



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de Registros Sísmicos en Roca en la Red
Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

MARCO ANTONIO GODÍNEZ LAGUNA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. LEONARDO ALCÁNTARA NOLASCO

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016





UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/061/15

Señor
MARCO ANTONIO GODÍNEZ LAGUNA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. LEONARDO ALCÁNTARA NOLASCO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ANÁLISIS DE REGISTROS SÍSMICOS EN ROCA EN LA RED ACELEROGRÁFICA DE LA CIUDAD DE OAXACA"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. MOVIMIENTO DEL TERRENO
- III. RED ACELEROGRÁFICA DE LA CIUDAD DE OAXACA
- IV. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS EN ROCA
- CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 22 de junio del 2015.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

VoBo
03/05/16

A Deminghi C

3/05/2016
Héctor Sanginés García

Vo.Bo.
Tesis concluida

Dr. Leonardo Alcántara Nolasco
3 de mayo de 2016

Guillermo Mancilla V. M. P. S. P. A.
03 Mayo 2016
3 mayo 16

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **M.I. AGUSTIN DEMENEGHI COLINA**
Vocal: **DR. LEONARDO ALCANTARA NOLASCO**
Secretario: **M.I. HECTOR SANGINES GARCIA**
1^{er}. Suplente: **ING. MARCOS TREJO HERNANDEZ**
2^{do}. Suplente: **M.I. GUILLERMO MANCILLA URREA**

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. LEONARDO ALCÁNTARA NOLASCO

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme las facilidades como estudiante de licenciatura y permitirme alcanzar una formación profesional de calidad y al mismo tiempo una humana.

Al Dr. Leonardo Alcántara por darme la oportunidad, el espacio y el tiempo para realizar el trabajo de tesis que aquí se presenta y que culmina con mis estudios de licenciatura.

Al Dr. Víctor Hugo Espíndola del Servicio Sismológico Nacional por las facilidades brindadas en el otorgamiento de datos y el tiempo dedicado a la solución de dudas particulares y extensas que se presentaron durante la realización de esta tesis.

Al Instituto de Ingeniería y a su coordinación de Instrumentación Sísmica por el uso de sus instalaciones y en particular a las personas que conocí en mi estancia durante la realización de mi tesis: Santiago, Cayetano, Iván y Alan; por su tiempo y colaboración en la aclaración de dudas de suma importancia en el trabajo que presento.

A mis padres Juan Antonio y María Teresa, a mi hermano Juan Pablo y a mis demás familiares por siempre brindarme el amor, apoyo moral y económico durante el curso de mi licenciatura; apoyos que hicieron posible el llegar hasta la última instancia de mi formación profesional.

A los amigos que coseché con mucho cariño durante mi paso por la Facultad de Ingeniería: Fernanda Lilian, Ana Rocío, José Tobías, Mario Alfredo, Daniel, Jorge Isaac, Juan Jesús, José Manuel, Carlos A., Omar L., Omar H., Gerardo y con los que ya contaba como Gabriela Ivonne, Gabriel, Sergio Daniel, Luis Ángel, Rodrigo y Diego; que con la ayuda y compañía de todos ellos fue más sencillo el camino hasta aquí.

INTRODUCCIÓN	1
I. MOVIMIENTO DEL TERRENO	4
I.1 Conceptos Generales	6
I.2 Registros Sísmicos	14
I.3 Espectros de Fourier y de Respuesta	18
II. RED ACELEROGRÁFICA DE OAXACA	28
II.1 Estación Acelerográfica	31
II.2 Localización de las Estaciones	33
II.3 Registros Obtenidos	37
III. ANÁLISIS DE REGISTROS EN ROCA	45
III.1 Acelerogramas	45
III.2 Espectros de Fourier	66
III.3 Análisis y Comparación de las Amplitudes del Movimiento	73
IV. CONCLUSIONES	83
REFERENCIAS	84

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, el ser humano ha hecho todo lo posible por tratar de comprender en su totalidad los fenómenos naturales que lo rodean y que han mermado por momentos su condición social y física; apoyándose en la ciencia y en las herramientas que poco a poco fueron ayudándolo en la investigación de estos sucesos, el hombre ha ido descifrando y poniendo poco a poco y correctamente las piezas del rompecabezas del que está hecho nuestro planeta y que aún no se conocen por completo. Uno de estos fenómenos naturales son los sismos, estos son los que han causado los más grandes daños y el mayor número de decesos humanos.

La ocurrencia de los sismos está asociada con la composición y el comportamiento interno de nuestro planeta, lo cual no está comprendido en su totalidad por las adversidades que se presentan al realizar estudios sobre un material de dimensiones tan grandes y de composición muy diversa como lo es la corteza terrestre. Existen distintas zonas que presentan importante actividad, tanto sísmica como volcánica y que están ligadas fuertemente ya que se encuentran generalmente en los límites entre las diferentes placas tectónicas.

La alta sismicidad en México, así como la gran magnitud que han alcanzado diversos eventos sísmicos a lo largo de la historia, han propiciado un gran interés para estudiar el fenómeno, sobre todo con fines asociados a la reducción del impacto de la seguridad en el ser humano como en su infraestructura y paralelamente para crear una cultura de prevención. La actividad sísmica en México se debe principalmente a la interacción entre la placa de Norteamérica con las placas del Caribe, Cocos, Rivera y Pacífico, no obstante que aproximadamente el 90 por ciento de dicha actividad se produce en la franja costera del Pacífico que va del estado de Jalisco al estado de Chiapas; es importante destacar la zona de subducción Mexicana, en la cual la placa de Cocos penetra a la Norteamericana, en ella se han generado los sismos de mayor magnitud que ha experimentado nuestro país y en dónde además, se considera, se ha almacenado suficiente energía para generar un sismo de una magnitud igual o mayor al del 19 de Septiembre de 1985 ($M=8.1$).

Aún cuando la ocurrencia de grandes sismos en nuestro país data de varios siglos atrás, es hasta 1904 cuando se forma la Asociación Internacional Sismológica siendo México uno de los países fundadores y derivado del acontecimiento anterior se funda el Servicio Sismológico Nacional (SSN) en 1910 y cuyos objetivos han sido la difusión de información oportuna sobre la ocurrencia de sismos en territorio nacional, la determinación de sus principales parámetros (magnitud y epicentro) y la colaboración en actividades de divulgación para prevenir el riesgo sísmico y volcánico a nivel nacional. Actualmente el SSN opera una vasta red instrumental que cubre gran parte del territorio nacional y que permite determinar la magnitud y el epicentro de la gran mayoría de los sismos que ocurren en el país; sin embargo dicha instrumentación no es suficiente para responder a la interrogante ¿Por qué se dañan las estructuras? La ocurrencia de sismos de intensidades grandes y medianas satura la capacidad de los sismógrafos y por ende la información proporcionada por éstos ya no es la apropiada para los estudios de ingeniería sísmica, el evento que detonó el cambio de instrumentación para la obtención de registros fue el del 28 de julio de 1957, posterior a éste suceso se instaló instrumentación que complementara los datos de los registros sismológicos, instrumentos que permitieran evaluar la respuesta de suelos y estructuras ante movimientos de mayor intensidad.

Se instalaron, en 1960, los primeros acelerógrafos analógicos y el primer acelerograma se obtuvo en 1961, a principios de 1985 la ciudad de México contaba únicamente con nueve instrumentos, ubicados entre las zonas del lago, transición y de terreno firme. Los sismos del 19 y 21 de septiembre de 1985 cambiaron la importancia de la percepción de la instrumentación sísmica y es después de ese suceso que diversas instituciones se sumaron a los esfuerzos de instalación y operación de instrumentos de registro sísmico como el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM), el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (IGEOF), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), la Fundación ICA (FICA), la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS).

Los acelerógrafos tienen una importancia considerable en sismología e ingeniería sísmica ya que mediante los registros que generan se pueden realizar estudios acerca del comportamiento del terreno. La respuesta y los registros de un sismo pueden variar dependiendo de las condiciones del subsuelo en donde se encuentre la estación, a ésta respuesta se le conoce como efecto de sitio, dicho fenómeno tiene un papel importante en el diseño por sismo de las estructuras. Las condiciones de sitio o del terreno afectan directamente los parámetros del movimiento (amplitud, frecuencia y duración), el aumento o disminución de éstos depende directamente de la geometría, y las propiedades de los materiales que conforman el subsuelo.

Una de las ciudades mexicanas que más se ha visto afectada por los sismos es la de Oaxaca, por tal motivo se ha instalado una red acelerográfica en sitios con diferentes condiciones del subsuelo. La red está integrada por 10 estaciones acelerográficas, 8 en suelos deformables y 2 en roca. El objetivo de colocar una estación en roca es evaluar precisamente el efecto de sitio en suelos deformables. La primera estación que se instaló fue OXIG (operada por el SSN), sin embargo ésta se ubica en el cerro del Fortín a una altura de 1737 msnm y por lo tanto los registros obtenidos presentan un efecto de topografía. Por lo anterior, algunos años después la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por medio de su Instituto de Ingeniería (II-UNAM) instaló, sobre un afloramiento de roca en la zona oriente de la ciudad, la estación OXLC.

OBJETIVO

Esta tesis está enfocada a la consecución de los siguientes objetivos:

- a) Procesar los acelerogramas obtenidos en la estación OXIG e integrar una base de datos compatibles con el formato utilizado por el II-UNAM.
- b) Establecer las diferencias entre los registros obtenidos en las estaciones OXIG y OXLC mediante la determinación de las Funciones de Transferencia.

El primer capítulo de esta tesis contiene conceptos generales, desde la formación de la tierra hasta las causas que originan a los sismos, así como todos los conceptos que se utilizan para el estudio de los mismos, se expresa también una breve semblanza de lo que han representado los movimientos en el territorio mexicano, desde la época prehispánica, la datación y registro de los movimientos hasta nuestro tiempo y la recopilación cronológica en una lista de varios fenómenos desde que se tiene el primer indicio de clasificación en 1568 y hasta el año 2015 de sismos con $M > 6$. Por último y más importante se explica detalladamente en qué consisten los espectros de Fourier y de Respuesta.

Se incluyen en el segundo capítulo la descripción de una estación acelerográfica, las partes que la componen y las redes acelerográficas que existen en el estado de Oaxaca. Adicionalmente se incluye un catálogo de los registros de aceleración en roca obtenidos de las estaciones.

El tercer capítulo presenta el contenido de la base de datos de los registros en roca de las estaciones en cuestión, OXIG y OXLC. Se detalla el procedimiento de selección de los sismos y el procesamiento llevado a cabo con los registros de aceleración para la obtención de Espectros de Fourier, Espectros de Respuesta y Funciones de Transferencia.

Finalmente en el cuarto capítulo se presentan los resultados y conclusiones.

I. Movimiento del Terreno

I. MOVIMIENTO DEL TERRENO

La composición de la Tierra puede ser clasificada por el tipo de rocas que la conforman o por el comportamiento dinámico de las mismas. La primera clasificación se divide, en su forma más simple, en corteza, manto y núcleo (Ref 1). La corteza está compuesta en su parte superior por rocas graníticas (silicio, aluminio y basalto principalmente), su espesor es de entre 25 y 40 [km] en su parte continental, en las grandes montañas aumenta en algunos casos hasta 70 [km]. La región oceánica es mucho más delgada y llega a tener hasta 5 [km]. El manto comienza en una zona que se denomina la “discontinuidad de *Mohorovicic*”, en ella se probó que las ondas longitudinales aumentan hasta alcanzar una velocidad máxima de 13.7 [km/s] y que el manto tiene una profundidad de 2,900 [km]. El núcleo de la Tierra está compuesto por el núcleo externo que tiene una composición fluida y el interno que es sólido y compuesto por hierro y níquel.

La segunda clasificación asociada al comportamiento de las rocas se integra por la litósfera, astenósfera, mesósfera y endósfera (Ref 2). La litósfera, por su etimología “esfera de roca”, contiene la parte dura de la corteza y una porción del manto y tiene una extensión de aproximadamente 100 [km] de profundidad. La astenósfera se extiende 700 [km] de profundidad desde la litósfera, está compuesto de material dúctil y semi-fundido, esta zona se descubrió gracias al análisis de velocidades en donde se observó que después de los 100 [km] de profundidad las velocidades crecen. La mesósfera se extiende hasta los 2,900 [km], lugar donde empieza la discontinuidad de *Gutenberg* y comienza en el límite con la astenósfera, esta división tiene su fin en el límite manto-núcleo. La endósfera es el núcleo en sí, formado de hierro y níquel. La imagen mostrada en la figura 1 es una representación gráfica de la clasificación de acuerdo al comportamiento de las rocas en donde se aprecian las diferentes capas de materiales que la conforman.

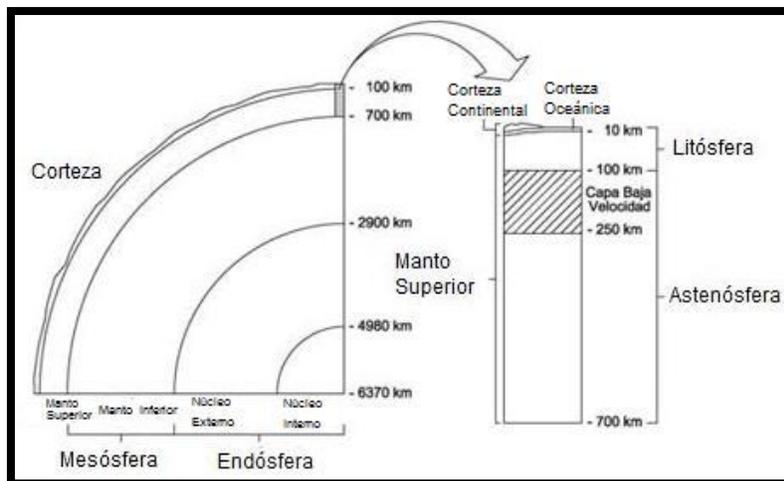


Fig. 1 Clasificación según el comportamiento de las rocas (Ref 3).

Tectónica de Placas

En 1960 se propuso una teoría que explica razonablemente todas las observaciones hechas hasta el momento de los hallazgos encontrados por *Alfred Wegener* y su teoría de la “Deriva Continental” (Ref 4), ésta teoría es la que da sentido a la ocurrencia de los sismos, afirma que la parte más externa de la Tierra está dividida en dos capas, cada una con diferentes propiedades. La inferior alcanza una profundidad de 700 [km] con zonas que contienen rocas menos rígidas en sus primeros 100 [km]. La superior es la corteza y tiene 50 [km] de profundidad aproximadamente en la parte oceánica y 100 [km] de espesor aproximadamente en la continental.

La capa superior de la corteza es rígida y está fragmentada de forma irregular en varias placas de diferentes dimensiones, éstas se desplazan a una velocidad de 2 a 10 centímetros por año, el desplazamiento ocurre sobre las rocas menos rígidas de la capa inferior. En los bordes de las placas continuamente se está formando o destruyendo corteza, tales zonas se han clasificado en tres categorías: La primera está constituida por fosas en donde las placas pueden converger o colisionar, la segunda integrada por las dorsales, zonas de desplazamiento divergente y finalmente se tienen las fallas transformantes en donde las placas tienen un movimiento lateral entre ellas. La figura 2 es un esquema de todas las placas tectónicas existentes en la Tierra.

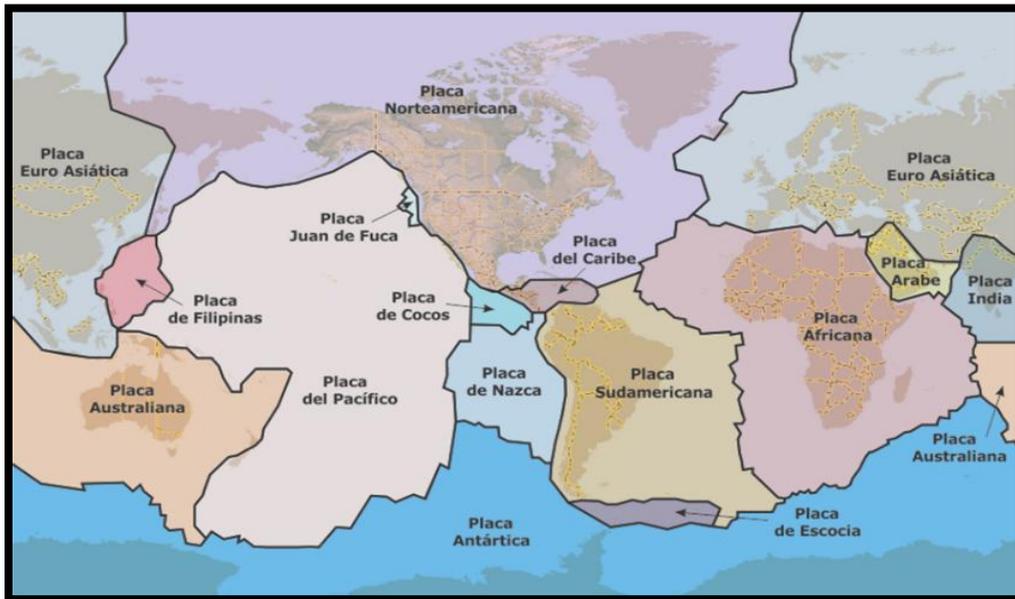


Fig. 2 Placas Tectónicas o Litosféricas (Ref 5).

Tipos de Falla

Una falla en una placa tectónica se puede presentar en el interior de la misma o en los límites que la comprenden, la interacción con otras entre los límites es lo que determina el tipo de movimiento y la naturaleza de los sismos, la intensidad y magnitud de estos dependen de los esfuerzos almacenados. Las fallas se han clasificado en cuatro tipos (figura 3); las normales o de deslizamiento, son originadas por las fuerzas de tensión generadas entre las superficies de contacto; las inversas o de cabalgadura, también llamadas de reversa, son producto de la compresión entre las placas; las transcurrentes se presentan por la fuerza cortante que ocurre al interactuar dos placas y las últimas son las de tipo mixto que se generan al presentarse una combinación de esfuerzos de compresión, tensión y cortante (Ref 6).

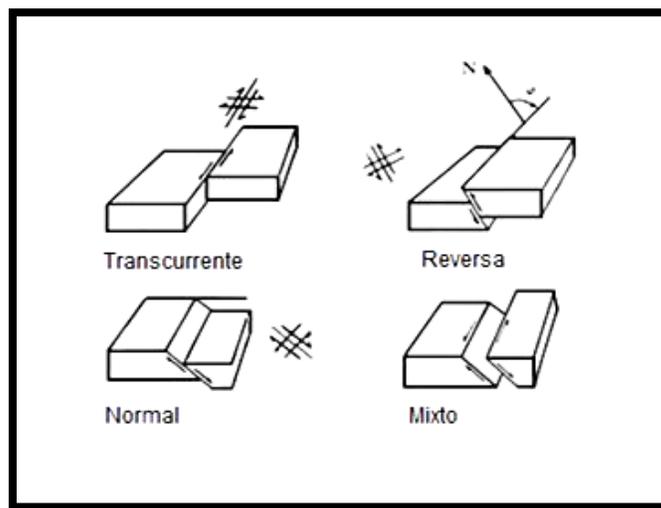


Fig. 3 Tipos de Fallas (Ref 7).

I.1 Conceptos Generales

Sismos

Un sismo es el movimiento de la corteza terrestre generado por liberación de energía, puede ser causado por el deslizamiento interno o externo de placas tectónicas, por causas volcánicas, por el movimiento repentino de grandes masas de suelo o roca y por cuestiones artificiales como las explosiones. La sismicidad producida por placas tectónicas se genera por la liberación de una gran cantidad de energía acumulada previamente por el movimiento de ellas e impedido durante un tiempo indefinido por una fuerza de fricción que existe entre sus bordes. Los movimientos debido al vulcanismo se producen por erupciones o por la misma actividad dentro de los cráteres. Los deslizamientos repentinos de masas de suelo o roca originan también vibraciones las cuales son clasificadas como movimientos locales. Las explosiones provocadas por el ser humano son eventos ajenos a la naturaleza en los cuales se liberan diversos tipos de energía creando perturbaciones en la corteza.

Los sismos ocurren en el espacio y su registro se realiza comúnmente en tres direcciones ortogonales, dos horizontales y una vertical en lo que comúnmente se conoce como coordenadas x, y, z (Ref 8). Los movimientos sísmicos son detectados en la superficie por medio de sismógrafos y/o acelerógrafos que en forma gráfica representan en un papel el tipo de movimiento que se presenta.

La figura 4 describe la distribución de las placas tectónicas existentes en nuestro planeta. Las placas se encuentran separadas por líneas verdes y cada uno de los puntos amarillos representa los sismos que han ocurrido. La mayor sismicidad se encuentra en una zona llamada "Cinturón de fuego del Pacífico" que comprende las costas del Océano con el mismo nombre, contiene varias de las zonas de subducción más importantes, y se extiende en dirección sur-norte a lo largo de diversos países. En el continente Americano, comprende Chile, Argentina, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia, Panamá, Costa Rica, El Salvador, Nicaragua, Honduras, Guatemala, México, Estados Unidos y Canadá, extendiéndose hacia la región de las islas Aleutianas y posteriormente en dirección norte-sur, por las costas de Rusia, Japón, Taiwán, Filipinas, Indonesia, Papúa Nueva Guinea hasta terminar en Nueva Zelanda.

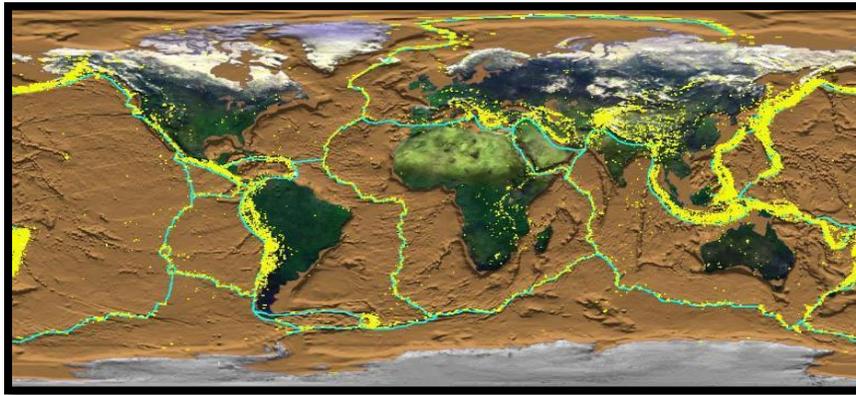


Fig. 4 Distribución de Placas Tectónicas y Sismicidad Mundial (Ref 9).

En la figura 5 se muestran las placas tectónicas existentes en la República Mexicana, en color azul se indican sismos con magnitud menor a 6 y los rojos corresponden a aquellos con magnitud mayor o igual a 6. En la misma figura se puede observar que la concentración de la mayoría de los sismos es en la zona de subducción entre las placas de Cocos y la Norteamericana, así mismo es importante señalar que en el estado de Guerrero, en la región conocida como la Brecha de Guerrero, se ha almacenado suficiente energía para generar un sismo de magnitud mayor a 8.

En general los grandes sismos, en nuestro país, se han generado en la zona de subducción señalada y que cubre los estados de la región costera del Pacífico que va desde Nayarit hasta Chiapas.



Fig. 5 Sismicidad en México (Ref 10).

Hipocentro y epicentro. Se denomina hipocentro o foco sísmico al lugar en donde se produce la liberación de energía necesaria para producir un sismo en un determinado tiempo y espacio, ésta energía se propaga en forma de ondas a partir de este punto. El epicentro es la proyección vertical hacia la superficie terrestre del hipocentro. Ambos conceptos se ilustran en la figura 6.

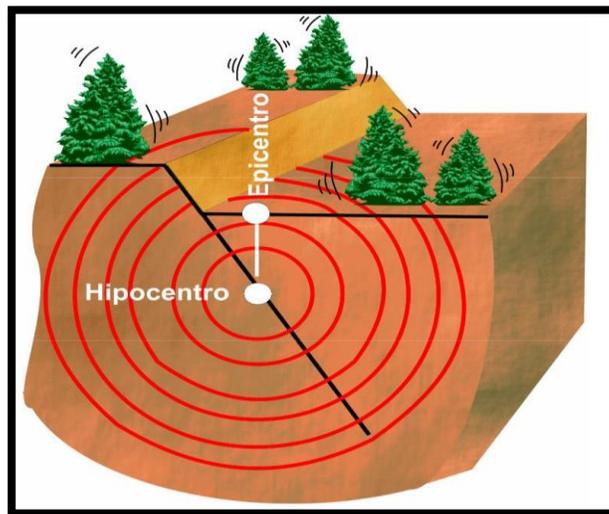


Fig. 6 Epicentro e Hipocentro (Ref 11).

Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas son las deformaciones que presenta un medio al ser alcanzado por una fuerza la cual va modificando la forma de las partículas del mismo para que posteriormente vuelvan a su estado normal, durante éste proceso las partículas alteran o empujan a partículas cercanas, lo que hace que la deformación se propague a través del material (Ref 12).

En sismología existen ondas denominadas de “Cuerpo” las cuales se dividen en S y P, éstas viajan a través del interior de la Tierra. Las “Superficiales” están comprendidas por las *Rayleigh* y *Love*, que viajan a través de la superficie en donde su amplitud se maximiza y por el contrario al interior del medio disminuye su amplitud hasta nulificarse.

Ondas (P). Estas se propagan a más de 5 [km/s] en rocas graníticas cercanas a la superficie y a 11 [km/s] en el interior de la Tierra, de ahí que también se le denomine “primarias” ya que es el primer tipo de onda en ser registrada en cualquier punto por los sismógrafos. Las partículas del medio por donde se transmite se mueven en la dirección de la propagación y origina que el medio presente dilataciones y compresiones.

Ondas (S). También denominadas “secundarias”, deforman el medio en dirección a su propagación, son más lentas que las ondas P, aproximadamente 58 % de la velocidad de las P, de ahí que sean las siguientes en ser detectadas en cualquier punto. Las ondas tipo S tienen mayor amplitud que las ondas tipo P.

Ondas *Rayleigh* (R). Estas ondas son de periodos largos y se originan cuando hay una interacción entre las ondas primarias y las secundarias en su componente vertical. Su máxima velocidad es de 4 [km/s] y su amplitud varía con la profundidad. El movimiento de éste tipo de ondas es retrogrado y su velocidad es aproximadamente 90 % la velocidad de las ondas S.

Ondas *Love* (L). La característica principal de éstas es que son de periodos muy largos, se deben a una interferencia de las ondas S en su componente horizontal, este tipo de onda presenta velocidades máximas de 4.5 [km/s], por lo tanto son más veloces que las de tipo *Rayleigh*. Para la generación de este tipo de ondas se necesita una capa de material sobre un espacio en dónde pueda quedar atrapada energía sísmica y el movimiento que presentan es perpendicular a la dirección de su propagación.

La figura 7 es un esquema del movimiento que presentan los tipos de ondas antes mencionados.

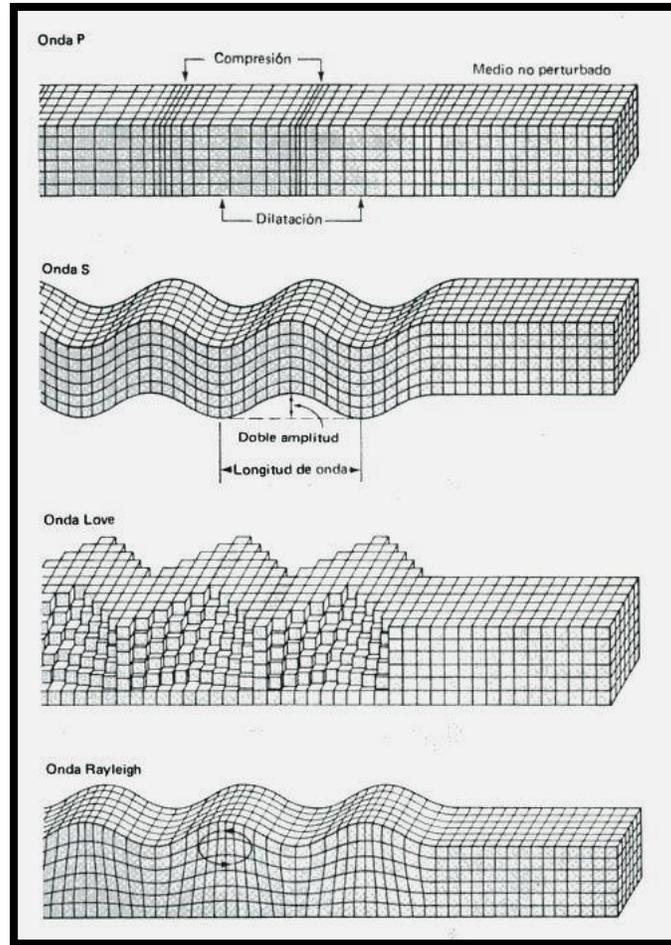


Fig. 7 Tipos de Ondas Sísmicas (Ref 13).

Magnitud

La magnitud es un valor que describe de forma indirecta la energía liberada por un sismo y existen diversas formas de medirla, que son las siguientes. La primera fue definida por *Charles Francis Richter* con el propósito de estimar un parámetro mediante el cual se pudiera estimar la energía liberada por sismos ocurridos en el estado de California en los Estados Unidos de Norteamérica y se le conoce como Magnitud Local (M_L). Su uso está limitado a no más de 600 [km] a la redonda, de ahí que se emplee el término local para su nombre. Esta magnitud está definida como el logaritmo en base 10 de la máxima amplitud (en centímetros) leída en un sismógrafo simple *Wood-Anderson*, menos una corrección por la distancia entre el epicentro y el lugar de registro, correspondiente al logaritmo de la amplitud que debe tener, a esa distancia, un sismo de $M=0$ (Ref 14), ha sido calibrada para poder ser usada en diferentes partes del mundo y usando registros de otros instrumentos; por limitaciones al tipo de datos sismológicos que emplea, ya no es utilizada. La fórmula descrita anteriormente es la siguiente:

$$M_L = \log (A_{max}) - \log A_0(D) \quad (1)$$

La escala de Magnitud de momento (M_W) se establece a partir del momento sísmico, lo último corresponde a una cantidad que proporcionalmente representa un área de ruptura y al deslizamiento que ocurra en la falla. Esta escala es más confiable puesto que no se satura y es la actualmente utilizada por las agencias y comunidades científicas. A es la superficie de ruptura, D es el desplazamiento y μ es el módulo de rigidez del terreno.

$$M_W = \frac{2}{3} \text{Log } M_0 - 10.7 \quad (2)$$

$$M_0 = \mu * A * D \quad (3)$$

La magnitud de coda (M_C) se obtiene de la duración de un registro, corresponde a la parte tardía de la señal que decrece conforme transcurre el tiempo hasta alcanzar su nivel original. La duración es proporcional al tamaño del sismo. Las constantes a , b y c dependen de la atenuación y dispersión de las ondas sísmicas en la zona.

$$M_C = a * \log (t_{\text{coda}}) + br + c \quad (4)$$

La magnitud de ondas de cuerpo (m_B) se calcula a partir de la amplitud máxima de la onda P. Una limitante de esta magnitud es que se satura para valores de m_B entre 6.5 y 6.8, por lo tanto no es posible determinar m_B para sismos con valores superiores. A es la amplitud máxima y T el periodo, P es una función de la distancia y profundidad tabulada para distancias angulares de hasta 100° .

$$m_b = \log (A/T) + P (\Delta, h) \quad (5)$$

La magnitud de ondas superficiales (M_S) se obtiene de la amplitud máxima, de las ondas superficiales que por lo general son ondas de *Rayleigh* con períodos de oscilación entre 18 y 22 segundos, aunque permite determinar magnitudes de sismos grandes también sufre saturación ante la ocurrencia de eventos con magnitud $M > 8.3$.

$$M_S = \log (A/T) + 1.66 * \log \Delta + 3.3 \quad (6)$$

La magnitud de energía (M_e) es proporcional a la energía que irradió el sismo en forma de ondas sísmicas, este valor puede ser diferente al determinado para M_W pues M_e cuantifica un aspecto diferente del sismo; por lo que generalmente esta magnitud no es reportada por las agencias durante los primeros días después de la ocurrencia de un sismo.

$$M_e = \frac{2}{3} \log 10 E - 9.9 \quad (7)$$

Intensidad

La intensidad es una medida de los efectos que ocasiona un sismo en la superficie terrestre en un determinado sitio, puede variar dependiendo de las condiciones del lugar y la distancia a la que se ubique el epicentro. Una de las primeras clasificaciones fue la de *Rossi-Forel* que comprendía 10 grados, la cual fue propuesta en el año de 1883. Otras son la *MKS* de 12 grados y que es utilizada en Europa Occidental y la escala *JMA* utilizada en Japón y que tiene sólo 7 grados (Ref 15). En América Latina se ha utilizado la escala modificada de *Mercalli (MM)*, a partir del año de 1931, cuenta con 12 grados de intensidad. La tabla 1 describe los 12 valores de intensidad asociados a la percepción del sismo en la escala *MM*.

Tabla 1. Escala de Mercalli (Ref 16).

Intensidad	Percepción
I	Sacudida que sienten muy pocas personas en condiciones especialmente favorables para percibirla.
II	Sacudida percibida por personas en reposo, especialmente en plantas altas de edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar.
III	Sacudida sentida claramente en el interior de inmuebles, especialmente en los pisos altos. Los vehículos estacionados pueden moverse ligeramente, vibraciones similares a las provocadas por el paso de un carro pesado.
IV	Sacudida sentida por muchas personas en el interior de inmuebles y pocas en el exterior. Vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas, los muros crujen y los vehículos estacionados se balancean claramente.
V	Sacudida sentida por casi todas las personas, algunas despiertan si es de noche, piezas de vajilla o vidrios de ventanas se rompen, movimientos visibles de árboles y postes.
VI	Sacudida sentida por todas las personas, muebles pesados cambian de sitio y hay daños ligeros en paredes.
VII	Daños ligeros en buenas construcciones y moderados en regulares, lo sienten las personas que conducen vehículos en movimiento.
VIII	Daños ligeros en construcciones buenas, considerables en edificios ordinarios, los muros salen de sus armaduras, cambio en el nivel del agua de pozos, pérdida de control en la conducción de vehículos.
IX	Daños considerables en construcciones de buena calidad, grandes daños en edificios sólidos, algunos edificios salen de sus cimientos, se agrieta el terreno notablemente y las tuberías subterráneas se rompen.
X	Destrucción de algunas estructuras de madera, agrietamiento considerable del terreno, las vías de ferrocarril se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y en pendientes fuertes.
XI	Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie, puentes destruidos, anchas grietas en el terreno, las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio, hundimientos y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas.
XII	Destrucción total, ondas visibles en el terreno y perturbaciones en las cotas de nivel.

Instrumentación sísmica

Para el registro sísmico los instrumentos comúnmente utilizados son los sismógrafos y los acelerógrafos, ambos registran los movimientos causados por las ondas que viajan a través del suelo durante la ocurrencia de uno; ambos instrumentos se basan en el principio de la inercia el cual menciona que un objeto permanecerá en reposo a menos que una fuerza externa modifique su estado. Mencionado el principio anterior, para obtener un registro sísmico correcto, es necesario referir el movimiento a un punto fijo en el espacio ya que si el registro es referido a un punto fijo en el suelo sería prácticamente imposible obtenerlo; dicha referencia se puede observar en la figura 8 y se ejemplifica mediante una masa suspendida por algún elemento que permita su estado de reposo durante un instante al iniciar un sismo, la masa es suspendida de un resorte el cual va fijado a un marco y a su vez, el marco es fijado al suelo. Existe también, en el mecanismo, un amortiguamiento que por lo general es de aceite el cual tiene la función de ejemplificar el verdadero movimiento del suelo; la masa suspendida tiene un dispositivo para poder registrar en papel la totalidad del movimiento y el papel está sujeto verticalmente a un tambor giratorio que se mueve a cierta velocidad para obtener un registro completo en el tiempo, el registro se puede hacer en cualquier componente espacial que se desee mientras se siga el mismo principio.

El sismógrafo es el instrumento que registra los movimientos del suelo, anteriormente se usaban sismógrafos como el de la figura 8, en la actualidad los sismógrafos que se usan para la investigación son electrónicos, los componentes de la base y el tambor son reemplazados por componentes eléctricos que generan una señal o voltaje eléctrico el cual es almacenado digitalmente pero el principio sigue siendo el mismo.

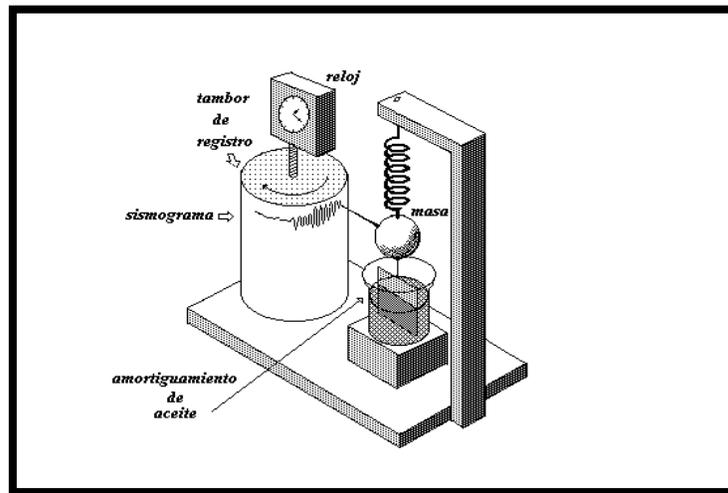


Fig. 8 Sismógrafo Vertical (Ref 17).

El acelerógrafo es el instrumento que registra las aceleraciones del suelo durante la ocurrencia de un sismo, actúa con el mismo principio básico que el sismógrafo pero tiene diferentes características ya que es mucho más sensible a los cambios de aceleración debido a que la rigidez que presenta en sus componentes electrónicos es mayor para poder registrar aceleraciones grandes, los acelerógrafos se crearon debido a que los

sismógrafos saturaban el registro de su señal con sismos de magnitudes considerables, estos aparatos también pueden registrar los cambios de aceleración en los tres ejes coordenados. Los equipos actuales no registran los movimientos del terreno durante el transcurso del día, únicamente se activan cuando los valores sobrepasan un umbral pre-establecido por el fabricante, la institución o personal que esté a cargo. A los registros obtenidos de éste dispositivo se les denomina acelerogramas.

I.2 Registros Sísmicos

Desde la época prehispánica nuestro país ha contado con registros sísmicos, algunos de ellos se pueden encontrar en fuentes pictográficas representadas por medio de glifos, éstas estaban comprendidas por las palabras “ollin” que significa movimiento y el “tlalli” que significa tierra, es así como la conjunción de estos dos comprenden un “movimiento de tierra” o “sismo”. Los métodos prehispánicos de registros sísmicos son el resultado de la combinación de números y signos, el fechamiento constituye una difícil tarea en esta época ya que el pictograma antes mencionado sólo indicaba si el sismo había ocurrido durante la noche o en el día dependiendo si el círculo central que contenía estaba coloreado de negro o rojo respectivamente.

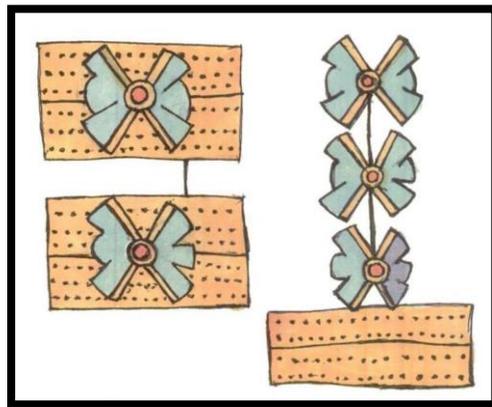


Fig. 9 Pictograma “ollin tlalli” (movimiento de tierra) (Ref 18).

A lo largo de la historia de nuestro país se ha tenido registro oral de diversos sismos, datándose así los más importantes por el grado de destrucción y por la magnitud, a partir de que ésta se pudo medir. El primer registro hemerográfico que se tuvo acerca de éstos ocurrió entre el 16 y 28 de enero de 1729; incluía una explicación científica sobre el origen y la causa de los temblores. Entre los historiadores y científicos que los analizaron y describieron destacan José Antonio Alzate y Ramírez, Mariano Fernández de Echeverría y Veytia, José Antonio Villaseñor y Sánchez, Pedro de Buzeta y Joaquín de Ausogorri (Ref 19).

El empleo de la duración para el cálculo de un movimiento data a partir del siglo XVII y se tienen registros que duraban “alrededor de dos credos” o “alrededor de dos credos rezados con devoción” lo que hace al tiempo relativo a la forma de rezar de quién registraba el sismo. Antes de la segunda mitad del siglo XVII sólo se mencionaba si el

sismo ocurrió durante el día o durante la noche, hacia la segunda mitad ya se especifica un poco más, teniendo como referencia si fue en la tarde, a medio día, en la madrugada o en la mañana.

El registro de la hora de ocurrencia de los sismos se especificó hasta la segunda mitad del siglo XVIII, fue Joaquín Velázquez de León quien se ocupó de esta tarea, el primer registro de éste tipo ocurrió el 4 de abril de 1768 a las 6 y 47 minutos de la mañana, estos avances en los registros se dieron a consecuencia del progreso que se tuvo en los relojes de bolsillo (Ref 20). La duración, por esas fechas, se media con las palabras “corto”, “largo”, de “corta duración” o “de larga duración”. La intensidad de los temblores era registrada como catastrófica, grande o enorme y fuerte. A su vez para la descripción de los movimientos oscilatorios y trepidatorios se empleaban los términos “oscilaciones espantosas” y “movimientos de abajo a arriba o modo de salto” respectivamente.

La tabla 2 contiene el registro de sismos ocurridos en México con $M \geq 6.0$, desde el primer registro que data de 1568 hasta febrero de 2015, los datos que aparecen fueron recopilados de la referencias 18 y 21, en ella aparecen 10 sismos con $M \geq 8.0$ siendo el de 1899 el de mayor magnitud, cuenta también con 27 registros con $M \geq 7.0$, 27 registros con $M \geq 6.0$ y 10 registros de los cuales no se pudo calcular la magnitud debido a la pobreza de la bibliografía de la época en la que ocurrieron.

Tabla 2. Sismos Ocurridos en México $M \geq 6.0$ (Ref 18 y 21).

Localización	Fecha	Magnitud
Jalisco	diciembre 27 de 1568	Sin Magnitud
México	agosto 25 de 1611	Muy Grande
Oaxaca	agosto 23 de 1696	Grande
Oaxaca	diciembre 21 de 1701	Destructivo
Colima	septiembre 16 de 1711	Varios Muertos
Acapulco	septiembre 1 de 1741	Tsunami
Acapulco	mayo 28 de 1784	Tsunami y varios muertos
Zapotlán	marzo 25 de 1806	Muchos muertos
Jalisco	noviembre 22 de 1837	M=7.7
Oaxaca	marzo 9 de 1845	M=8.0
Oaxaca	mayo 5 de 1854	M=8.0
Zapopan	febrero 11 de 1875	M=7.5
Huajuapán	julio 19 de 1882	Sin Magnitud
Sonora	mayo 3 de 1887	42 Muertos
Oaxaca	enero 29 de 1899	M=8.4
Jalisco	enero 20 de 1900	M=8.3
Jalisco	mayo 16 de 1900	M=7.8
Chiapas	septiembre 23 de 1902	M=7.8
Baja California Norte	octubre 16 de 1902	M=7.8
Oaxaca	enero 14 de 1903	M=8.3
Acapulco	abril 15 de 1907	M=8.3
Jalisco	junio 7 de 1911	M=8.0
Pinotepa Nacional	junio 17 de 1928	M=8.0
Puerto Escondido	octubre 9 de 1928	M=8.0
Jalisco	junio 3 de 1932	M=8.1
Jalisco	junio 18 de 1932	M=7.9
Colima	junio 22 de 1932	M=7.9
Orizaba	julio 26 de 1937	M=7.7
Petatlán	febrero 22 de 1943	M=7.5
Acapulco	julio 28 de 1957	M=7.9
Oaxaca	agosto 23 de 1965	M=7.6
Chiapas	abril 29 de 1970	M=7.4
Colima	enero 30 de 1973	M=7.6
Orizaba	agosto 28 de 1973	M=7.3
Oaxaca	noviembre 29 de 1978	M=7.8
Petatlán	enero 26 de 1979	M=6.5
Petatlán	febrero 28 de 1979	M=6.2
Petatlán	marzo 14 de 1979	M=7.6
Tehuantepec	junio 22 de 1979	M=7.1
Huajuapán de León	octubre 24 de 1980	M=7.0
Playa Azul	octubre 25 de 1981	M=7.3
Ometepec	junio 7 de 1982	M=7.0
Michoacán	septiembre 19 de 1985	M=8.2
Michoacán	septiembre 20 de 1985	M=7.6
Michoacán	abril 30 de 1986	M=7.0
Oaxaca	julio 13 de 1986	M=6.0
Oaxaca	julio 15 de 1987	M=6.0
Guerrero	abril 25 de 1989	M=6.9
Sinaloa	marzo 16 de 1990	M=6.1

Tabla 2. (Continuación).

Localización	Fecha	Magnitud
Chiapas	septiembre 19 de 1993	M=6.3
Chiapas	septiembre 30 de 1993	M=6.4
Guerrero	octubre 24 de 1993	M=6.6
Chiapas	marzo 14 de 1994	M=6.8
Baja California Sur	agosto 28 de 1995	M=6.5
Ometepec	septiembre 14 de 1995	M=7.3
Colima	octubre 9 de 1995	M=8.0
Oaxaca	febrero 25 de 1996	M=7.1
Guerrero	julio 15 de 1996	M=6.6
Guerrero	mayo 22 1997	M=6.0
Oaxaca	julio 19 de 1997	M=6.7
Chiapas	junio 7 de 1998	M=6.2
Puebla	junio 15 de 1999	M=7.0
Oaxaca	septiembre 30 de 1999	M=7.4
Guerrero	marzo 12 de 2000	M=6.4
Guerrero	agosto 9 de 2000	M=7.0
Colima	mayo 19 de 2001	M=6.5
Guerrero	octubre 7 de 2001	M=6.1
Oaxaca	noviembre 10 de 2001	M=6.0
Chiapas	noviembre 28 de 2001	M=6.0
Chiapas	enero 16 de 2002	M=6.7
Guerrero	abril 18 de 2002	M=6.3
Colima	enero 21 de 2003	M=7.6
Michoacán	mayo 19 de 2003	M=6.0
Guerrero	enero 1 de 2004	M=6.3
Baja California Sur	enero 4 de 2006	M=6.7
Guerrero	abril 13 de 2007	M=6.3
Chiapas	junio 13 de 2007	M=6.6
Chiapas	julio 5 de 2007	M=6.2
Baja California Sur	septiembre 9 de 2007	M=6.3
Oaxaca	febrero 12 de 2008	M=6.6
Chiapas	abril 14 de 2008	M=6.5
Colima	septiembre 23 de 2008	M=6.4
Chiapas	octubre 16 de 2008	M=6.6
Sinaloa	julio 3 de 2009	M=6.0
Sonora	agosto 3 de 2009	M=6.9
Jalisco	septiembre 24 de 2009	M=6.2
Baja California Norte	abril 4 de 2010	M=7.2
Oaxaca	junio 30 de 2010	M=6.0
Jalisco	agosto 23 de 2010	M=6.1
Baja California Sur	octubre 21 de 2010	M=6.5
Veracruz	febrero 25 de 2011	M=6.0
Puebla	abril 07 de 2011	M=6.7
Guerrero	diciembre 10 de 2011	M=6.5
Guerrero	marzo 20 de 2012	M=7.4
Baja California Sur	abril 12 de 2012	M=6.8
Chiapas	noviembre 7 de 2012	M=7.3
Chiapas	marzo 25 de 2013	M=6.2
Chiapas	septiembre 6 de 2013	M=6.1
Guerrero	abril 18 de 2014	M=7.2
Guerrero	mayo 8 de 2014	M=6.4
Guerrero	mayo 10 de 2014	M=6.1
Jalisco	mayo 31 de 2014	M=6.2
Chiapas	julio 7 de 2014	M=6.9
Veracruz	julio 29 de 2014	M=6.4
Sinaloa	octubre 7 de 2014	M=6.1
Jalisco	febrero 22 de 2015	M=6.3

I.4 Espectros de Fourier y de Respuesta

Espectro de Fourier

El espectro de Fourier (EF) es una gráfica en donde se representan valores o series de datos (funciones) con su respectivo dominio en la frecuencia, éste espectro debe su nombre a *Jean Jaques Fourier* quién fue el encargado de descomponer funciones periódicas en series trigonométricas. Los datos que se representan gráficamente en el EF son transformados previamente de su dominio en el tiempo a datos con dominio en su frecuencia. Esta conversión se hace mediante transformadas lineales las cuales son una herramienta muy utilizada y de gran ayuda en ingeniería sísmica. Las transformadas hechas por Fourier permiten representar una función periódica continua con un número finito de máximos y mínimos en cualquier periodo como una serie trigonométrica correspondiente a dicha función, a éste cambio se le conoce como Transformada de Fourier (TF).

La TF es una operación que se realiza sobre funciones, en sismología las funciones son representadas por medio de series de tiempo, ya sea de velocidad, de aceleración o de desplazamiento. La TF no es mas que la suma infinita (integral) de una función de partida convertida a otra función, para que la suma sea la correcta se tienen que cumplir una serie de condiciones razonables para que su transformada sea equivalente. En la forma más sencilla, la TF descompone una señal en una serie de senoides de diferentes frecuencias y amplitudes que sumadas corresponden a la señal original y que sirve para representar una señal continua en el tiempo.

Siendo $f(t)$ una función integrable, TF estará dada por:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

$F(\omega)$ = Señal Transformada al Dominio de la Frecuencia

$f(t)$ = Señal en el Dominio del Tiempo

$$j^2 = -1$$

En donde la variable t corresponde al tiempo y ω corresponde a la frecuencia.

Un sismo es una función continua en el tiempo, la cual es registrada por los acelerógrafos como discontinua, es decir, que a lo largo del registro se van guardando valores de aceleración cada determinado tiempo, la tasa de muestreo es la que determina el número de valores que contendrá el acelerograma. El registro sísmico que se genera en el acelerógrafo es un conjunto de valores discontinuos, y se crea de ésta manera ya que las computadoras utilizan algoritmos binarios para manejar datos; para discretizar la señal se emplea un algoritmo el cual lleva por nombre Transformada Discreta de Fourier (TDF).

La discretización de una señal continua se hace a través de una operación llamada muestreo, la TDF permite evaluar una representación espectral (en frecuencia) discreta en una ventana de tiempo, el procedimiento para el cambio de funciones puede ser agilizado mediante la Transformada Rápida de Fourier (TRF).

La TRF evalúa directamente las sumas y productos de la TDF, así para una cantidad grande de muestras el tiempo de cálculo de éste algoritmo puede ser más rápido, en breves palabras, la TRF descompone la transformada a tratar en otras más simples y estas a su vez hasta llegar a transformadas de dos elementos, una vez resueltas las transformadas más simples se tienen que ordenar o agrupar en otras de nivel superior que deben resolverse de nuevo y así sucesivamente hasta llegar al nivel más alto y al final del proceso los resultados que se obtienen deben reordenarse.

El espectro de Fourier permite el análisis de frecuencias del movimiento del terreno, el cual es producido por la propagación de ondas sísmicas, relacionándolas con su correspondiente valor de amplitud. El espectro se calcula como el valor absoluto de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la parte real y la parte imaginaria de la señal en el dominio de la frecuencia que se define como.

$$|F(\omega)| = \sqrt{R(\omega)^2 + jX(\omega)^2} \quad (9)$$

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t \, dt \quad (10)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sen \omega t \, dt \quad (11)$$

$R(\omega)$: Parte real

$jX(\omega)$: Parte imaginaria

La figura 10 corresponde a un registro de aceleración (con dominio en el tiempo) con su respectivo EF (con dominio en frecuencia).

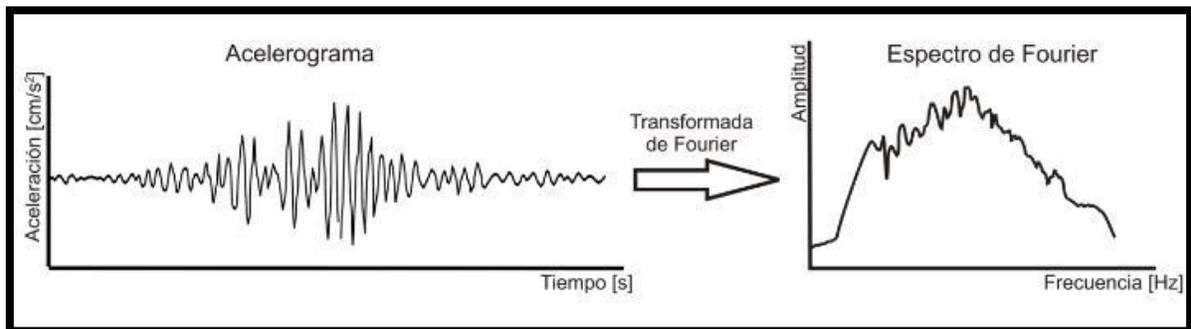


Fig. 10 Acelerograma con su respectivo EF (Ref 22).

Función de Transferencia en Registros Sísmicos

Estrictamente una función de transferencia es una operación basada en las transformaciones lineales que permite estimar la respuesta transitoria y en frecuencia de sistemas lineales, es también definida como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del medio de forma precisa o aproximada (Ref 23). En términos de transformadas, la respuesta a la Función de transferencia $y(\omega)$ puede expresarse como la multiplicación de los datos de entrada $x(\omega)$ multiplicados por la Función de Transferencia $H(\omega)$, expresándose de la siguiente manera (Ref 24):

$$y(\omega) = x(\omega) * H(\omega) \quad (12)$$

Una función de transferencia en el campo de la Ingeniería Sísmica es la relación que existe al dividir diferentes espectros de amplitudes de Fourier registrados en diversos sitios con características distintas, las funciones de transferencia relacionan el comportamiento dinámico y la excitación, ambos del terreno.

Sistema de un grado de Libertad (*SDF*)

Un sistema de un grado de libertad está representado por una masa (m), un amortiguamiento (c), y una rigidez (k) siempre y cuando pueda tener desplazamiento en una sola dirección, éste sistema puede ser representado como elementos estructurales apoyados (marcos, armaduras, etc.). En estática comúnmente se ejemplifican *SDF* como elementos apoyados en sus bases como el marco que se muestra en la figura 11.

El primer esquema (a) representa un *SDF* bajo la acción de una sola fuerza aplicada en un extremo (en éste caso el derecho) la cual va a generar un único desplazamiento (u) en el elemento, y en la masa que contiene el mismo; el siguiente esquema (b) representa el mismo *SDF* alterado por la acción de un sismo y con dos desplazamientos en la misma dirección, uno generado por el movimiento en el suelo (u_g), que hará que el elemento se desplace junto con el suelo, y el segundo desplazamiento (u) que se genera en el elemento, es así como en el esquema (b) el desplazamiento total (u^t) está dado por la suma de los dos desplazamientos antes mencionados.

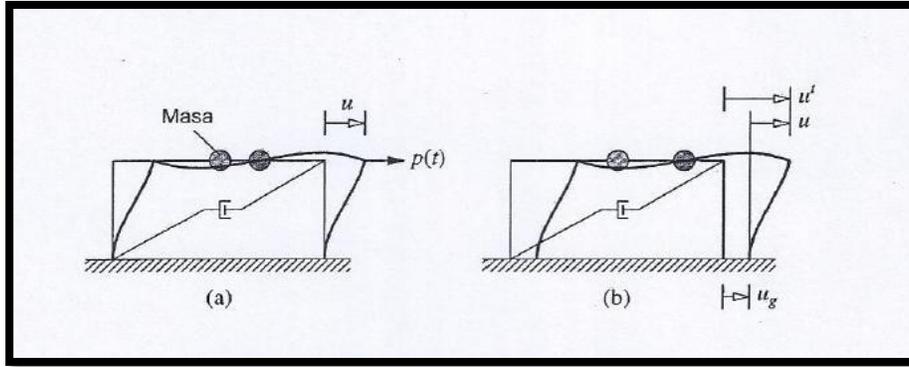


Fig. 11 Sistema de Un Grado de Libertad
 a) Con una fuerza aplicada lateralmente
 b) Durante una acción sísmica
 (Ref 25).

La ecuación 13 representa el desplazamiento en el instante en el que una fuerza sísmica actúa sobre un *SDF*, el desplazamiento total del elemento estará dado entonces por la siguiente ecuación:

$$u^t(t) = u(t) + u_g(t) \quad (13)$$

Considerando el equilibrio dinámico del sistema (*SDF*) bajo la acción de distintas fuerzas (inercia, amortiguamiento y rigidez), dicho equilibrio se representa con la ecuación 14.

$$f_I + f_D + f_S = 0 \quad (14)$$

En donde:

f_I = Fuerza de Inercia

f_D = Fuerza de Amortiguamiento

f_S = Fuerza de Rigidez o Resistente

A su vez las fuerzas anteriores están conformadas por las siguientes ecuaciones:

$$f_I = m\ddot{u}^t$$

$$f_S = ku$$

$$f_D = c\dot{u}$$

En donde:

m = Masa del Sistema
 \ddot{u}^t = Aceleración Total del Sistema
 k = Rigidez Lateral
 u = Desplazamiento
 c = Coeficiente de Amortiguamiento Viscoso
 \dot{u} = Velocidad

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación 14 y considerando la ecuación 13, la ecuación resultante queda de la siguiente manera.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (15)$$

Esta expresión es la ecuación que rige el desplazamiento total $u^t(t)$ de una estructura o elemento con comportamiento lineal cuando es sujeta a un movimiento de aceleración. Si el sistema es inelástico la expresión sufre una modificación, quedando de la siguiente manera:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_S(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (16)$$

En un comportamiento inelástico presentado en una estructura la fuerza f_S que corresponde a la deformación u no tiene un valor único y depende de la historia de deformaciones y de su trayectoria, por lo que la fuerza resistente f_S está dada por:

$$f_S = f_S(u, \dot{u}) \quad (17)$$

Sistemas Linealmente Elásticos

Ecuación de Movimiento

Considerando la ecuación 16 y al ser dividida entre la masa del sistema (m) se tiene:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g(t) \quad (18)$$

En donde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}, \quad f_n = \frac{\omega_n}{2n}, \quad \zeta = \frac{c}{c_r} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (19)$$

ω_n = Frecuencia Circular Natural de Vibración
 k = Rigidez Lateral del Sistema
 m = Masa del Sistema

- T_n = Período Natural de Vibración
- f_n = Frecuencia Cíclica Natural de Vibración
- ζ = Relación de Amortiguamiento o Fracción de Amortiguamiento Crítico
- c = Coeficiente de Amortiguamiento Viscoso
- c_r = Coeficiente Crítico de Amortiguamiento, valor mínimo de c que impide que el sistema oscile al regresar a su posición original después de haber sufrido un desplazamiento

La expresión 18 implica que el desplazamiento $u(t)$ del sistema es función de la frecuencia natural ω_n 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 alguno de ellos posea mayor rigidez o tenga diferente masa en comparación con el otro.

La importancia de determinar los desplazamientos relativos $u(t)$ radica en la relación lineal que estos guardan con respecto a las fuerzas internas como son los momentos y las fuerzas cortantes en elementos estructurales como las vigas o las columnas, también el determinar el valor de los desplazamientos totales $u^t(t)$ de la masa o de la estructura permiten establecer la separación mínima que debe haber entre las estructuras para evitar el contacto entre ellas en caso de que se presente un sismo (Ref 26). La respuesta del desplazamiento $u(t)$ de un sistema con un grado de libertad depende directamente de la relación de amortiguamiento y del período natural de vibración

Espectro de Respuesta

El espectro de respuesta (ER) es la integración, mediante una gráfica, de los valores pico de la respuesta de un cuerpo o elemento a una excitación y que está en función del período natural de vibración de un sistema para una relación de amortiguamiento determinada; el espectro de respuesta es, en el campo de la ingeniería, una herramienta muy importante para el estudio de los sismos, usado primeramente por *Benioff* en 1934 y posteriormente por *Houser* y *Biot* en el mismo año (Ref 27). Este espectro es hoy la base de los reglamentos de diseño sísmico en el mundo y se usa para determinar las fuerzas de diseño con las que se proporciona la rigidez y la resistencia a las estructuras.

El espectro de respuesta sirve para caracterizar los movimientos del terreno bajo la acción de un sismo y poder observar con mayor certeza el efecto que tendrá en las estructuras, sirve también para poder representar la respuesta máxima de todos los posibles sistemas de un grado de libertad para un movimiento particular de un terreno y representa la respuesta máxima de una serie de osciladores con período y amortiguamiento determinados.

Se pueden definir tres tipos de espectros: de desplazamiento, de velocidad y de aceleración, los cuales quedan definidos como:

$$u_0(T_n, \zeta) = \max |u, (t, T_n, \zeta)|$$

$$\dot{u}_0(T_n, \zeta) = \max |\dot{u}, (t, T_n, \zeta)|$$

$$\ddot{u}_0^t(T_n, \zeta) = \max |\ddot{u}^t, (t, T_n, \zeta)|$$

u_0 = Espectro de Respuesta de Desplazamiento

\dot{u}_0 = Espectro de Respuesta de Velocidad

\ddot{u}_0^t = Espectro de Respuesta de Aceleración

La figura 12 representa historiales de aceleración en dos estaciones diferentes (SCT y CU) junto con sus respectivos espectros respuesta en una sola gráfica para observar el comportamiento que se presenta en suelos con diferentes propiedades.

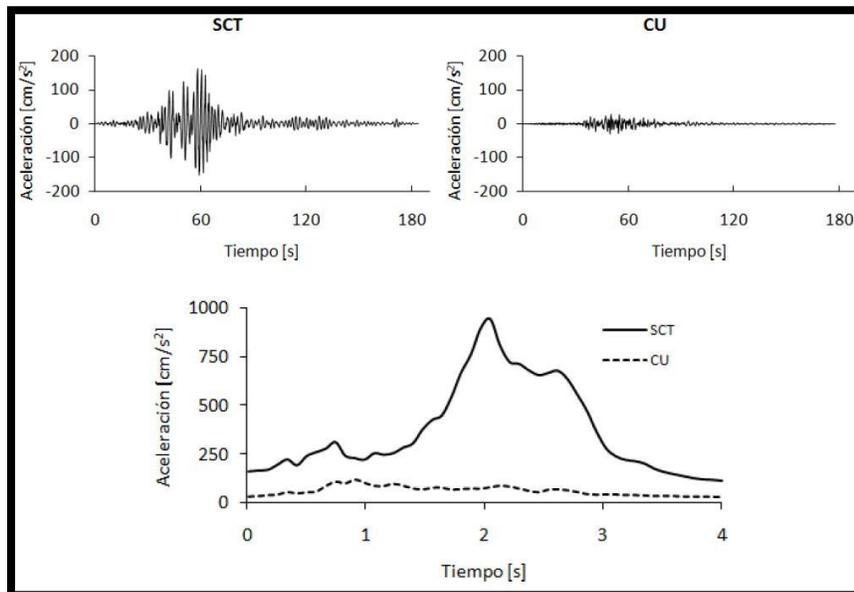


Fig. 12 Registros de aceleración con sus respectivos Espectros de Respuesta (Ref 28).

Los pseudo-espectros (velocidad y aceleración) son útiles para calcular las fuerzas internas, la respuesta de la estructura y para la construcción de espectros de diseño, aún cuando estos valores no son los máximos valores de velocidad y aceleración se encuentran muy cercanos a los obtenidos en registros sísmicos por lo que en la práctica se les considera de igual magnitud a los valores espectrales.

El procedimiento para determinar un espectro de respuesta de deformación es el siguiente:

- Determinar las respuestas de desplazamiento para diferentes periodos y para un valor de amortiguamiento fijo.
- Obtener el valor máximo del desplazamiento $D=u_0$.

- c) El valor del desplazamiento D obtenido para cada sistema de un grado de libertad representa un punto de espectro respuesta de desplazamiento.
- d) Repetir los pasos anteriores para valores de diferente amortiguamiento.

El espectro de respuesta de pseudo-velocidad es la gráfica que relaciona el producto $\omega_n * D$ como una función del periodo natural del sistema T_n , este espectro para un SDF con frecuencia natural ω_n y un desplazamiento $D = u_0$ producido por un sismo está dado por:

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (20)$$

En donde V tiene unidades de velocidad y está relacionado al valor máximo de la energía de deformación E_{s_0} almacenada en el sistema mediante un temblor en el cual E_{s_0} queda definida como:

$$E_{s_0} = \frac{mV^2}{2} \quad (21)$$

El espectro de respuesta de pseudo-aceleración es considerado como una cantidad A para un SDF con frecuencia natural ω_n relacionada a su desplazamiento máximo $D=u_0$ debido a un movimiento sísmico, en donde A tiene unidades de aceleración y está relacionada al valor del cortante máximo en la base V_{b_0} , el espectro respuesta de pseudo-aceleración también es considerado como una gráfica de $\omega_n^2 u$ en función natural del sistema T_n en donde:

$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (22)$$

$$V_{b_0} = f_{s_0} = mA \quad (23)$$

$$V_{b_0} = \frac{A}{g} W = CW \quad (24)$$

$$C = \frac{A}{g} \quad (25)$$

W = Peso de la Estructura
 g = Aceleración de la Gravedad
 C = Coeficiente de Fuerza Cortante

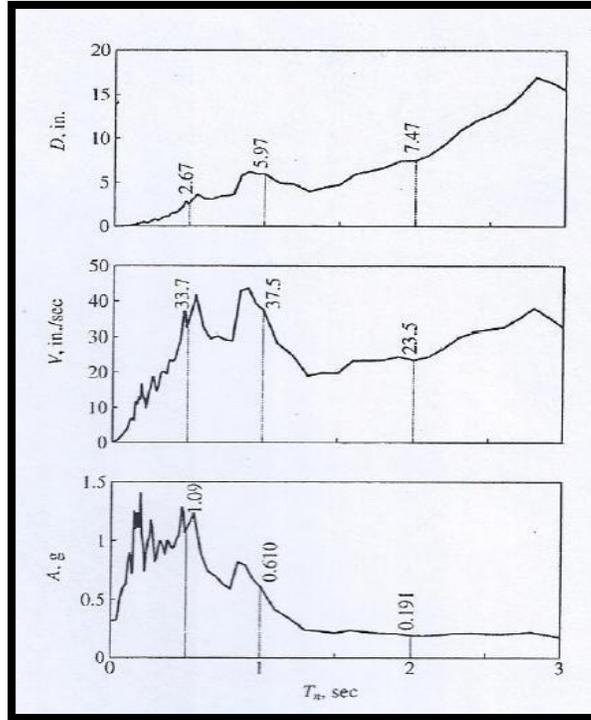


Fig. 13 Espectro de Respuesta de Desplazamiento (D)
 Espectro de Respuesta de Velocidad (V)
 Espectro de Respuesta de Aceleración (A)
 (Ref 29).

Representación Gráfica

Los espectros de respuesta de desplazamiento, velocidad y aceleración contienen la misma información, la ventaja de la representación gráfica es que conocido alguno de ellos, cualquiera de los otros dos puede ser obtenido; la importancia de la obtención de los tres espectros de respuesta está en el significado físico que representan. El espectro de respuesta de desplazamiento proporciona la distancia máxima que presenta el sistema, el de velocidad representa la máxima energía almacenada en el sistema durante un sismo y el de aceleración está asociado al valor máximo de la fuerza cortante en la base del sistema.

La representación gráfica de los tres espectros de respuesta se basa en la siguiente expresión:

$$\frac{A}{\omega_n} = V = \omega_D D \quad \text{ó} \quad \frac{T_n}{2\pi} A = V = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (26)$$

El valor pico de desplazamiento puede ser obtenido por medio de la siguiente ecuación:

$$u_0 = D = \frac{T_n}{2\pi} V = \left(\frac{T_n}{2\pi}\right)^2 A \quad (27)$$

La fuerza máxima equivalente del sistema f_{S0} está dada por la siguiente ecuación:

$$f_{S0} = kD = mA \quad (28)$$

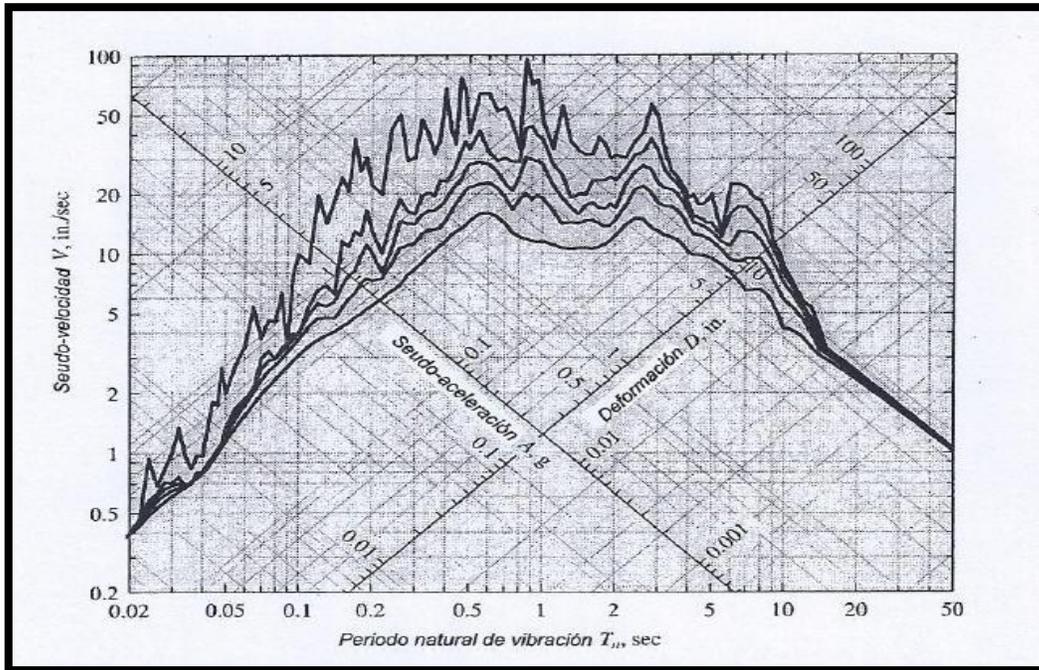


Fig. 14 Representación de los espectros de desplazamiento, pseudo-velocidad y pseudo-aceleración en papel tetra-logarítmico (Ref 30).

El espectro puede ser dividido en tres regiones:

- 1) Región Sensible al Desplazamiento: Es una zona de periodo largo $T_n > T_d$ en donde la respuesta estructural está directamente relacionada al desplazamiento del terreno.
- 2) Región Sensible a la Velocidad: Esta considera los sistemas de periodo intermedio $T_c < T_n < T_d$ en donde la respuesta estructural está más relacionada a la velocidad del terreno que a otros parámetros del movimiento. En esta región la respuesta está fuertemente influenciada por el amortiguamiento.
- 3) Región Sensible a la Aceleración: Es denominada así porque la respuesta estructural de este tipo de sistemas con periodo $T_n < T_c$ corto está muy directamente asociada a la aceleración del terreno.

II. Red Acelerográfica de Oaxaca

II. RED ACELEROGRÁFICA DE OAXACA

Breve Historia

La creación del Servicio Sismológico Nacional en 1910 dio paso a la instalación de equipo para el registro de la actividad sísmica en varios estados, primeramente comprendió a las ciudades de Guadalajara, Veracruz, Mérida, Oaxaca, Zacatecas, Monterrey y Chihuahua, estos equipos sísmicos sólo fueron sismógrafos. El temblor de 1957 de magnitud 7.9 fue un parte aguas en el mejoramiento de la infraestructura para el registro sísmico (Ref 31).

La historia del registro acelerográfico en el estado de Oaxaca se remonta a 1970 cuando es instalado el primer acelerógrafo en la ciudad de Oaxaca, el cual fue colocado en la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma Benito Juárez. Por otra parte en 1979 se instala un acelerógrafo fuera de la ciudad, perteneciente a la red de acelerógrafos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual fue puesto en operación en el municipio de Puerto Escondido (Ref 32), éste acelerógrafo pertenece a la Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca (RACO) y que cuenta con una amplia cobertura en la zona costera de ese estado.

Es hasta el año de 1998 cuando se procede a crear una red más completa que comprende, hasta ahora, ocho estaciones acelerográficas ubicadas en diferentes puntos y que hasta éste momento integran la RAO (Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca).

Características Geográficas y Geológicas del Estado de Oaxaca

El estado de Oaxaca se localiza en la región sureste de la República Mexicana, colinda al norte con el estado de Veracruz, al noreste con el estado de Puebla, al este con el estado de Chiapas y al sur con el océano Pacífico; comprende entre sus límites una costa de casi 600 [km] de longitud. Se encuentra entre las coordenadas geográficas 15° 39' y 18° 42' de latitud norte y 93° 52' y 98° 32' de longitud oeste. Abarca una superficie de 93, 952 [km²] y representa el 4.8 % de la superficie total de los Estados Unidos Mexicanos (Ref 33). La localización geográfica del estado es la que atribuye la importante actividad sísmica que presenta, ya que se encuentra la zona de subducción de la placa de Cocos con la Norteamericana como se observa en la figura 15.



Fig.15 Interacción de placas tectónicas en México (Ref 34).

La estructura tectónica de la porción continental de ésta región está dividida en seis terrenos tectono-estratigráficos, propuestos por *Campa* y *Coney* (Ref 35), correspondiéndole a Oaxaca tres de ellos los cuales son Xolapa, Oaxaca y Juárez.

-El terreno Xolapa está conformado por un cinturón metamórfico-plutónico compuesto por rocas metasedimentarias, metaplutónicas y voluminosos granitoides no deformados.

-El terreno Oaxaca cuenta con un basamento granulítico el cual está conformado por metagabros, paragneis y anortositas. Se encuentra cubierto por una secuencia discontinua de rocas sedimentarias y volcánicas.

-El terreno Juárez está formado por secuencias sedimentarias y volcánicas fuertemente plegadas.

La actividad sísmica en el estado de Oaxaca (Ref. 36) se puede dividir en:

- a) Superficial. Se genera en la zona de subducción, la placa de Cocos penetra con una velocidad, en esta zona, de 7.8 [cm/año]. Los sismos en esta zona han alcanzado $M = 7.6$.
- b) Intermedia. Se localiza a una profundidad que varía de los 25 a los 40 [km], es producto de la ruptura de la placa de Cocos debido a procesos gravitacionales, los epicentros de esta zona se registran al sur de la ciudad de Oaxaca. Los sismos registrados en esta zona han alcanzado magnitudes de hasta 7.8.
- c) Profunda. Se localiza en la placa subducente, en esta zona se presentan sismos de falla normal y sus epicentros se registran al norte de la ciudad de Oaxaca a profundidades desde los 65 hasta los 115 [km].

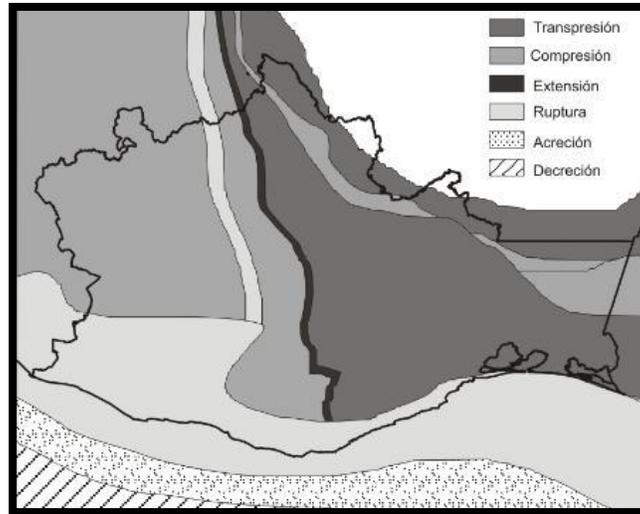


Fig. 16 Tectonismo en Oaxaca (Ref 37).

El estado de Oaxaca también ha sido dividido en las siguientes ocho zonas sísmicas para su estudio (Ref 38), la ubicación geográfica de dichas zonas puede ser observada en la figura 17:

- a) Mixteca Media. Se localiza en las fronteras entre los estados de Oaxaca y Guerrero, los temblores en esta zona se sienten con menor intensidad en la costa.
- b) Huajuapán. Se caracteriza porque la intensidad es más fuerte en la región sur que en la norte, en relación con el epicentro. Los sismos en esta zona afectan principalmente al sur del estado Puebla y el noroeste de Oaxaca.
- c) Norte y Cañada. Es la más extensa y bordea el eje volcánico Mexicano. Los sismos en esta parte afectan principalmente a las ciudades de Tehuacán, Orizaba, Córdoba y Veracruz. Los eventos son más intensos hacia el norte que hacia el sur en relación con su epicentro.
- d) Istmo. Colinda al este con el Istmo de Tehuantepec y al oeste con las zonas e, f y g.
- e) Mixe. Los sismos registrados en esta zona han causado graves daños en la región Mixe y en la ciudad de Oaxaca, tal es el caso del sismo del 17 de abril de 1928 (M=7.7).
- f) Valle. Al presentarse un sismo, los daños más graves se han presentado en la parte sur del valle de la capital. El temblor del 15 de enero de 1931 (M=7.8) ocasionó un mecanismo de falla normal a una profundidad de 25 [km] que afectó terriblemente al poblado de Miahuatlán.
- g) Puerto Escondido-Huatulco. Los sismos registrados en el año de 1870 en esa zona ocasionaron diversos desastres en los poblados de Puerto Escondido, Pochutla, Puerto Ángel, Huatulco y Loxicha, el primero de ellos (M=7.9) devastó también a los municipios de Miahuatlán y Pochutla: registrándose grietas, ruidos

subterráneos, derrumbes de cerros y calentamiento del suelo. Otro sismo ocurrido el 22 de marzo de 1928 ($M=7.7$) provocó la invasión del mar a las costas de Puerto Ángel, posteriormente el 17 de junio del mismo año se produjo otro movimiento que originó un tsunami, afectando a los poblados de Oaxaca, Huatulco, Pochutla y Puerto Ángel.

- h) Pinotepa Nacional-Jamiltepec. Las regiones más afectadas cuando ocurre un sismo en esta zona son las de Chacahua, Jamiltepec, Pinotepa Nacional y Ometepec. El sismo más fuerte registrado dentro de esta zona es el de San Sixto el 28 de marzo de 1787, de acuerdo a los reportes generados por los daños se considera que tuvo una magnitud superior a 8, a este sismo siguió una sequía sísmica, aproximadamente de 141 años.

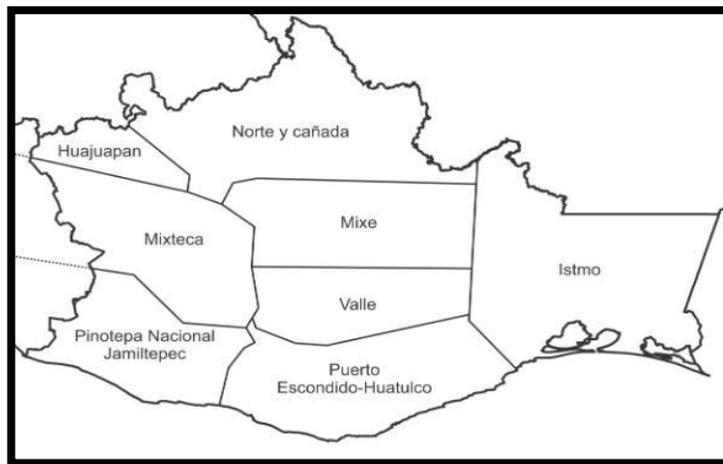


Fig. 17 Zonificación Sísmica en el estado de Oaxaca (Ref 39).

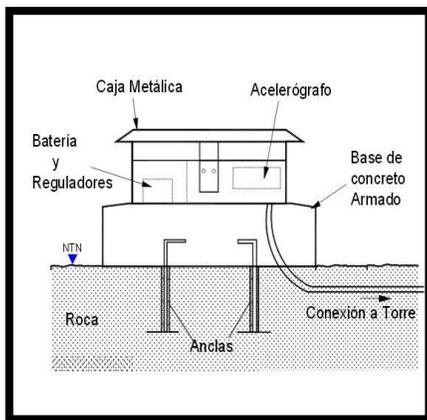
II.1 Estación Acelerográfica

Una estación acelerográfica está integrada de tres elementos fundamentales: 1) caseta y/o base de concreto, 2) acelerógrafo y 3) sistema de alimentación de energía (Ref 40).

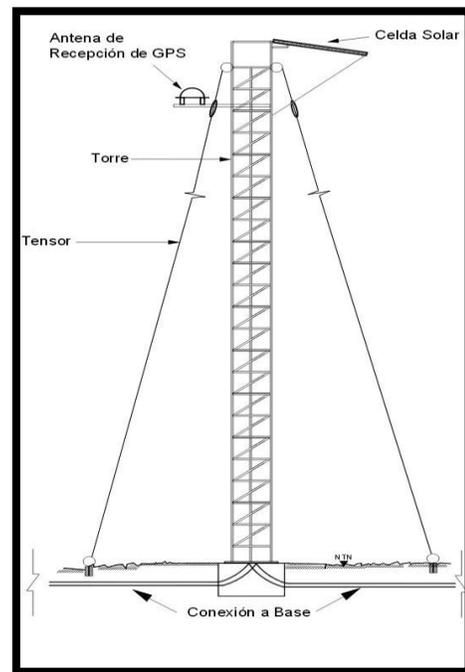
- 1) La caseta normalmente cuenta con una base de concreto que debe estar fijada al suelo o a la roca, sobre la base se tiene una caja metálica que es la que contiene al acelerógrafo y sus sensores.
- 2) El acelerógrafo es el instrumento que detecta los movimientos del terreno, esto se hace por medio de tres sensores los cuales tienen un arreglo ortogonal entre sí; para el manejo de los datos obtenidos se emplea un registrador el cual también está contenido dentro del acelerógrafo y que realiza una conversión de una señal analógica a una digital y almacena los datos registrados. El acelerógrafo puede contar con un GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para mayor precisión y control de los datos registrados, así como para información general de la estación.

- 3) El sistema de alimentación de energía para el acelerógrafo puede ser por corriente directa o ser de energía sustentable por medio de paneles solares para garantizar el abasto cuando éste lo requiera.

Los acelerogramas proporcionados por estas estaciones son de gran utilidad ya que por medio de ellos es posible estimar las fuerzas de inercia que se generan en la base de las estructuras, también es posible por medio de estos registros estimar las respuestas dinámicas máximas que tendrán las estructuras sometidas a éste tipo de excitación y de ahí se obtienen los espectros respuesta.



a)



b)

Fig. 18 a) Base de concreto y caja
b) Torre de Conexión
(Ref 41).

II.2 Localización de las Estaciones

Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería en el estado de Oaxaca

La red acelerográfica del Instituto de Ingeniería en el estado de Oaxaca tiene sus inicios en el año de 1970 cuando se puso en marcha la operación del primer acelerógrafo en la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Oaxaca (OAXM), su primer objetivo fue registrar sismos fuertes que no podían ser captados íntegramente por los sismógrafos, todo esto en relación a que la zona del centro de la ciudad de Oaxaca está muy expuesta a daños considerables cuando ocurre un sismo originado en la zona de subducción de la placa de Cocos con la Norteamericana (Ref 42).

En el estado de Oaxaca la red de acelerógrafos del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) se encuentra subdividida en dos, la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca y la Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca, para la ubicación de las estaciones se consideraron previamente los estudios existentes de vibración ambiental para estimar la amplificación relativa de los diferentes suelos, los resultados de los estudios mencionados derivaron en la elaboración de mapas de isoperiodos y en una microzonificación sísmica preliminar, ambos resultados fueron considerados en la ubicación de las estaciones. En la figura 19 se muestran las estaciones con las que cuenta el Instituto de Ingeniería de la UNAM por todo el territorio mexicano, la red costera de las estaciones en el Océano Pacífico empieza en el estado de Nayarit hasta el estado de Chiapas, que es la zona donde colindan la placa de Cocos con la Norteamericana, incluye también estaciones que se encuentran más adentro del territorio, sobre todo en el centro que corresponde a los estados de Michoacán, Guadalajara, Guerrero, Estado de México, Puebla y Tlaxcala. Por otra parte cerca de la costa del Golfo de México se cuenta con pocas estaciones en los estados de Tabasco y Veracruz.



Fig. 19 Red Acelerográfica del II-UNAM en México (Ref 43).

Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca

La finalidad de la implantación de la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca (RAO) fue investigar la respuesta del subsuelo y la forma en que los efectos de sitio modifican los movimientos sísmicos de la región, con la instalación de esta red, también se pretendió estudiar la propagación de las ondas sísmicas y evaluar la amplitud del movimiento en diversos sitios con diferentes condiciones de subsuelo, tomando como referencia los datos proporcionados de una estación en roca (Ref 44). La instalación de las estaciones acelerográficas de la RAO se hizo bajo los siguientes criterios: alcanzar una cobertura general de la zona de alto riesgo sísmico en la ciudad de acuerdo a una microzonificación preliminar, instrumentar sitios con diferentes tipos de subsuelo, contar con una referencia en roca y elegir instalaciones que proporcionen libre acceso, seguridad y protección contra la intemperie (Ref 45).

En 1970 tuvo sus inicios colocándose la primera estación acelerográfica (OXFM) en la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma Benito Juárez, fue hasta el año de 1998 cuando se decide instalar la segunda de ellas en el parque Ciudad de las Canteras, ubicado en el poblado del mismo nombre. Para 1999 se instalan cinco estaciones más, estas colocadas estratégicamente en diferente tipo de suelo, la información para la colocación de las estaciones fue proporcionada por un estudio de amplificación relativa de vibración ambiental, lo que permitió definir curvas de iso-periodos, niveles de amplificación relativa y un mapa de microzonificación sísmica, estas estaciones fueron la OXTO, OXCU, OXPM, OXBJ y OXAL, por último se unieron las estaciones que se encuentran en la Unidad de Protección Civil (OXPC) y la del Aeropuerto Internacional de la ciudad de Oaxaca (OXAE) (Ref 46).

El Instituto de Geofísica de la UNAM también cuenta con una estación acelerográfica (OXIG) la cual está situada sobre un cerro y su operación está a cargo del Servicio SSN.

La tabla 3 contiene los nombres de las estaciones, la clave para hacer mas fácil la identificación, las coordenadas geográficas y el tipo de depósito donde se encuentra cada una de ellas y la figura 20 es un mapa dónde se encuentran localizadas las estaciones de la RAO.

Tabla 3. Ubicación Geográfica de las Estaciones de la RAO.

Estación (Clave)	Ubicación	Coordenadas Geográficas		Depósito
		Latitud N.	Longitud W.	
OXFM	Facultad de Medicina UABJ	17° 05'	96° 43'	Suelos rígidos de profundidad intermedia
OXTO	División de Ciencias de la Tierra ITO	17° 05'	96° 45'	Suelos rígidos muy profundos
OXCU	Facultad de Arquitectura UABJ	17° 03'	96° 43'	Suelos rígidos muy profundos
OXLC	Poblado Las Canteras	17° 04'	96° 42'	Roca blanda
OXPC	Oficinas de la Unidad de Protección Civil	17° 03'	96° 43'	Suelos rígidos muy profundos
OXPM	Escuela Primaria Múgica	17° 05'	96° 43'	Suelos rígidos de profundidad intermedia
OXBJ	Escuela Primaria Benito Juárez	17° 04'	96° 43'	Suelos rígidos de profundidad intermedia
OXAL	Alameda de la Ciudad de Oaxaca	17° 04'	96° 44'	Suelos rígidos de profundidad intermedia
OXAE	Aeropuerto	17° 03'	96° 43'	Suelos blandos

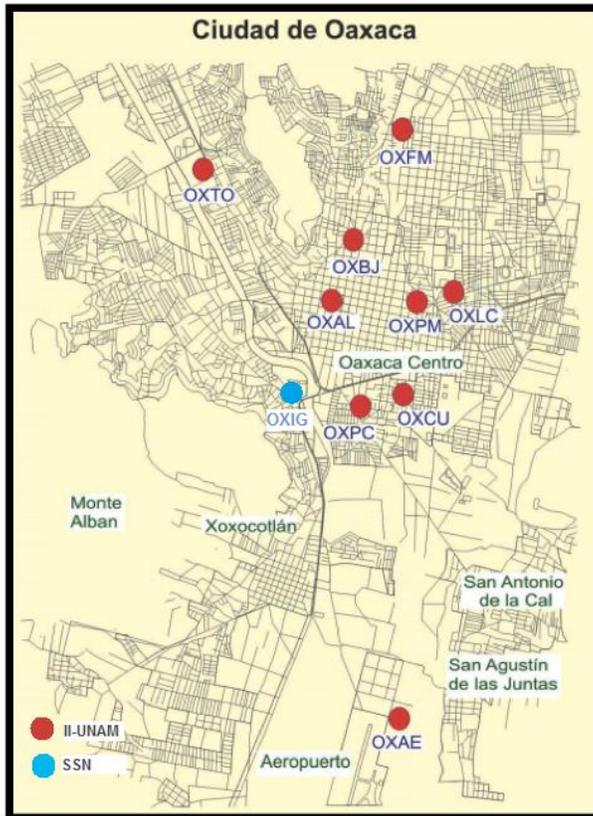


Fig. 20 Localización de Estaciones de la RAO (Ref 47).

Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca

Esta red acelerográfica cuenta con un total de 12 estaciones, las cuales fueron colocadas considerando la calidad del material de desplante, la seguridad del sitio y la facilidad de acceso. La RAO tiene una extensión en forma de franja que va desde la zona costera de Huatulco hasta el municipio de Ometepec en el estado de Guerrero, así como una línea de atenuación que va desde la ciudad de Oaxaca, pasando por Puebla hasta llegar a la ciudad de México (Ref 48).

La primera estación de esta red en ser colocada fue la de Puerto Escondido (PESC) en 1979, la segunda de ellas fue la PNTP (Pinotepa Nacional), es así que conforme al paso de los años la RAO fue incrementando en alcance y en número sus estaciones acelerográficas (Ref 49).

La tabla 4 contiene el nombre de las estaciones, la clave para la facilidad de identificación, el tipo de depósito de material en donde se encuentran y las latitudes y longitudes que corresponden a las coordenadas geográficas.

Tabla 4. Ubicación Geográfica de las Estaciones de la RACO.

Estación (CLAVE)	Ubicación	Coordenadas Geográficas		Depósito
		Latitud N	Longitud W	
HUAM	Huamelula	16°02'	95°40'	Roca
JAMI	Jamiltepec	16°17'	97°49'	Roca
LANE	Las Negras	15°57'	97°11'	Roca
NILT	Niltepec	16°34'	94°37'	Suelo Firme
OXJM	Jalapa del Marqués	16°27'	95°27'	Roca
PANG	Puerto Ángel	15°40'	96°29'	Roca
PNTP	Pinotepa Nacional	16°21'	98°04'	Limo Arenoso
RIOG	Río Grande	16°01'	97°26'	Roca
SCRU	Salina Cruz	16°11'	95°13'	Roca
SMLC	San Martín Los Canseco	16°39'	96°44'	Roca
TAMA	Tamazulapan	16°16'	96°35'	Roca
GALE	Las Galeras	15°59'	96°29'	Roca

La figura 21 es un mapa que contiene las estaciones de la Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca en color rojo y el indicador azul hace referencia al arreglo de acelerógrafos en la capital del estado.



Fig. 21 Localización de las estaciones de la RACO (Ref 50).

II.3 Registros Obtenidos

Los registros presentados en esta tesis se tomaron de dos fuentes distintas para su comparación, los registros de la primer fuente fueron del acelerógrafo del Instituto de Ingeniería (OXLC) el cuál se encuentra en el poblado “Las Canteras” ubicado en roca en las inmediaciones de la ciudad de Oaxaca, el equipo es modelo ETNA/1328 que tiene una tasa de muestreo actual de 200 [muestras/segundo]. Los registros de esta estación comprenden desde el 15 de Junio de 1999 hasta el 13 de Agosto de 2014 y se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6. Registros de la Estación OXLC.

No.	REGISTRO	SISMO	HORA	EPICENTRO		PROFUNDIDAD	MAGNITUD	ACELERACIÓN MÁXIMA [GAL]
				LATTITUD	LONGITUD			
1	OXLC9906.151	15/06/99	20:42:07	18.18	97.51	69	Mb=6.4/Ms=6.5/Ma=6.3/Me=7.0	23.5
2	OXLC9909.301	30/09/99	16:31:15	15.95	97.03	16	Mb=6.5/Ms=7.5/Mc=5.2/Ma=7.1/Me=7.6	-74.65
3	OXLC0001.191	19/01/00	19:56:55	16.41	96.68	15	Mb=4.1/Mc=4.5	6
4	OXLC0003.011	01/03/00	23:31:21	15.86	97.11	16	Mb=4.9/Mc=4.7	-2.69
5	OXLC0003.121	12/03/00	22:21:33	14.59	92.97	35	Mb=5.5/Ms=5.8/Mc=5.4/Ma=5.8/Me=5.9	2.42
6	OXLC0009.291	29/09/00	11:31:31	16.10	95.91	60	Mb=4.7/Mc=4.7	-3.97
7	OXLC0109.081	08/09/01	07:55:45	16.59	94.96	105	MMb=4.7/Mc=4.8	-3.29
8	OXLC0110.031	03/10/01	09:40:27	16.93	96.85	67	Mb=4.2/Mc=4.4	9.46
9	OXLC0201.161	16/01/02	23:09:55	15.43	93.55	76	Mb=5.8/Mc=6.0/Ma=5.7/Me=6.7	4.36
10	OXLC0201.301	30/01/02	08:42:05	18.10	95.97	109	Mb=5.6/Mc=5.5/Ma=5.2/Me=5.4	-14.02
11	OXLC0206.071	07/06/02	17:00:52	15.91	96.97	23	Mb=5.3/Ms=5.1/Mc=4.8/Ma=5.4/Me=5.6	-8.85
12	OXLC0208.051	05/08/02	01:25:18	15.60	96.05	9	Mb=5.2/Ms=4.9/Mc=4.9/Ma=5.3/Me=5.2	-2.47
13	OXLC0208.271	27/08/02	17:08:48	16.04	97.59	15	Mb=5.0/Mc=4.9/Ma=4.8/Me=4.9	-3.67
14	OXLC0301.221	22/01/03	02:06:34	18.60	104.22	9	Mb=6.5/Ms=7.6/Ma=7.2/Me=7.6	-2.06
15	OXLC0401.131	13/01/04	19:50:20	16.01	97.30	3	M=5.1	-3.86
16	OXLC0401.132	13/01/04	21:28:56	15.90	97.03	16	M=5.5	8
17	OXLC0401.171	17/01/04	21:13:09	17.68	95.66	109	M=4.7	2.43
18	OXLC0402.181	18/02/04	12:44:17	16.92	96.86	71	M=4.3	-6.57
19	OXLC0408.071	07/08/04	11:49:12	17.10	95.48	106	M=5.3	-9.86
20	OXLC0408.181	18/08/04	09:03:11	16.24	95.15	51	Mb=5.7/Mc=5.6	-12.94
21	OXLC0412.101	10/12/04	10:32:21	15.14	97.33	16	M=5.1	-2.52
22	OXLC0601.191	19/01/06	16:34:39	17.13	96.75	65	M=4.2	5.26
23	OXLC0606.081	08/06/06	08:40:15	17.30	96.63	68	M=4.2	3.16
24	OXLC0608.191	19/08/06	05:41:30	15.91	97.30	52	M=5.5	-3.19
25	OXLC0611.081	08/11/06	17:18:47	16.05	96.54	45	M=5.1	-6.11
26	OXLC0702.141	14/02/07	18:04:40	16.76	96.18	78	M=4.6	3.17
27	OXLC0703.151	15/03/07	13:13:00	16.08	97.26	15	M=5.1	-4.92
28	OXLC0705.041	04/05/07	10:21:10	17.20	96.84	70	M=4.8	-22.01
29	OXLC0706.021	02/06/07	00:20:06	17.03	95.61	73	M=4.5	2.35
30	OXLC0706.131	13/06/07	19:29:48	13.26	91.43	20	M=6.6	0.51
31	OXLC0707.061	06/07/07	01:09:19	16.90	94.10	100	M=6.2	-4.29
32	OXLC0708.201	20/08/07	05:01:30	17.34	95.96	92	M=4.5	-1.88
33	OXLC0709.151	15/09/07	10:30:48	17.46	94.71	153	M=5	-2.2
34	OXLC0710.011	01/10/07	14:41:52	17.24	94.36	149	M=4.7	1.18
35	OXLC0710.171	17/10/07	11:29:42	16.98	96.63	66	M=3.7	0.62
36	OXLC0710.201	20/10/07	15:14:46	16.08	95.60	26	M=4.5	-1.71
37	OXLC0711.121	12/11/07	21:58:57	17.45	97.07	84	M=4.2	1.55
38	OXLC0711.191	19/11/07	10:44:58	15.93	96.58	23	M=4.4	-0.6
39	OXLC0712.111	11/12/07	01:28:52	15.74	96.92	27	M=4.6	0.72
40	OXLC0712.131	13/12/07	17:08:54	17.26	96.70	82	M=4.5	-6.45
41	OXLC0801.041	04/01/08	14:20:57	17.01	94.76	122	M=4.4	0.58
42	OXLC0801.091	09/01/08	04:03:13	17.02	96.38	68	M=4.1	-0.89
43	OXLC0801.181	18/01/08	21:34:24	16.88	95.10	107	M=4.5	-1.27
44	OXLC0802.111	11/02/08	22:20:33	16.22	94.22	109	M=4.8	0.9
45	OXLC0802.121	12/02/08	12:50:18	16.19	94.54	90	M=6.6	-20.79

Tabla 6. (Continuación).

No.	REGISTRO	SISMO	HORA	EPICENTRO		PROFUNDIDAD	MAGNITUD	ACELERACIÓN MÁXIMA [GAL]
				LATTITUD	LONGITUD			
47	OXLC0804.111	11/04/08	05:10:03	16.94	95.33	104	M=4.3	0.64
48	OXLC0804.151	15/04/08	03:03:06	13.27	91.04	40	M=6.5	0.76
49	OXLC0804.281	28/04/08	00:06:29	18.05	100.01	52	M=5.6	-0.98
50	OXLC0805.041	04/05/08	10:21:35	15.41	96.75	10	M=4.5	-0.5
51	OXLC0805.121	12/05/08	04:37:55	16.96	95.27	106	M=4.3	-0.35
52	OXLC0805.171	17/05/08	20:04:08	16.18	98.06	40	M=4.8	0.82
53	OXLC0806.011	01/06/08	05:52:00	17.04	96.80	65	M=4.1	2.29
54	OXLC0806.201	20/06/08	12:44:45	16.07	96.50	8	M=4	0.41
55	OXLC0806.221	22/06/08	01:32:07	15.32	94.29	112	M=4.9	-0.89
56	OXLC0807.181	18/07/08	05:00:30	17.95	97.49	51	M=4.5	0.9
57	OXLC0807.301	30/07/08	10:23:33	15.98	96.10	49	M=5.1	-3.49
58	OXLC0809.101	10/09/08	05:04:59	15.91	95.07	78	M=4.8	0.57
59	OXLC0810.161	16/10/08	19:41:22	13.87	92.50	23	M=6.6	-0.85
60	OXLC0811.231	23/11/08	18:06:39	17.13	94.09	169	M=4.8	0.66
61	OXLC0812.041	04/12/08	05:38:13	16.36	95.10	65	M=4.2	-0.53
62	OXLC0812.111	11/12/08	09:14:59	17.38	97.19	70	M=3.9	0.6
63	OXLC0812.112	11/12/08	11:16:38	17.47	97.40	67	M=4	0.5
64	OXLC0812.151	15/12/08	14:27:10	17.07	97.00	65	M=4.4	4.99
65	OXLC0812.181	18/12/08	02:04:37	16.54	98.08	33	M=4.3	0.37
66	OXLC0901.171	17/01/09	02:57:30	15.74	92.76	15	M=5.2	-1.32
67	OXLC0901.211	21/01/09	15:19:06	15.76	96.66	14	M=4.1	-0.34
68	OXLC0902.021	02/02/09	13:09:57	15.95	96.44	44	M=4.2	0.48
69	OXLC0902.181	18/02/09	05:41:36	16.72	94.71	82	M=4.8	1.67
70	OXLC0903.101	10/03/09	00:36:44	16.46	93.65	147	M=4.9	-0.54
71	OXLC0904.071	07/04/09	21:49:28	15.82	96.65	20	M=4.8	2.5
72	OXLC0904.171	17/04/09	09:59:33	15.95	96.24	10	M=4.3	0.55
73	OXLC0904.271	27/04/09	16:46:27	16.90	99.58	7	M=5.7	1.08
74	OXLC0905.221	22/05/09	19:24:18	18.13	98.44	45	M=5.7	2.76
75	OXLC0905.261	26/05/09	19:13:47	15.86	95.65	10	M=4.6	-0.42
76	OXLC0906.071	07/06/09	21:26:47	16.15	93.32	135	M=5.0	0.49
77	OXLC0908.141	14/08/09	02:17:20	17.63	95.08	141	M=4.4	-0.95
78	OXLC0908.191	19/08/09	22:35:49	16.04	97.20	20	M=4.4	-0.89
79	OXLC0908.281	28/08/09	05:18:42	17.40	96.79	75	M=4.0	-0.69
80	OXLC0909.081	08/09/09	05:14:31	17.68	95.77	102	M=5.1	5.11
81	OXLC0909.151	15/09/09	09:49:39	16.45	96.66	47	M=3.9	0.56
82	OXLC0909.181	18/09/09	21:35:23	15.49	97.53	17	M=4.8	-0.4
83	OXLC0910.081	08/10/09	07:23:36	16.03	96.88	20	M=4.0	2.37
84	OXLC0910.291	29/10/09	10:52:57	18.89	95.81	13	M=5.5	-1.63
85	OXLC0912.161	16/12/09	06:49:12	16.69	94.80	115	M=4.1	1.19
86	OXLC0912.251	25/12/09	05:39:11	15.73	94.37	20	M=4.2	0.35
87	OXLC1001.081	08/01/10	08:50:42	16.86	94.25	141	M=4.6	0.45
88	OXLC1001.191	19/01/10	13:44:53	16.59	96.51	52	M=4	1.56
89	OXLC1001.201	20/01/10	09:32:30	16.53	94.86	93	M=4.7	-0.42
90	OXLC1001.231	23/01/10	13:53:23	17.44	97.19	62	M=4.1	0.7

Tabla 6. (Continuación).

No.	REGISTRO	SISMO	HORA	EPICENTRO		PROFUNDIDAD	MAGNITUD	ACELERACIÓN MÁXIMA [GAL]
				LATITUD	LONGITUD			
92	OXLC1002.091	09/02/10	00:47:40	15.90	96.86	37	M=5.8	-10.2
93	OXLC1002.261	26/02/10	01:52:14	15.82	96.91	9	M=4.4	1.81
94	OXLC1003.171	17/03/10	04:28:52	16.04	96.98	16	M=4.2	-1.36
95	OXLC1004.121	12/04/10	18:20:00	16.56	96.54	43	M=4.2	1.26
96	OXLC1004.161	16/04/10	10:01:07	16.14	98.41	10	M=5.1	1.51
97	OXLC1004.201	20/04/10	02:28:57	16.07	98.34	5	M=5	1.2
98	OXLC1005.131	13/05/10	23:34:33	15.99	97.18	20	M=4.1	1.03
99	OXLC1005.311	31/05/10	22:20:18	17.47	95.52	113	M=4.4	1.1
100	OXLC1006.081	08/06/10	05:30:03	16.11	97.26	28	M=4	-1.08
101	OXLC1006.082	08/06/10	07:49:32	15.26	96.67	35	M=4.6	-0.64
102	OXLC1006.091	09/06/10	22:58:01	17.47	96.39	46	M=3.8	-0.72
103	OXLC1006.251	25/06/10	17:08:55	15.22	96.44	12	M=5.1	-1.37
104	OXLC1007.011	01/07/10	00:20:52	16.18	96.44	21	M=3.9	0.84
105	OXLC1007.241	24/07/10	06:52:32	17.38	96.02	87	M=4.4	-0.83
106	OXLC1009.211	21/09/10	14:42:09	15.73	95.19	17	M=5.0	-1.59
107	OXLC1011.011	01/11/10	23:16:49	16.68	93.90	124	M=5	-1.5
108	OXLC1011.262	26/11/10	22:13:49	16.13	95.91	20	M=4.5	1.76
109	OXLC1101.051	05/01/11	14:45:38	16.29	98.26	5	M=4.5	-0.45
110	OXLC1101.201	20/01/11	10:01:58	16.55	94.00	62	M=5.1	0.46
111	OXLC1102.041	04/02/11	17:32:02	17.25	96.56	76	M=4.5	-2.85
112	OXLC1102.111	11/02/11	13:20:43	16.02	95.94	11	M=4.4	-1.83
113	OXLC1102.251	25/02/11	13:07:27	17.73	95.21	135	M=6	-8
114	OXLC1102.281	28/02/11	21:11:26	15.62	96.26	20	M=4.2	-0.71
115	OXLC1103.261	26/03/11	06:33:26	16.31	96.37	37	M=4.1	1.01
116	OXLC1104.071	07/04/11	13:11:22	17.20	94.34	167	M=6.7	-12.11
117	OXLC1104.141	14/04/11	16:33:45	16.70	95.09	102	M=4.7	-0.52
118	OXLC1104.181	18/04/11	00:46:55	17.61	94.97	136	M=4.4	-0.49
119	OXLC1104.261	26/04/11	11:07:28	16.71	99.69	7	M=5.5	0.53
120	OXLC1105.051	05/05/11	13:24:07	16.61	98.91	11	M=5.5	4.21
121	OXLC1105.111	11/05/11	17:31:44	16.24	96.16	60	M=4.5	1.53
122	OXLC1106.031	03/06/11	14:21:25	17.69	95.31	135	M=4.9	-1.4
123	OXLC1106.101	10/06/11	13:13:24	16.00	98.54	10	M=4.9	-0.44
124	OXLC1106.121	12/06/11	11:17:47	17.19	95.15	116	M=4.8	-0.82
125	OXLC1106.181	18/06/11	22:54:44	16.92	99.60	26	M=5.2	0.61
126	OXLC1107.091	09/07/11	12:42:29	15.87	96.42	22	M=5.3	-3.21
127	OXLC1107.101	10/07/11	15:19:20	16.58	95.21	127	M=4.8	0.49
128	OXLC1108.131	13/08/11	07:33:09	14.58	94.88	16	M=5.7	-0.45
129	OXLC1112.111	11/12/11	01:47:25	17.84	99.98	58	M=6.5	-2.19
130	OXLC1203.201	20/03/12	18:02:50	16.42	98.36	15	M=7.4	37.17
131	OXLC1203.205	20/03/12	18:35:39	16.21	98.58	14	M=5.3	-1.39
132	OXLC1203.206	20/03/12	19:02:39	15.85	98.72	15	M=5.2	0.5
133	OXLC1203.207	20/03/12	20:14:41	16.34	98.28	15	M=5.2	-0.97
134	OXLC1203.208	20/03/12	22:25:38	15.90	99.02	15	M=4.8	0.37
135	OXLC1203.211	21/03/12	02:07:37	15.62	99.05	10	M=4.9	-0.38

Tabla 6. (Continuación).

No.	REGISTRO	SISMO	HORA	EPICENTRO		PROFUNDIDAD	MAGNITUD	ACELERACIÓN MÁXIMA [GAL]
				LATITUD	LONGITUD			
137	OXLC1203.213	21/03/12	02:54:40	16.46	98.40	15	M=4.5	0.69
138	OXLC1203.214	21/03/12	11:36:14	16.51	98.50	20	M=4.9	-0.57
139	OXLC1203.221	22/03/12	16:46:42	15.88	98.60	16	M=5	0.74
140	OXLC1203.222	22/03/12	20:42:04	16.14	98.38	4	M=4.8	0.33
141	OXLC1203.223	22/03/12	22:14:45	16.22	98.47	9	M=4.8	-0.6
142	OXLC1203.224	22/03/12	23:47:05	16.48	98.29	24	M=4.8	-0.85
143	OXLC1203.231	23/03/12	02:16:22	15.93	98.66	16	M=4.1	0.52
144	OXLC1203.232	23/03/12	23:47:44	16.23	98.27	1	M=4.4	0.45
145	OXLC1203.241	24/03/12	01:58:35	16.26	98.29	10	M=4.6	-0.39
146	OXLC1203.251	25/03/12	01:55:29	16.23	98.17	16	M=4.5	-0.55
147	OXLC1203.281	28/03/12	05:39:39	16.25	98.30	10	M=4.4	0.52
148	OXLC1209.221	22/09/12	12:29:57	16.23	98.30	2	M=5.4	2.05
149	OXLC1306.161	16/06/13	05:19:03	18.04	99.25	60	M=5.8	-0.92
150	OXLC1306.281	28/06/13	20:18:37	16.06	95.68	11	M=4.2	0.94
151	OXLC1308.021	02/08/13	09:29:46	16.36	94.76	77	M=5	2.92
152	OXLC1308.061	06/08/13	20:17:30	16.49	98.58	16	M=4.9	-1.3
153	OXLC1308.131	13/08/13	16:50:42	16.56	98.57	4	M=5	-0.7
154	OXLC1308.161	16/08/13	15:32:59	16.54	98.59	20	M=5.1	0.73
155	OXLC1308.211	21/08/13	12:38:30	16.79	99.56	20	M=6	1.02
156	OXLC1308.212	21/08/13	13:02:18	16.73	99.70	11	M=5	0.33
157	OXLC1310.181	18/10/13	02:43:49	16.70	96.43	53	M=4	-1.35
158	OXLC1310.191	19/10/13	03:55:09	17.00	95.22	123	M=4.3	-0.9
159	OXLC1310.241	24/10/13	05:00:20	16.11	95.64	23	M=4.6	2.29
160	OXLC1401.021	02/01/14	23:53:56	16.08	97.96	1	M=4.7	-0.78
161	OXLC1402.031	03/02/14	16:59:09	17.37	97.20	67	M=4.3	0.76
162	OXLC1402.241	24/02/14	04:04:28	15.81	96.96	5	M=4.7	0.83
163	OXLC1403.101	10/03/14	00:37:57	15.79	98.55	16	M=5.8	0.85
164	OXLC1403.261	26/03/14	04:42:28	16.17	95.75	60	M=4.6	-47
165	OXLC1404.131	13/04/14	06:45:22	17.77	95.08	33	M=4.4	0.41
166	OXLC1404.181	18/04/14	14:27:23	17.18	101.19	10	M=7.2	-3.37
167	OXLC1405.021	02/05/14	19:08:26	17.33	94.73	130	M=5	1.5
168	OXLC1405.081	08/05/14	17:00:16	17.11	100.87	17	M=6.4	4
169	OXLC1405.101	10/05/14	07:36:01	17.06	100.95	12	M=6.1	-0.78
170	OXLC1405.131	13/05/14	19:42:01	16.14	95.65	24	M=4.6	0.45
171	OXLC1405.211	21/05/14	10:06:15	17.11	95.07	121	M=5.8	-9.09
172	OXLC1405.241	24/05/14	08:24:45	16.21	98.42	18	M=5.7	-2.75
173	OXLC1406.101	10/06/14	12:37:18	16.21	94.93	80	M=4.2	-0.61
174	OXLC1407.071	07/07/14	11:23:58	14.75	92.63	60	M=6.9	3.3
175	OXLC1407.261	26/07/14	01:47:42	16.04	97.12	35	M=4.1	-0.56
176	OXLC1407.291	29/07/14	10:46:14	17.70	95.63	117	M=6.4	-23.66
177	OXLC1408.041	04/08/14	04:25:30	15.83	94.93	48	M=5	0.49
178	OXLC1408.111	11/08/14	01:09:42	16.38	98.19	10	M=5.2	-0.35
179	OXLC1408.131	13/08/14	06:48:11	16.13	98.35	10	M=5.4	-2.37

La segunda base de registros acelerográficos se obtuvo de la estación OXIG, la cual se encarga de operar el Instituto de Geofísica de la UNAM, ésta estación se encuentra en el centro de la Ciudad de Oaxaca y está situada sobre roca en el cerro del Fortín, el registrador cuenta con sensores FBA-23 con escala de 1g. Los registros de ésta estación fueron proporcionados por el SSN y se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 7. Registros de la estación OXIG.

No.	REGISTRO	SISMO	HORA
1	19990615-204052.MSEED2AH_03.1.sac	15/06/1999	20:40:52
2	19990930-162931.MSEED2AH_03.1.sac	30/09/1999	16:29:31
3	20000929-113002.MSEED2AH_03.1.sac	29/09/2000	11:30:02
4	20011003-093902.MSEED2AH_03.1.sac	03/10/2001	09:39:02
5	20020116-230921.MSEED2AH_03.1.sac	16/01/2002	23:09:21
6	20020130-084102.MSEED2AH_03.1.sac	30/01/2002	08:41:02
7	20020607-230737.MSEED2AH_03.1.sac	07/06/2002	23:07:37
8	20020805-012406.MSEED2AH_03.1.sac	05/08/2002	01:24:06
9	20040818-090227.MSEED2AH_03.1.sac	18/08/2004	09:02:27
10	20050908-160157.MSEED2AH_03.1.sac	08/09/2005	16:01:57
11	20050924-011310.MSEED2AH_03.1.sac	24/09/2005	01:13:10
12	20060119-163336.MSEED2AH_03.1.sac	19/01/2006	16:33:36
13	20060608-083912.MSEED2AH_03.1.sac	08/06/2006	08:39:12
14	20060819-170400.MSEED2AH_03.1.sac	19/08/2006	17:04:00
15	20061108-171750.MSEED2AH_03.1.sac	08/11/2006	17:17:50
16	20070214-180303.MSEED2AH_03.1.sac	14/02/2007	18:03:03
17	20070315-131100.MSEED2AH_03.1.sac	15/03/2007	13:11:00
18	20070504-101902.MSEED2AH_03.1.sac	04/05/2007	10:19:02
19	20070602-111200.MSEED2AH_03.1.sac	02/06/2007	11:12:00
20	20070706-010701.MSEED2AH_03.1.sac	06/07/2007	01:07:01
21	20070820-045901.MSEED2AH_03.1.sac	20/08/2007	04:59:01
22	20070915-102801.MSEED2AH_03.1.sac	15/09/2007	10:28:01
23	20071001-143903.MSEED2AH_03.1.sac	01/10/2007	14:39:03
24	20071017-112700.MSEED2AH_03.1.sac	17/10/2007	11:27:00
25	20071020-151203.MSEED2AH_03.1.sac	20/10/2007	15:12:03
26	20071112-215603.MSEED2AH_03.1.sac	12/11/2007	21:56:03
27	20071119-104200.MSEED2AH_03.1.sac	19/11/2007	10:42:00
28	20071211-012600.MSEED2AH_03.1.sac	11/12/2007	01:26:00
29	20071213-170600.MSEED2AH_03.1.sac	13/12/2007	17:06:00
30	20080104-141803.MSEED2AH_03.1.sac	04/01/2008	14:18:03
31	20080109-040101.MSEED2AH_03.1.sac	09/01/2008	04:01:01
32	20080118-213202.MSEED2AH_03.1.sac	18/01/2008	21:32:02
33	20080211-221800.MSEED2AH_03.1.sac	11/02/2008	22:18:00
34	20080212-124801.MSEED2AH_03.1.sac	12/02/2008	12:48:01
35	20080308-162203.MSEED2AH_03.1.sac	08/03/2008	16:22:03
36	20080411-050800.MSEED2AH_03.1.sac	11/04/2008	05:08:00
37	20080415-030101.MSEED2AH_03.1.sac	15/04/2008	03:01:01
38	20080504-101900.MSEED2AH_03.1.sac	04/05/2008	10:19:00
39	20080517-200200.MSEED2AH_03.1.sac	17/05/2008	20:02:00
40	20080601-055001.MSEED2AH_03.1.sac	01/06/2008	05:50:01
41	20080620-124201.MSEED2AH_03.1.sac	20/06/2008	12:42:01
42	20080622-013000.MSEED2AH_03.1.sac	22/06/2008	01:30:00
43	20080718-045800.MSEED2AH_03.1.sac	18/07/2008	04:58:00
44	20080730-102100.MSEED2AH_03.1.sac	30/07/2008	10:21:00
45	20080910-050201.MSEED2AH_03.1.sac	10/09/2008	05:02:01
46	20081016-193902.MSEED2AH_03.1.sac	16/10/2008	19:39:02
47	20081123-180401.MSEED2AH_03.1.sac	23/11/2008	18:04:01
48	20081204-053601.MSEED2AH_03.1.sac	04/12/2008	05:36:01
49	20081211-111401.MSEED2AH_03.1.sac	11/12/2008	11:14:01
50	20081215-142500.MSEED2AH_03.1.sac	15/12/2008	14:25:00
51	20081218-020201.MSEED2AH_03.1.sac	18/12/2008	02:02:01
52	20090117-025500.MSEED2AH_03.1.sac	17/01/2009	02:55:00
53	20090121-151700.MSEED2AH_03.1.sac	21/01/2009	15:17:00
54	20090202-131900.MSEED2AH_03.1.sac	02/02/2009	13:19:00
55	20090218-053901.MSEED2AH_03.1.sac	18/02/2009	05:39:01

Tabla 7. (Continuación).

No.	REGISTRO	SISMO	HORA
56	20090310-003402.MSEED2AH_03.1.sac	10/03/2009	00:34:02
57	20090407-214701.MSEED2AH_03.1.sac	07/04/2009	21:47:01
58	20090427-184300.MSEED2AH_03.1.sac	27/04/2009	18:43:00
59	20090522-192200.MSEED2AH_03.1.sac	22/05/2009	19:22:00
60	20090526-191100.MSEED2AH_03.1.sac	26/05/2009	19:11:00
61	20090814-021502.MSEED2AH_03.1.sac	14/08/2009	02:15:02
62	20090828-051600.MSEED2AH_03.1.sac	28/08/2009	05:16:00
63	20090915-094701.MSEED2AH_03.1.sac	15/09/2009	09:47:01
64	20090918-213300.MSEED2AH_03.1.sac	18/09/2009	21:33:00
65	20091008-072100.MSEED2AH_03.1.sac	08/10/2009	07:21:00
66	20091029-105001.MSEED2AH_03.1.sac	29/10/2009	10:50:01
67	20091216-064701.MSEED2AH_03.1.sac	16/12/2009	06:47:01
68	20091225-053700.MSEED2AH_03.1.sac	25/12/2009	05:37:00
69	20100108-084800.MSEED2AH_03.1.sac	08/01/2010	08:48:00
70	20100119-134201.MSEED2AH_03.1.sac	19/01/2010	13:42:01
71	20100120-183701.MSEED2AH_03.1.sac	20/01/2010	18:37:01
72	20100123-135100.MSEED2AH_03.1.sac	23/01/2010	13:51:00
73	20100201-094500.MSEED2AH_03.1.sac	01/02/2010	09:45:00
74	20100209-004500.MSEED2AH_03.1.sac	09/02/2010	00:45:00
75	20100226-015003.MSEED2AH_03.1.sac	26/02/2010	01:50:03
76	20100317-042600.MSEED2AH_03.1.sac	17/03/2010	04:26:00
77	20100412-181800.MSEED2AH_03.1.sac	12/04/2010	18:18:00
78	20100416-095901.MSEED2AH_03.1.sac	16/04/2010	09:59:01
79	20100420-022601.MSEED2AH_03.1.sac	20/04/2010	02:26:01
80	20100513-233201.MSEED2AH_03.1.sac	13/05/2010	23:32:01
81	20100531-221803.MSEED2AH_03.1.sac	31/05/2010	22:18:03
82	20100608-052801.MSEED2AH_03.1.sac	08/06/2010	05:28:01
83	20100609-225500.MSEED2AH_03.1.sac	09/06/2010	22:55:00
84	20100625-170600.MSEED2AH_03.1.sac	25/06/2010	17:06:00
85	20100701-001801.MSEED2AH_03.1.sac	01/07/2010	00:18:01
86	20100724-065002.MSEED2AH_03.1.sac	24/07/2010	06:50:02
87	20100921-144002.MSEED2AH_03.1.sac	21/09/2010	14:40:02
88	20110105-144302.MSEED2AH_03.1.sac	05/01/2011	14:43:02
89	20110120-100002.MSEED2AH_03.1.sac	20/01/2011	10:00:02
90	20110204-173000.MSEED2AH_03.1.sac	04/02/2011	17:30:00
91	20110211-131802.MSEED2AH_03.1.sac	11/02/2011	13:18:02
92	20110225-130500.MSEED2AH_03.1.sac	25/02/2011	13:05:00
93	20110228-210903.MSEED2AH_03.1.sac	28/02/2011	21:09:03
94	20110326-063100.MSEED2AH_03.1.sac	26/03/2011	06:31:00
95	20110407-130902.MSEED2AH_03.1.sac	07/04/2011	13:09:02
96	20110418-004400.MSEED2AH_03.1.sac	18/04/2011	00:44:00
97	20110426-110501.MSEED2AH_03.1.sac	26/04/2011	11:05:01
98	20110505-132200.MSEED2AH_03.1.sac	05/05/2011	13:22:00
99	20110511-172901.MSEED2AH_03.1.sac	11/05/2011	17:29:01
100	20110603-141901.MSEED2AH_03.1.sac	03/06/2011	14:19:01
101	20110610-131100.MSEED2AH_03.1.sac	10/06/2011	13:11:00
102	20110612-111501.MSEED2AH_03.1.sac	12/06/2011	11:15:01
103	20110709-124000.MSEED2AH_03.1.sac	09/07/2011	12:40:00
104	20110710-151800.MSEED2AH_03.1.sac	10/07/2011	15:18:00
105	20110813-073201.MSEED2AH_03.1.sac	13/08/2011	07:32:01
106	20111211-014600.MSEED2AH_03.1.sac	11/12/2011	01:46:00



Fig. 22 Acelerógrafo ETNA/1328.



Fig. 23 Acelerómetro FBA-23 (Ref 51).

De ambas bases de datos se tomaron los registros que van del 15 de junio de 1999 al 11 de diciembre del 2011, se seleccionaron estos registros ya que fue en 1999 cuando se instaló la estación OXLC del II-UNAM, y el sismo del 15 de junio de ese mismo año fue el primero registrado simultáneamente por ambas estaciones, así mismo la selección de los 61 registros se realizó mediante inspección visual y se descartaron los que presentaban diferentes tipos de alteraciones como desfases, con amplitudes de movimiento muy pequeñas, o con presencia de ruido que se consideró alteraban en gran medida la señal. En las figuras 24 y 25 se presentan ejemplos del tipo de registros descartados.

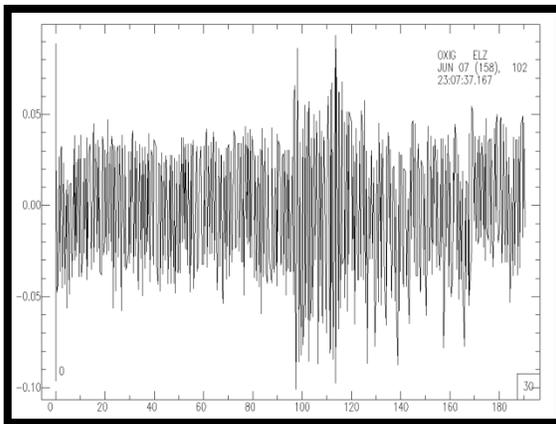


Fig. 24 Registro contaminado con ruido.

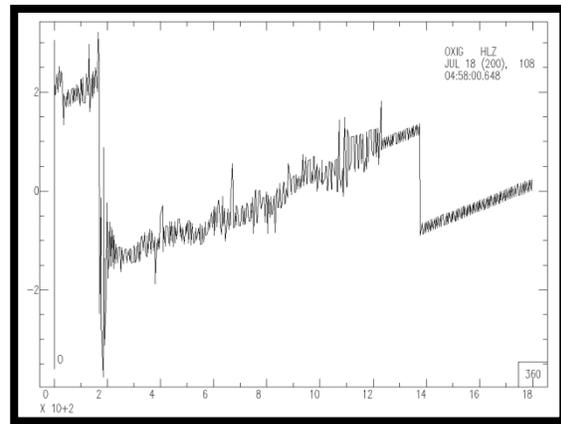


Fig. 25 Registro con desfases.

III. Análisis de los Registros en Roca

III. ANALISIS DE REGISTROS EN ROCA

III.1 Acelerogramas

Los registros de aceleración que se presentan en ambas estaciones son 61 a los cuales les fue corroborada la hora de registro, el epicentro y la magnitud para determinar que efectivamente fueran pertenecientes al mismo sismo; éste proceso se realizó para las dos estaciones en cuestión.

De los 61 registros mencionados se seleccionaron 7, los que corresponden al 15 de junio (M=7.0) y al 30 de septiembre (M=7.4), ambos del año 1999, 16 de enero del 2002 (M=6.7), 12 de febrero del 2008 (M=5.3), 09 de febrero de 2010 (M=5.8), 25 de febrero (M=6.0) y 07 de abril del año 2011 (M=6.7). Se seleccionaron ya que han sido los de mayor magnitud registrada por los dos acelerógrafos de las estaciones (OXIG y OXLC) y los que no tienen ningún defecto o anomalía en su registro. La tabla 8 muestra los registros comunes en las estaciones OXIG y OXLC.

Tabla 8. Registros comunes obtenidos en las estaciones OXLC y OXIG.

#	CLAVE SISMO	FECHA DD/MM/AAAA	MAGNITUD	HORA DE REGISTRO	
				OXLC	OXIG
1	19990615	15/06/1999	7.0	20:42:07	20:42:04
2	19990930	30/09/1999	6.5	16:31:14	16:31:13
3	20000929	29/09/2000	4.7	11:31:31	11:31:31
4	20011003	03/10/2001	4.4	09:40:27	09:40:26
5	20020116	16/01/2002	6.3	23:09:55	23:09:55
6	20020130	30/01/2002	5.1	08:42:05	08:42:04
7	20020805	05/08/2002	5.3	01:25:18	01:25:18
8	20060119	19/01/2006	4.2	16:34:39	16:34:39
9	20060608	08/06/2006	4.2	08:40:15	08:40:14
10	20061108	08/11/2006	5.1	17:18:47	17:18:47
11	20070214	14/02/2007	4.6	18:04:40	18:04:40
12	20070315	15/03/2007	5.1	13:13:00	13:13:00
13	20070504	04/05/2007	4.8	10:21:10	10:21:10
14	20070706	06/07/2007	6.2	01:09:19	01:09:21
15	20070820	20/08/2007	4.5	05:01:30	05:01:30
16	20071020	20/10/2007	4.5	15:14:46	15:14:45
17	20071213	13/12/2007	4.5	17:08:54	17:08:55
18	20080109	09/01/2008	4.1	04:03:13	04:03:13
19	20080118	18/01/2008	4.5	21:34:24	21:32:24
20	20080211	11/02/2008	4.8	22:20:33	22:20:33
21	20080212	12/02/2008	6.6	12:50:18	12:48:01
22	20080308	08/03/2008	4.5	16:24:17	16:24:18
23	20080411	11/04/2008	4.3	05:10:03	05:10:03
24	20080504	04/05/2008	4.5	10:21:35	10:21:35
25	20080517	17/05/2008	4.8	20:04:08	20:04:08
26	20080601	01/06/2008	4.1	05:52:00	05:52:00
27	20080622	22/06/2008	4.9	01:32:07	01:32:07
28	20081211	11/12/2008	4.0	11:16:38	11:16:38
29	20081215	15/12/2008	4.4	14:27:10	14:27:10
30	20081218	18/12/2008	4.3	02:04:37	02:04:37
31	20090218	18/02/2009	4.8	05:41:36	05:41:35
32	20090407	07/04/2009	4.8	21:49:28	21:49:27
33	20090522	22/05/2009	5.7	19:24:18	19:24:18
34	20090814	14/08/2009	4.4	02:17:20	02:17:20
35	20090915	15/09/2009	3.9	09:49:39	09:49:38
36	20091008	08/10/2009	4.0	07:23:36	07:23:35
37	20091029	29/10/2009	5.5	10:52:57	10:52:58
38	20091216	16/12/2009	4.1	06:49:12	06:49:12
39	20100119	19/01/2010	4.0	13:44:53	13:44:52
40	20100201	01/02/2010	4.3	09:47:44	09:47:44
41	20100209	09/02/2010	5.8	00:47:40	00:47:40
42	20100412	12/04/2010	4.2	18:20:00	18:20:00
43	20100513	13/05/2010	4.1	23:34:33	23:34:34
44	20100531	31/05/2010	4.4	22:20:18	22:20:19
45	20100608	08/06/2010	4.0	05:30:03	05:30:03
46	20100921	21/09/2010	5.0	14:42:09	14:42:08
47	20110204	04/02/2011	4.5	17:32:02	17:30:00
48	20110211	11/02/2011	4.4	13:20:43	13:20:43
49	20110225	25/02/2011	6.0	13:07:27	13:07:28
50	20110228	28/02/2011	4.2	21:11:26	21:11:26
51	20110326	26/03/2011	4.1	06:33:26	06:33:26
52	20110407	07/04/2011	6.7	13:11:22	13:11:22
53	20110418	18/04/2011	4.4	00:46:55	00:46:55
54	20110505	05/05/2011	5.5	13:24:07	13:24:07
55	20110511	11/05/2011	4.5	17:31:44	17:31:44
56	20110603	03/06/2011	4.9	14:21:25	14:21:25
57	20110612	12/06/2011	4.8	11:17:47	11:17:47
58	20110709	09/07/2011	5.3	12:42:29	12:42:29
59	20110710	10/07/2011	4.8	15:19:20	15:19:20
60	20110813	13/08/2011	5.7	07:33:09	07:33:07
61	20111211	11/12/2011	6.5	01:47:25	01:47:25

Procesamiento de Datos

En el procesamiento de las señales acelerográficas se utilizaron los siguientes paquetes de programas:

-*Seismic Analysis Code (SAC)*

SAC es un programa desarrollado para el sistema operativo *Linux* que permite ingresar una serie de líneas de comandos para realizar operaciones básicas en datos de series de tiempo, especialmente en registros sísmicos. Los datos se ingresan en la terminal de éste sistema operativo para que sean leídos por SAC y mediante una serie de comandos proporciona gráficamente los registros acelerográficos que se quieran estudiar, éste programa también puede proporcionar espectros de Fourier de registros de aceleraciones, puede cambiar la tasa de muestreo, cortar registros (si no es necesario utilizar todo el tiempo del registro), puede superponer gráficas de diferentes sismos en la misma escala de tiempo y hacer correcciones por instrumentos a los registros que se tienen.

SAC fue desarrollado en la década de los 80's en los laboratorios *Livermore* y el laboratorio de *Los Álamos*, la realización de éste programa fue dirigida por *W.C. Tapley*, *Joe Tull* y fueron tomadas partes de un paquete que se incorporó posteriormente, perteneciente a *Dave Harris*. SAC es capaz de leer formatos *SEG-Y*, *MSEED* y *GCF* que son los formatos utilizados más frecuentemente para registros sísmicos (Ref 52).

El programa SAC es de descarga libre y puede ser adquirido en el sitio *web* de *IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology)* para *Linux* o para computadoras con sistema operativo *iOS (Macintosh)*, sin embargo, si se desea instalar para computadoras con sistema operativo *Windows* primero se tiene que instalar una máquina virtual para emular el sistema operativo *Linux*.

-*DEGTRA*

Es un paquete de procesamiento de datos sísmicos desarrollado en conjunto por los profesores Mario G Ordaz Schroeder y Carlos Montoya Dulché del Instituto de Ingeniería de la UNAM y del Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED) respectivamente. El paquete permite leer registros sísmicos en formato *ASCII*, binario, *SEISAN*, *Raro*, y *BMDSF 2*; además, cuenta con herramientas para escalar, diezmar, corregir línea base, calcular espectros de Fourier, de respuesta y estimar funciones de transferencia empíricas.

Acelerogramas de la estación del Servicio Sismológico OXIG

Los acelerogramas de la estación OXIG fueron proporcionados en formato binario, específicamente con la extensión “.sac” los cuales sólo pueden abrirse y trabajarse en SAC, programa del sistema operativo *Linux*. Se leen los acelerogramas y posteriormente se les aplica una serie de comandos para que puedan ser trabajados en el programa *DEGTRA*, compatible únicamente con el sistema operativo *WINDOWS*.

La metodología empleada para los registros de esta estación se describe y ejemplifica a continuación; para una mejor descripción se detalla a continuación un ejemplo muy completo que corresponde al sismo del 15 de junio de 1999 en su componente vertical.

1.- Se lee en SAC cada uno de los registros en sus tres componentes (Vertical, Norte y Este), en éste caso la vertical. En SAC se hace mediante el comando **READ**, seguido del nombre completo del archivo.

```
SAC> READ 19990615-204052.MSEED2AH____03.1.sac
```

2.- Se listan los encabezados (comando **LH** “List Header”) para ver la información del registro (número de puntos, tiempo de inicio y final del registro, tasa de muestreo, los mínimos y máximos, la fecha, nombre de estación y el tipo de instrumento) se verifica que esté en la misma tasa de muestreo que en la estación OXLC, de no ser así se tendrá que aplicar otro comando para cambiar la tasa de muestreo.

```
SAC> LH
```

```
NPTS: 66342  
B: 0.000000e+00  
E: 8.292625e+02  
DELTA: 1.250000e-02  
DEP. MIN: -1.635771e+01  
DEP. MAX: 1.504692e+01  
DEP. MEN: 2.710372e-06  
KZDATE: JUN 15 (166), 1999  
KZTIME: 20:40:55.320  
KINST: QTR  
KSTNM: OXIG
```

La información más importante en éste listado es la **DELTA**, que representa la tasa de muestreo, en éste caso es de 80 muestras/segundo ($1/0.0125= 80$).

3.- Se verifica que los datos de ambas estaciones (OXIG y OXLC) para un mismo registro tengan la misma tasa de muestreo, de no ser así (como en el ejemplo) se le aplica el comando **INTERPOLATE** seguido de la palabra **DELTA** y de la tasa de muestreo a la que se quiera cambiar, en éste ejemplo la tasa de muestreo del mismo sismo correspondiente al de la estación OXLC estaba a 200 muestras/segundo, por lo que se tuvo que cambiar el registro de la estación OXIG a 200 muestras/segundo. ($1/200 = 0.005$).

```
SAC> INTERPOLATE DELTA 0.005
```

Con éste comando se asegura la interpolación a la nueva tasa de muestreo, se puede comprobar el cambio volviendo a invocar el comando **LH** para que muestre la información del registro ya cambiado.

Si la tasa de muestreo en las dos estaciones OXLC y OXIG es la misma se omite éste paso.

4.- Los archivos en formato SAC están en binario por lo que se tiene que pasar cada registro a formato alfa-numérico para posteriormente poder leerlos en el programa *DEGTRA*. Esta acción se realiza mediante el comando **WRITE ALPHA**, seguido del nuevo nombre que se le quiera dar al archivo convertido a alfa-numérico.

SAC> WRITE ALPHA 19990615-204052.03.1.int.txt

Las extensiones “.int” y “.txt” sólo hacen referencia a que el registro ya fue interpolado y convertido a alfa-numérico, fue nombrado así para evitar una confusión posterior. No hay ningún problema al guardarlos así, ya que pueden ser abiertos en cualquier editor de texto y de igual manera se pueden guardar con el nombre que mejor convenga. Al escribir el comando **WRITE ALPHA** automáticamente se guarda el nuevo archivo en la misma carpeta de la que se estén leyendo los registros (Fig. 26).

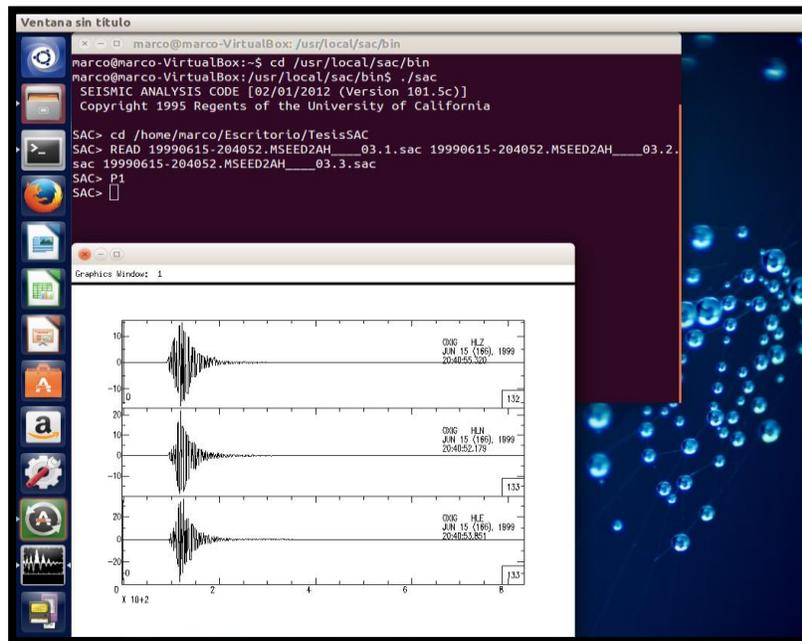


Fig. 26 Lectura simultanea de registros de aceleración en SAC (3 componentes, sismodel 15 de junio de 1999 M=7.0).

DEGTRA es un programa muy gráfico y no existe complicación alguna para obtener la lectura de los acelerogramas de los registros de la estación OXIG. Para leer los acelerogramas de la estación OXIG se toma en cuenta que el formato en el que los convierte SAC es diferente y se debe de corregir para que *DEGTRA* los lea

correctamente, esto se hace rellenando la celda “**No. de líneas o muestras inútiles**” con el número **30**, ya que son las líneas inútiles pertenecientes al formato en que lo guarda SAC y posterior a eso se rellena la celda que “**DT**” la cual hace referencia al Delta de Tiempo de ese registro, ahí se coloca el delta de acuerdo a la tasa de muestreo, en éste ejemplo fue de 0.005. (Fig 27).

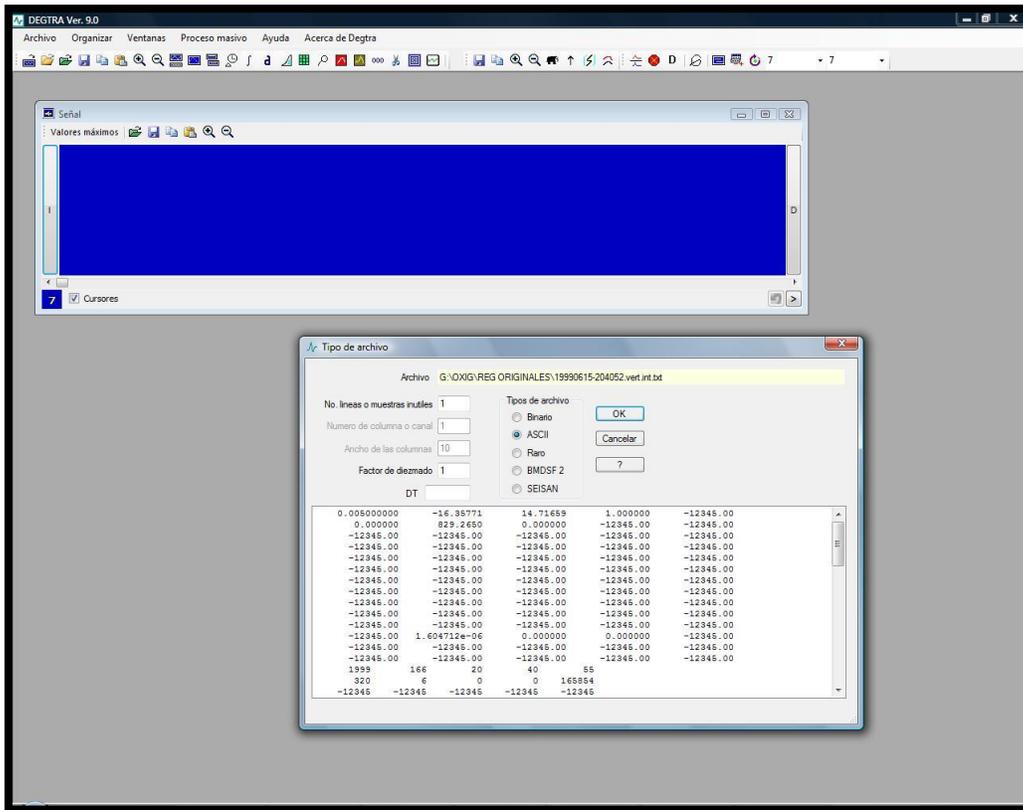


Fig. 27 Ejemplo de lectura de acelerogramas en *DEGTRA*.

Las figuras 28 a 34 corresponden a los 7 registros de aceleración obtenidos de la estación OXIG, los cuales están presentados en cada imagen en sus componentes Vertical (V), Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-W), han sido ordenados en forma ascendente de acuerdo a la fecha en que se registraron los movimientos.

El sismo del 15 de junio de 1999 tuvo epicentro en el estado de Puebla ($M= 7.0$), su mayor aceleración la presenta en la componente E-W alcanzando los 36.7 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 57 segundos.

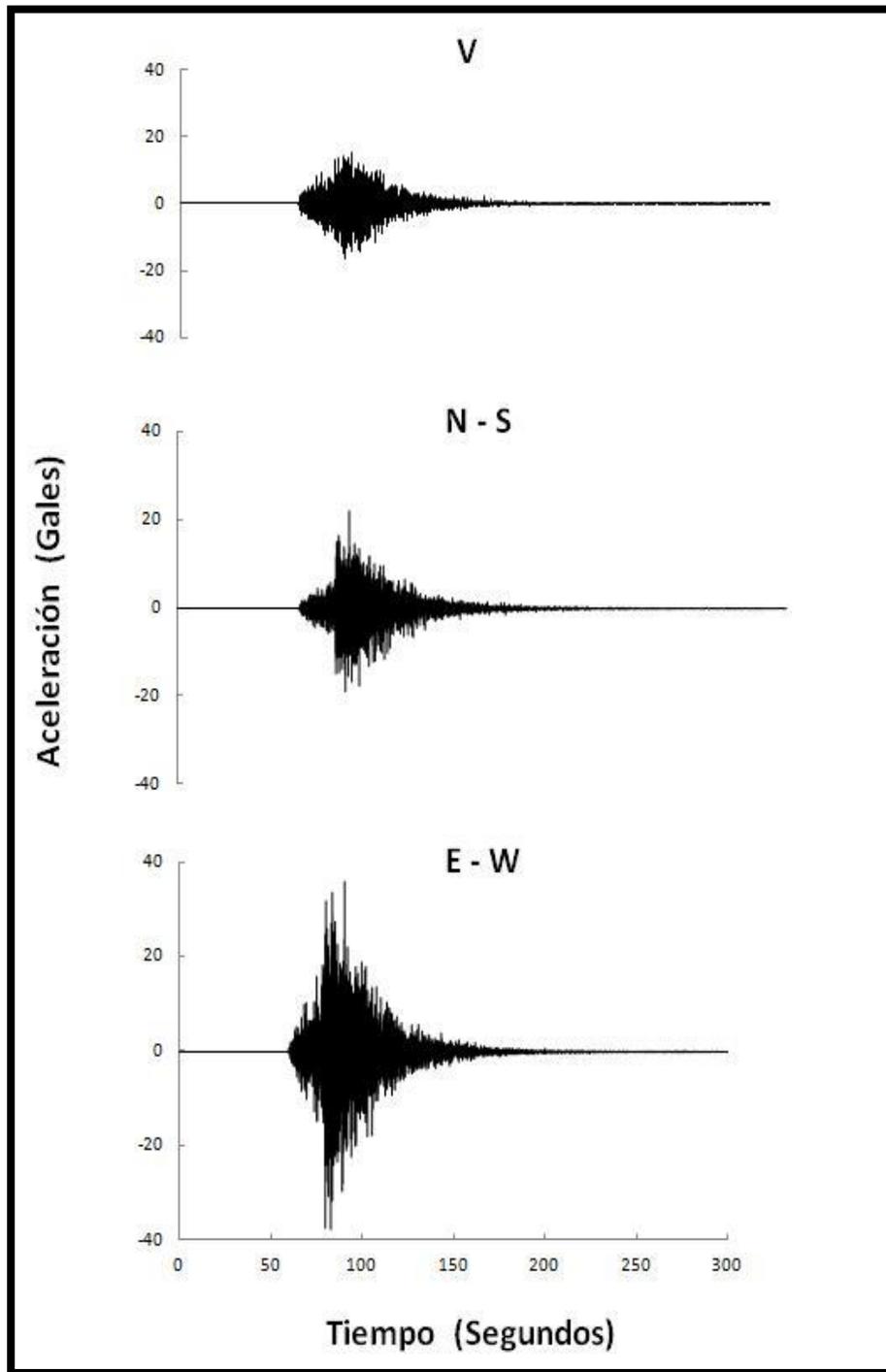


Fig. 28 Registros de Aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo 15 junio de 1999).

El sismo del 30 de septiembre de 1999 con epicentro en el estado de Oaxaca ($M= 7.4$) tuvo su mayor aceleración en la componente E-W alcanzando los 196 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 30 segundos.

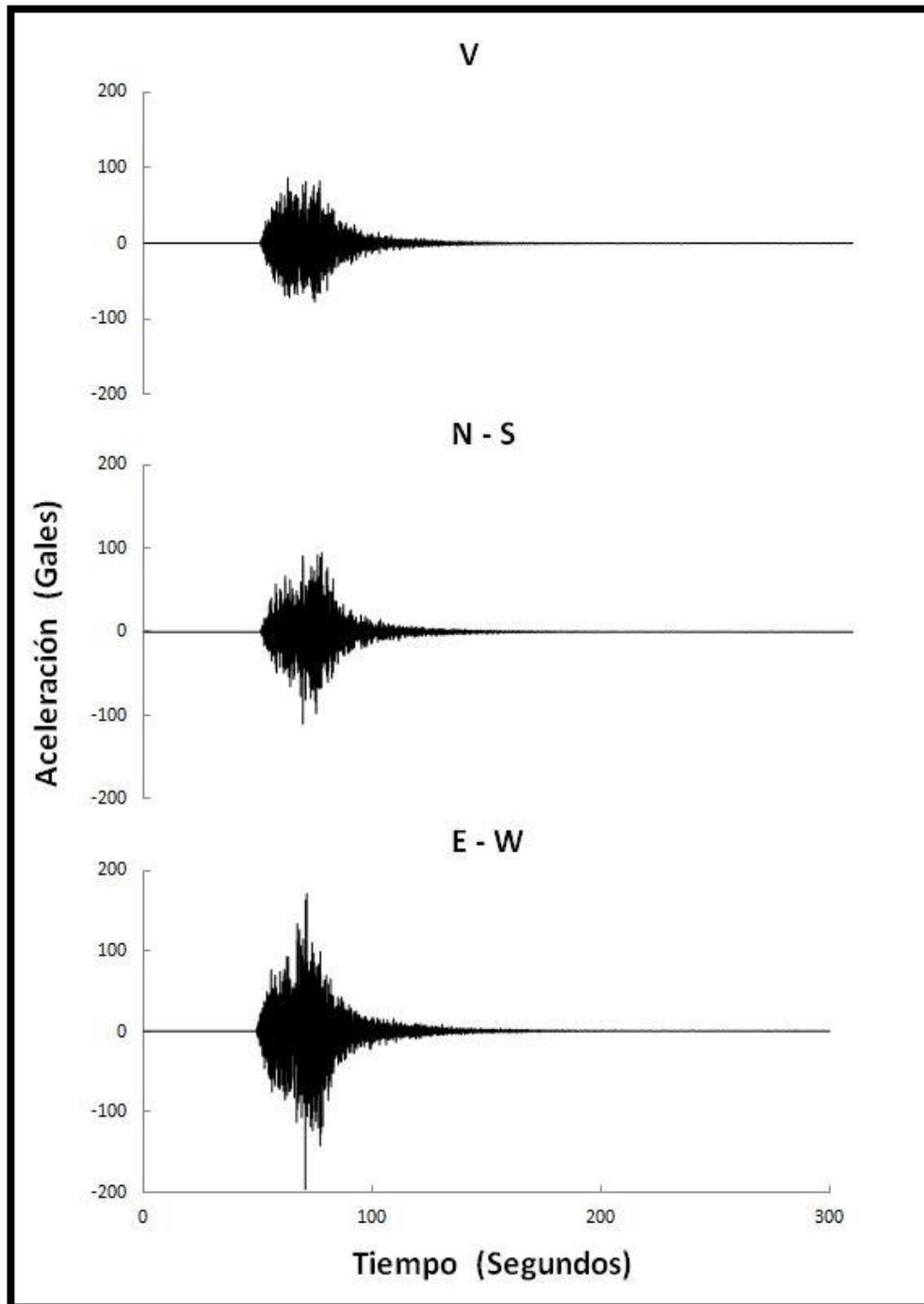


Fig. 29 Registros de Aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo 30 septiembre de 1999).

El sismo del 16 de enero de 2002 con epicentro en las costas del estado de Chiapas (M= 6.7) tuvo su mayor aceleración en la componente E-W alcanzando los 3.7 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 40 segundos.

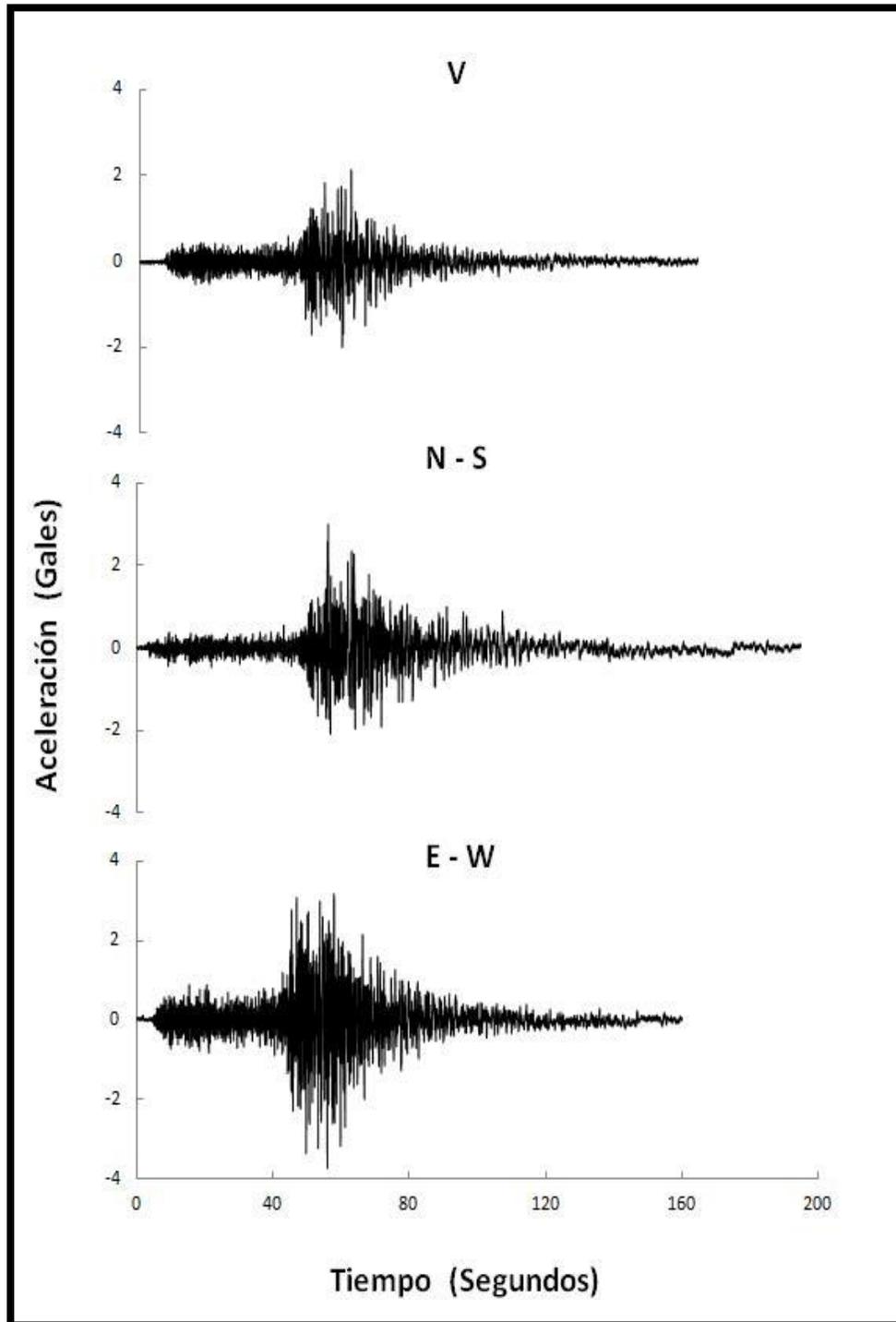


Fig. 30 Registros de Aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo 16 enero de 2002).

El sismo del 12 de febrero de 2008 con epicentro en el estado de Oaxaca ($M= 5.3$) tuvo su mayor aceleración en la componente N-S alcanzando los 63 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 20 segundos.

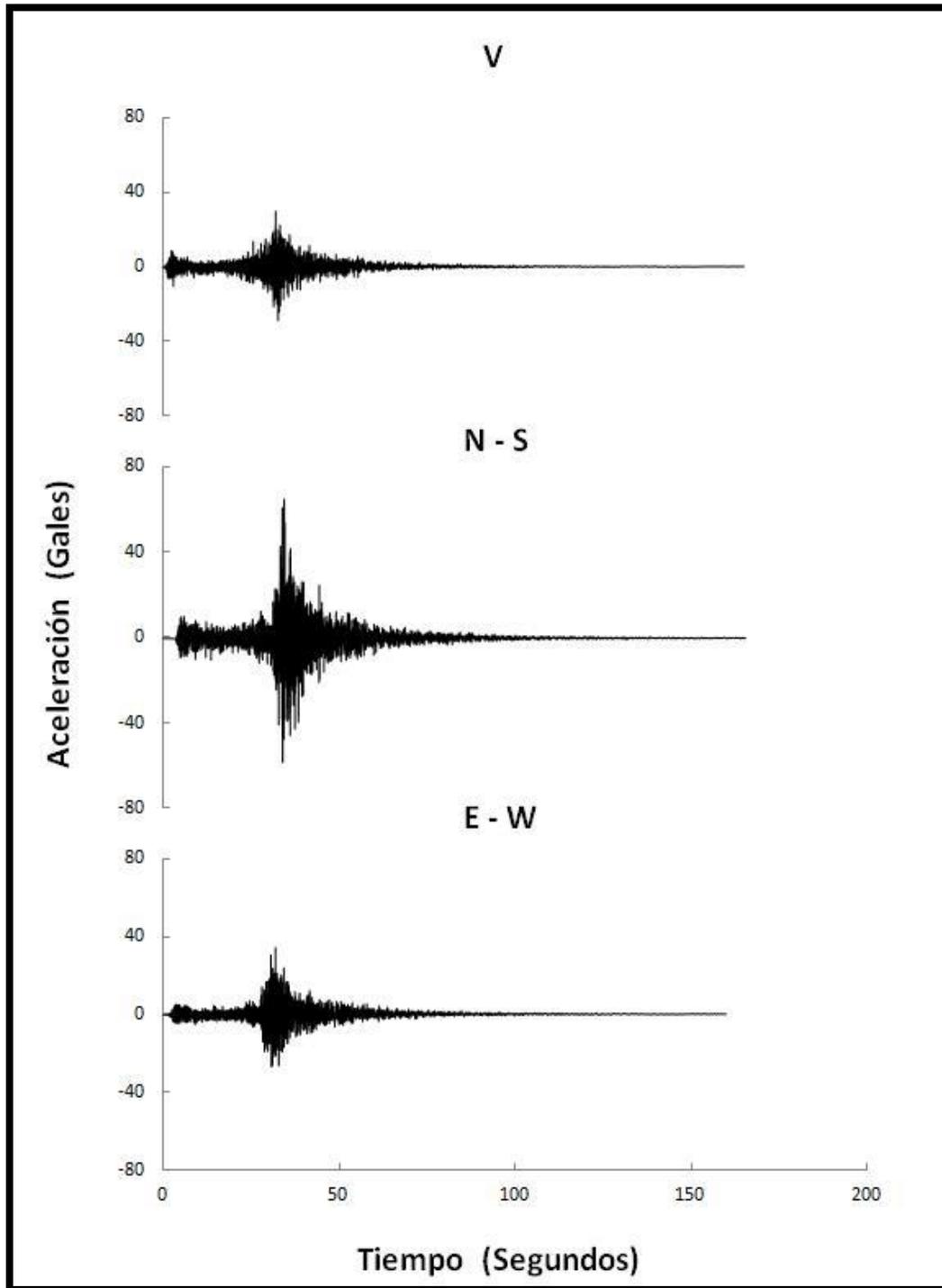


Fig. 31 Registros de Aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo 12 febrero de 2008).

El sismo del 09 de febrero de 2010 con epicentro en el estado de Oaxaca ($M= 5.8$) tuvo su mayor aceleración en la componente N-S alcanzando los 18 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 15 segundos.

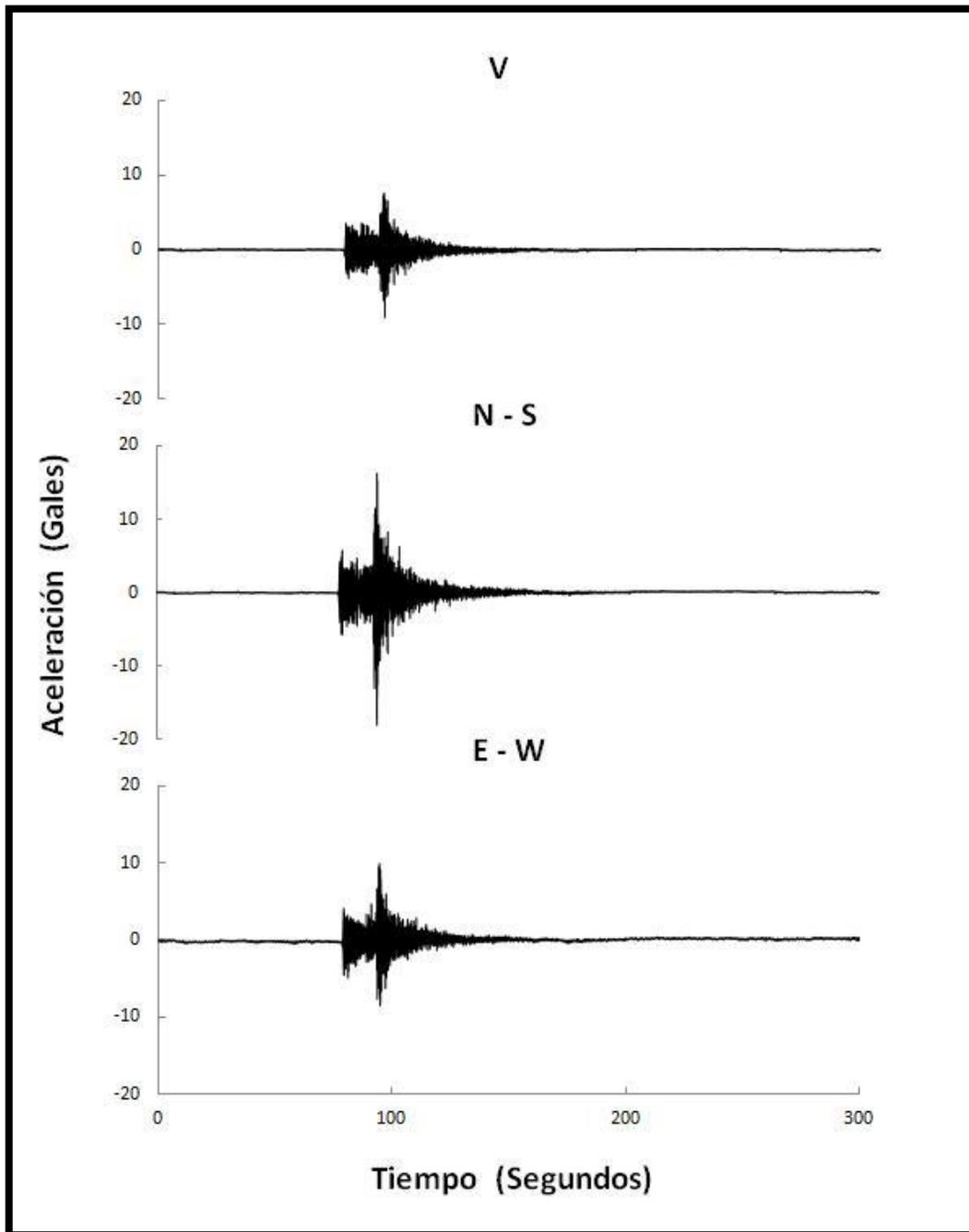


Fig. 32 Registros de Aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo 09 febrero de 2010).

El sismo del 25 de febrero de 2011 con epicentro en el estado de Oaxaca ($M= 6.0$) tuvo su mayor aceleración en la componente N-S alcanzando los 22 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 10 segundos.

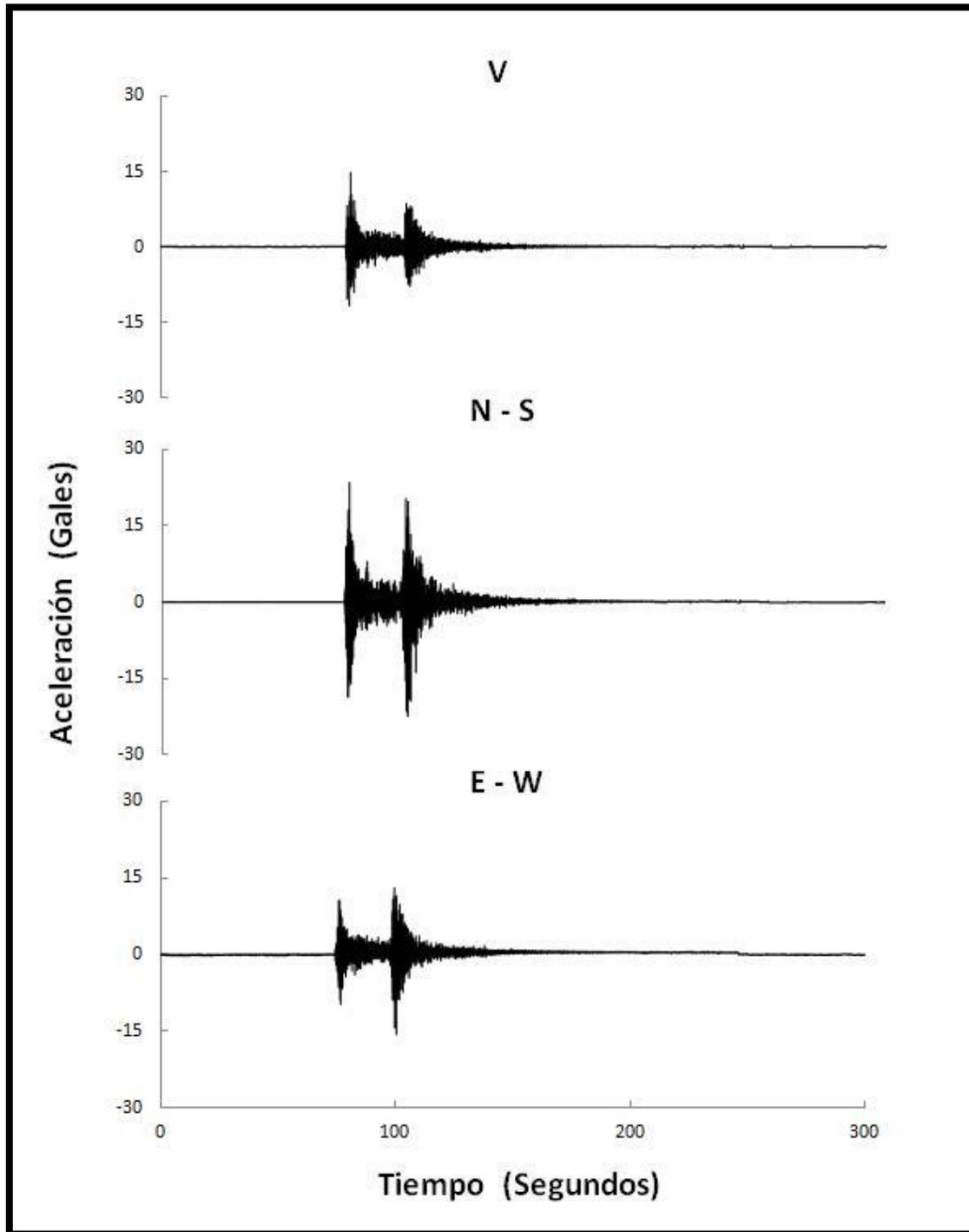


Fig. 33 Registros de Aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo 25 febrero de 2011).

El sismo del 07 de abril de 2011 con epicentro en el estado de Puebla ($M= 6.7$) tuvo su mayor aceleración en la componente N-S alcanzando los 29 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 50 segundos.

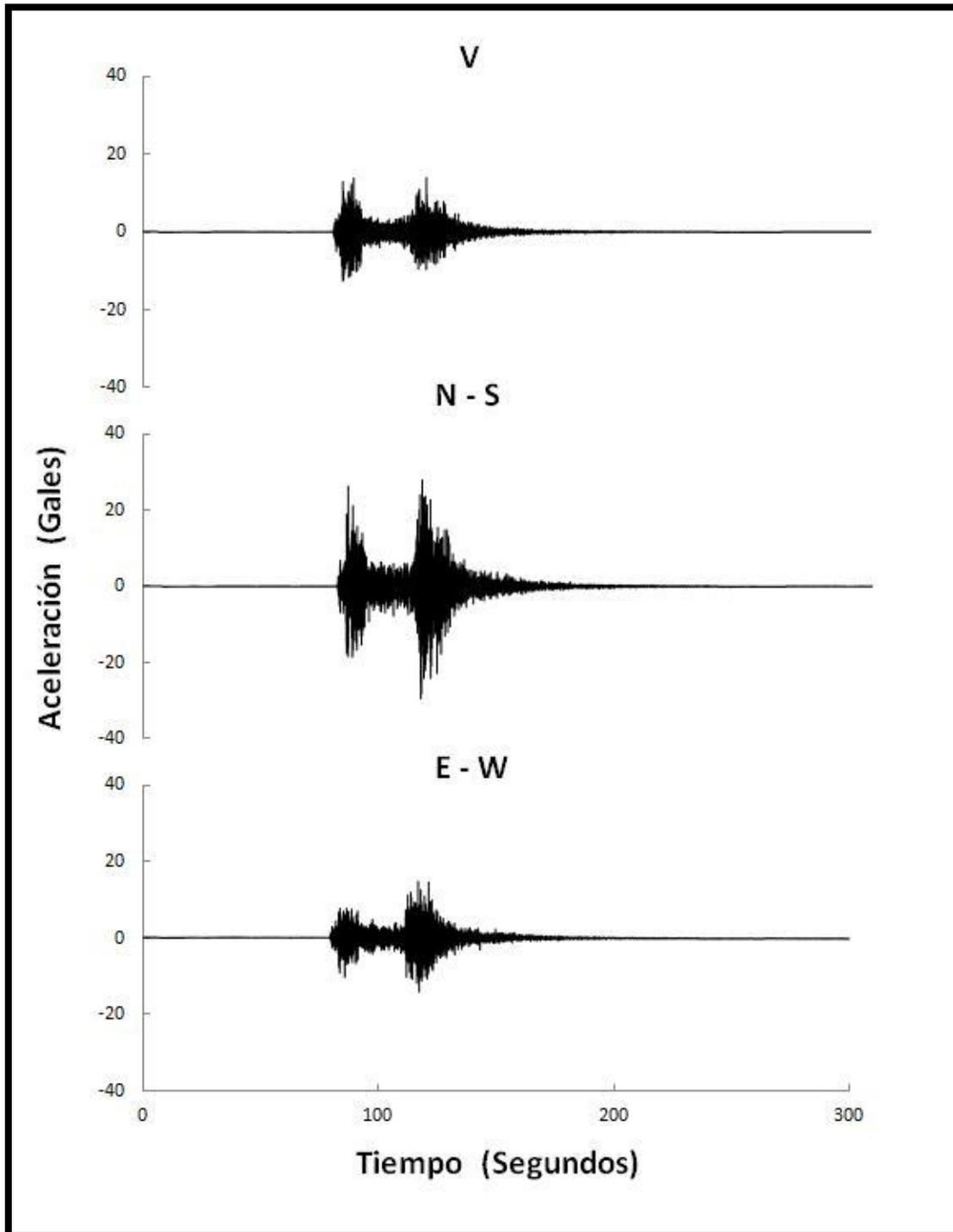


Fig. 34 Registros de Aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo 07 abril de 2011).

Acelerogramas de la estación del Instituto de Ingeniería UNAM OXLC

Los acelerogramas de la estación OXLC, pertenecientes a la RAO, fueron tomados de una base de datos proporcionada por el II-UNAM, estos datos ya se encontraban en formato alfa-numérico por lo que no se necesitó la ayuda de algún otro programa para el manejo o el cambio de datos de estos registros. Los archivos de esta estación se encuentran en formato *BMDSF 2* y pueden ser leídos directamente en *DEGTRA*, no existió ninguna dificultad para abrirlos ya que el programa automáticamente identifica el número de líneas inútiles, el delta de tiempo o tasa de muestreo (DT), lo único que se requiere rellenar es el número de canal según la componente que se quiera leer. El procedimiento que se siguió para la lectura de los datos de esta estación fue el siguiente.

1.- Se abre el programa *DEGTRA* y se selecciona la opción “**Leer Acelerograma**”, se tiene que seleccionar el número de canal que se quiere leer, ya que en los datos proporcionados por el II-UNAM vienen las tres componentes en un solo archivo. En todos los archivos de esta estación la relación de los canales es la siguiente:

- Canal 1: Componente Este-Oeste (E-W)**
- Canal 2: Componente Vertical (Z)**
- Canal 3: Componente Norte (N-S)**

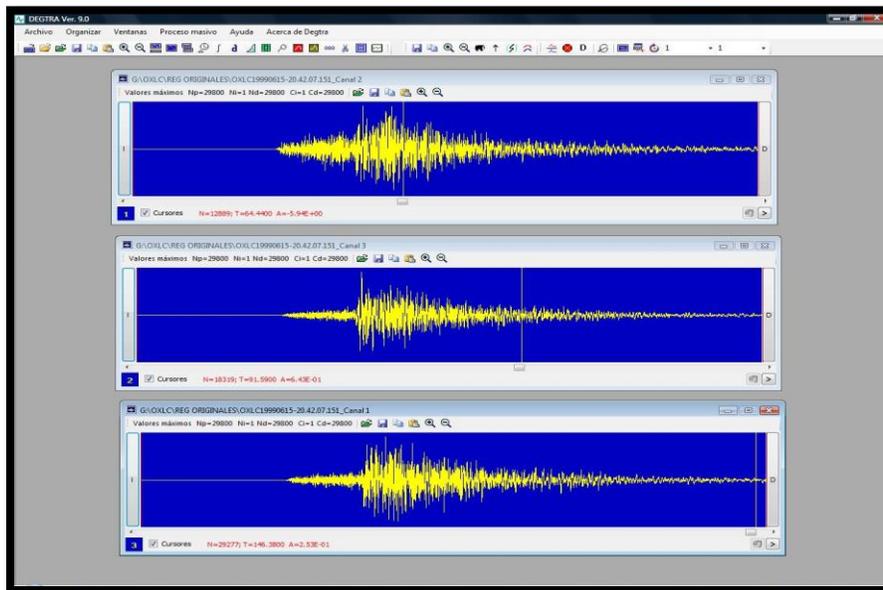


Fig. 35 Lectura de acelerogramas en *DEGTRA* (sismo del 15 de junio de 1999 M=7.0).

Las figuras 36 a 42 corresponden a los 7 registros de aceleración obtenidos de la estación OXLC, los cuales están presentados en cada imagen en sus componentes Vertical (V), Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-W), han sido ordenados en forma ascendente de acuerdo a la fecha en que se registraron.

El sismo del 15 de junio de 1999 tuvo epicentro en el estado de Puebla ($M= 7.0$), su mayor aceleración la presenta en la componente E-W alcanzando los 23 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 57 segundos.

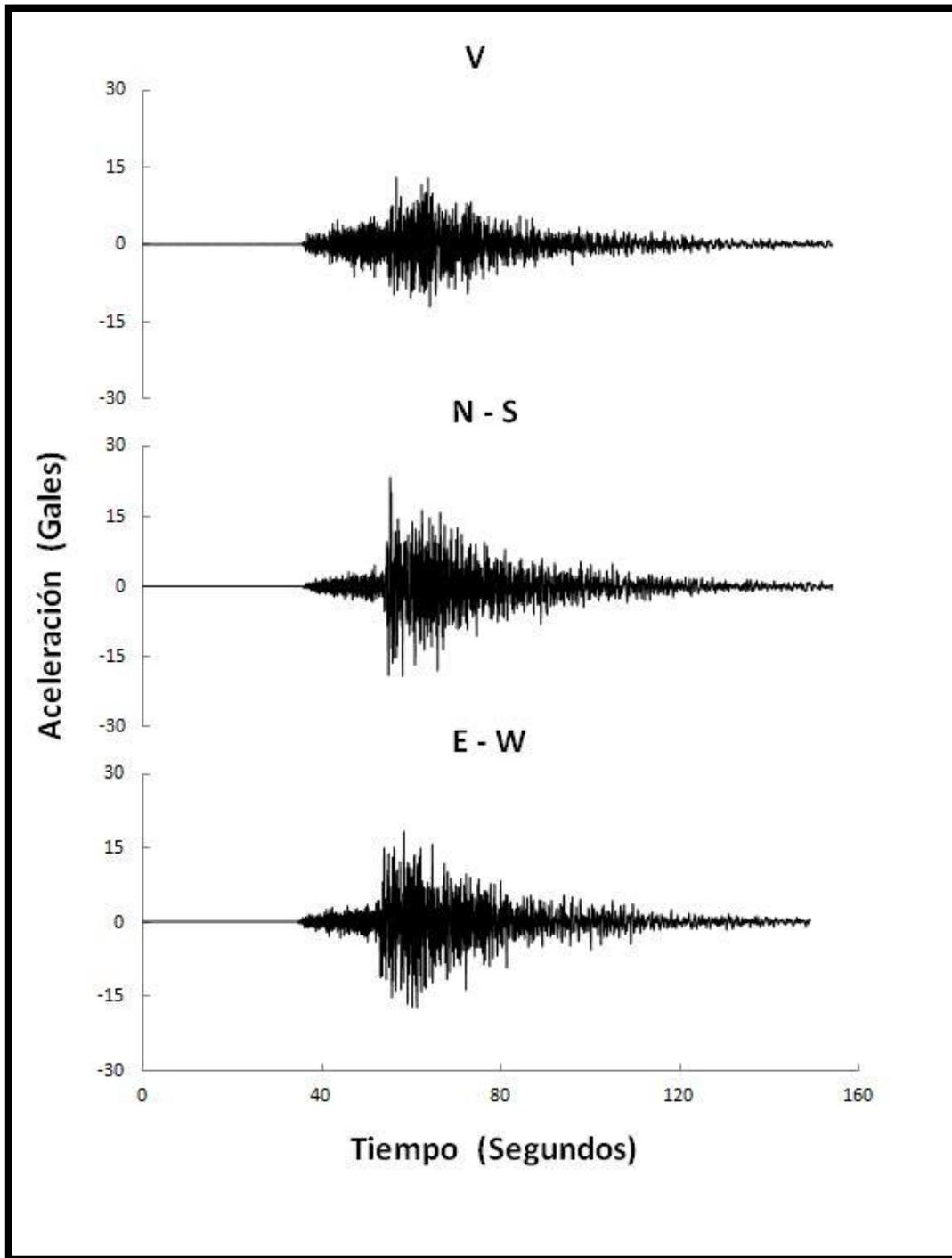


Fig. 36 Registros de aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo del 15 de junio de 1999).

El sismo del 30 de septiembre de 1999 con epicentro en el estado de Oaxaca ($M= 7.4$) tuvo su mayor aceleración en la componente N-S alcanzando los 74 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 30 segundos.

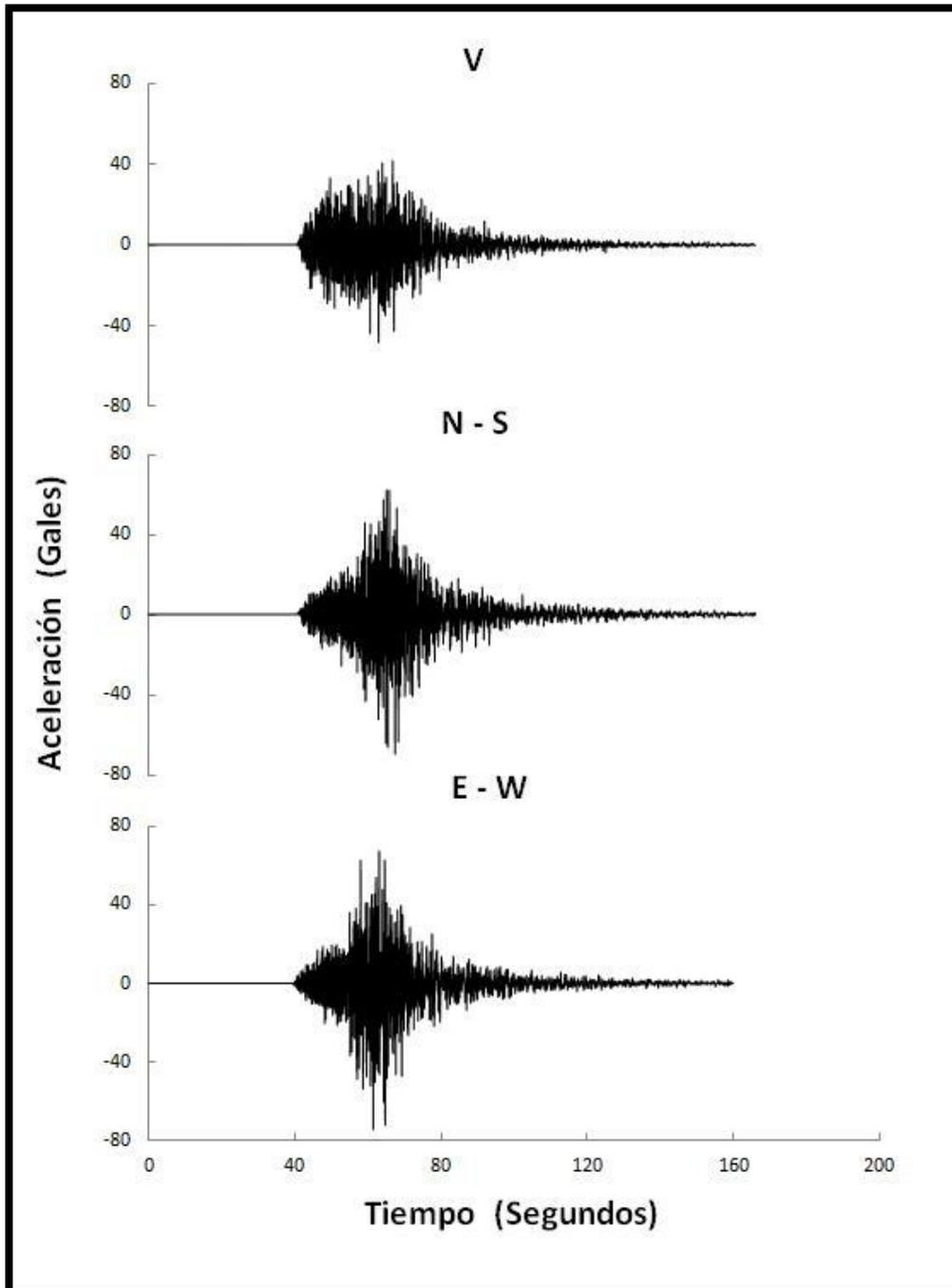


Fig. 37 Registros de aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo del 30 de septiembre de 1999).

El sismo del 16 de enero de 2002 con epicentro en las costas del estado de Chiapas (M= 6.7) tuvo su mayor aceleración en la componente E-W alcanzando los 4 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 40 segundos.

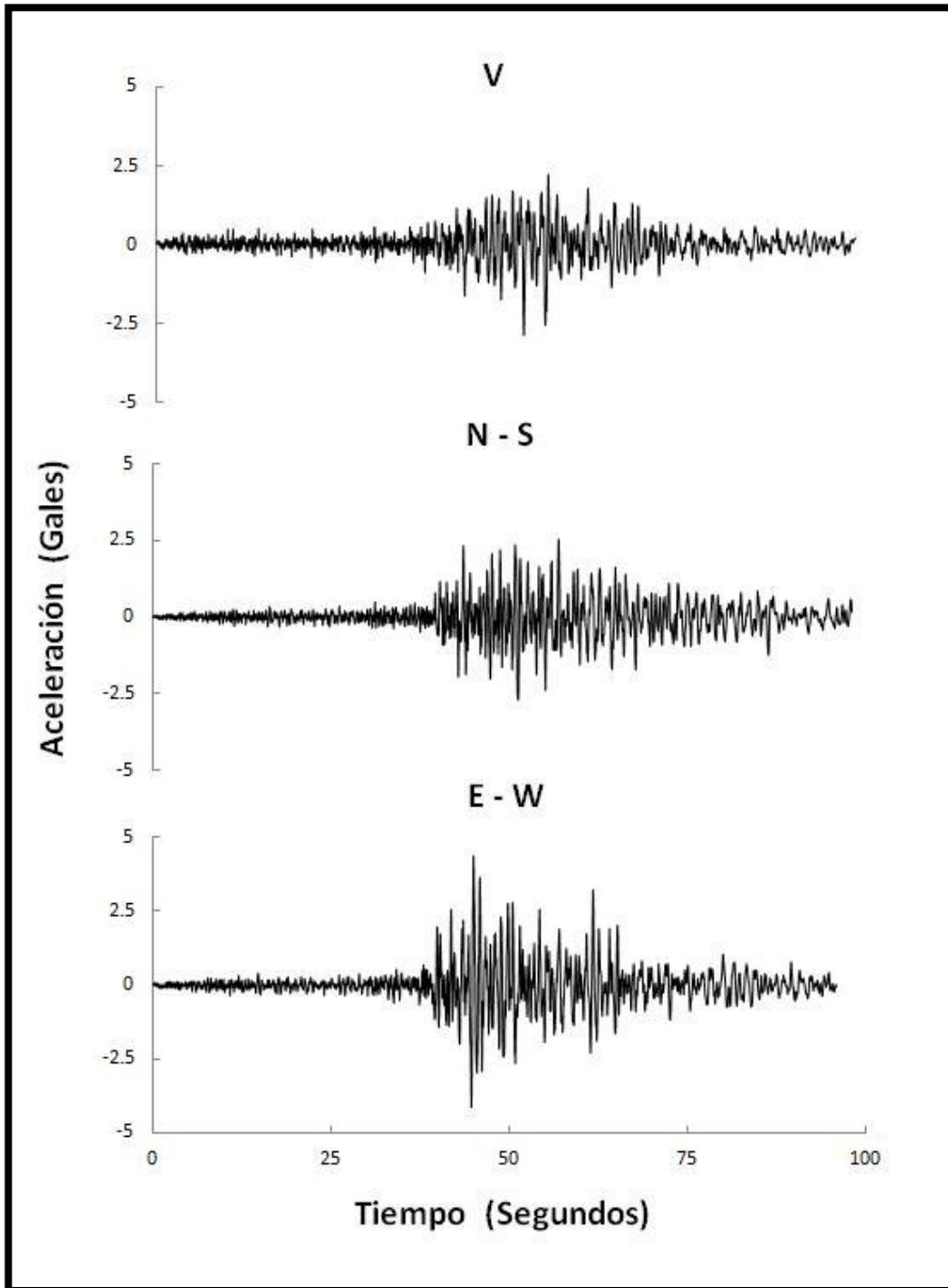


Fig. 38 Registros de aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo del 16 de enero de 2002).

El sismo del 12 de febrero de 2008 con epicentro en el estado de Oaxaca ($M= 5.3$) tuvo su mayor aceleración en la componente E-W alcanzando los 20 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 20 segundos.

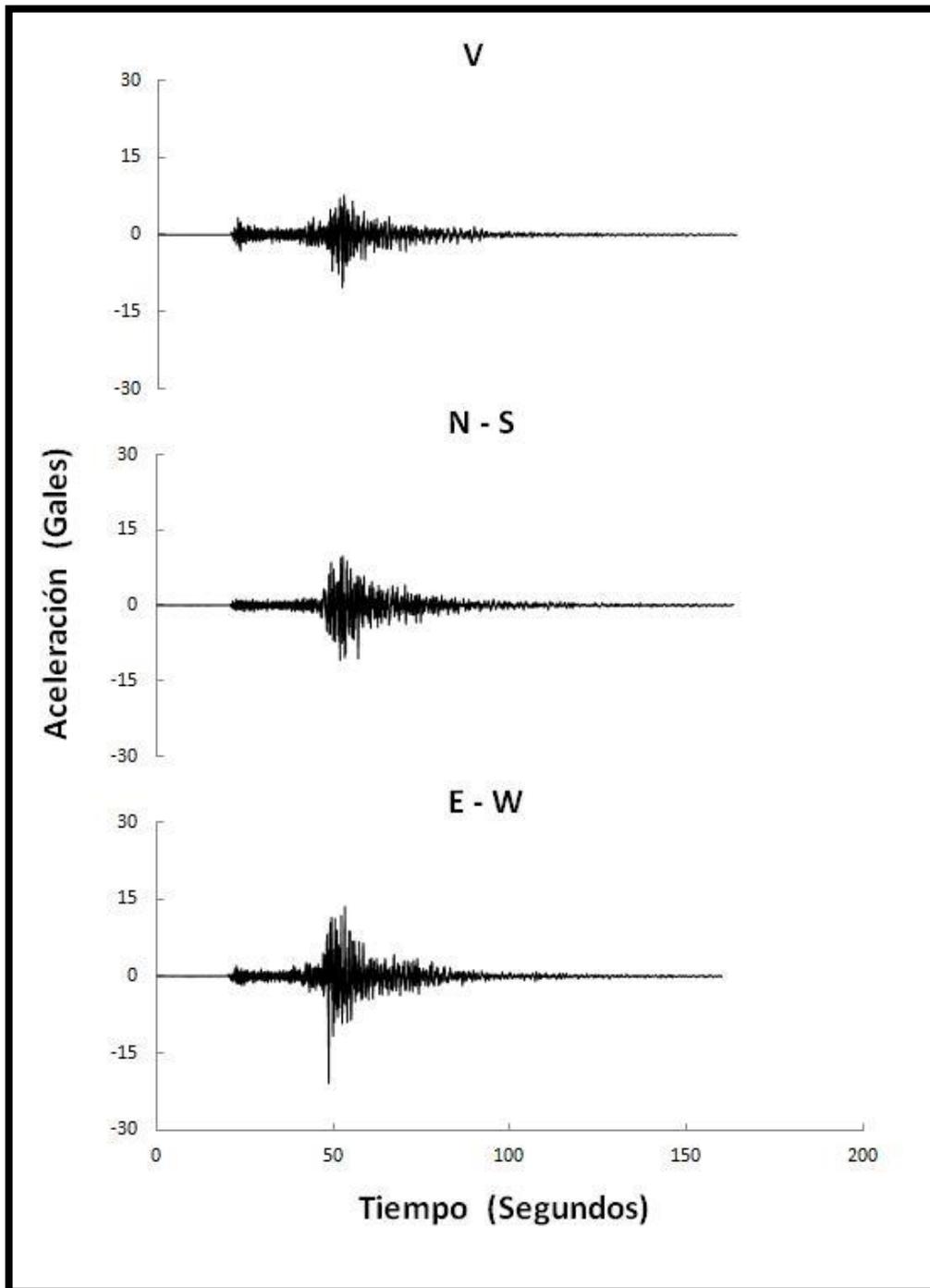


Fig. 39 Registros de aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo del 12 de febrero de 2008).

El sismo del 09 de febrero de 2010 con epicentro en el estado de Oaxaca ($M= 5.8$) tuvo su mayor aceleración en la componente E-W alcanzando los 10.2 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 15 segundos.

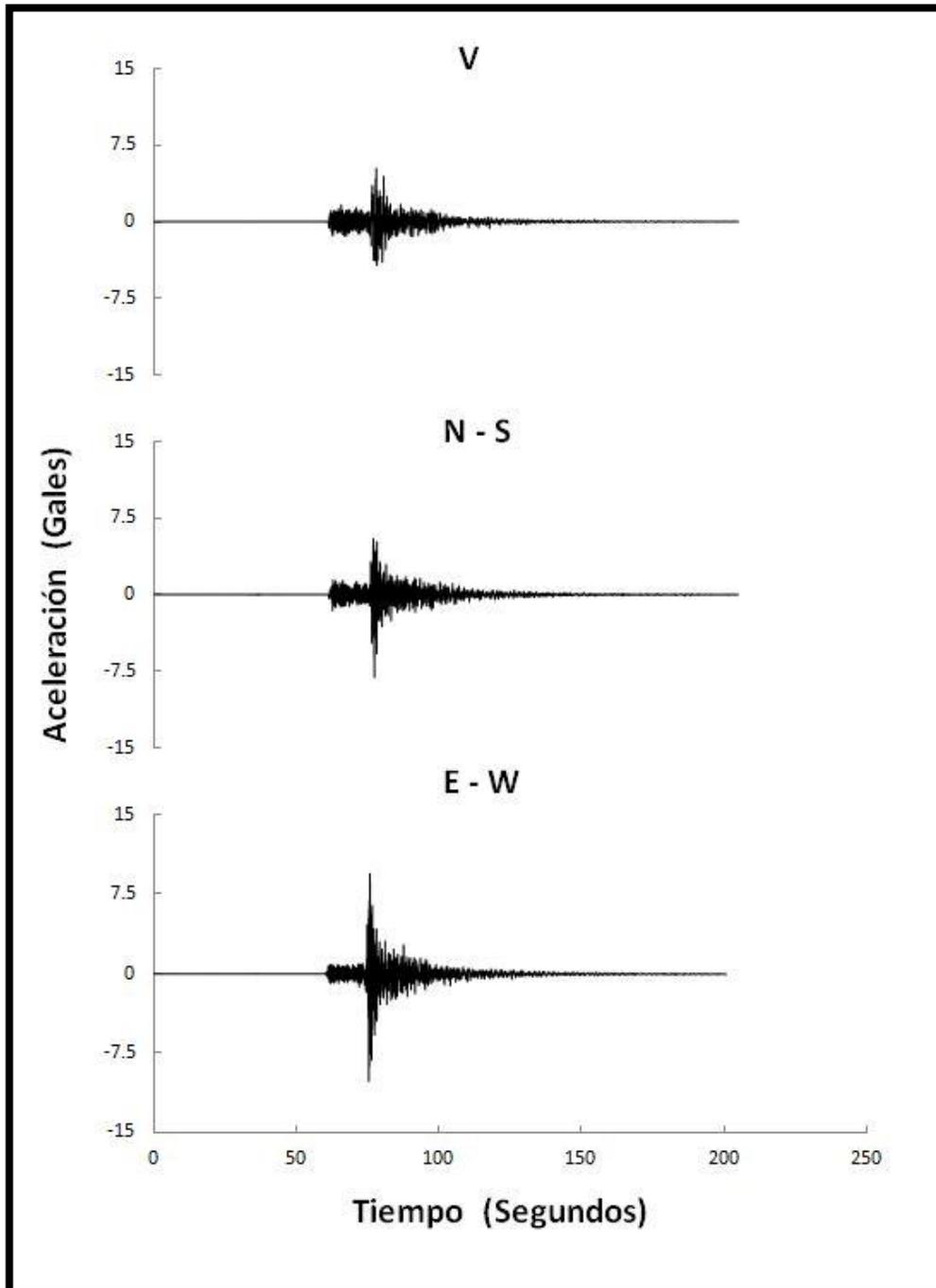


Fig. 40 Registros de aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo del 09 de febrero de 2010).

El sismo del 25 de febrero de 2011 con epicentro en el estado de Oaxaca ($M= 6.0$) tuvo su mayor aceleración en la componente N-S alcanzando los 8 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 10 segundos.

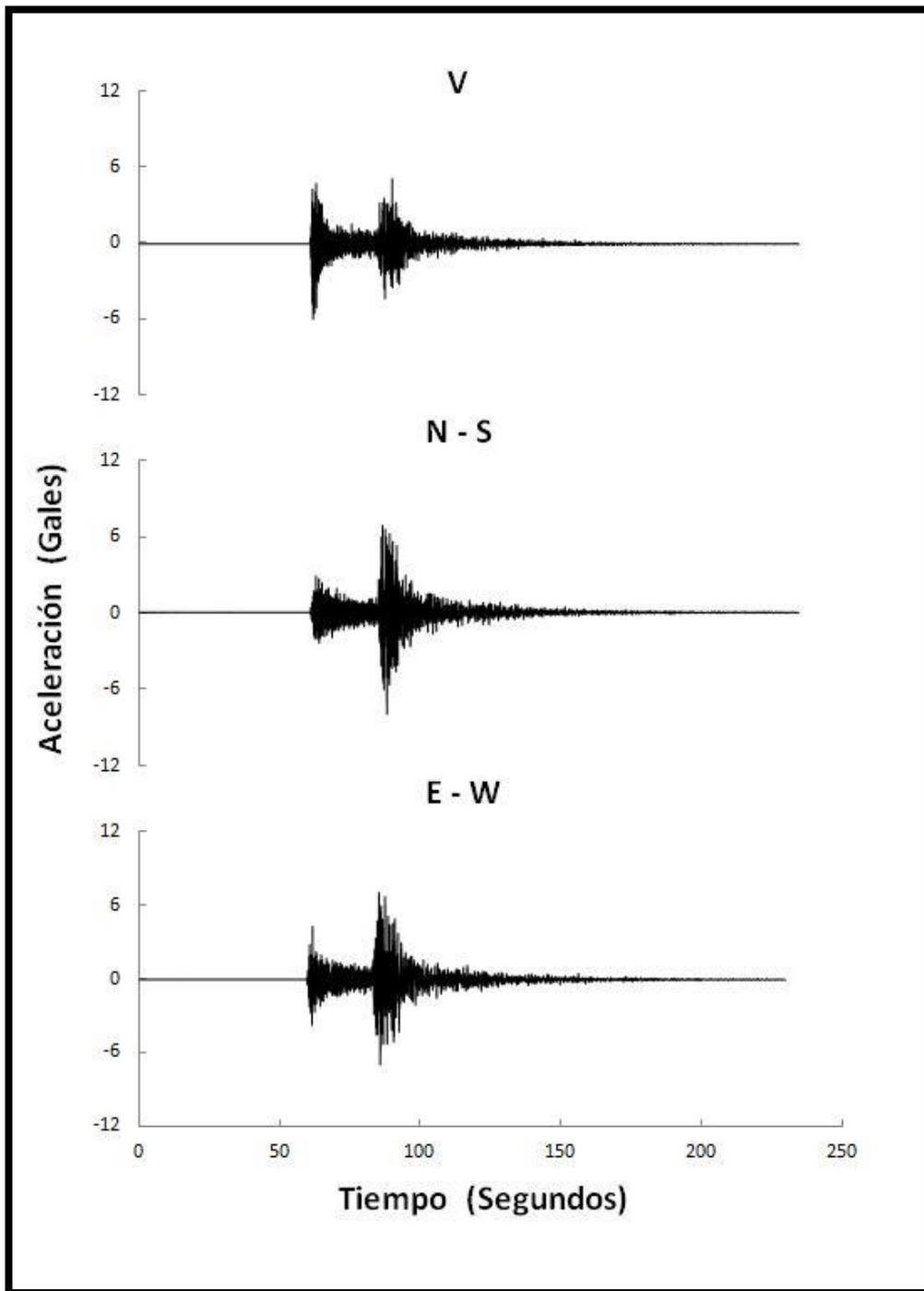


Fig. 41 Registros de aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo del 25 de febrero de 2011).

El sismo del 07 de abril de 2011 con epicentro en el estado de Puebla ($M= 6.7$) tuvo su mayor aceleración en la componente E-W alcanzando los 11 gales (cm/s^2) y contó con una duración aproximada de 1 minuto con 50 segundos.

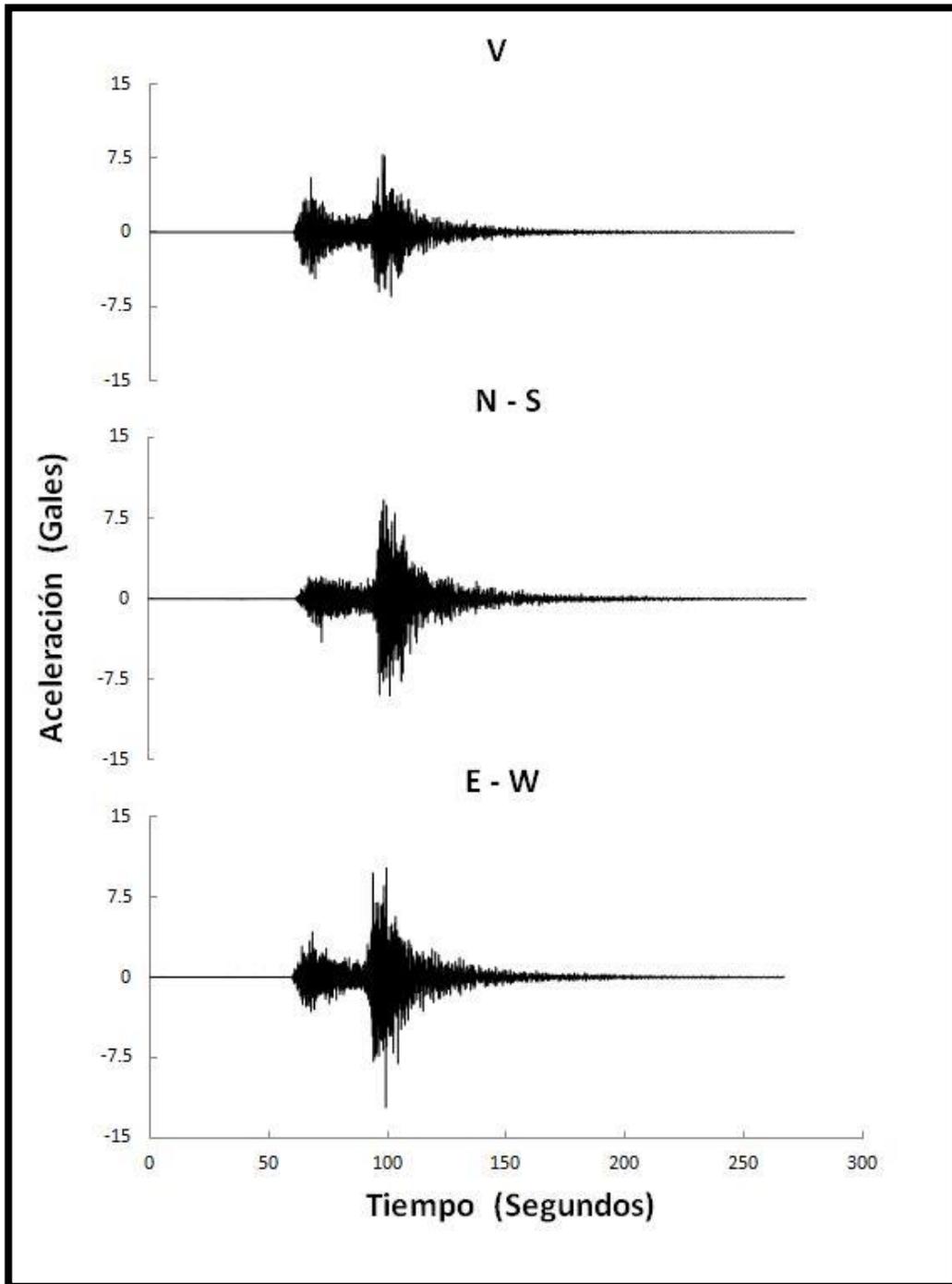


Fig. 42 Registros de aceleración, componentes V, N-S y E-W respectivamente (Sismo del 07 de abril de 2011).

III.2 Espectros de Fourier

Espectros de Fourier de la estación del Servicio Sismológico OXIG

Una vez teniendo los registros de aceleración abiertos en *DEGTRA* se determinan los Espectros de Fourier de cada una de las componentes de los registros, para esto se activa la casilla “**Calcular Espectro de Fourier**” de color rojo que se encuentra en la parte superior de la ventana y automáticamente calcula el EF, posterior a esto se debe guardar el EF de cada una de las componentes ya que el programa no los guarda automáticamente. El resultado final de la ejecución de ésta instrucción en el programa se muestra en la Figura 43.

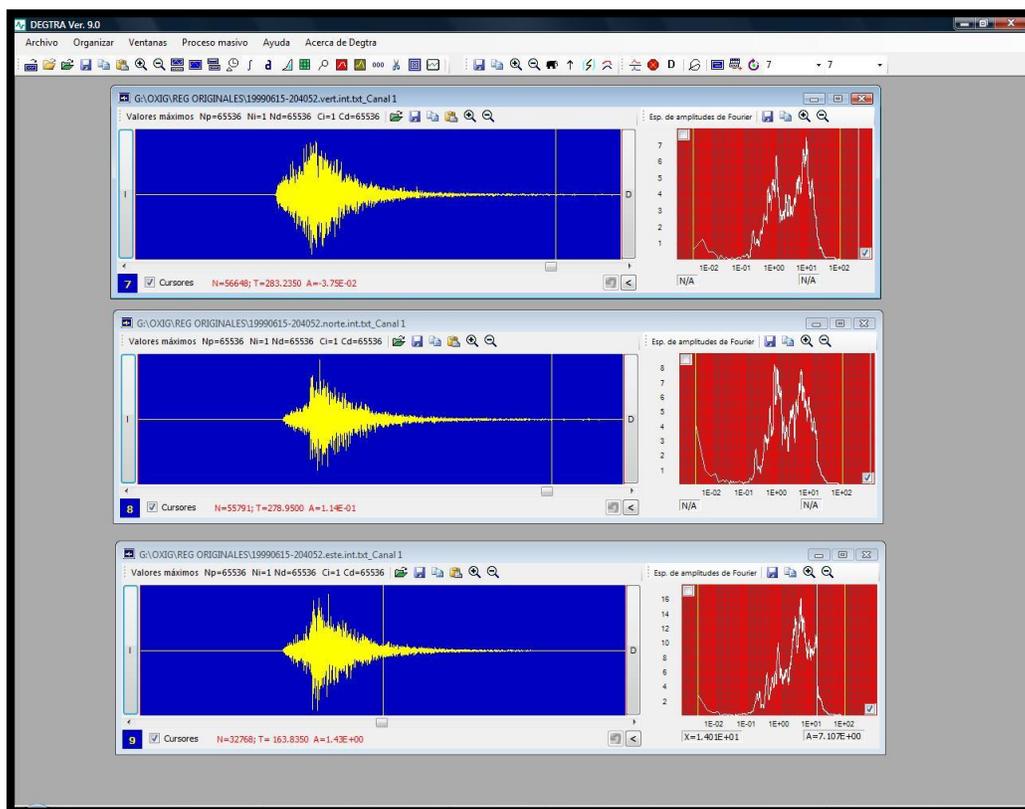


Fig. 43 Ejemplo de EF en *DEGTRA*.

En las figuras 44 a 46 se presentan los EF obtenidos de los 7 diferentes sismos en la estación OXIG con cada una de sus componentes, cabe resaltar los espectros del sismo del 30 de septiembre de 1999 en donde se alcanzó una amplitud de 60 [cm/s] a los 4 Hz; posterior a ese sismo le sigue en importancia el del 07 de abril de 2011, el cual alcanzó una amplitud cercana a los 20 [cm/s] igualmente a los 4 Hz. La frecuencia significativa se estableció a los 0.1 Hz ya que las amplitudes que se presentan anteriores a esa frecuencia no tienen mucha importancia porque el periodo, en el caso de que se llegaran a presentar, sería muy largo.

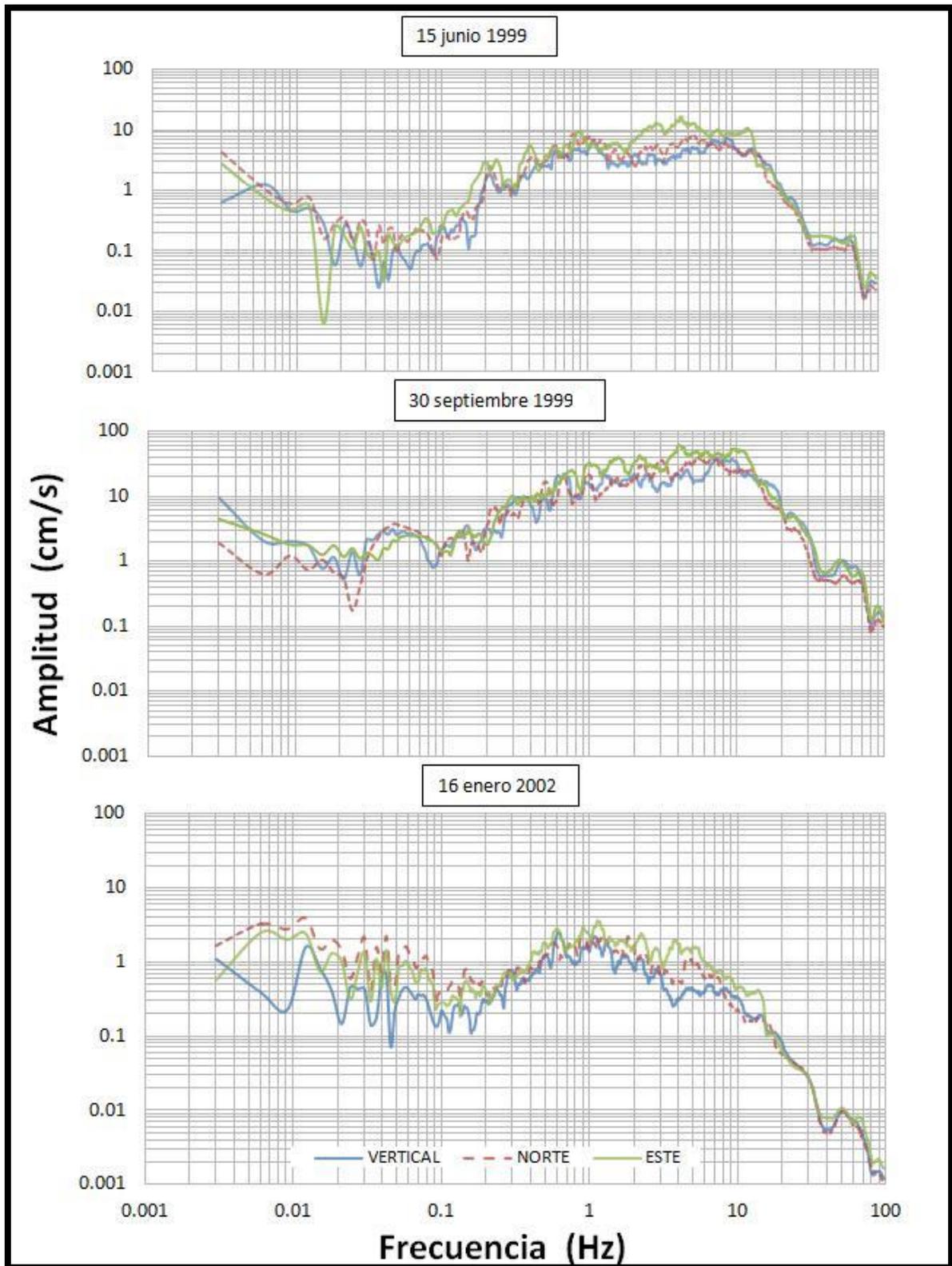


Fig. 44 Espectros de Fourier.

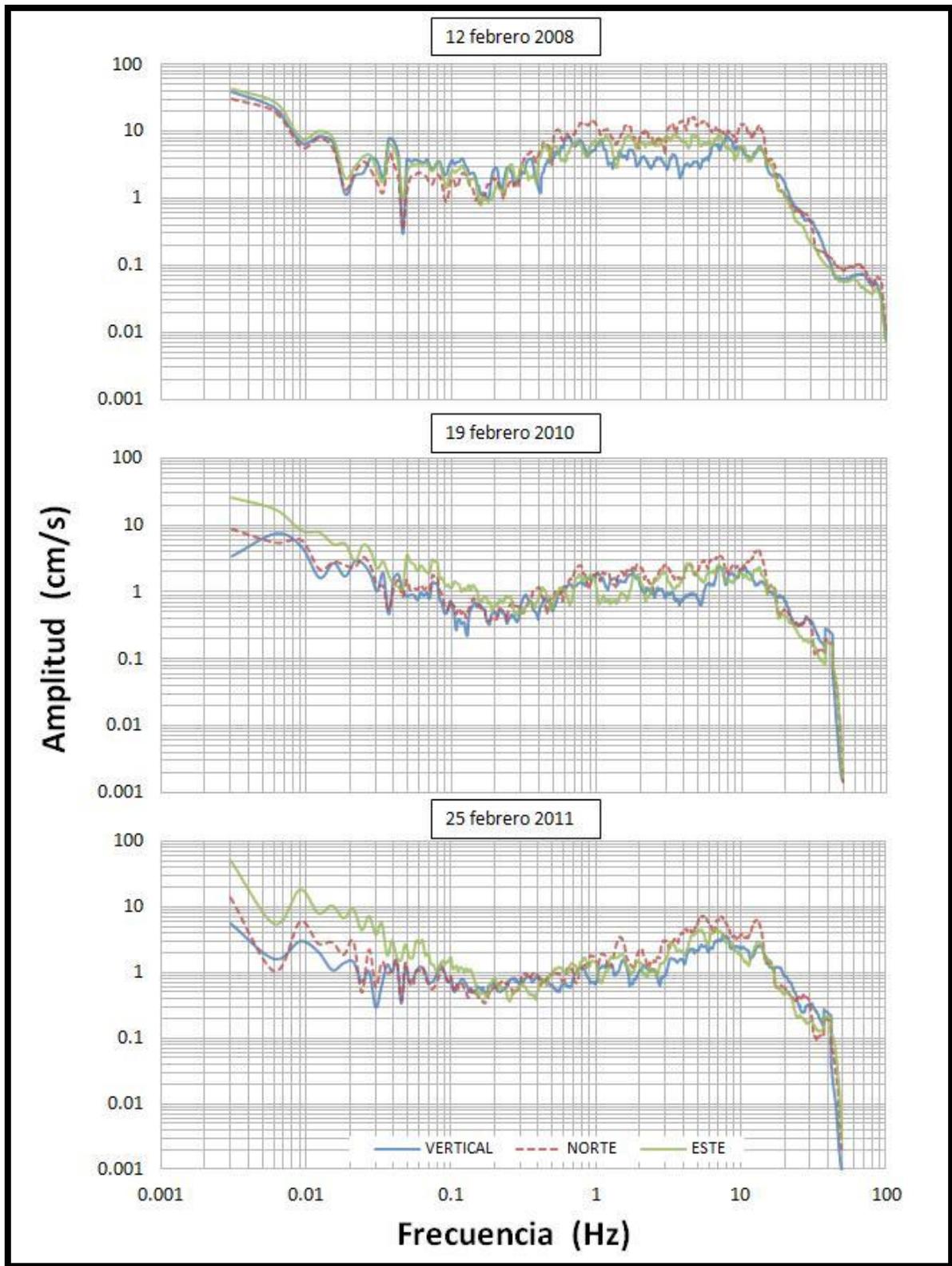


Fig. 45 Espectros de Fourier.

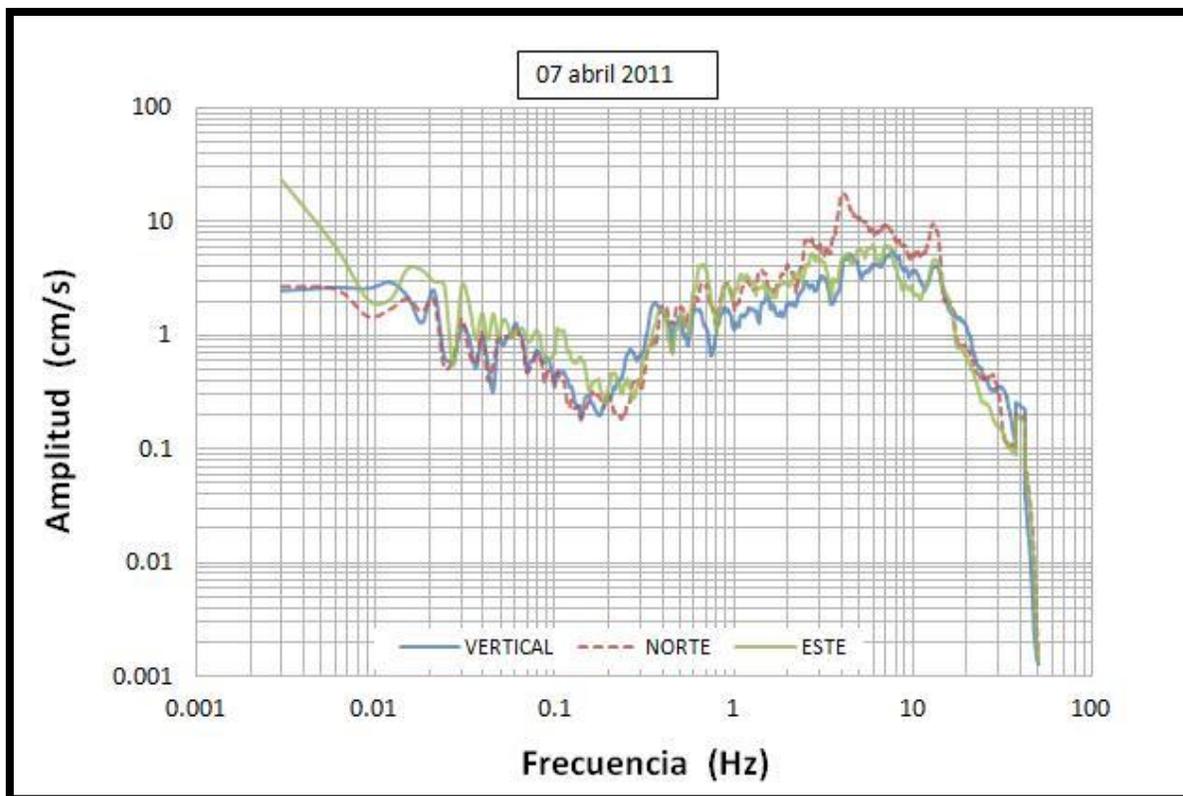


Fig. 46 Espectros de Fourier.

Espectros de Fourier de la estación del Instituto de Ingeniería UNAM OXLC

De igual manera se obtuvieron los EF de esta estación en *DEGTRA*, teniendo abierto el acelerograma, el EF se obtiene mediante la opción “**Calcular el Espectro de Fourier**” que se presenta en la parte superior de la barra de herramientas del programa; una vez obtenido se guarda como un archivo *DEGTRA* para su posterior uso en *Excel*, esta opción de guardado tiene un formato alfa-numérico por lo que se puede abrir con cualquier editor de textos. En la figura 47 se presenta un ejemplo de esta estación abierto en *DEGTRA* con su respectivo EF.

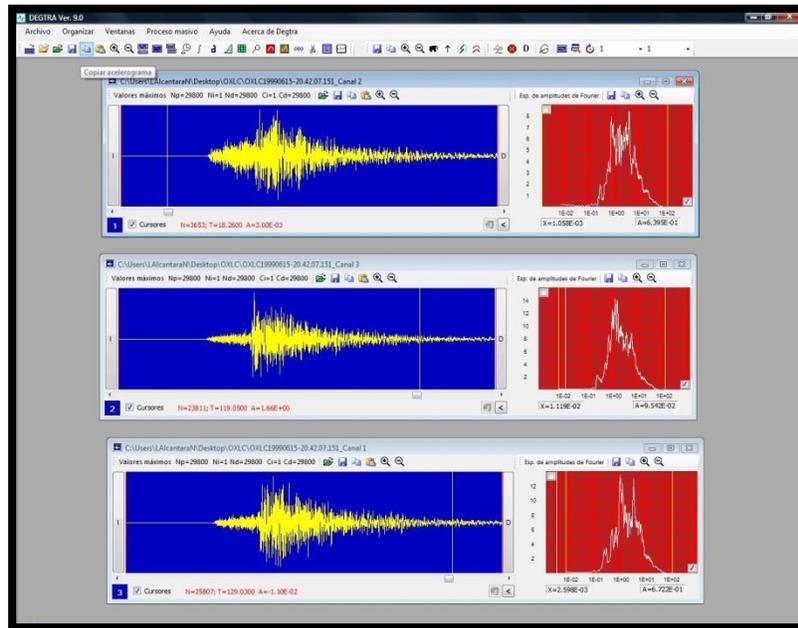


Fig. 47 Obtención de EF de la estación OXLC (Sismo del 15 de junio de 1999 M=7.0).

En las figuras 48 a 50 se presentan los EF obtenidos de los 7 diferentes sismos en la estación OXLC en cada una de sus componentes, de igual manera cabe resaltar los espectros en las tres componentes del sismo del 30 de septiembre de 1999 en donde para la estación OXLC se alcanzó una amplitud cercana a los 50 [cm/s] a los 0.7 Hz; posterior a ese sismo le sigue en importancia el del 12 de febrero de 2008, el cual alcanzó una amplitud cercana a los 20 [cm/s] igualmente a los 4 Hz en la componente E-W. La frecuencia significativa se estableció a los 0.1 Hz ya que las amplitudes anteriores a la misma son producto de errores de equipo de aproximación de cálculo para los fines de estudio en esta tesis.

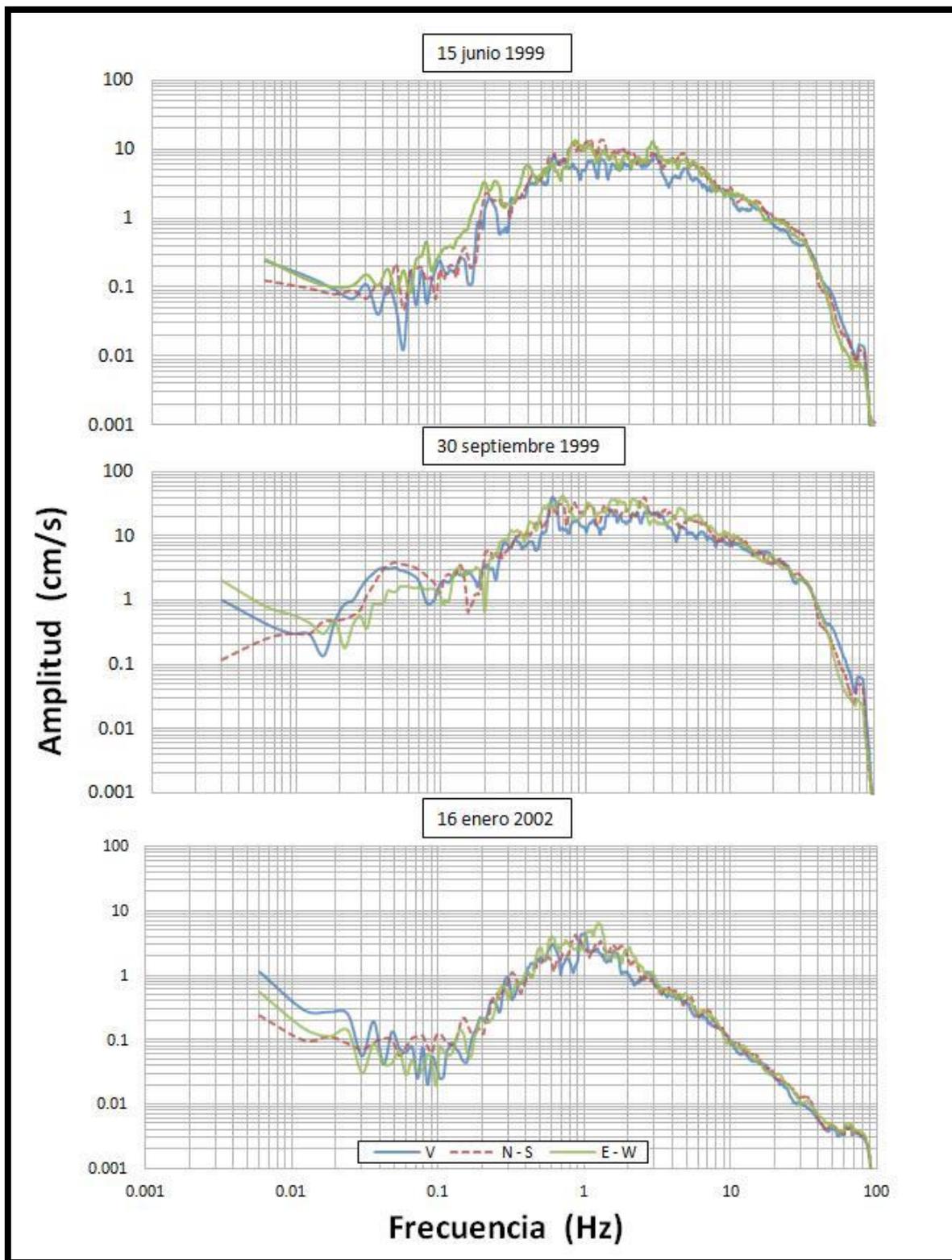


Fig. 48 Espectros de Fourier.

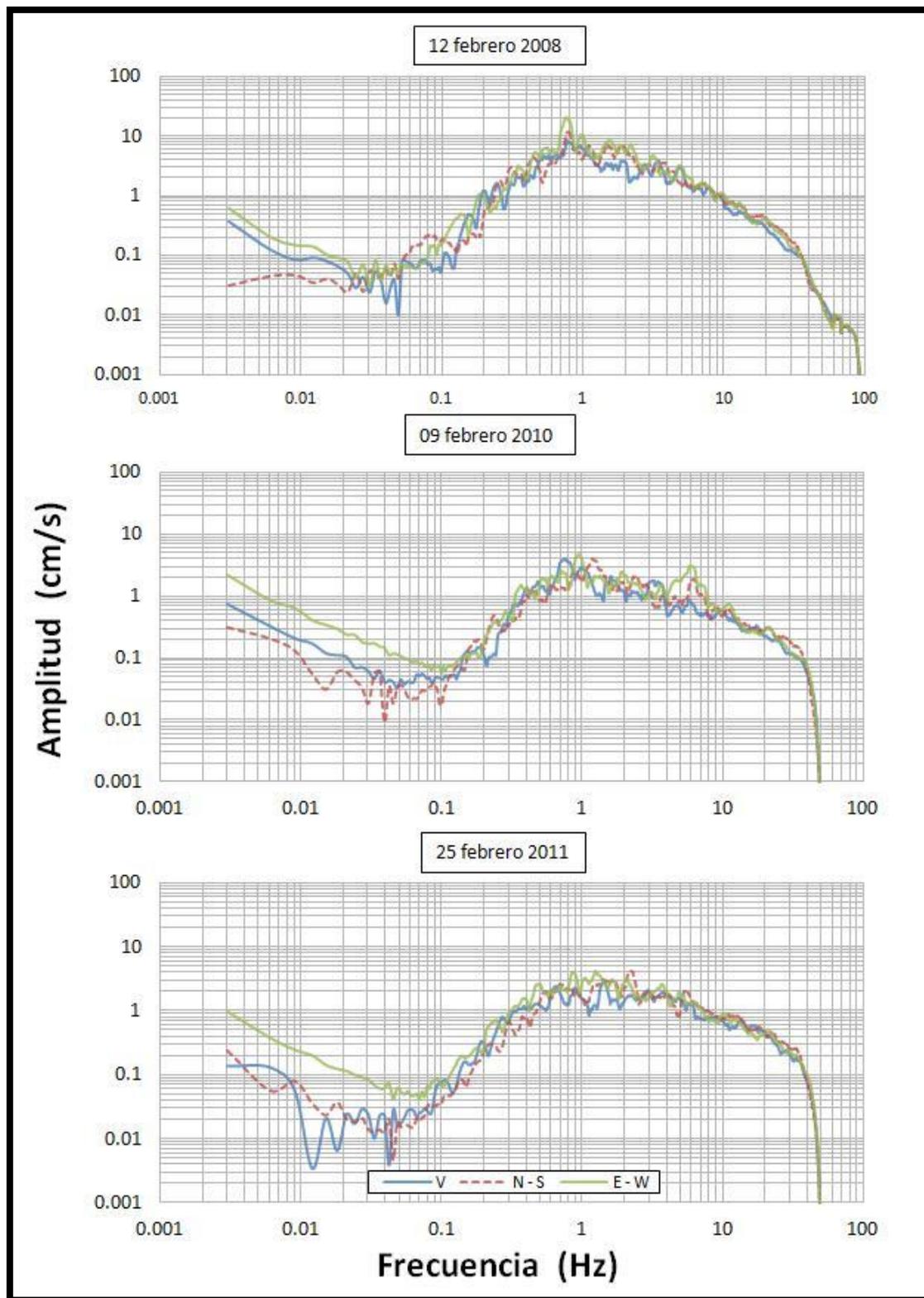


Fig. 49 Espectros de Fourier.

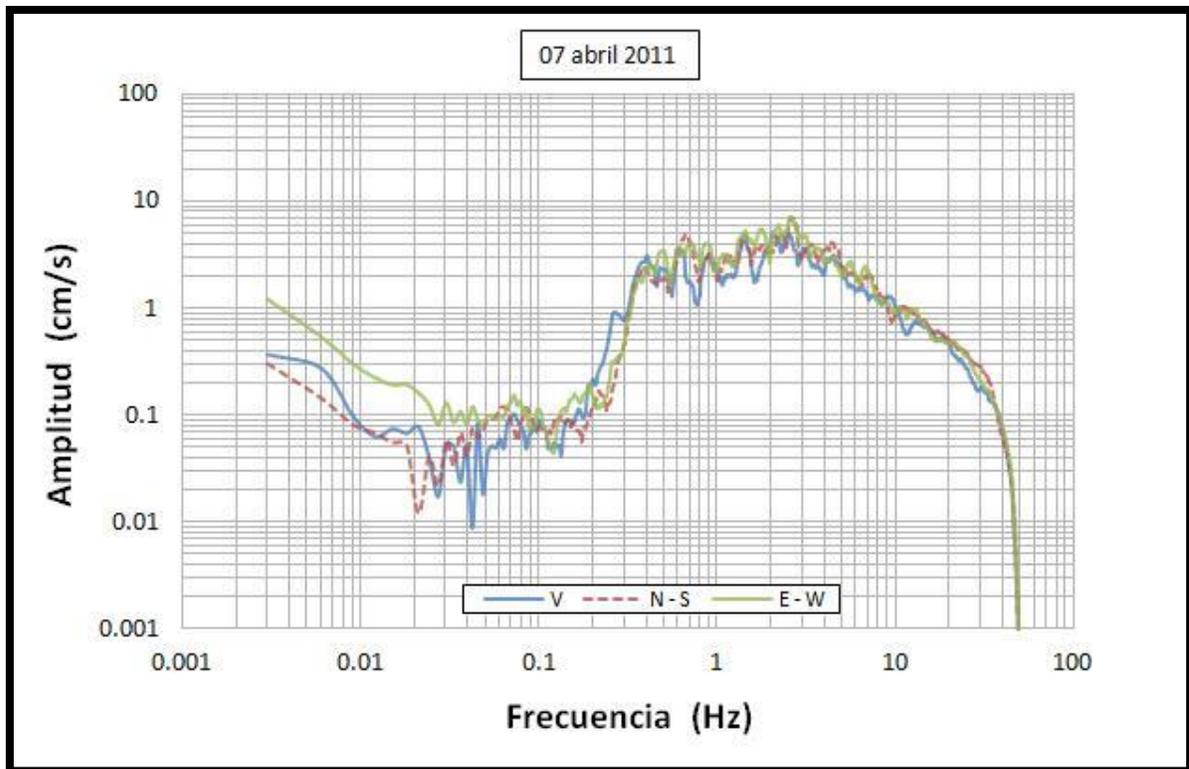


Fig. 50 Espectros de Fourier.

III.3 Análisis y Comparación de las Amplitudes del Movimiento

Efectos de Sitio

Durante la ocurrencia de un movimiento se libera una gran cantidad de energía de deformación, ésta se propaga por el interior de la tierra en forma de ondas sísmicas que se atenúan con la distancia respecto al foco, sin embargo la energía almacenada, en algunos casos en suelo blando, aumenta la duración de la sacudida sísmica y modifica el contenido frecuencial (Ref 53).

Los efectos de sitio son las diferencias en el comportamiento del suelo o de estructuras en diferentes puntos relacionados al mismo movimiento, son provocados por la propagación de las ondas sísmicas, éstas diferencias dependen de la composición del medio por donde se mueven, es decir, durante la ocurrencia de un sismo las ondas llegan a alcanzar diferentes amplitudes de acuerdo a las condiciones geológicas y topográficas de la zona en la que se esté registrando el comportamiento sísmico, también la respuesta del suelo a éste movimiento está muy influenciada por el comportamiento cíclico que presentan las ondas.

En roca, los efectos de sitio suelen ser menores, en éste tipo de suelos la amplificación es impedida por la consolidación del suelo, la geometría de las partículas, las propiedades estáticas y dinámicas del tipo de material rocoso; se ha observado que mientras más duro

o más consolidado esté el suelo, la amplificación de las ondas disminuye considerablemente.

Los efectos de sitio han sido la principal causa de las fallas estructurales, pérdidas económicas y humanas, esto se puede constatar en los sismos de Michoacán (México 1985), y el de Loma Prieta (Estados Unidos 1989) en donde los efectos de sitio fueron importantes en la amplificación de las ondas. En el caso del sismo de Michoacán, la ciudad de México fue la más afectada aún cuando ésta se encuentra a 350 [km] de distancia con Michoacán, se pudieron obtener registros en suelo y en terreno firme; se encontró que en suelo las aceleraciones presentaban un pico de 161.63 [cm/s²] mientras que en terreno firme las aceleraciones fueron de 32.54 [cm/s²].

En el caso de la ciudad de Oaxaca, la estación OXIG instalada en roca, en las faldas del cerro del Fortín, tuvo el objetivo de realizar la localización de los sismos ocurridos en la región sureste del país; sin embargo, los movimientos sísmicos registrados en dicha estación son afectados por el efecto topográfico inherente a la estructura montañosa. Si los registros obtenidos en OXIG quieren ser utilizados para evaluar el efecto de sitio en estaciones del valle de Oaxaca ubicadas sobre diferentes tipos de suelo, el resultado se verá afectado por el efecto topográfico indicado.

Considerando lo antes expresado, el II-UNAM instaló la estación OXLC sobre un afloramiento de roca al sureste del valle de Oaxaca para evaluar de manera más confiable los efectos de sitio presentados en diversos suelos de la ciudad de Oaxaca.

Considerando que existen dos estaciones en roca (OXIG y OXLC) se determinaron las funciones de transferencia empíricas entre estos dos sitios, lo que permite establecer el efecto de topografía en la estación OXIG.

Funciones de Transferencia

Una Función de Transferencia (FT) es un modelo que permite determinar la respuesta de un sistema cuando es sometido a una excitación provocada por la acción de una o varias fuerzas, en lo que compete a esta tesis, sólo se obtuvo la función de transferencia para estimar la amplitud que presentan los registros en las dos estaciones en roca.

La estimación de la FT se logra mediante el cociente de los EF obtenidos en las dos estaciones en cuestión, en el numerador se coloca el espectro de la estación OXIG ya que es la que presenta las mayores aceleraciones y en el denominador el espectro de la estación OXLC. La metodología empleada fue la siguiente:

- 1.- Se abren los registros de aceleración en *DEGTRA* de los que se desee obtener la FT, los registros deben ser de la misma fecha y la FT debe ser componente a componente, es decir, sólo se pueden obtener FT si se trabajan componentes Z-Z, N-S con N-S y E-W con E-W.
- 2.- Se selecciona la opción "**Calcular Espectro de Fourier**" y se le aplica a todos los registros con los que se quiera trabajar para calcular la FT.
- 3.- Una vez obtenidos los EF se selecciona la opción "**Función de Transferencia**", la cual sólo es posible determinar después de rellenar las casillas que se encuentran en el

extremo derecho de la ventana, la primer casilla se deberá rellenar con el espectro que actúe como numerador y la segunda con el que actúe como denominador.

4.- Se guarda nuevamente el archivo de la FT.

En la figura 51 se presenta un ejemplo para el sismo del 15 de junio de 1999 con su respectiva FT (Cociente de Fourier) calculada para la componente vertical con los registros de las estaciones OXIG y OXLC. Éste proceso se hizo para los 7 sismos con los que se trabajó.

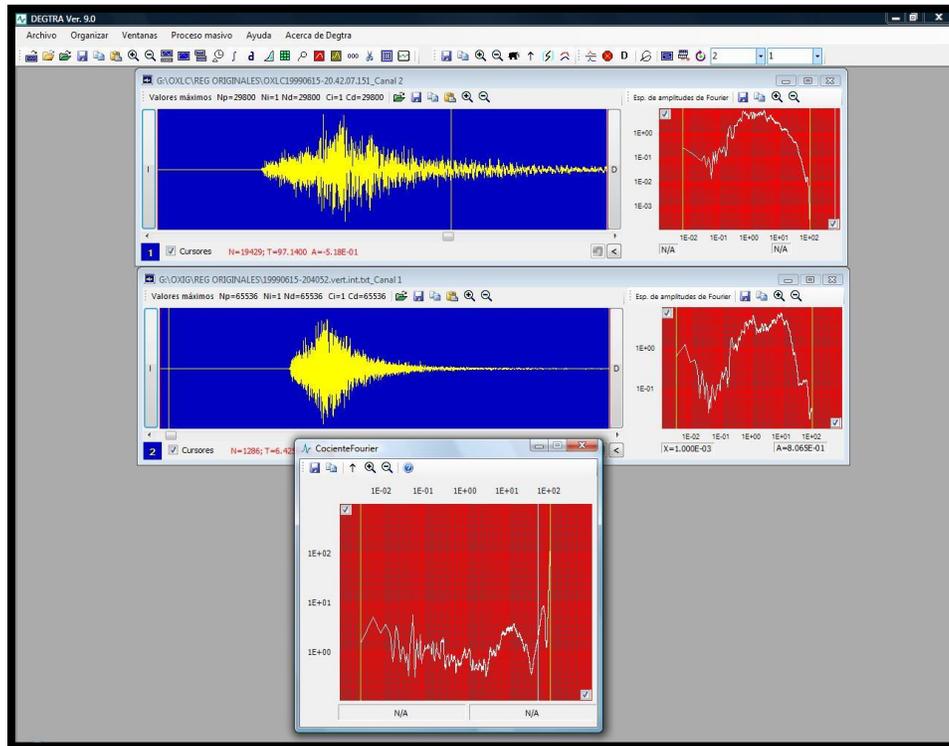


Fig. 51 Función de Transferencia para la componente vertical (Sismos del 15 de junio de 1999 M=7.0).

Para poder realizar el análisis se necesitó graficar por aparte la FT de cada sismo en su respectiva componente (Fig. 52), esto para obtener el rango de frecuencia para la cual se debe aplicar el análisis. El objetivo de éste procedimiento fue desechar las frecuencias muy bajas que por lo general es ruido ambiental registrado en el acelerómetro. En las Funciones de Transferencia se puede observar notablemente que el comportamiento de los siete movimientos analizados es similar; a frecuencias bajas las amplitudes del movimiento son más grandes en la estación OXIG que en la estación OXLC, presentándose las amplitudes más grandes después de 1 Hz. El intervalo de frecuencias seleccionado para las gráficas fue de los 0.1 a los 100 Hz, la línea negra graficada representa la FT Promedio de los sismos en cuestión la cual será usada para el análisis posterior.

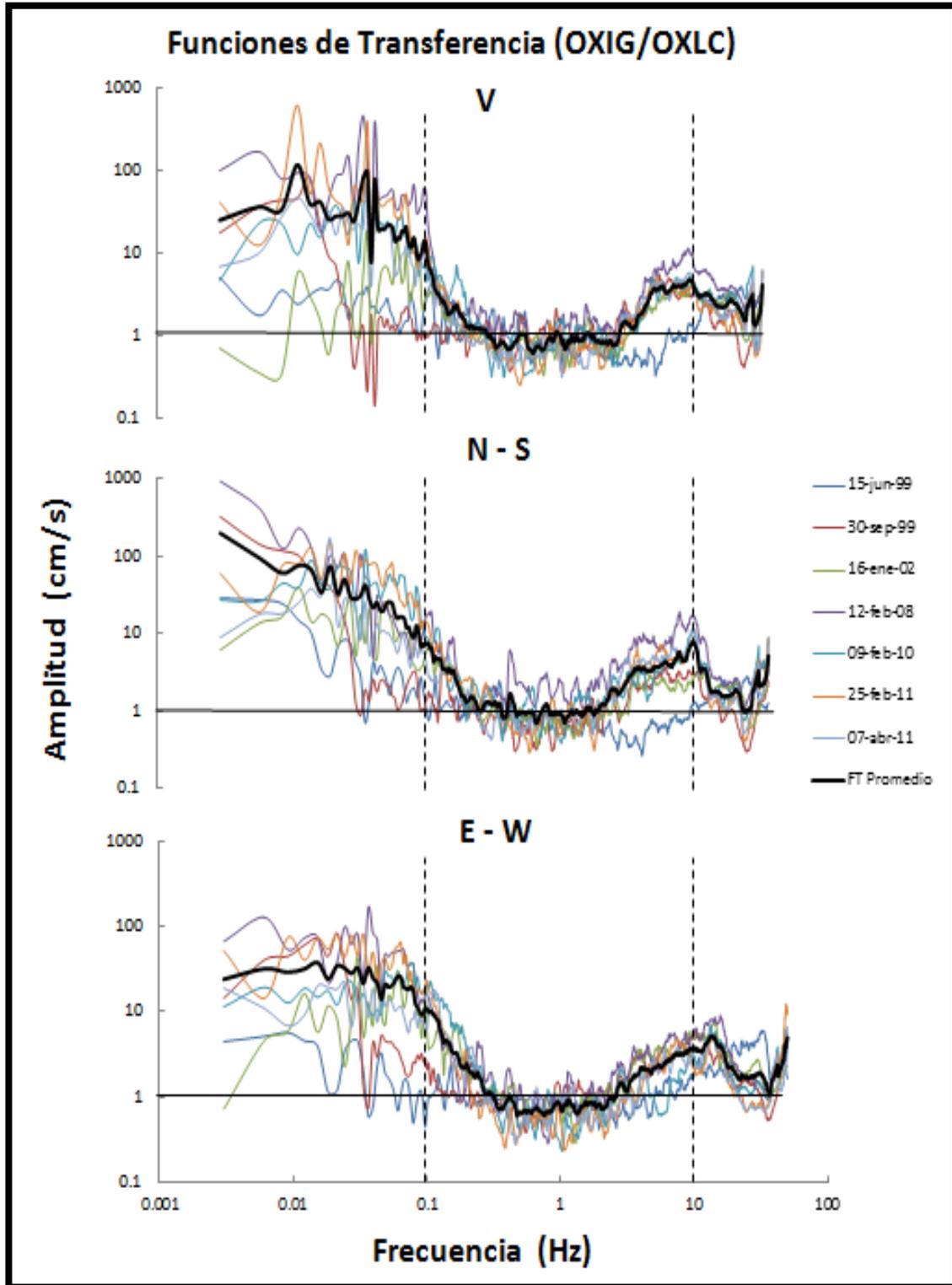


Fig. 52 Funciones de Transferencia de los 7 sismos analizados.

Espectros de Respuesta

El espectro respuesta (ER), como se mencionó en el primer capítulo, sirve para caracterizar los movimientos de un terreno dado bajo la acción de un sismo y poder observar con mayor certeza el efecto que tendrá en las estructuras, los espectros respuesta que se obtuvieron para los sismos que se analizan en esta tesis son los de pseudo-aceleración.

Los espectros respuesta se obtienen a partir de los registros de aceleración, estos sismos son procesados en *DEGTRA* para la obtención de los espectros, la metodología seguida fue la siguiente:

1.- Se abren los archivos del sismo original en *DEGTRA*, por la facilidad de observación se abrieron las tres componentes en la misma ventana, esto por si se necesita cambiar el tiempo de inicio y final, y poder comparar los ER de las tres componentes.

2.- Se selecciona la casilla “**Calcular el Espectro Respuesta**” en la parte superior en la barra de herramientas del programa, el cuál despliega una ventana en donde hay que seleccionar y rellenar algunos campos dependiendo el tipo de ER que se desea obtener.

3.- Se llenan todas las casillas dependiendo del espectro que se quiere estimar, para los sismos analizados en esta tesis se obtuvieron los ER con un **Nt** (Número de puntos) de 500, un **Tmin** (Tiempo mínimo o tiempo inicial) de 0.01 segundos, un **Tmáx** (Tiempo máximo o tiempo final) de 1.5 segundos, en la casilla “**Respuesta**” se selecciona “Pseudo-aceleración” y por último en la casilla “**Comportamiento**” se selecciona el comportamiento elástico, el desarrollo de los pasos anteriores se presenta en la figura 53.

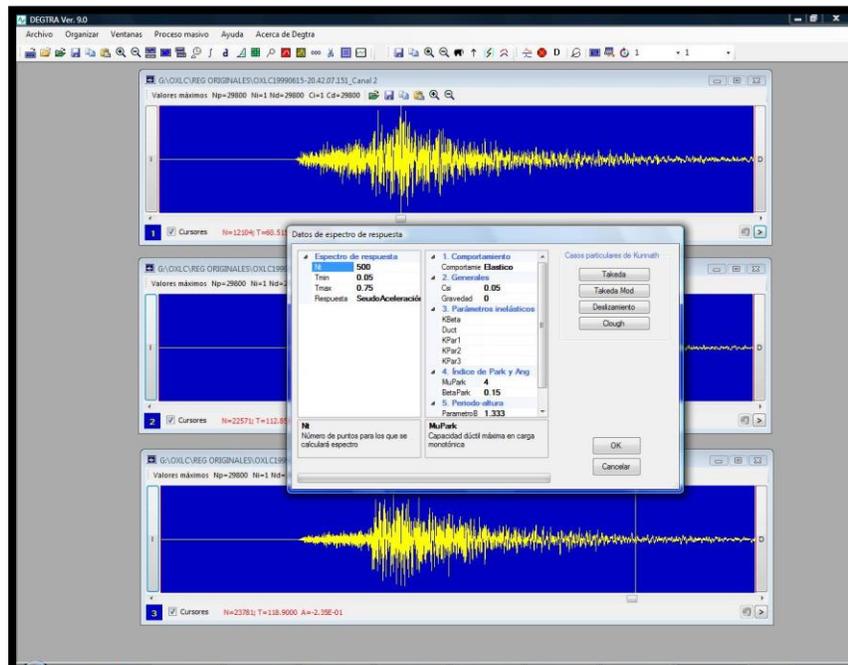


Fig. 53 Obtención de los Espectros Respuesta.

4.- Los ER se obtienen de las tres componentes y se verifica que tengan una buena resolución en cuanto al tiempo, ya que si son intervalos de tiempo muy cortos o muy largos las gráficas pueden verse muy angostas o muy anchas y se pueden perder valores importantes para el análisis, esto se hace a criterio del observador.

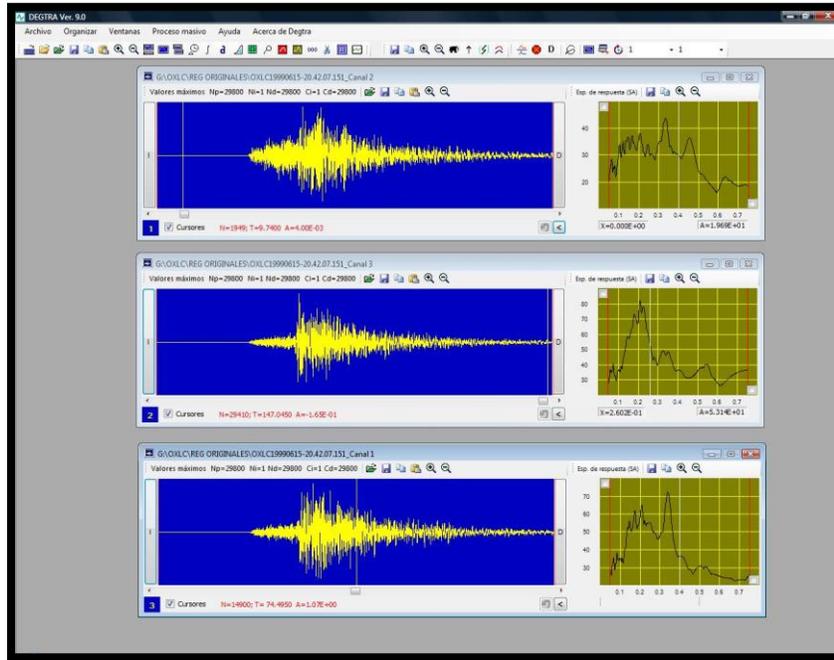


Fig. 54 ER de las tres componentes
(Sismo del 15 de junio de 1999 M=7.0).

En las figuras 55 y 56 se presentan los ER de los 7 sismos que se analizan en esta tesis, mismos que corresponden a cada una de las tres componentes en las dos estaciones. Resalta en importancia el sismo del 30 de septiembre de 1999 en sus tres componentes, alcanzando una aceleración de 650 [cm/s²] como máxima en su componente E-W bajo las condiciones en las que se realizó en análisis en la estación OXIG. En la estación OXLC la máxima aceleración absoluta la presentó, de igual manera, el sismo del 30 de septiembre; alcanzando un valor de 240 [cm/s²].

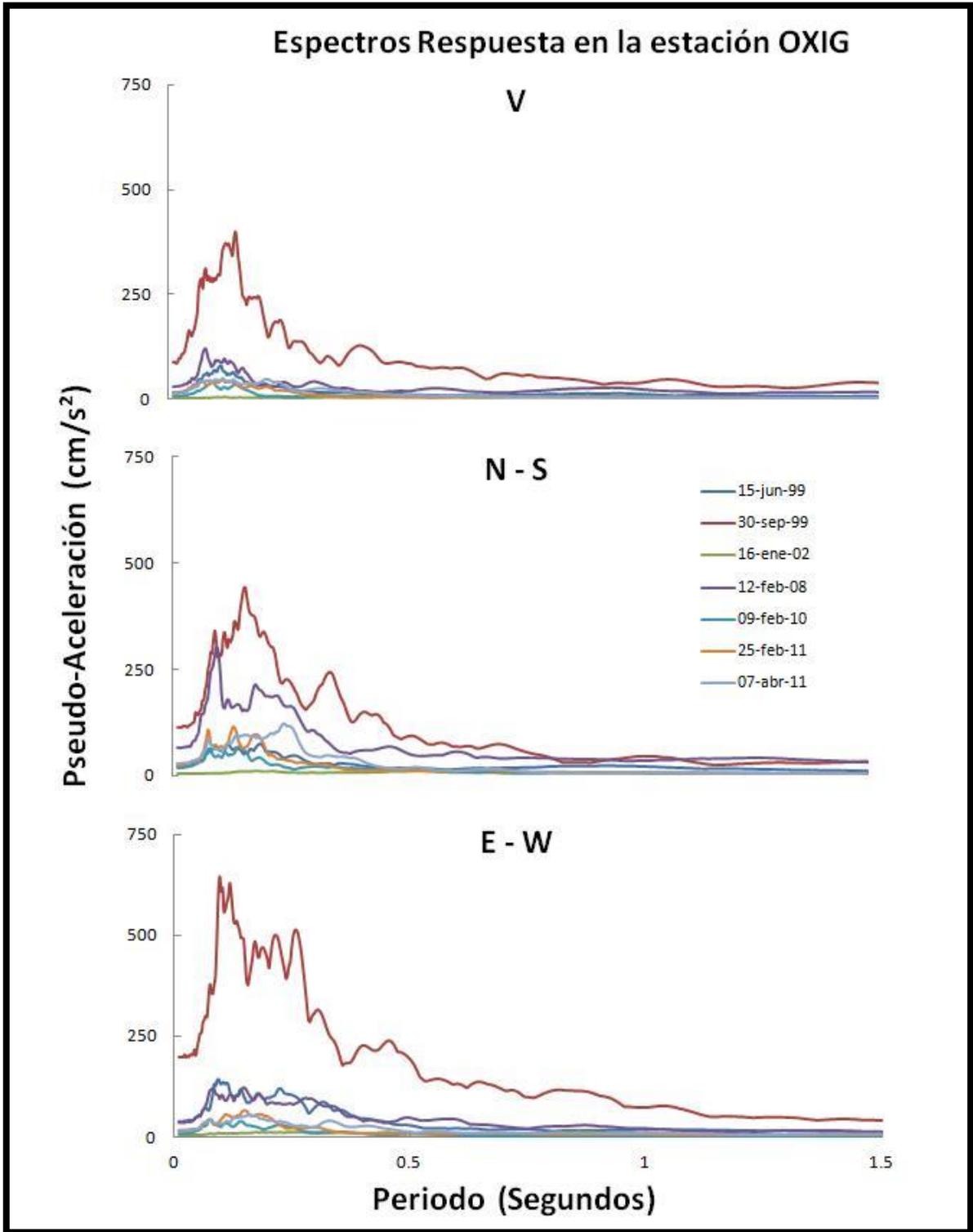


Fig. 55 ER de los sismos registrados en la estación OXIG.

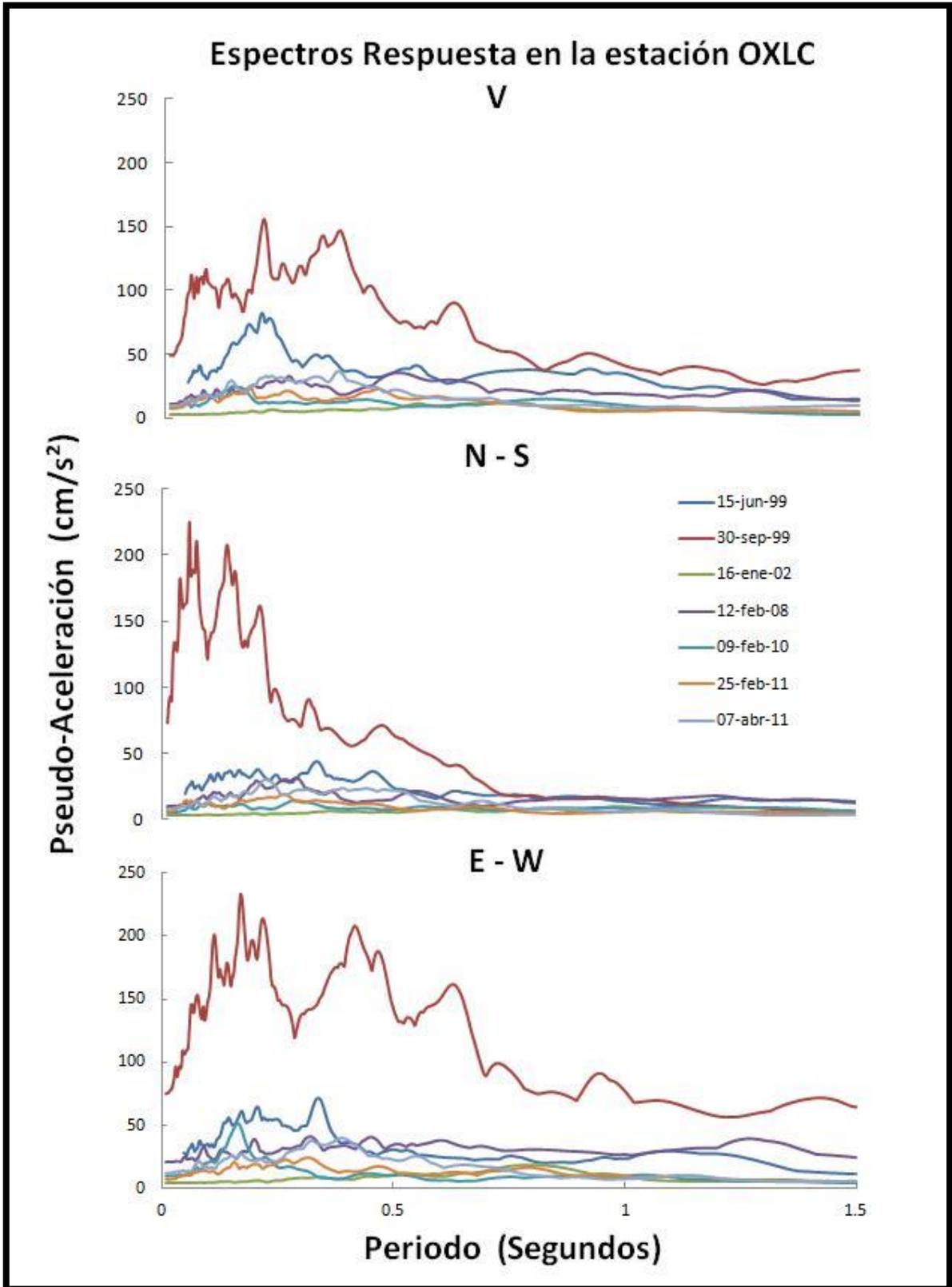


Fig. 56 ER de los sismos registrados en la estación OXLC.

Para los EF obtenidos mediante el análisis en esta tesis se tomaron las frecuencias mayores a 0.1 Hz ya que las frecuencias menores se descartan por no tener un efecto significativo al ser muy pequeñas, los espectros obtenidos presentan un comportamiento esperado ya que ambas estaciones se encuentran en roca. En la comparación de cada espectro en las diferentes estaciones se puede constatar el efecto de la topografía que causa el cerro del Fortín, con mayor relevancia en el sismo del 30 de septiembre de 1999 el cuál presentó las amplitudes más grandes; teniéndose la mayor en la estación OXIG con poco más de 60 [cm/s] a una frecuencia de 4 Hz mientras que en la estación OXLC para el mismo sismo se registró una amplitud máxima de poco más de 40 [cm/s] a 0.7 Hz; de lo anterior podemos observar que cualquier movimiento tiene una amplitud mayor en la estación OXIG a una frecuencia mas grande y por el contrario, una menor a una frecuencia más baja en la estación OXLC.

En el análisis de los ER que corresponden a la estación OXIG (Fig. 55) se observa que los periodos dominantes en la componente vertical se presentan de los 0 a 0.8 segundos, teniendo un valor pico de aceleración absoluta de 400 [cm/s²] en T=0.141 [s] el 30 de septiembre de 1999. En la componente N-S los periodos dominantes están entre 0 y 0.75 segundos alcanzando un valor de aceleración absoluta de 442.5 [cm/s²] en T=0.148 [s] para el mismo sismo. En la componente E-W el periodo dominante comprende de los 0 a 1.0 segundos alcanzando un valor pico de aceleración de 644.9 [cm/s²] en T=0.096 [s] para el sismo de la misma fecha. De los resultados anteriores puede observarse que las aceleraciones espectrales más grandes ocurrieron con el sismo de mayor magnitud (30 de septiembre de 1999) ya que el epicentro fue en la costa del estado de Oaxaca a 137 [km] de distancia de la ciudad; por ende, las aceleraciones arrojadas en ambas estaciones son mayores que las de los otros seis sismos

Para los ER obtenidos de la estación OXLC (Fig. 56) se puede observar que para la componente vertical, el intervalo de periodos en donde se presentan las mayores ordenadas espectrales va de los 0 a los 0.9 segundos y alcanza un valor pico de aceleración absoluta de 155.78 [cm/s²] en T=0.213 [s] para el sismo del 30 de septiembre, en su componente N-S el periodo dominante se encuentra de los 0 a los 0.75 segundos con un valor pico de aceleración de 224.48 [cm/s²] en T=0.057 [s] en el sismo de la misma fecha y para la componente E-W el periodo dominante va de los 0 a los 1.5 segundos con un valor pico de aceleración de 233.79 [cm/s²] en T=0.171 [s] de igual manera para el sismo del 30 de septiembre de 1999.

Para el análisis de las Funciones de Transferencia se tomó en cuenta el intervalo de frecuencias que va de los 0.1 a los 10 Hz, considerando que las frecuencias anteriores al primer valor corresponderían a las amplitudes de un comportamiento muy rígido y las frecuencias posteriores al segundo valor corresponderían a un comportamiento contrario, comportamientos que no se presentan en las diversas estructuras desarrolladas en la construcción, éste rango de frecuencias se encuentran acotadas por las líneas punteadas en la figura 52 para una mejor referencia e interpretación de las FT. Existe también una línea horizontal de color negro en el valor de amplitud igual a 1.0; los valores de amplitud mayores a 1.0 indican que hay un aumento de amplitud en la estación OXIG, mientras que los valores por debajo del valor 1.0 indican que existe una atenuación de las mismas; si los valores de las FT se encuentran cercanos a esa línea indican que las amplitudes en ambas estaciones son casi las mismas.

El análisis que se presenta en los siguientes párrafos se hizo basándose en la FT promedio la cual se obtuvo con un promedio aritmético de los siete sismos en cuestión para estimar un comportamiento empírico y general en la zona con movimientos de esas características y así poder dar conclusiones del análisis realizado.

Para la componente vertical (V) de las Funciones de Transferencia obtenidas (Fig. 52) se observa que para frecuencias bajas, es decir, las que van de 0.1 a 0.3 Hz las amplitudes de movimiento sufren una amplificación en la estación OXIG, posteriormente en el intervalo de frecuencias que va de los 0.3 a los 4 Hz las amplitudes presentan una atenuación que corresponde al incremento de las amplitudes en OXLC entre esos valores de frecuencias; por último, de los 4 a los 10 Hz los valores de amplitud vuelven a tener una amplificación en la estación OXIG.

Para la componente norte (N – S) se presenta una situación similar en las FT, es decir, se presentan las mayores amplitudes en la estación del SSN (OXIG) cuando se tienen frecuencias menores a 1 Hz y por el contrario, presenta un comportamiento similar en ambas estaciones (OXIG y OXLC) cuando se presentan frecuencias que van de los 0.3 a los 3 Hz; de igual manera se presenta una amplificación en OXIG en los valores de amplitud que se encuentran después de los 2 Hz.

En la componente este (E – W) se puede observar que las amplitudes tienen una amplificación antes de los 0.3 Hz en la estación OXIG, pasando esa frecuencia y hasta los 0.3 Hz el comportamiento de las mismas sufre una atenuación hasta los 4 Hz y de nuevo las amplitudes vuelven a ser mayores en la estación OXIG pasando el valor anterior de frecuencia comportándose así hasta los 10 Hz.

IV. Conclusiones

IV. CONCLUSIONES

La ciudad de Oaxaca cuenta con una importante infraestructura para el registro de sismos intensos, sin embargo dicha infraestructura conocida como Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca (RAO) es limitada en cuanto a su cobertura y más aún si se considera el crecimiento urbano que ha venido experimentando el valle de la misma ciudad. Por otra parte, si bien el número de acelerógrafos instalados sobre el terreno es insuficiente, la condición se vuelve aún más crítica debido a la ausencia del monitoreo de las estructuras existentes.

Se logró integrar una base de registros de aceleración de los sismos que han sido registrados en las dos estaciones en roca (OXIG y OXLC). La primera contaba en total con 106 y la segunda con 179; de los acelerogramas de ambas estaciones se lograron descartar los que no estaban en correctas condiciones para estudiarse, quedando en total 61 registros de aceleración comunes en dichas estaciones. Los registros, en ambos casos, presentan condiciones óptimas, destacando los sismos del 15 de junio ($M=7.0$) y 30 de septiembre ($M=7.4$) ocurridos en 1999. Para estos eventos se registraron los valores de aceleración máxima de 37 y 196 gales, respectivamente, en la componente E-W de la estación OXIG.

Los valores de aceleración registrados durante un sismo en dos diferentes sitios del valle de Oaxaca están en función de las características del terreno (topografía, altitud, geología y composición del suelo) lo que origina una variación en los ER y FT obtenidos mediante el análisis anterior. Aunque la distancia que separa a las dos estaciones no es considerable, la diferencia de altitudes presenta un cambio significativo en las amplitudes generadas por los siete sismos tomados en cuenta para el análisis en ambas estaciones.

Considerando la base de datos sísmicos se integró un conjunto de 7 sismos registrados en ambas estaciones. Los eventos son: 15 de junio de 1999 ($M=7.0$), 30 de septiembre de 1999 ($M=7.4$), 16 de enero de 2002 ($M=6.7$), 12 de febrero de 2008 ($M=5.3$), 09 de febrero de 2010 ($M=5.8$), 25 de febrero de 2011 ($M=6.0$) y 07 de abril de 2011 ($M=6.7$). Los acelerogramas correspondientes fueron convertidos a un formato común y se estimaron los Espectros de Fourier, de Respuesta y las Funciones de Transferencia Empíricas.

Del análisis de los acelerogramas en las estaciones OXIG y OXLC se establece que las mayores amplitudes se presentan en el intervalo de frecuencias que va de 0.1 a 10 Hz. El análisis de los resultados confirma que la estación OXIG amplifica significativamente los movimientos debido al efecto de topografía.

Con relación a las Funciones de Transferencia se puede establecer que la estación OXIG en su componente V, en comparación con la estación OXLC, amplifica el movimiento en 10 veces para el intervalo de frecuencias que va de 0.1 a 0.3 Hz; sin embargo en el intervalo de frecuencias de 0.3 a 4 a Hz se presenta una atenuación promedio de 4 veces la amplitud. En la componente N-S se presenta una amplificación en OXIG de 9 veces el movimiento para el intervalo de frecuencias de 0.1 a 0.4 Hz y una atenuación de 3 veces para el intervalo que va de los 0.4 a los 3 Hz. Por último en la componente E-W el movimiento presenta una amplificación 9 veces mayor entre las frecuencias de 0.1 y 0.3 Hz y una atenuación promedio en 4 veces de los 0.3 a los 4 Hz.

V. Referencias

V. REFERENCIAS

1. Estrada L, *Apuntes de Sismología* (2012), Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
2. *Idem* p. 27.
3. *Ibidem*, p. 28.
4. Nava A, *Terremotos* (1987), Fondo de Cultura Económica.
5. USGS (United States Geological Survey), Maps, Imagery and Publications.
6. Nava A, *Op. Cit.* p. 108.
7. *Ibidem* p. 54.
8. Martínez J, *Terremotos y Edificios. Una Historia Común* (2010), Revista Digital Universitaria, vol. 11, No. 1. 10 pp.
9. Estrada L, *Op. Cit.* p. 05.
10. Alcántara L, *La Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM* (2011), Conferencia, Semana de Riesgos Naturales y Antropogénicos.
11. Giner J, Pozo M, Carenas B, Domínguez C, García A, Regadío M, y De Soto I, *Riesgo Sísmico* (2001), Universidad Autónoma de Madrid.
12. Nava A, *Op. Cit.* p 69.
13. Bolt B, *Terremotos* (2008), Editorial Reverté S.A.
14. Nava A, *Op. Cit.* p. 118.
15. Nava A, *Op. Cit.* p. 119.
16. Medina F, *Sismicidad y Volcanismo en México* (2003), La Ciencia Para Todos.
17. Rodríguez F, *Trabajo de Sismología*, (1990) Universidad de Valladolid <www.lpi.tel.uva.es>
18. García V. y Suárez G, *Los Sismos en la Historia de México* (1996), CIESAS.
19. *Idem.* p. 28.
20. *Ibidem.* p. 35.
21. Servicio Sismológico Nacional <www2.ssn.unam.mx>

22. Medrano V, *Análisis del Comportamiento Sísmico en una Zona de Suelos Blandos del Valle de Oaxaca* (2012), Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
23. Lathi P, *Signal, Systems and Communication* (1963), John Wiley and Sons, Inc.
24. Chopra A, *Dynamic of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering* (2007), Pearson Education.
25. *Idem* p. 7.
26. *Ibidem* p. 13.
27. Reyes C, Miranda E, Ordaz M, y Meli R, *Estimación de Espectros de Aceleraciones Correspondientes a Diferentes Periodos de Retorno para las Distintas Zonas Sísmicas de la Ciudad de México* (2002), Universidad Nacional Autónoma de México.
28. *Idem* p. 98.
29. Chopra A, (2007), *Op Cit.* p. 201.
30. Chopra A, (2007), *Op Cit.* p. 204.
31. Alcántara L, *Análisis de Movimientos Sísmicos en las Ciudades de Oaxaca y Puebla con Redes Neuronales* (2013), Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
32. Medrano V, (2012), *Op. Cit.* p. 29.
33. Gobierno del Estado de Oaxaca <www.oaxaca.gob.mx>
34. Alcántara L, (2011), *Op. Cit.*
35. Mena M, de la Fuente M, Morán D, Espíndola J, Nuñez-Cornu F, y Medina F, *Anomalías Gravimétricas y Espesor de Corteza en la Región de Oaxaca, México* (1995) Geofísica Internacional, vol. 34. pp. 79-91.
36. Nuñez-Cornu F y Ponce L, *Zonas Sísmicas de Oaxaca, México: Sismos Máximos y Tiempos de Recurrencia para el periodo 1542 – 1988* (1989), Geofísica Internacional Vol. 28. pp. 587-641.
37. Unidad Estatal de Protección Civil, *Sismicidad en el estado de Oaxaca, 1990 – 2000*, (2000), Gobierno Del Estado de Oaxaca.
38. *Idem* p 22.
39. Nuñez-Cornu F y Ponce L, (1989), *Op. Cit.* p 609.
40. Alcántara L; (2013), *Op. Cit.* p. 06.

41. Alcántara L; (2013), *Op. Cit.* p. 08.
42. Medrano V, (2012), *Op. Cit.* p. 30.
43. Alcántara, L; (2011), *Op. Cit.*
44. Medrano V, (2012) *Op. Cit.* p. 29.
45. Medrano V, (2012) *Op. Cit.* p. 29.
46. Lermo J, Chávez, García F, Urbieto J y Mijares H. *Amplificación relativa en la zona urbana de Oaxaca Contribución a la microzonificación sísmica* (1991), Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Manzanillo.
47. Alcántara L, (2013), *Op. Cit.* p. 25.
48. Figueroa J, *Sismicidad en Oaxaca* (1975), Instituto de Ingeniería UNAM, No. 360.
49. Alcántara L, Ovando E, Almora D, Singh S, González G, Macías M, Posada A, Romo M, Sandoval H, Torres M, Vázquez R, Velásco J, Ayala M, Castro G, Pérez C, Ylizaliturri J, Vázquez E y Ruíz A, *Propagación de las ondas sísmicas de temblores generados en la costa de Oaxaca y los efectos locales producidos en la Ciudad de Puebla, Informe final elaborado para CONACYT* (2002), Instituto de Ingeniería UNAM.
50. Medrano V, *Op. Cit.* p. 30.
51. Servicio Sismológico Nacional <www2.ssn.unam.mx>
52. Manuales para software SAC (*Seismic Analysis Code*), IRIS.
53. Tsiege M y García I, *Propuesta de Clasificación Geotécnica del “Efecto Sitio” (Amplificación Sísmica) de las Formaciones Geológicas de la Región de Murcia* (2006), Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid.