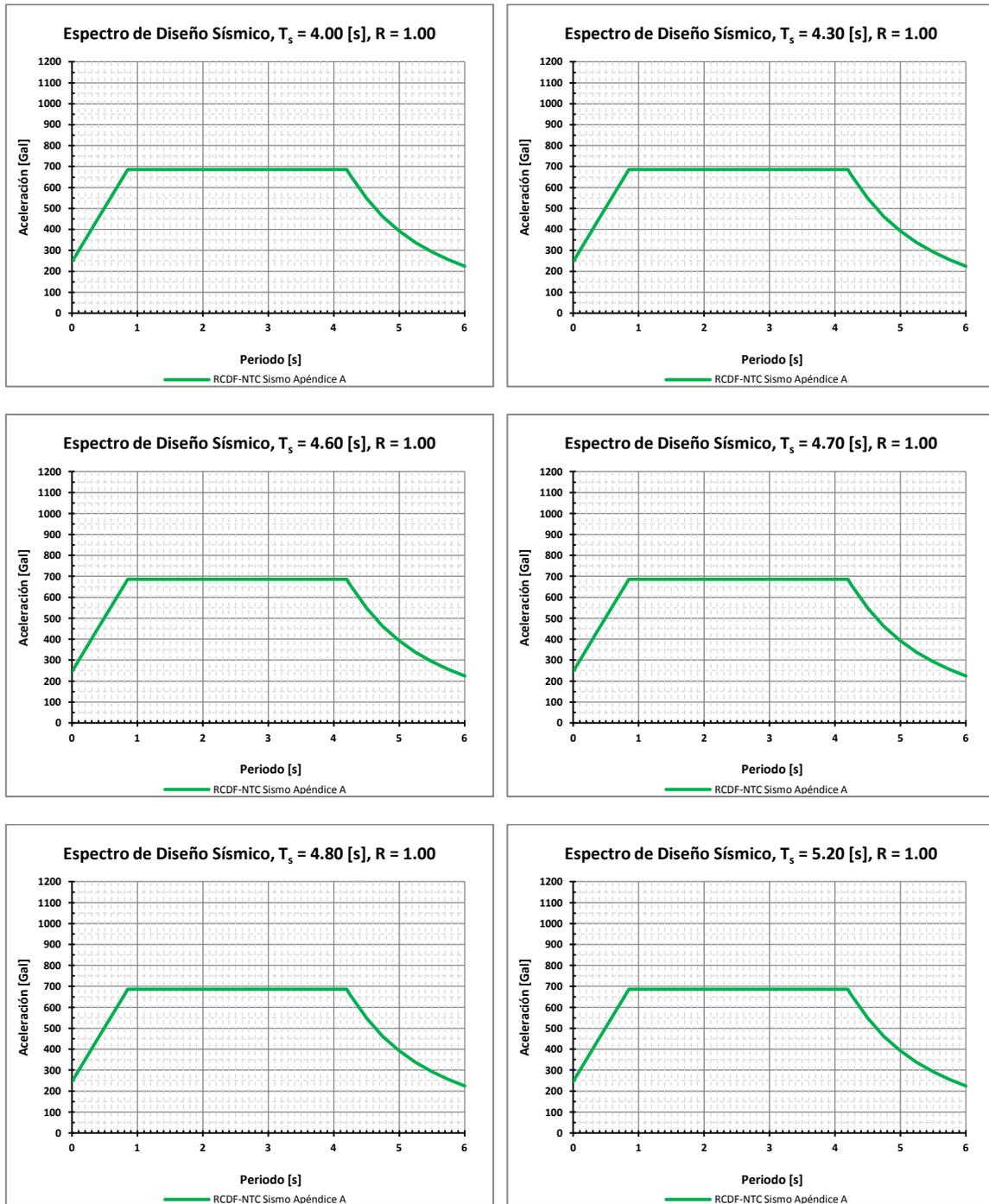


Figura V.6 Espectros de diseño obtenidos del Apéndice A para sitios en la zona sísmica III d

CAPÍTULO VI.

COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA Y ESPECTROS DE DISEÑO

VI. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA Y ESPECTROS DE DISEÑO

VI.1 Comparación entre los Espectros de Respuesta calculados y los Espectros de Diseño de las Normas para Diseño por Sismo

Los espectros de respuesta calculados de los registros capturados durante el sismo del 25 de abril de 1989 se compararon con los espectros de diseño establecidos en el cuerpo de las Normas para Diseño por Sismo. En las figuras VI.1, VI.2 y VI.3 se muestra tal comparación para las zonas sísmicas IIIb, IIIc y IIIId, respectivamente.

Como se puede observar en estas figuras, para las tres zonas los espectros de respuesta calculados están cubiertos por su correspondiente espectro de diseño.

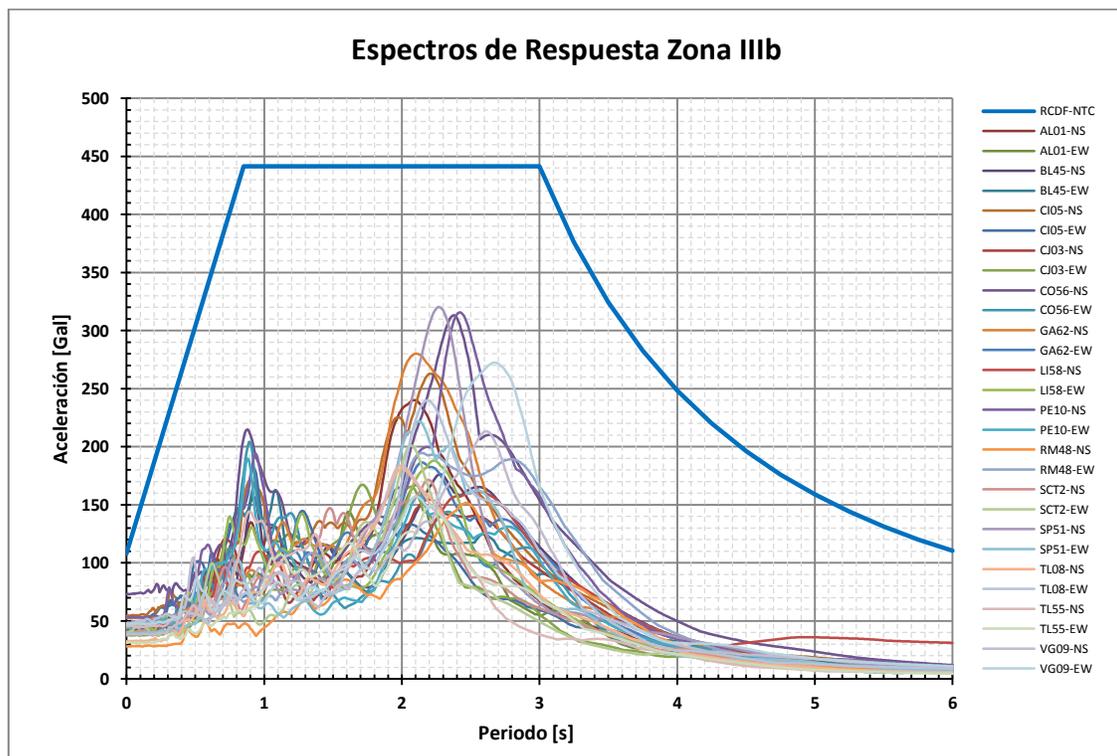


Figura VI.1 Comparación entre espectros de respuesta y espectro de diseño reglamentario para la zona IIIb

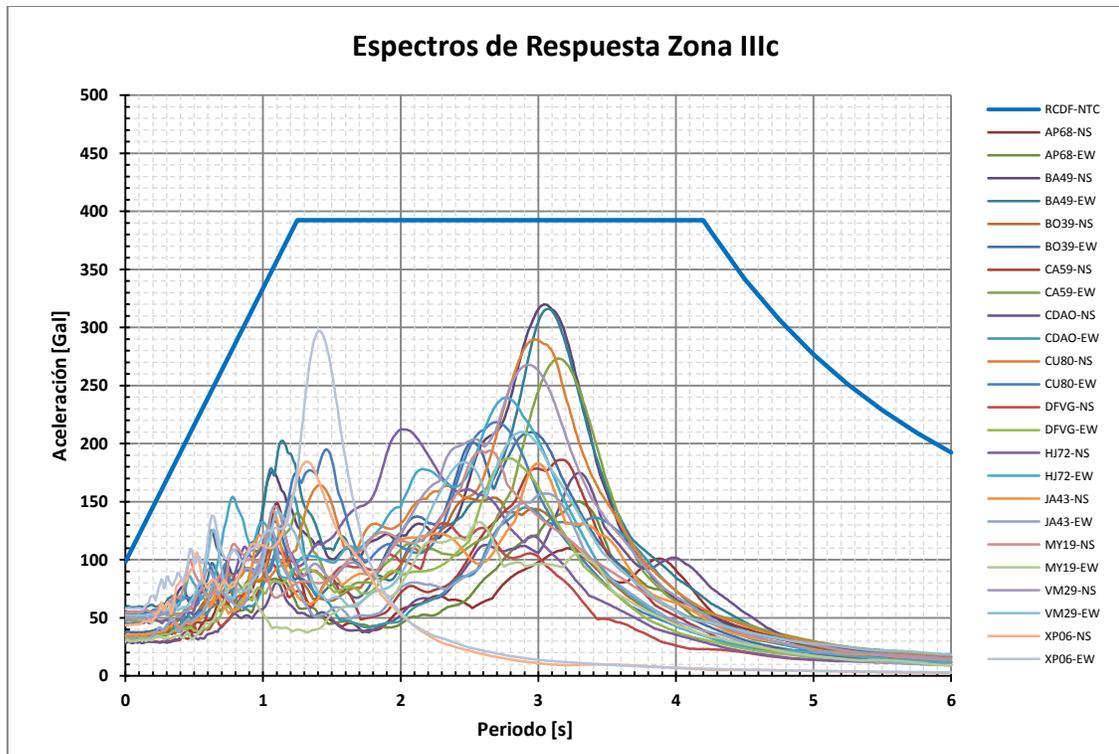


Figura VI.2 Comparación entre espectros de respuesta y espectro de diseño reglamentario para la zona IIIc

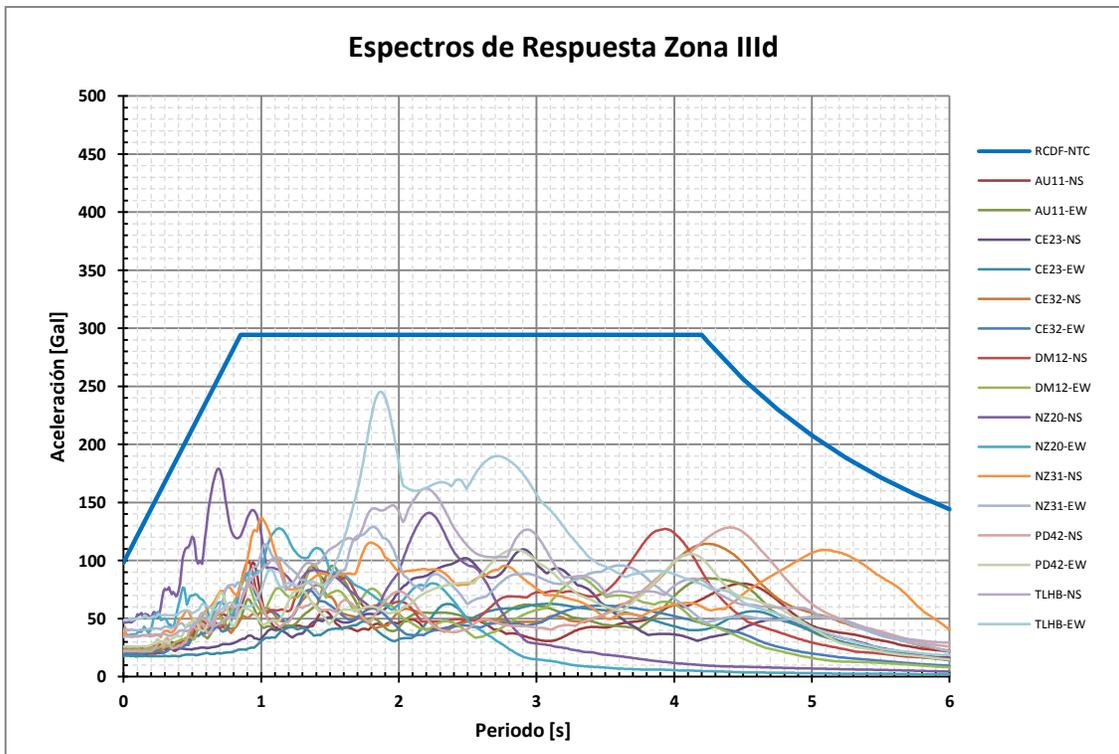


Figura VI.3 Comparación entre espectros de respuesta y espectro de diseño reglamentario para la zona IIIId

Los espectros de respuesta calculados para el sismo del 25 de abril de 1989 multiplicados por su correspondiente factor para simular un movimiento similar al del sismo del 19 de septiembre de 1985, se compararon con los espectros de diseño establecidos en el cuerpo de las Normas para Diseño por Sismo, con una diferencia al caso anterior: los resultados obtenidos para los espectros calculados se dividieron entre dos debido a que los espectros de diseño llevan aplicados implícitamente un factor de sobrerresistencia igual a 2. En el caso anterior, no se aplicó este factor adicional pues los valores de los espectros de respuesta calculados al 100%, no exceden de los valores de los espectros de diseño. Adicionalmente, se incluyeron los espectros de los registros del sismo de 1985. En las figuras VI.4, VI.5 y VI.6 se muestra tal comparación para las zonas sísmicas IIIb, IIIc y III d, respectivamente.

Como puede observarse en la figura VI.4 se presentaron espectros que exceden el valor de la meseta del espectro de diseño, inclusive el espectro de SCT1-EW para el sismo del 85 no está cubierto. Para la zona IIIc, los espectros de respuesta están dentro del espectro de diseño. Y en la figura VI.6 que corresponde a la zona III d, se observa que tienen una importante participación el segundo y tercer modo de vibrar del suelo de tal manera que su respuesta sísmica es mayor incluso que el primer modo de vibrar del sitio. Así mismo, en esta zona sísmica se presentan espectros calculados que no están cubiertos en la rama ascendente, meseta, ni en la rama descendente del espectro de diseño.

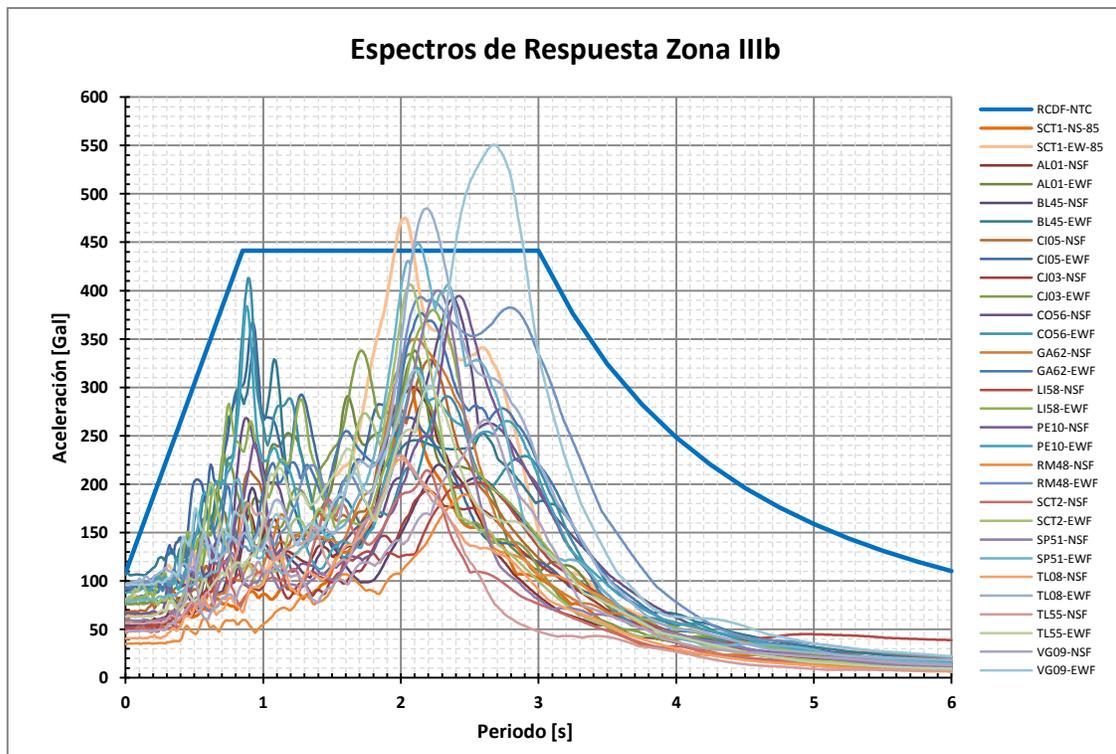


Figura VI.4 Comparación de espectros de respuesta escalados y espectro de diseño reglamentario para la zona IIIb

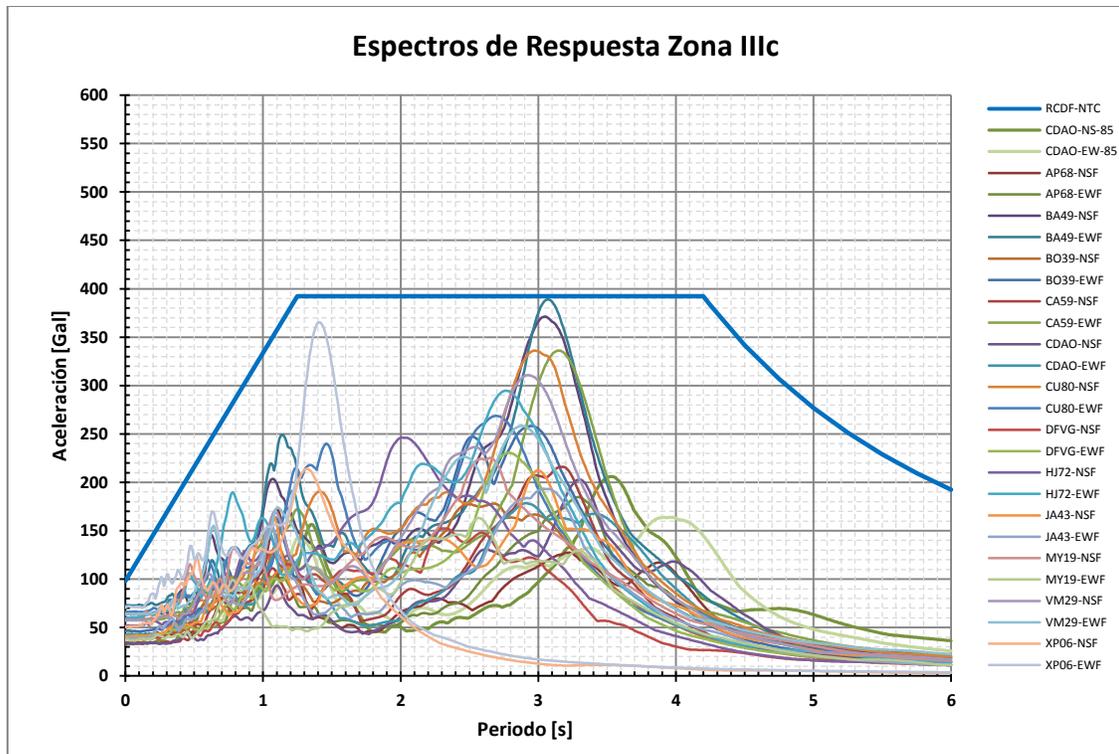


Figura VI.5 Comparación de espectros de respuesta escalados y espectro de diseño reglamentario para la zona IIIc

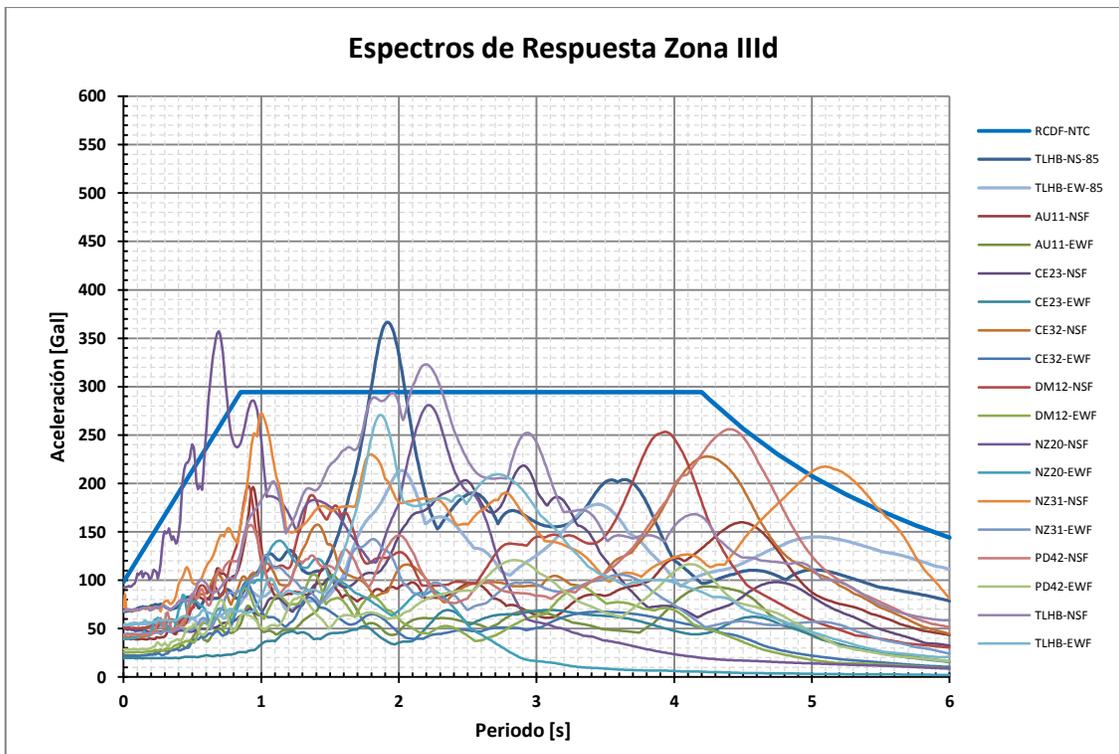


Figura VI.6 Comparación de espectros de respuesta escalados y espectro de diseño reglamentario para la zona IIIId

VI.2 Comparación de los Espectros de Respuesta calculados y los Espectros de Diseño del Apéndice A de las Normas para Diseño por Sismo

Para la comparación de los espectros de respuesta de sitio y los espectros de diseño sísmico se tomaron en cuenta los espectros al 100% calculados para los registros del sismo de 1989, los espectros al 100% calculados para los registros del sismo de 1989 afectados por su correspondiente factor de 1985 y los espectros al 100% calculados para los registros del sismo de 1985.

La comparación se realizó con su respectivo espectro de diseño construido a partir del periodo dominante más largo del terreno y se consideró un factor de sobrerresistencia igual a 1.0 debido a que los espectros calculados se dejaron al 100%.

En las figuras VI.7 a VI.13 se presenta la comparación correspondiente a las estaciones que se encuentran en la zona sísmicas IIIb; en esta condición todos los espectros calculados quedaron contenidos en el espectro de diseño. Únicamente para el caso del espectro de diseño sísmico construido con un $T_s = 2.40$ [s] se observa que uno de los espectros calculados llega a la línea de la rama ascendente.

En las figuras VI.14 a VI.20 se muestra la comparación que corresponde a las estaciones que se encuentran en la zona IIIc; en esta condición todos los espectros de respuesta calculados quedaron cubiertos por el espectro de diseño.

Finalmente, las figuras VI.21 a VI.26 corresponden a la comparación de las estaciones que se encuentran en la zona sísmica III d; en este caso los espectros construidos para un periodo dominante del terreno de 4.70 y 5.20 [s] excedieron los valores del espectro de diseño sísmico.

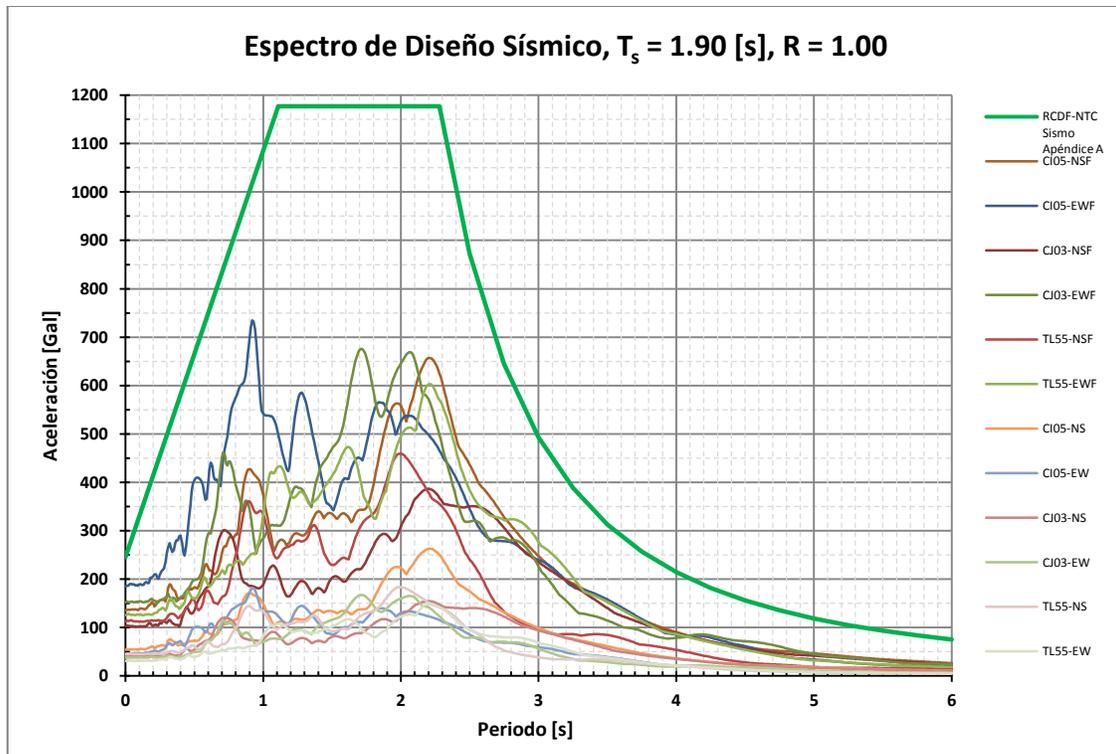


Figura VI.7 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 1.90$ [s]

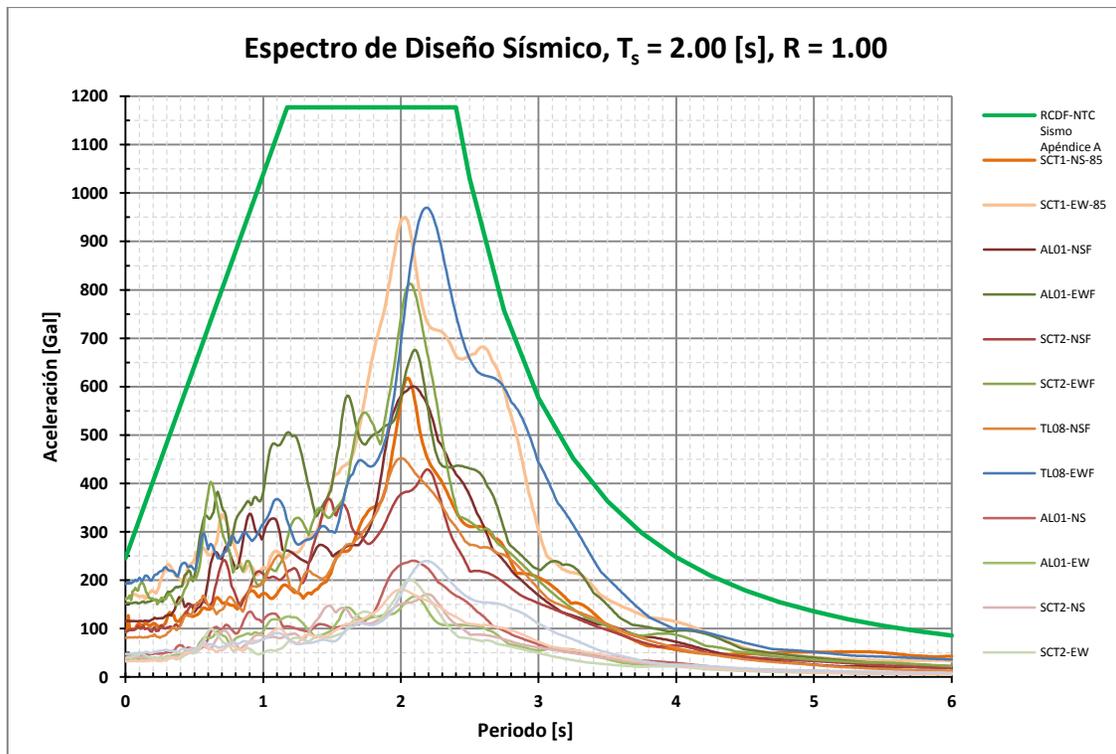


Figura VI.8 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 2.00$ [s]

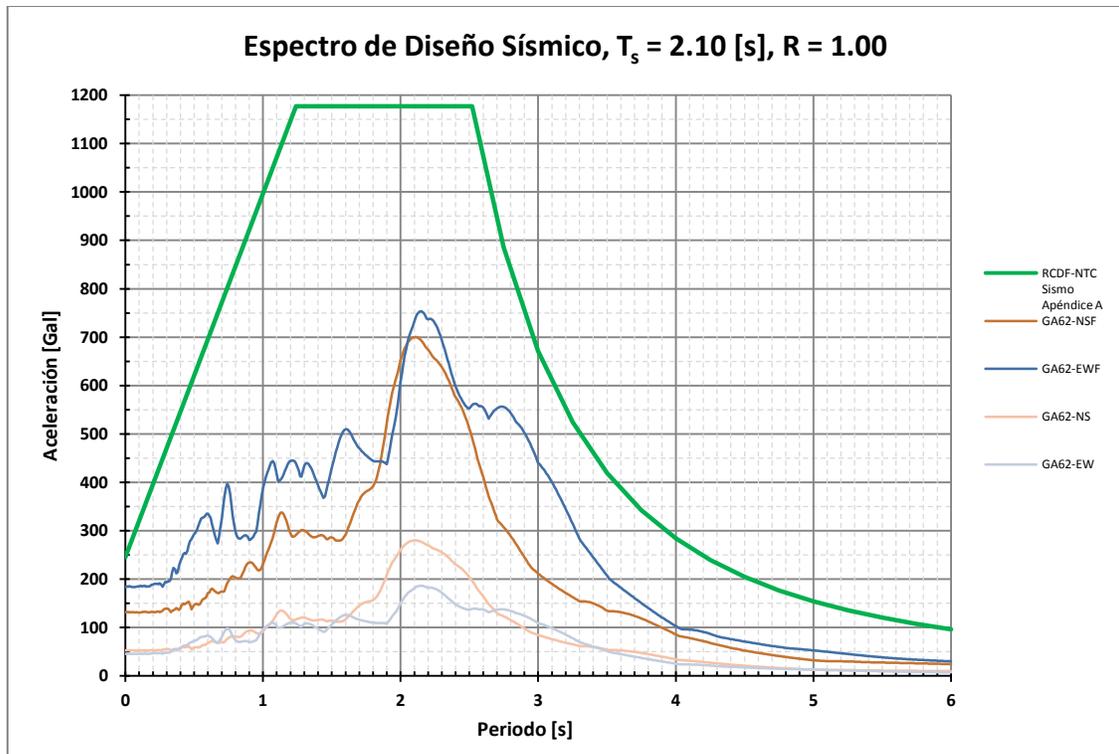


Figura VI.9 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 2.10$ [s]

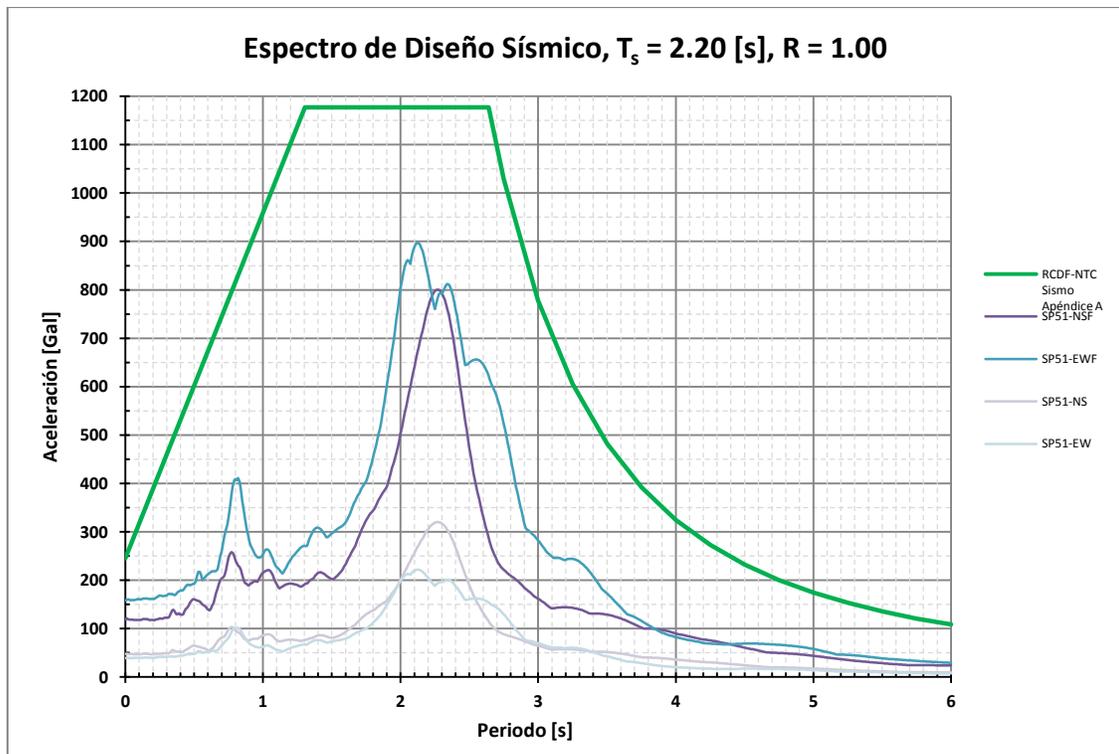


Figura VI.10 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 2.20$ [s]

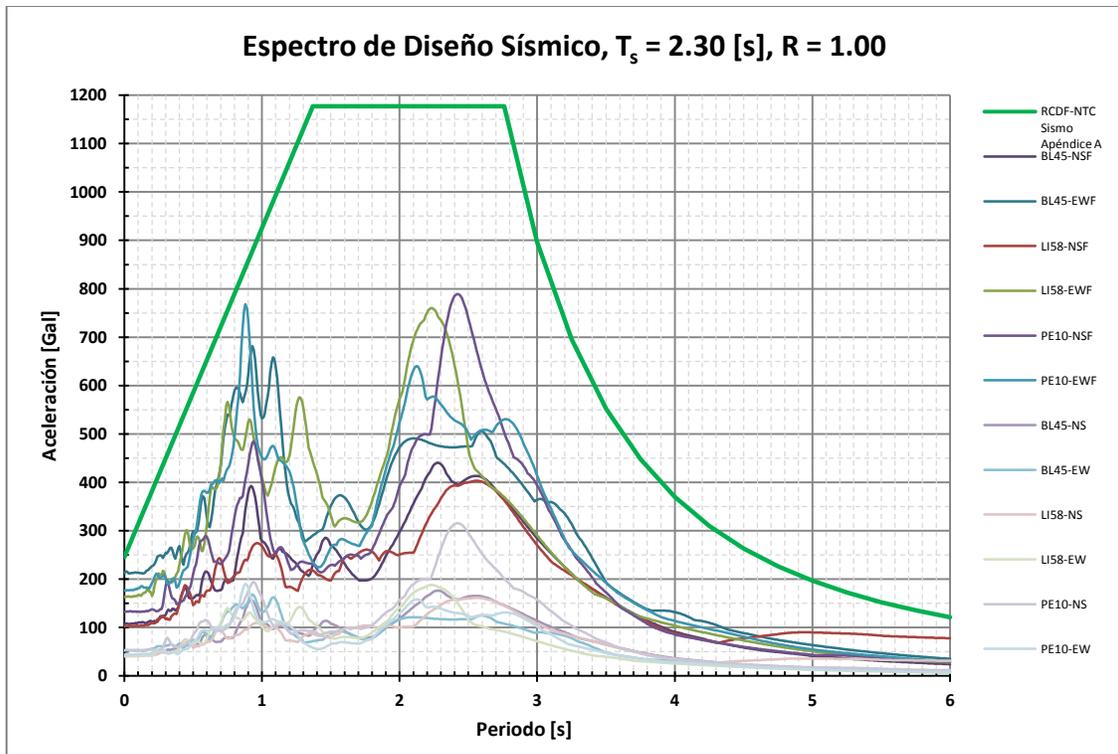


Figura VI.11 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 2.30$ [s]

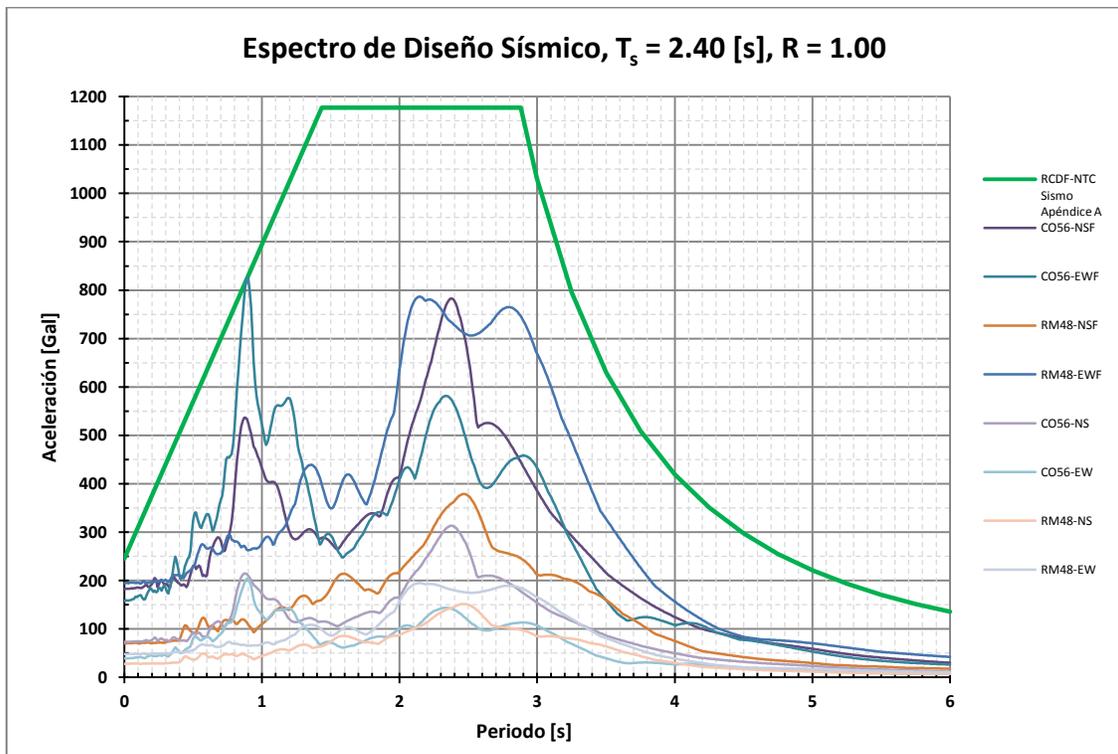


Figura VI.12 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 2.40$ [s]

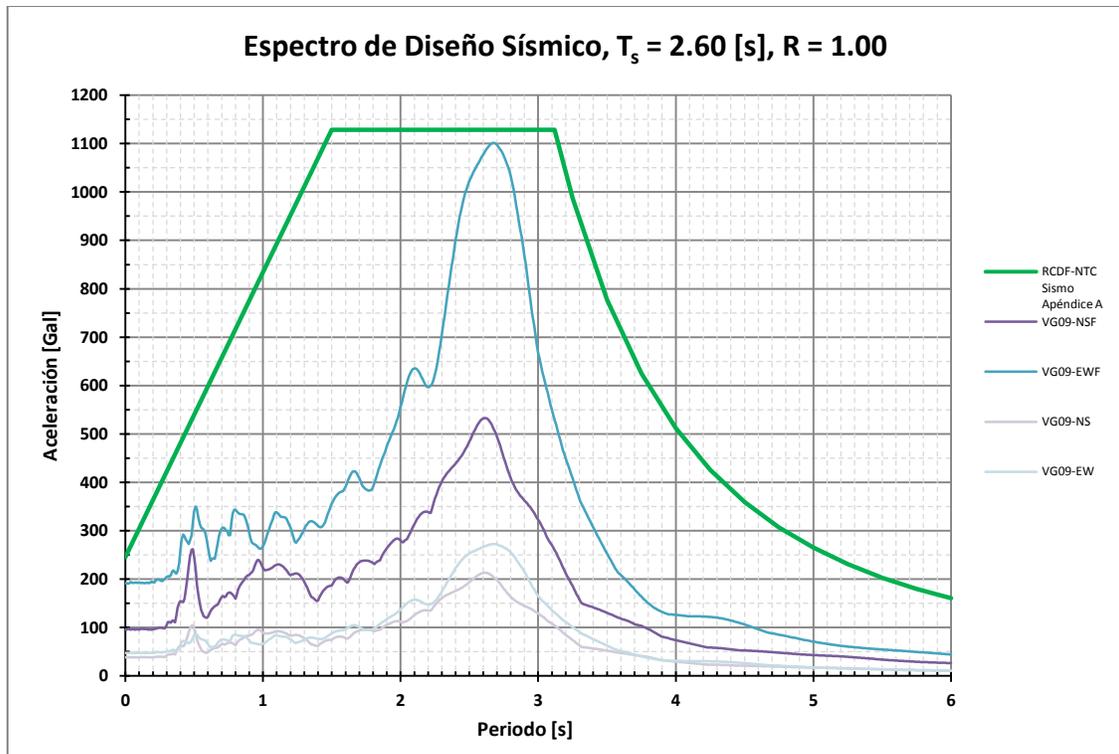


Figura VI.13 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 2.60$ [s]

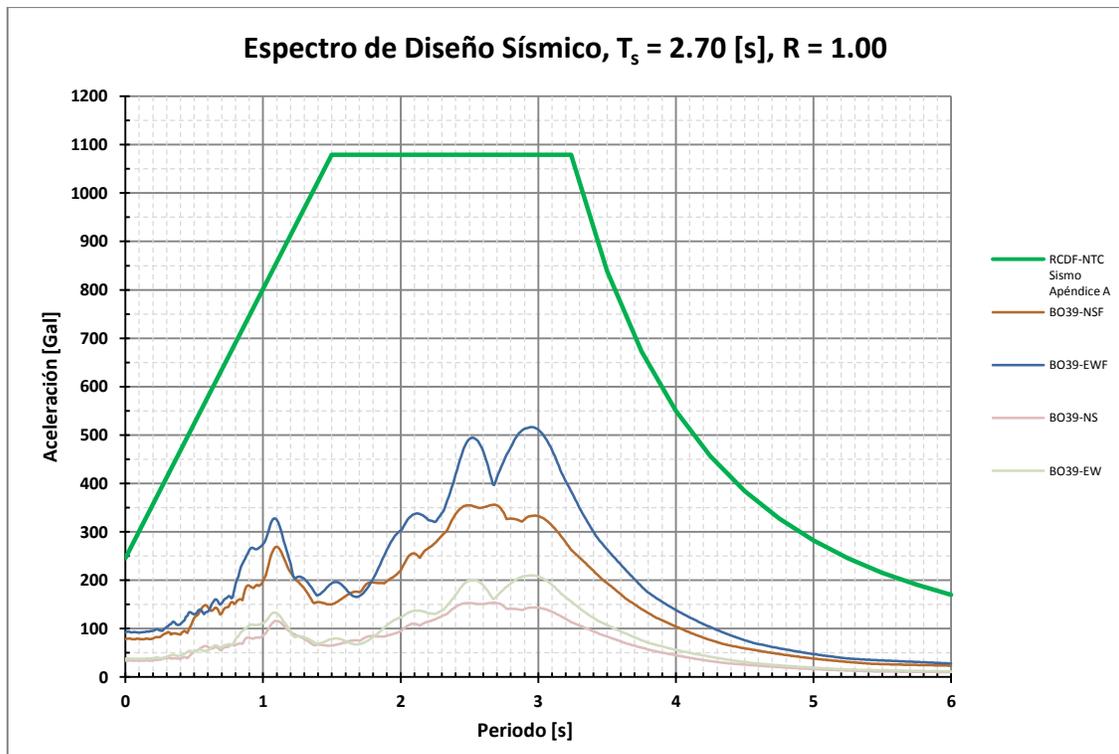


Figura VI.14 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 2.70$ [s]

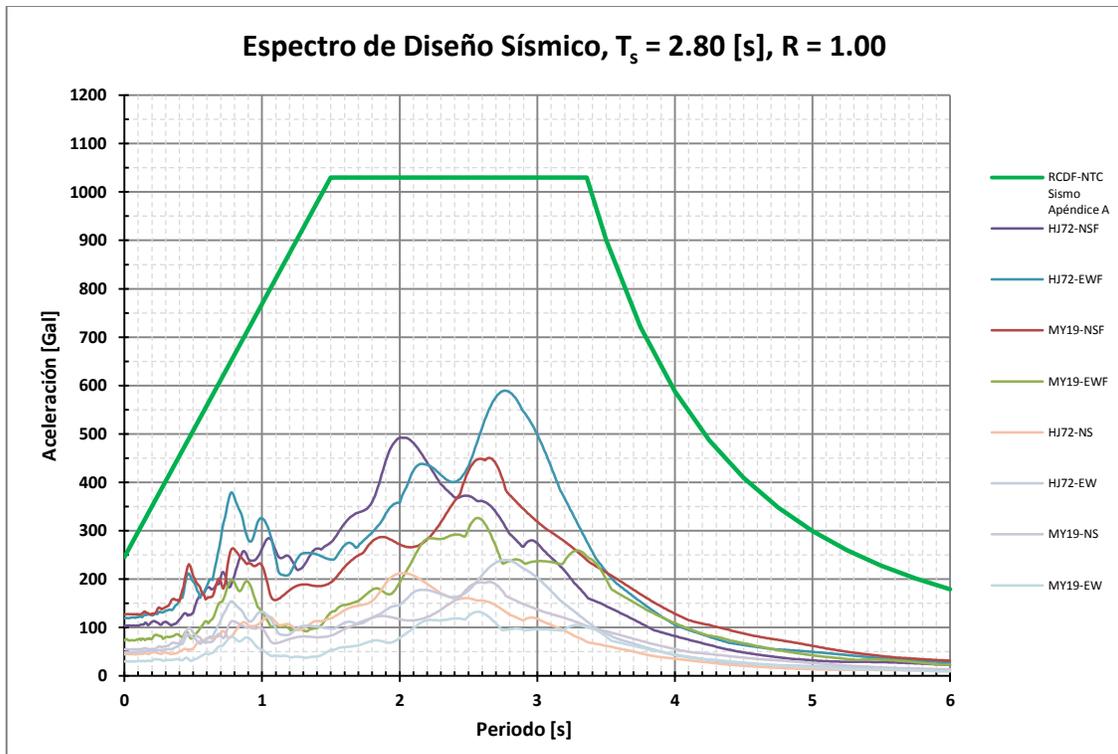


Figura VI.15 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 2.80$ [s]

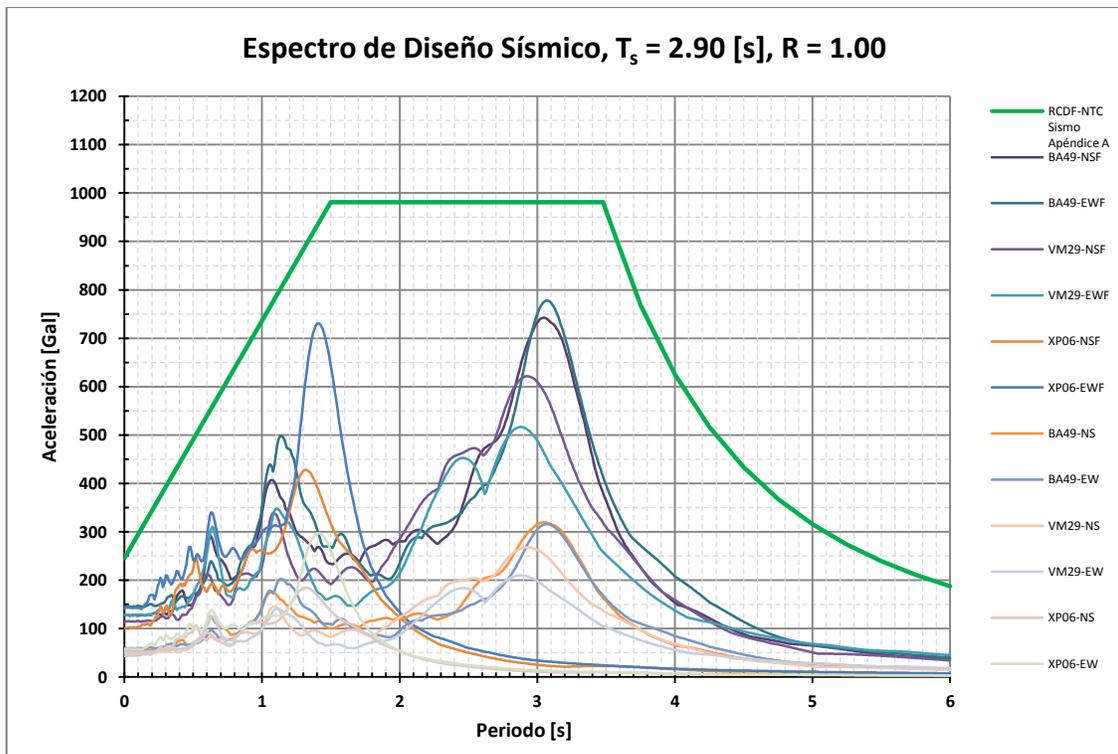


Figura VI.16 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 2.90$ [s]

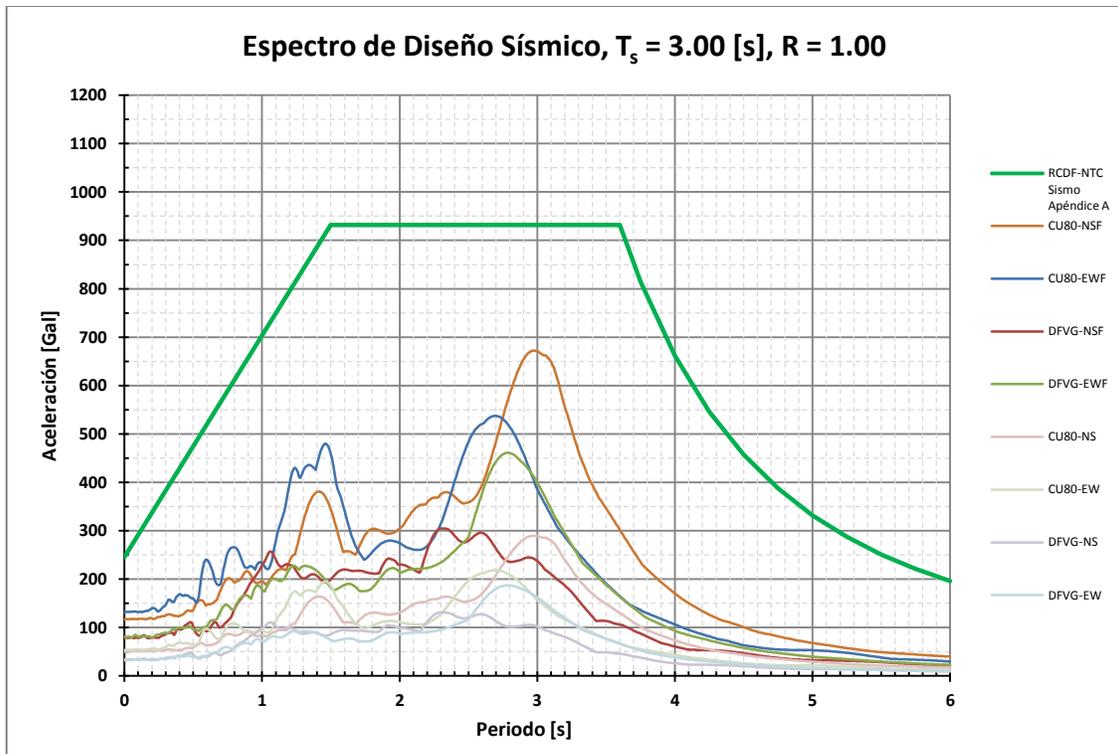


Figura VI.17 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 3.00$ [s]

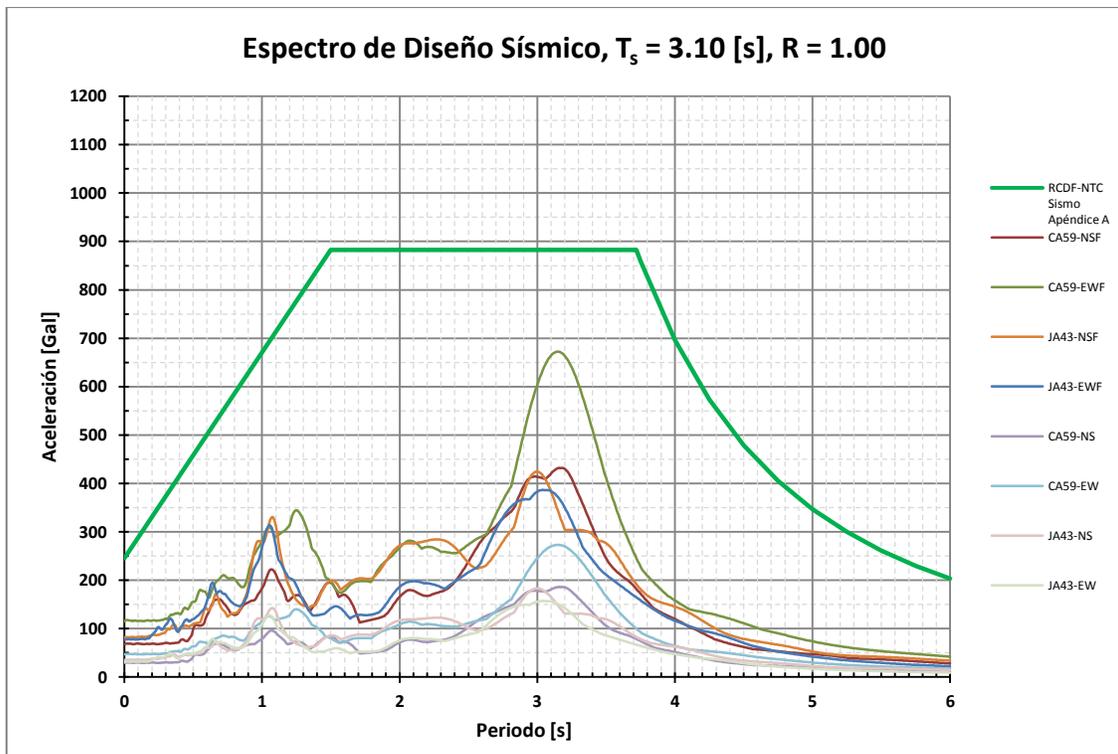


Figura VI.18 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 3.10$ [s]

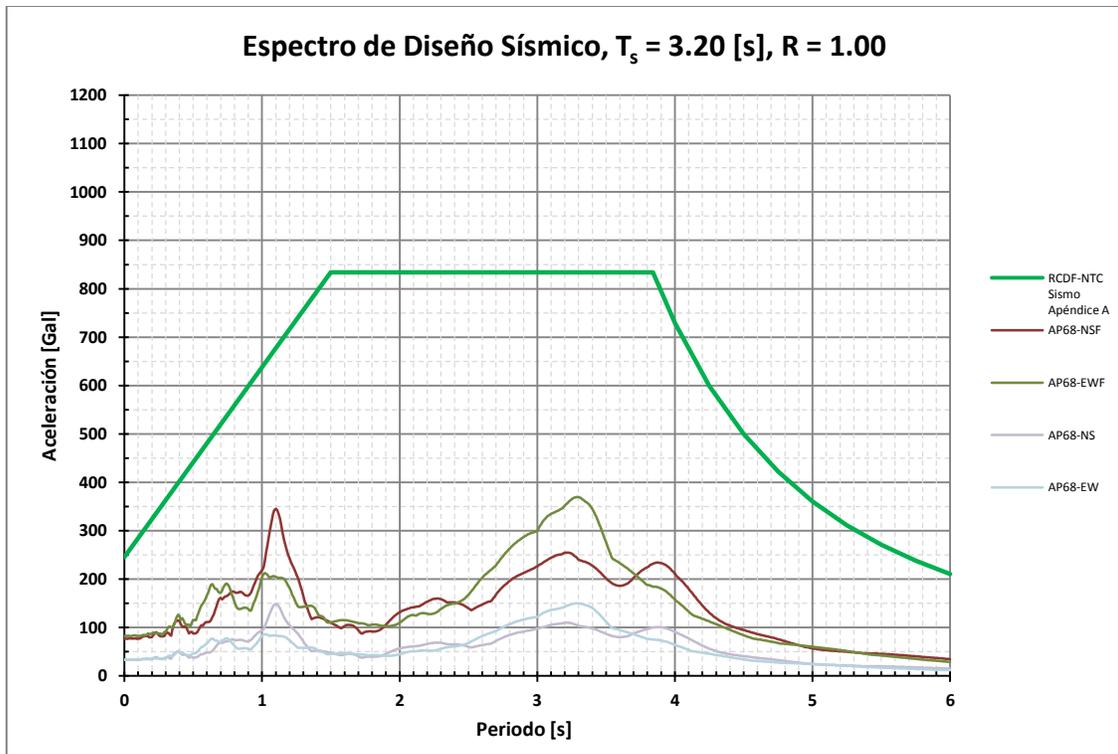


Figura VI.19 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 3.20$ [s]

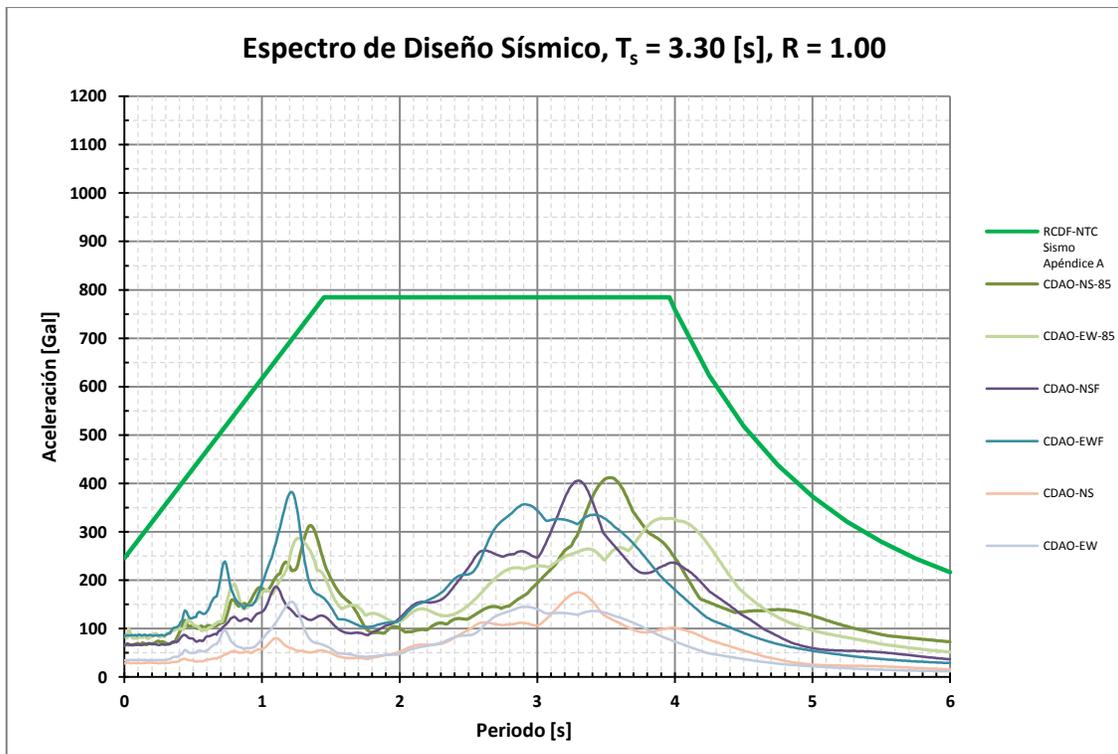


Figura VI.20 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 3.30$ [s]

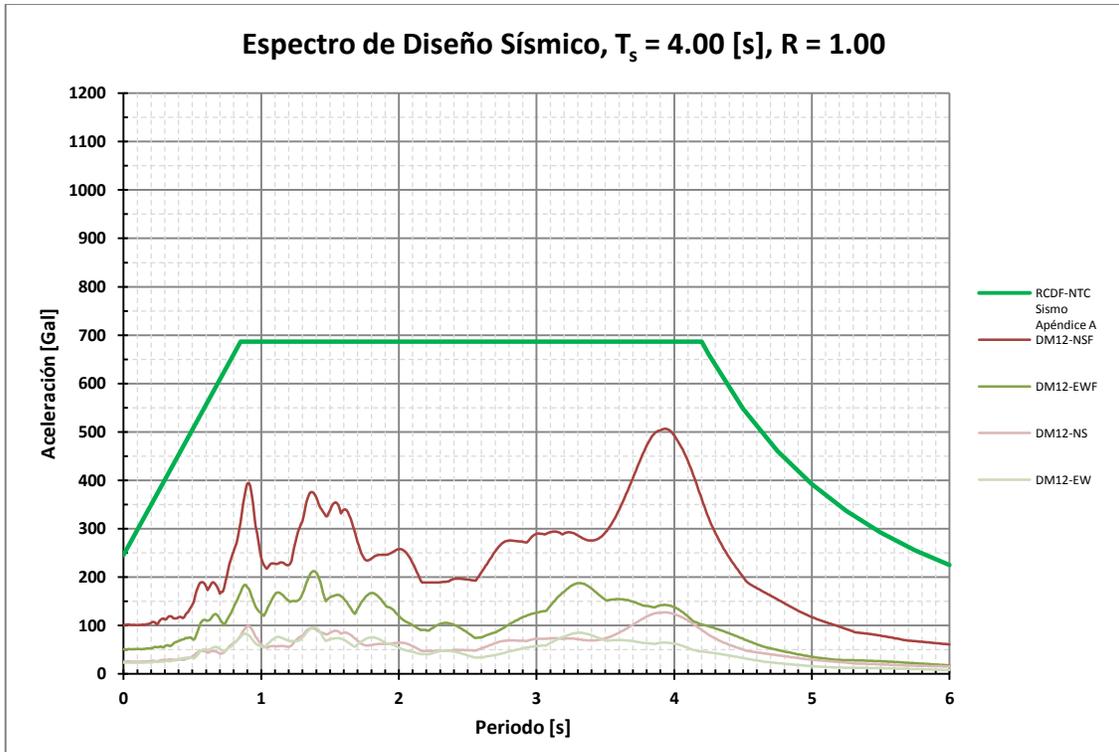


Figura VI.21 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 4.00$ [s]

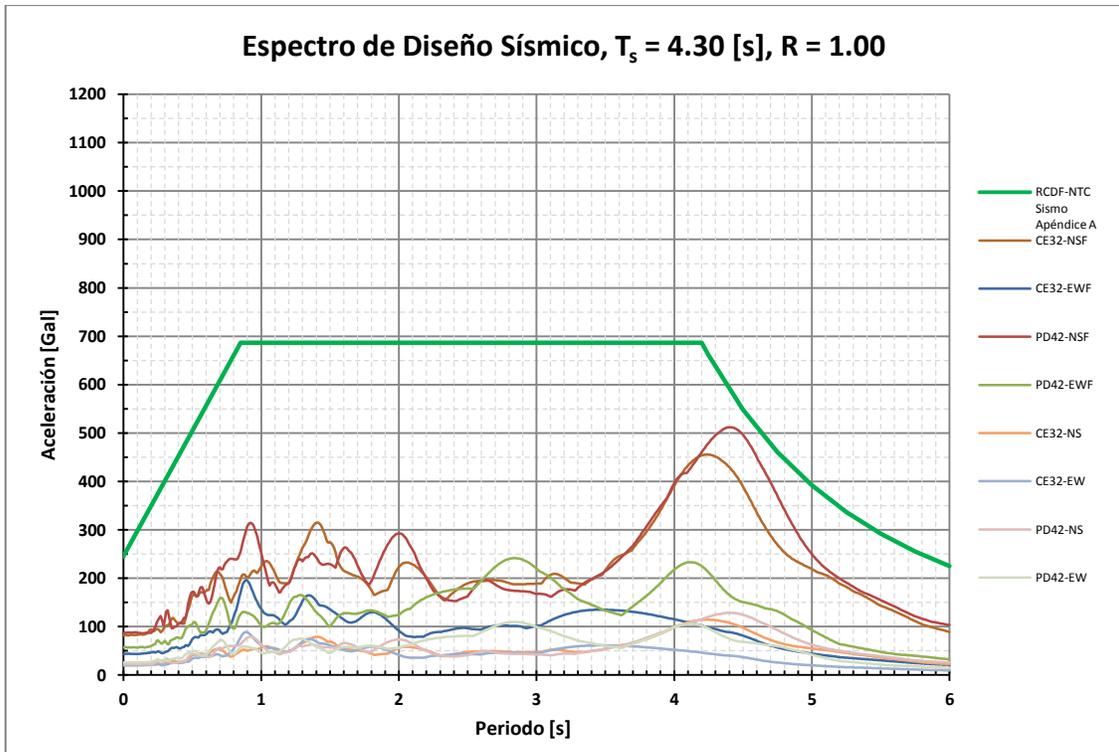


Figura VI.22 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 4.30$ [s]

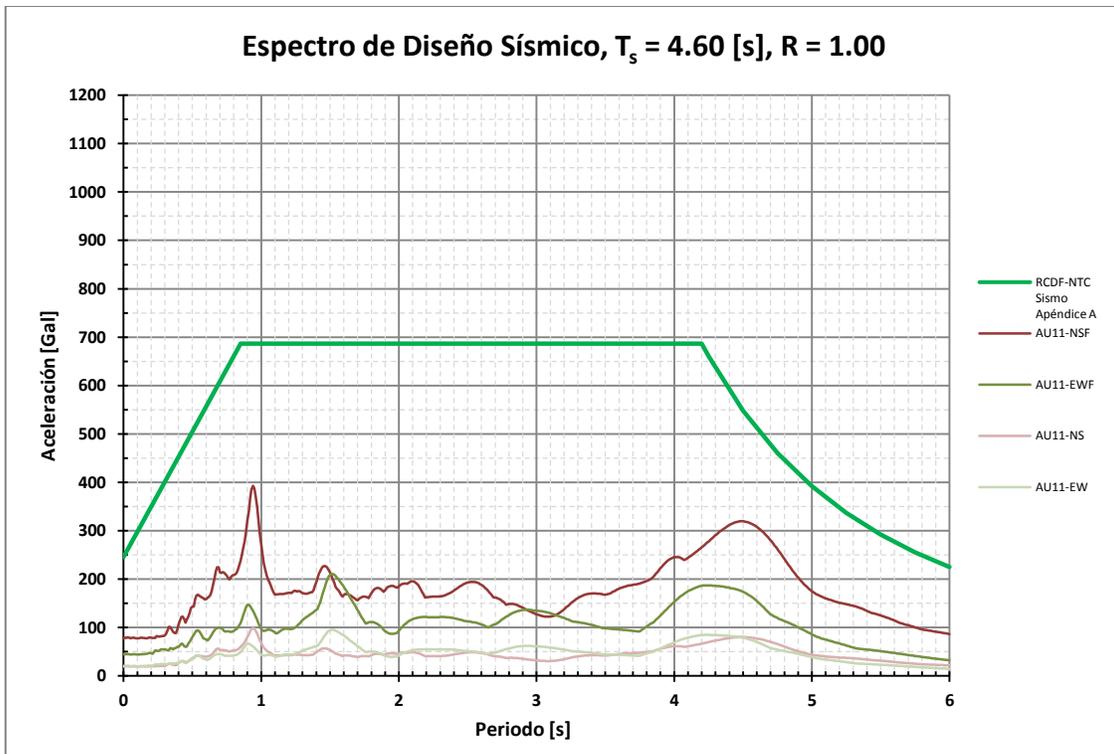


Figura VI.23 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 4.60$ [s]

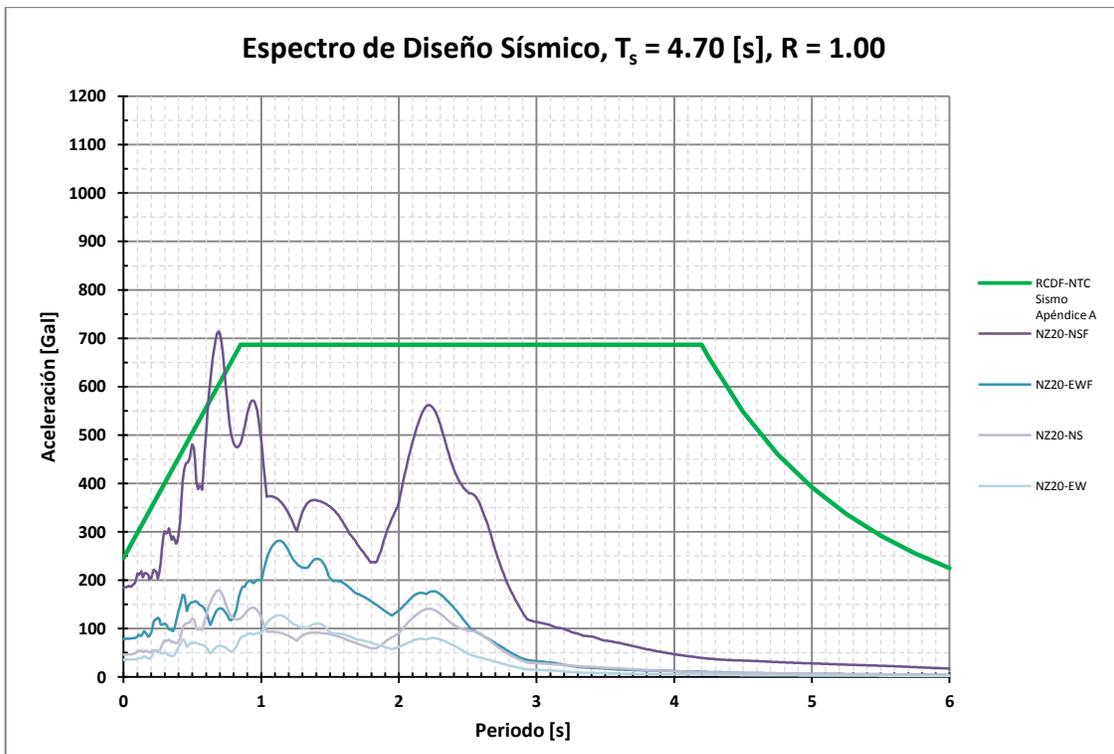


Figura VI.24 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 4.70$ [s]

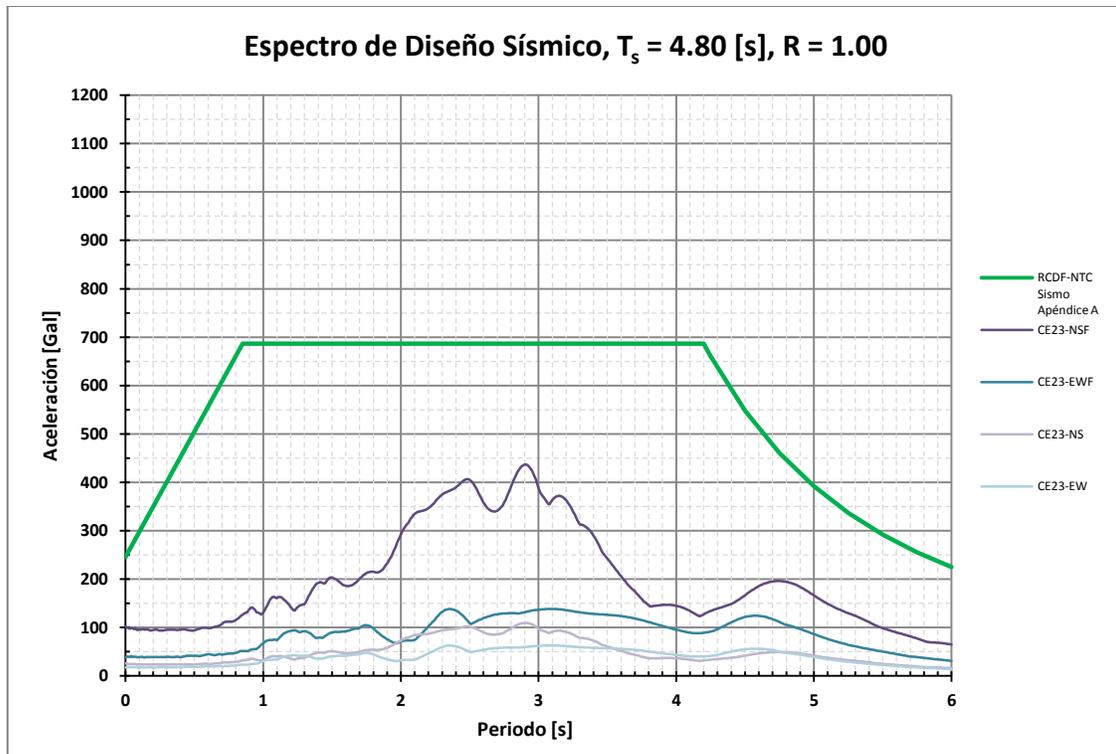


Figura VI.25 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 4.80$ [s]

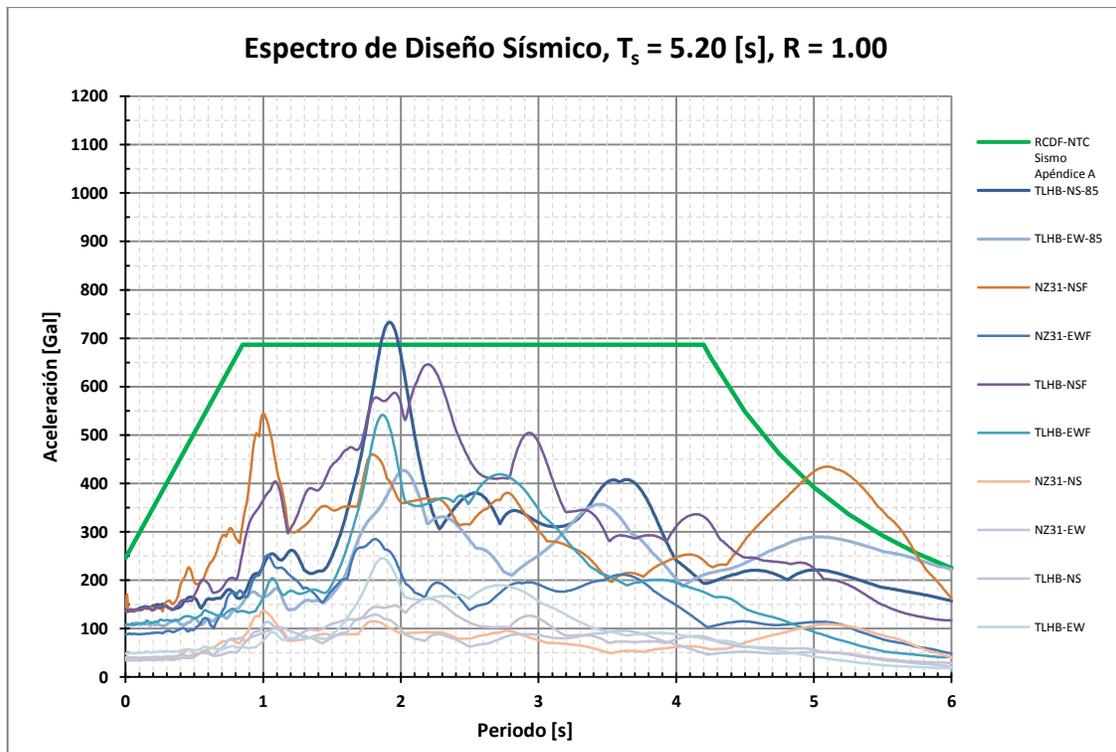


Figura VI.26 Comparación de espectros de respuesta y espectro de diseño obtenidos del Apéndice A para un sitio con $T_s = 5.20$ [s]

CAPÍTULO VII.

CONCLUSIONES

VII. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado un programa en lenguaje de programación FORTRAN que aplica el Método β de Newmark para calcular espectros de respuesta de sistemas de un grado de libertad a partir del uso de registros acelerométricos históricos.

Con el conocimiento del periodo dominante de vibración del suelo, se determinaron los espectros de diseño sísmico conforme al criterio fijado en el Apéndice A de las Normas para Diseño por Sismo del Distrito Federal, así como también a lo establecido en el cuerpo de la misma norma en función de la localización de los sitios de interés, coincidentes con la ubicación de estaciones acelerométricas dentro de las zonas sísmicas IIIb, IIIc y IIId.

Los resultados obtenidos al comparar los espectros de sitio y los espectros de diseño obtenidos al aplicar el Apéndice A, muestran que la mayoría de ellos están cubiertos por los espectros de diseño.

Al comparar los espectros de sitio con los espectros de diseño establecidos en el cuerpo de la misma norma, se observó que varios de ellos exceden a los de diseño tanto en su rama ascendente, como en la meseta y en la rama descendente.

Se destaca que incluso los espectros de sitio obtenidos de los registros del sismo del 19 de septiembre de 1985 no fueron cubiertos por los espectros de diseño. Tal es el caso de los registros de las estaciones con clave SCT1-EW y TLHB-NS, y el registro de la estación con clave TLHB-NS para el caso del Apéndice A de las normas.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que al construir el espectro de diseño utilizando el criterio fijado en el Apéndice A de las Normas para Diseño por Sismo, se obtiene mayor certidumbre sobre el comportamiento dinámico del suelo. Esta condición es mejor que aplicar los espectros que se presentan en el cuerpo de la Norma. Esta condición obliga a determinar un apropiado periodo dominante del terreno a partir de ensayos y análisis de dinámica de suelos que tomen en cuenta la estratigrafía y las propiedades del suelo en el sitio de interés.

La estimación de espectros de respuesta es una herramienta fundamental en la ingeniería sísmica, ya que permiten conocer la respuesta elástica máxima para sistemas de un grado de libertad que simulan la respuesta sísmica de estructuras. El estudio del comportamiento dinámico de estructuras observado a través de los espectros de respuesta contribuye a aumentar la seguridad de las estructuras y de los seres humanos que se encuentran en su interior ante un evento sísmico.

ANEXOS

ANEXO 1. FORMATO DEL ARCHIVO ESTÁNDAR DE ACELERACIÓN

El Archivo Estándar de Aceleración es una parte fundamental de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. Ha sido formalmente adoptada por la mayoría de las instituciones que operan redes de acelerógrafos en México y también por algunos fabricantes de instrumentos (ref 8).

Este es un archivo de texto con caracteres ASCII estándar. Como tal puede desplegarse fácilmente y modificarse con cualquier editor del texto. Asimismo puede comprimirse eficientemente, preservando espacio en disco y facilitando su transportación a otros equipos de cómputo. Se ha demostrado que en la mayoría de los casos, los archivos ASCII comprimidos son solo un poco más grandes que los archivos binarios nativos.

Este formato estándar se escogió básicamente por su universalidad y fácil manejo. Como se verá a continuación, el archivo es auto-explicativo y no requiere por parte del usuario ninguna información adicional para su interpretación y el manejo de los datos. La estructura general del Archivo Estándar de Aceleración se muestra en la figura A.1. Se divide básicamente en dos bloques de datos: un encabezado y bloque para los datos numéricos de aceleración. A continuación se presenta una breve descripción de cada bloque.

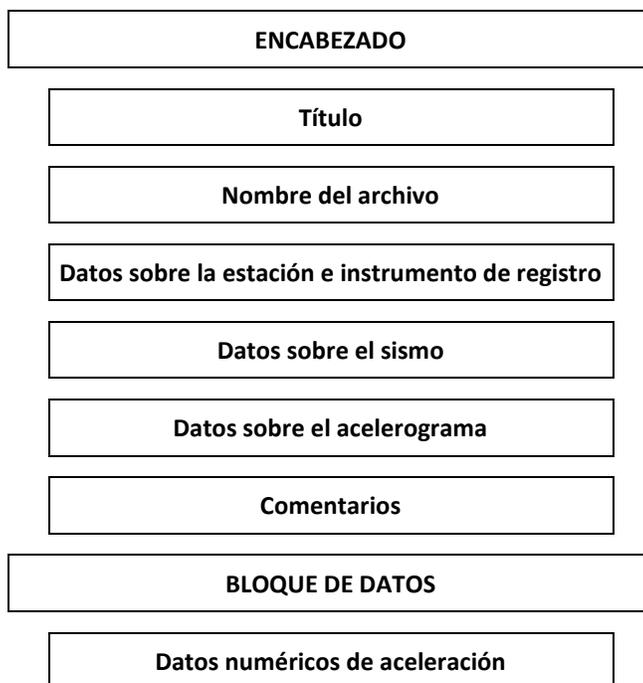


Figura A1.1 Estructura del Archivo Estándar de Aceleración

Título: Datos de identificación de la institución responsable, su nombre, dirección, teléfonos, etc.

Nombre del archivo: Nombre del archivo, versión del formato, fecha y hora de su creación y referencia al catálogo general de acelerogramas (número del registro y página).

Estación e instrumento: Incluye una breve descripción de la estación, su nombre, código asignado, dirección y localización (coordenadas), altitud, tipo de suelo e institución a cargo de su operación. Con respecto al instrumento se especifican los siguientes datos: modelo, número de serie, número de canales, orientación, tasa de muestra, rango de escala completa, frecuencia natural, amortiguamiento, intervalo de muestreo, umbral de disparo para cada canal, memoria del pre-evento y tiempo de pos-evento.

Datos sobre el sismo: Este bloque incluye la fecha y tiempo de origen (GMT) del evento, magnitud, localización del epicentro, profundidad focal y la fuente que proporcionó esta información.

Datos sobre el acelerograma: Se especifican el tiempo (GMT) de la primera muestra y su exactitud, duración del registro, número total de muestras, valor máximo de aceleración (en gal) para cada canal junto con la muestra en que ocurrió, el factor de decimación utilizado y por último la especificación del formato tipo FORTRAN utilizado para los valores numéricos.

Comentarios: Esta parte del encabezado puede utilizarse para comentarios sobre los datos del acelerograma como por ejemplo la calidad del registro, método de procesamiento, filtrado o alguna información adicional pertinente al registro o al sismo.

Datos de la aceleración: Ésta es la parte principal del archivo. Contiene los valores numéricos de aceleración de hasta 12 canales. Cada línea corresponde a una muestra. Las series de datos están organizadas por columnas, cada una con un campo fijo de 10 caracteres y con un formato como el especificado en el encabezado (por ejemplo 3F10.2, que especifica tres números reales de 10 caracteres, 7 para la parte entera y 2 decimales).

EJEMPLO DE UN ARCHIVO ESTÁNDAR DE ACELERACIÓN

Para ilustrar la forma y contenido de este archivo, a continuación se presenta en la figura A.2 un archivo de ejemplo. Los datos no corresponden a un registro real, se escogieron sólo para ilustrar el formato. Cada línea del archivo comienza en la columna 1. Los números de línea sólo se muestran como referencia.

```

columna 1                                columna 40                                columna 80
1. *****
2.                                INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM
3.                                Coordinacion de Instrumentacion Sismica
4.                                Ciudad Universitaria, Apartado Postal 70-472, Mexico, D.F.
5.                                Tel. (52-5) 622-3413, Fax. (52-5) 616-1514
6. *****
7. ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACION:
8. VERSION DEL FORMATO                : 2.0
* 9. NOMBRE DEL ARCHIVO                : COPL9509.141
* 10. FECHA Y HORA DE CREACION          : 18 de Sept. 1995/14:38:13
11. REF. CATALOGO ACELEROGRAMAS, SMIS 1995 : NUM. REG. 1355/PAG. 146
12.
13.
14. =====
15. DATOS DE LA ESTACION:
16. NOMBRE DE LA ESTACION              : COPALA
17. CLAVE DE LA ESTACION               : COPL
18. LOCALIZACION DE LA ESTACION        : Escuela Primaria Federal
19.                                    : "Otilio Monta&o"
20.                                    : Copala, Guerrero
21.                                    :
22.                                    :
23. COORDENADAS DE LA ESTACION         : 16.605 LAT. N
24.                                    : 98.974 LONG. W
25. ALTITUD (msnm)                     : 40
26. TIPO DE SUELO                      : Granito gneiss intemperizado
27.                                    :
28.                                    :
29. INSTITUCION RESPONSABLE            : Instituto de Ingenieria, UNAM
30.                                    : Coordinacion de Instrumentacion
31.
32. =====
33. DATOS DEL ACELEROGRAFO:
* 34. MODELO DEL ACELEROGRAFO          : DCA-333
* 35. NUMERO DE SERIE DEL ACELEROGRAFO : 201
* 36. NUMERO DE CANALES                 : 3
37. ORIENTACION C1-C6 (rumbo;orientacion) : /V/N90E/N00E
38. ORIENTACION C7-C12 (rumbo;orientacion) :
* 39. VEL. DE MUESTREO, C1-C6 (muestras/s) : /100/100/100
* 40. VEL. DE MUESTREO, C7-C12 (muestras/s) :
* 41. ESC. COMPLETA DE SENSORES, C1-C6, (g) : /2.00/2.00/2.00
* 42. ESC. COMPLETA DE SENSORES, C7-C12, (g) :
* 43. FREC. NAT. DE SENSORES, C1-C6, (Hz) : /30.0/30.0/30.0
* 44. FREC. NAT. DE SENSORES, C7-C12, (Hz) :
* 45. AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, C1-C6 : /0.71/0.72/0.78
* 46. AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, C7-C12 :
* 47. INTERVALO DE MUESTREO, C1-C6, (s) : /0.01/0.01/0.01
* 48. INTERVALO DE MUESTREO, C7-C12, (s) :
* 49. UMBRAL DE DISPARO, C1-C6, (Gal) : /3/3/3
* 50. UMBRAL DE DISPARO, C7-C12, (Gal) :
* 51. MEMORIA DE PREEVENTO (s)          : 3.62
* 52. TIEMPO DE POSEVENTO (s)          : 15
53.
54.
55. =====
56. DATOS DEL SISMO:
57. FECHA DEL SISMO (GMT)               : 14 de septiembre 1995
58. HORA EPICENTRO (GMT)                : 14:04:31
59. MAGNITUD(ES)                        : /Mb=6.5/Ms=7.2/Mw=7.4
60. COORDENADAS DEL EPICENTRO           : 16.830 LAT. N
61.                                    : 98.647 LONG. W
62. PROFUNDIDAD FOCAL (km)              : 21
63. FUENTE DE LOS DATOS EPICENTRALES   : Instituto de Geofisica, UNAM
64.                                    : Servicio Sismologico Nacional
65.
66. =====
67. DATOS DE ESTE REGISTRO:
* 68. HORA DE LA PRIMERA MUESTRA (GMT)   : 14:04:32.25
* 69. EXACTITUD DEL TIEMPO (s)          : 0.01

```

Figura A1.2 Ejemplo de un archivo con el formato estándar, versión 2.0

```

* 70. DURACION DEL REGISTRO (s), C1-C6      : /63.15/63.15/63.15
* 71. DURACION DEL REGISTRO (s), C7-C12    :
* 72. NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C1-C6       : /6315/6315/6315
* 73. NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C7-C12     :
* 74. ACEL. MAX.(Gal), C1-C6              : /46.42/68.91/77.04
* 75. ACEL. MAX., C1-C6, EN LA MUESTRA    : /1246/1326/1223
* 76. ACEL. MAX.(Gal), C7-C12            :
* 77. ACEL. MAX., C7-C12, EN LA MUESTRA  :
* 78. UNIDADES DE LOS DATOS                : Gal (cm/s/s)
* 79. FACTOR DE DECIMACION                 : 1
* 80. FORMATO DATOS (FORTRAN,10 campos/dato) : 3F10.2
81.
82.
83. =====
84. CALIDAD DEL ACELEROGRAMA:
85. Registro digital completo. Tiempo absoluto correcto
86.
87.
88. =====
89. COMENTARIOS:
90. El sismo que genero este acelerograma produjo da&os significativos en los pobla-
91. dos de San Luis Acatlan, Axoyu, Igualapa y Ometepec en la Costa Chica. Cerca de 50
92. personas resultaron lesionadas. El sismo fue sentido fuertemente en la ciudad de
93. Mexico en donde solo provoco da&os menores.
94.
95.
96.
97.
98.
99.
100.
101.
102.
103.
104. =====
105. DATOS DE ACELERACION:
106. -----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
107.      CANAL-1   CANAL-2   CANAL-3   CANAL-4   CANAL-5   CANAL-6   CANAL-7   CANAL-8
108.          V     N90E     N00E
109. -----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
*110.          0.06      0.04      0.03
*111.          0.06      0.04      0.03
*112.         -0.42     -0.44      0.03

```

Figura A1.2 (continuación)

NOTA: La información de las líneas marcadas con un (*) puede ser obtenida directamente durante el proceso de conversión del archivo binario original al ASCII estándar.

ANEXO 2. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA *EspectroR* PARA UN REGISTRO ACELEROMÉTRICO EN UN FORMATO ESTÁNDAR DE ACELERACIÓN

Tomando a manera de ejemplo el registro SCT28904.251, el cual corresponde a la estación SCT-B2, se tiene la siguiente información obtenida del propio registro acelerométrico, como se muestra en las figuras A2.1 y A2.2:

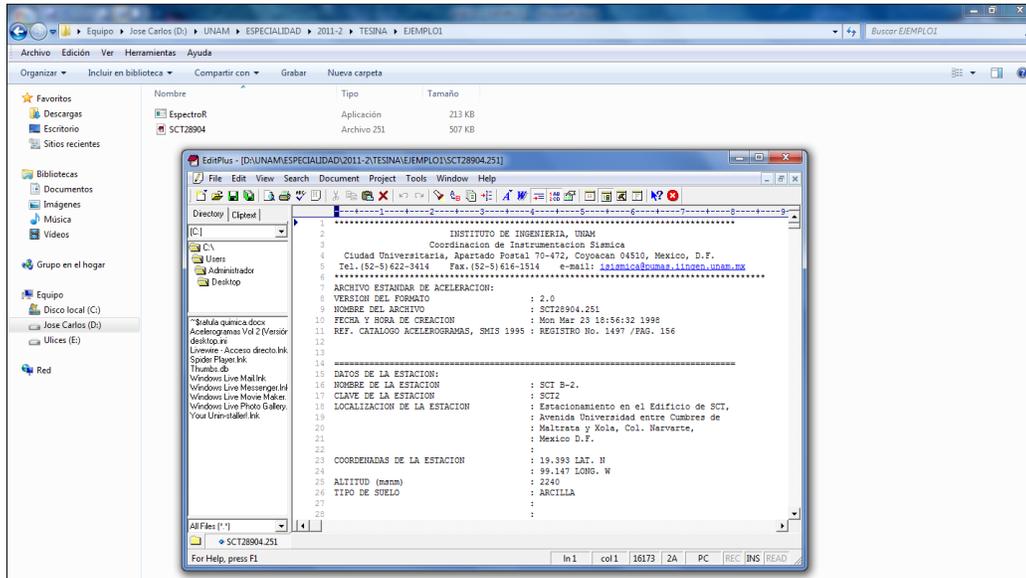


Figura A2.1

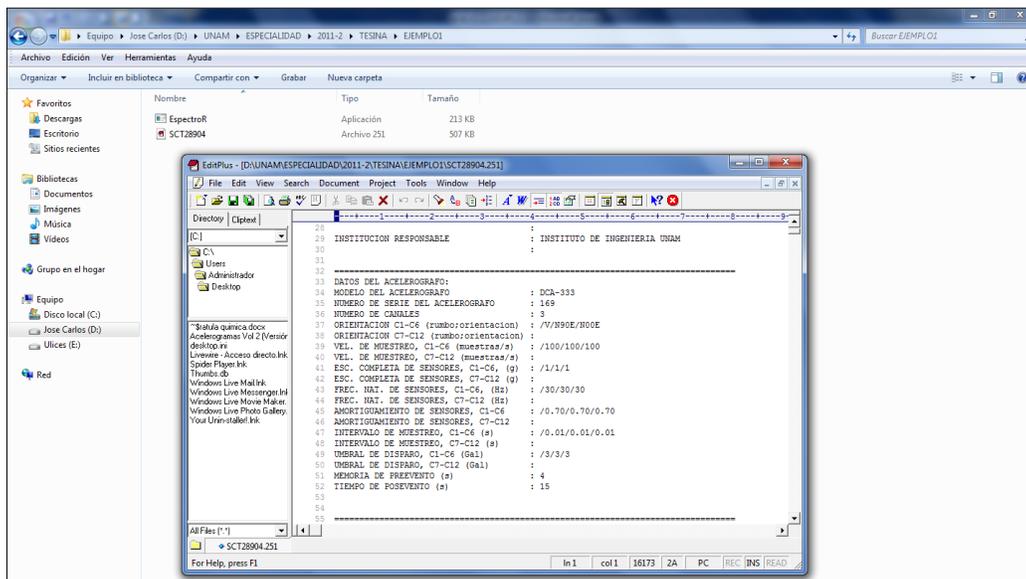


Figura A2.2

Δt del registro = 0.01 [s]

Número de canales del registro = 3

Canal 1 (V), Canal 2 (N90E), Canal 3 (N00E)

Ahora considerando el canal 2 para el análisis, una fracción de amortiguamiento crítico del 5%, un periodo máximo de 6 [s] y el nombre de SCT2-EW.RES para el archivo resultados, se ingresa toda esta información al programa, como se indica en la figura A2.3. Cabe señalar que tanto el archivo de datos como el archivo ejecutable deben estar en el mismo directorio.

El archivo de salida es como el mostrado en la figura A2.4, el cual contiene cuatro columnas: la primera columna corresponde al valor del periodo, la segunda a la pseudo-aceleración, la tercera a la aceleración absoluta y la cuarta a la aceleración relativa.

Finalmente este archivo de resultados se puede importar a una hoja de cálculo y manipular la información, por ejemplo graficar los valores de aceleración absoluta tal y como se muestra en la figura A2.5.

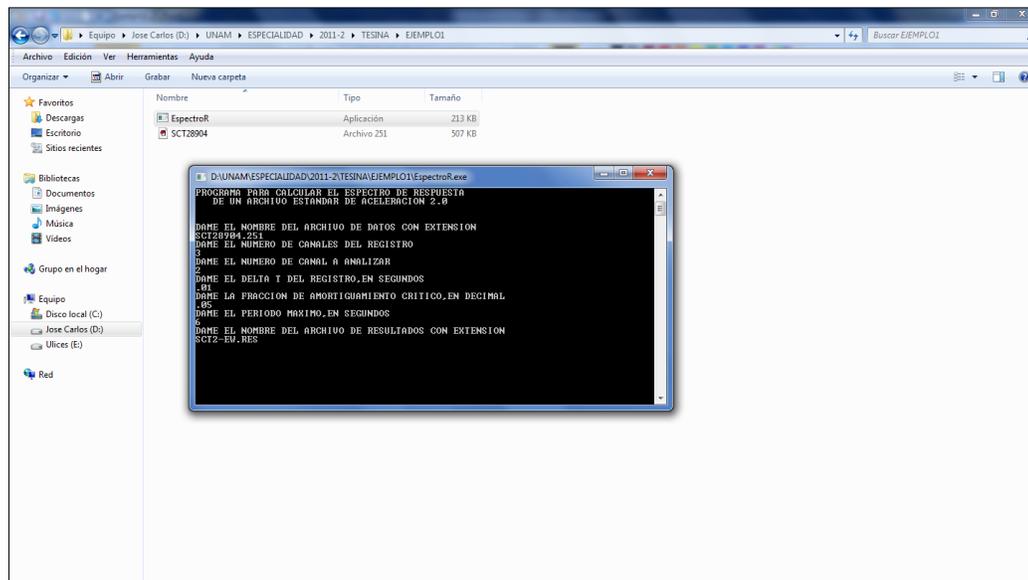


Figura A2.3

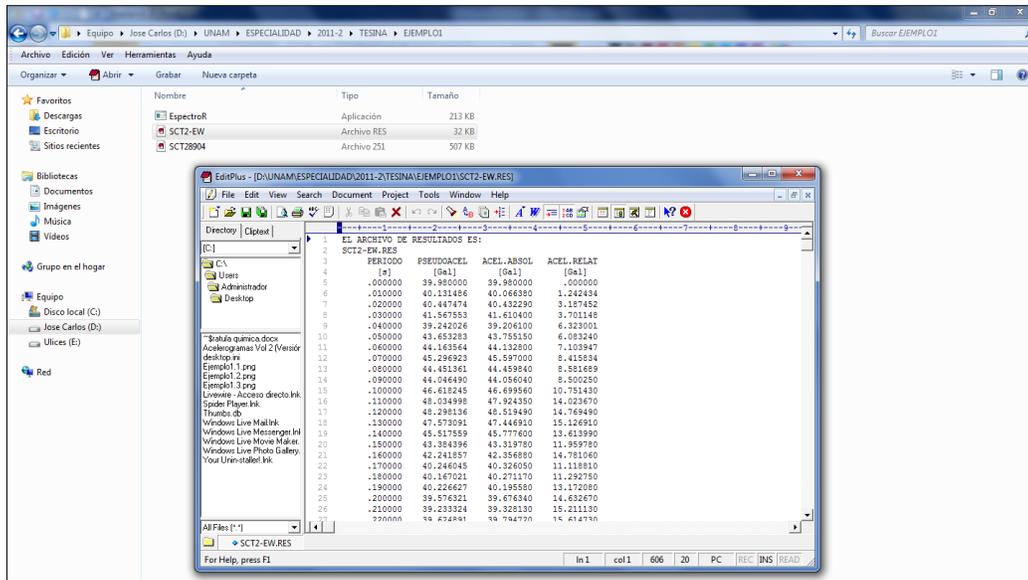


Figura A2.4



Figura A2.5

ANEXO 3. ADAPTACIÓN DEL PROGRAMA *EspectroR* Y EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA *EspectroRF* PARA UN REGISTRO ACELEROMÉTRICO EN UN FORMATO ESTÁNDAR DE ACELERACIÓN

A continuación se presenta el código fuente del programa *EspectroRF*:

```

C
C   PROGRAMA PARA CALCULAR UN ESPECTRO DE RESPUESTA CON METODO BETA DE NEWMARK
C   APLICANDO UN FACTOR A LOS DATOS DEL REGISTRO
C   PROGRAMA PARA TESINA DE JOSE CARLOS GARCIA TORRES
C
PROGRAM ESPECTRORF
DIMENSION Y(100000,20)
REAL*8 DI,VI,AI,V,D,A,PI,M,DDT,TMAX,TMAXC,TI
CHARACTER *30,NDATOS,NRESULTADOS
CHARACTER *150,Z(109)
100 FORMAT(4F13.6)
101 FORMAT(F13.6)
102 FORMAT(A150)
103 FORMAT(" PROGRAMA PARA CALCULAR EL ESPECTRO DE RESPUESTA"/
1      " DE UN ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACION 2.0"//)
WRITE(*,103)
WRITE(*,*)"DAME EL NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS CON EXTENSION"
READ(*,*)NDATOS
OPEN(1,FILE=NDATOS,STATUS='OLD')
WRITE(*,*)"DAME EL NUMERO DE CANALES DEL REGISTRO"
READ(*,*)NREG
WRITE(*,*)"DAME EL NUMERO DE CANAL A ANALIZAR"
READ(*,*)NANA
WRITE(*,*)"DAME EL DELTA T DEL REGISTRO,EN SEGUNDOS"
READ(*,101)DDT
WRITE(*,*)"DAME LA FRACCION DE AMORTIGUAMIENTO CRITICO,EN DECIMAL"
READ(*,101)X
WRITE(*,*)"DAME EL PERIODO MAXIMO,EN SEGUNDOS"
READ(*,*)TMAX
WRITE(*,*)"DAME EL FACTOR PARA LOS DATOS DEL REGISTRO,EN DECIMAL"
READ(*,*)F
WRITE(*,*)"DAME EL NOMBRE DEL ARCHIVO DE RESULTADOS CON EXTENSION"
READ(*,*)NRESULTADOS
OPEN(2,FILE=NRESULTADOS,STATUS='UNKNOWN')
C   SE LEEN LAS 109 LINEAS DEL ENCABEZADO DEL REGISTRO
DO N=1,109
READ(1,102,END=20) Z(N)
WRITE(*,102)Z(N)
20 END DO
C   SE LEEN LOS DATOS DE ACELERACION
DO K=1,100000
READ(1,*,END=10) (Y(K,Q),Q=1,NREG)
NCONT=(K-1)+1
IF(ABS(Y(K,NANA)).GT.YMAX) YMAX= ABS(Y(K,NANA))
10 END DO
TI=0.0
WRITE(2,*)"EL ARCHIVO DE RESULTADOS ES:"
WRITE(*,*)"EL ARCHIVO DE RESULTADOS ES:"

```

```

WRITE (2, *) NRESULTADOS
WRITE (*, *) NRESULTADOS
WRITE (2, *) "      PERIODO   PSEUDOACEL   ACEL.ABSOL   ACEL.RELAT"
WRITE (*, *) "      PERIODO   PSEUDOACEL   ACEL.ABSOL   ACEL.RELAT"
WRITE (2, *) "          [s]           [Gal]           [Gal]           [Gal]"
WRITE (*, *) "          [s]           [Gal]           [Gal]           [Gal]"
WRITE (2, 100) TI, F*YMAX, F*YMAX, F* (YMAX-YMAX)
WRITE (*, 100) TI, F*YMAX, F*YMAX, F* (YMAX-YMAX)
NPTOS=NCONT*1.3
DO L=NCONT, NPTOS
Y(L, NANA)=0.0
END DO
C   TMAXC, ES EL NUMERO DE PERIODOS PARA ANALIZAR
TMAXC=TMAX*100+1
DO I=2, TMAXC
C   T, ES EL PERIODO ESTRUCTURAL
C   M, ES OMEGA (FRECUENCIA CIRCULAR)
C   DI, ES EL DESPLAZAMIENTO i
C   VI, ES LA VELOCIDAD i
C   AI, ES LA ACELERACION i
C   D, ES EL DESPLAZAMIENTO i+1
C   V, ES LA VELOCIDAD i+1
C   A, ES LA ACELERACION i+1
T=(I-1)*0.01
PI=4.*ATAN(1.)
M=2*PI/T
DI=0.0
VI=0.0
AI=0.0
DMAX=0.0
VMAX=0.0
AMAX=0.0
AABSMAX=0.0
DO J=1, NPTOS
VI=V+A*DDT*0.5
DI=D+V*DDT+A*DDT*DDT*0.25
A=- (F*Y(J, NANA)+2*X*M*VI+M*M*DI) / (1+2*X*M*DDT*0.5+
2M*M*DDT*DDT*0.25)
V=VI+A*DDT*0.5
D=DI+A*DDT*DDT*0.25
AABS=A+F*Y(J, NANA)
IF (ABS(A) .GT. AMAX) AMAX=ABS(A)
  (ABS(AABS) .GT. AABSMAX) AABSMAX=ABS(AABS)
IF (ABS(D) .GT. DMAX) DMAX=ABS(D)
END DO
C   PERIODO, PSEUDOACELERACION, ACELERACION ABSOLUTA, ACELERACION RELATIVA
WRITE (2, 100) T, DMAX*M*M, AABSMAX, AMAX
WRITE (*, 100) T, DMAX*M*M, AABSMAX, AMAX
END DO
CLOSE (1)
CLOSE (2)
END PROGRAM ESPECTRORE

```

Tomando a manera de ejemplo el mismo registro SCT28904.251 del Anexo 2, el cual corresponde a la estación SCT-B2, se tiene la siguiente información obtenida del propio registro acelerométrico:

Δt del registro = 0.01 [s]

Número de canales del registro = 3

Canal 1 (V), Canal 2 (N90E), Canal 3 (N00E)

Ahora considerando el canal 2 para el análisis, una fracción de amortiguamiento crítico del 5%, un periodo máximo de 6 [s] y el nombre de SCT2-EWF.RES para el archivo resultados, se ingresa toda esta información al programa, como se indica en la figura A3.1. Adicionalmente, se ingresa el factor correspondiente de acuerdo a la tabla IV.4, el cual es 4.0428, pues se trata del canal este-oeste para la zona sísmica IIIb. Es necesario recordar que tanto el archivo de datos como el archivo ejecutable deben estar en el mismo directorio.

El archivo de salida es como el mostrado en la figura A3.2, el cual contiene cuatro columnas: la primera columna corresponde al valor del periodo, la segunda a la pseudo-aceleración, la tercera a la aceleración absoluta y la cuarta a la aceleración relativa.

Finalmente este archivo de resultados se puede importar a una hoja de cálculo y manipular la información, por ejemplo graficar los valores de aceleración absoluta tal y como se muestra en la figura A3.3.

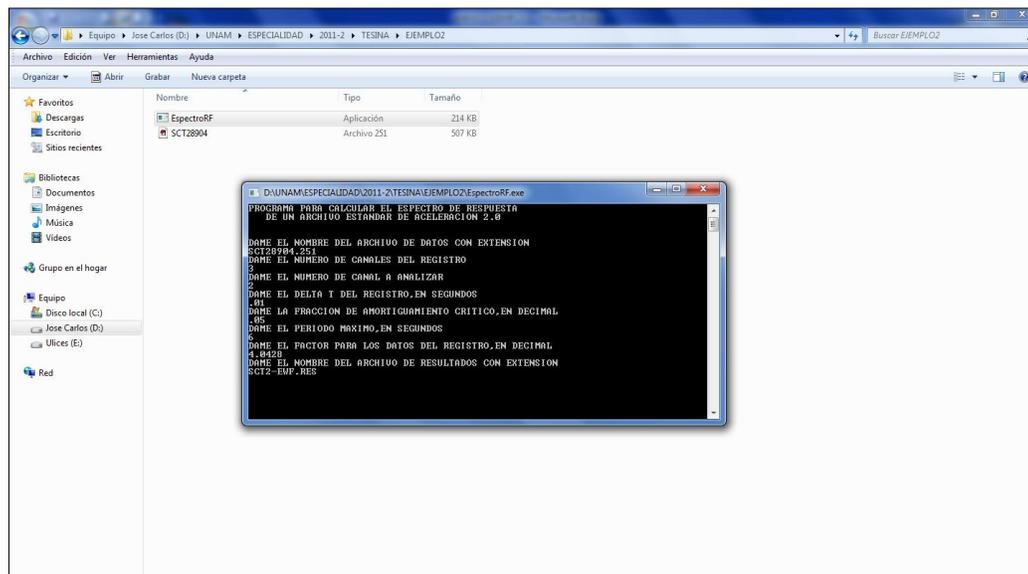


Figura A3.1

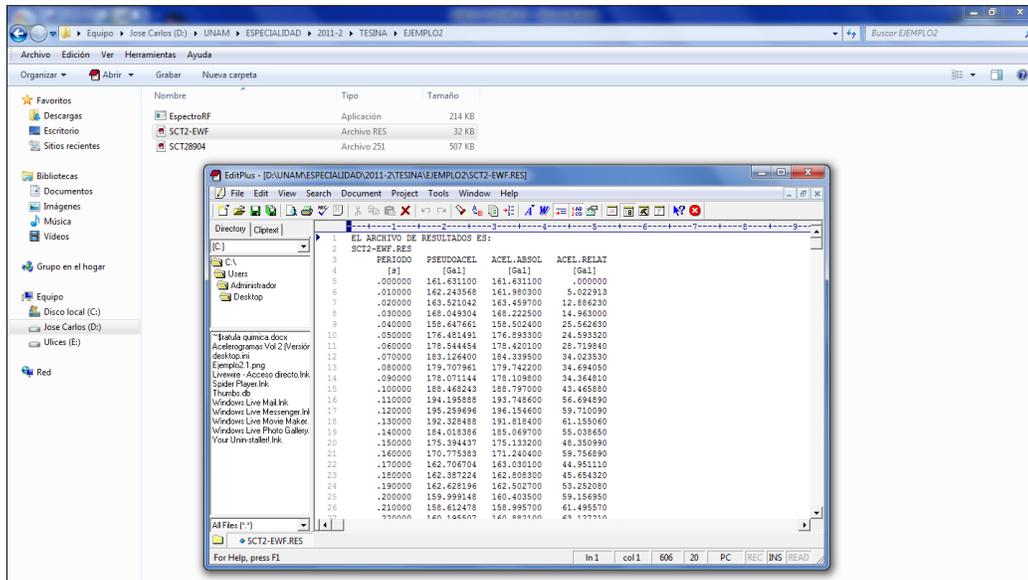


Figura A3.2



Figura A3.3

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Santoyo E, et al, (2005), "*Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*", TGC, México
2. RCDF (2004), "*Reglamento de Construcciones del Distrito Federal*", Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre 2004.
3. NTC-RCDF (2004), "*Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*", Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre 2004.
4. <http://www.cires.org.mx/racm_es.php>
5. <http://www.cires.org.mx/racm_reporte_df_com_zoom_es.php>
6. Huerta B y Reinoso E, (2002), "*Espectros de energía de movimientos fuertes registrados en México*", Revista de Ingeniería Sísmica No. 66 45-72, México.
7. Alcántara L, Quaas R, Pérez C, Ayala M, Macías M A, Sandoval H (II-UNAM); Javier C, Mena E, Andrade E, González F, Rodríguez E (CFE); Vidal A, Munguía O, Luna M (CICESE); Espinosa J M, Cuellar A, Camarillo L, Ramos S, Sánchez M (CIRES); Quaas R, Guevara E, Flores J A, López B, Ruiz R (CENAPRED); Guevara O, Pacheco J F (SSN); Ramírez M, Aguilar J, Juárez J, Vera R, Gama A, Cruz R, Hurtado F, Martín del Campo R, Vera F (RIIS); Alcántara L (SMIS), (2000), "*Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes CD-ROM vol. 2*", México.
8. <<http://www.unam.mx/db/spanish/conten.html>>
9. Aguilar R, Arciniega A, Flores F, Ordaz M, Padilla G, Pérez-Rocha L E, Reinoso E, Sánchez-Sesma F, (1992), *Respuesta Sísmica del Valle de México: Aplicaciones y Teoría, Informe Final de Actividades del Centro de Investigación Sísmica AC a la Secretaría de Obras del Departamento del Distrito Federal.*
10. Chopra A K, (1995), "*Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*", Prentice Hall, EUA.