



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“LA AMPLIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO SÍSMICO  
EN EL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE OAXACA”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**I N G E N I E R O C I V I L**

P R E S E N T A

**ALEJANDRO MORA CONTRERAS**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**M. en I. Leonardo Alcántara Nolasco**



México, D. F.

2006

**A mi Madre,** *por su amor incondicional, por haber triunfado en la vida y ser el ejemplo más grande a seguir. Porque sin ella jamás habría llegado hasta aquí, y aunque toda palabra sea insuficiente para expresar mi cariño y gratitud, le dedico este pequeño espacio para darle las gracias y decirle que la quiero, respeto, y por encima de todo, adoro hoy, mañana y siempre.*

**A mi Padre,** *por darme todo siempre y forjar en mí el camino de la honestidad, la nobleza y la sencillez, pues de él emana la grandeza de una persona. A él le expreso también toda mi admiración y cariño.*

**A mis hermanos,** *Rubén y Berenice por todos los años que pasamos juntos, por las risas y diversiones, por las peleas y berrinches, en fin, por haberme enseñado que lo más aburrido del mundo es ser hijo único. A los dos, por ser exitosos y aventurarse a llevar una vida independiente.*

**A toda mi Familia,** *abuelitas, tías, tíos, primas y primos, por su apoyo, amistad y cariño a lo largo de toda mi vida.*

**A Andrés y Mariana,** *por ser más hermanos que amigos, por estar siempre a mi lado, por los innumerables recuerdos lindos que tengo de los hermanitos Urquiaga.*

**A mis amigas y amigos del Herminio Almendros y el IE,** *por su amistad, por crecer juntos y tener tantos recuerdos y anécdotas inolvidables.*

**A Frida, Iván y Xanath,** *por que los mejores amigos, así como las grandes cosas en la vida, siempre llegan cuando menos los esperas.*

**A Paula,** *por su enorme amor, cariño y dedicación sin condiciones. Por todo lo que hemos vivido juntos y lo mucho que nos queda por vivir. Por todo lo que nos falta por hacer y por hacer de nuevo todo aquello que hemos disfrutado.*

***A la Universidad Nacional Autónoma de México, por la formación profesional y personal que generosamente me ha brindado.***

***Al M. en I. Leonardo Alcántara Nolasco, por su paciencia, apoyo y amistad en la realización del presente trabajo y a lo largo de mi participación dentro de la Coordinación de Instrumentación Sísmica.***

# LA AMPLIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO SÍSMICO EN EL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE OAXACA

## INTRODUCCIÓN

a) Fuentes sísmicas en México.....	2
b) Sismicidad en el estado de Oaxaca.....	10
c) Objetivos de la tesis.....	14
d) Contenido.....	14

## I. PROPIEDADES DEL SUELO EN LA CIUDAD DE OAXACA

I.1 Fisiografía del estado de Oaxaca.....	15
I.2 El subsuelo en el valle de Oaxaca.....	19

## II. LA RED ACELEROGRÁFICA DE LA CIUDAD DE OAXACA

II.1 Descripción de la red.....	28
II.2 Localización de nuevos sitios.....	41
II.3 Construcción de las estaciones acelerográficas.....	42

## III. LA AMPLIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO SÍSMICO

III.1 Acelerogramas obtenidos.....	46
III.2 Espectros de Fourier y funciones de transferencia.....	61
III.3 Espectros de Respuesta.....	64
III.4 Análisis de resultados.....	71

## IV. CONCLUSIONES

IV.1 Comentarios y recomendaciones.....	84
---	----

## REFERENCIAS

## **INTRODUCCIÓN**

### **a) Fuentes sísmicas en México**

México es un país que se encuentra amenazado en una gran extensión de su territorio por riesgos de carácter geológico, particularmente de origen sísmico y volcánico. Resulta fácil percatarse de lo anterior al observar la geografía tan accidentada de nuestro país, lo cual es una muestra de la actividad geológica reciente y activa. Uno de los resultados obvios de esta vigorosa deformación geológica son los sismos que se registran en nuestro país

Esta actividad sísmica y volcánica afecta fundamentalmente a las regiones centro y sur de nuestro país, donde curiosamente también se ha dado un creciente aumento y concentración de la población. La conjunción de estos dos fenómenos ha dado pie a que una gran parte de la población y de la infraestructura de nuestra nación se encuentre bajo la amenaza de estos fenómenos naturales. La evaluación del riesgo que representan dichos fenómenos geológicos a la población, y el subsecuente planteamiento de medidas de protección civil, serán más efectivos en la medida en que conozcamos a fondo los fenómenos en cuestión.

La ciencia que estudia los aspectos relacionados con la ocurrencia de temblores de tierra, terremotos o sismos se denomina sismología. Esta es una ciencia joven, ya que la mayor parte de sus métodos e instrumentos de observación fueron desarrollados a lo largo del siglo XX. No obstante, esta disciplina junto con numerosos estudios científicos han contribuido notablemente a un mejor entendimiento acerca de nuestro planeta. Una de las más valiosas aportaciones ha sido justamente la llamada ***Tectónica de Placas***.

En 1620, Sir Francis Bacon advirtió que existían correspondencias muy claras en la forma de las líneas de la costa atlántica de América y la de África Occidental. Con base en esto, en 1912 el científico alemán Alfred Wegener formuló la teoría de la deriva continental; en ella se afirma que, hace 200 millones de años, los continentes actuales integraban un supercontinente denominado *Pangea*. Al moverse

constantemente sobre un supuesto estrato viscoso, llegaron a ocupar su posición actual.

Posteriormente, con base en la teoría elaborada por Wegener y numerosas aportaciones de geólogos y geofísicos, se desarrolló la teoría de la tectónica de placas. En ella se postula que la litosfera no es una capa continua sobre la superficie de la Tierra, sino que se encuentra dividida formando una especie de mosaico de segmentos rígidos, conocidos como placas que se mueven entre sí y cuyos desplazamientos son del orden de unos cuantos centímetros por año (fig. 1). El movimiento relativo entre ellas sólo se logra, si en algunos de los márgenes de las mismas se está creando nueva litosfera, mientras que en otros márgenes algunas de ellas “cabalgan” o se sumergen en otras. Para entender el mecanismo que impulsa las placas, se debe recalcar que la capa sobre la cual se encuentra la litosfera, es decir el manto, se comporta como un fluido. De esta manera, el arrastre de las placas tectónicas es provocado por corrientes convectivas de calor generadas en el interior del manto, que desplazan los fragmentos de litosfera sobre la parte viscosa de éste último. Los movimientos de la corteza terrestre son tan lentos que los pliegues creados pueden ajustarse a estos sin ruptura de las masas de roca. Pero cuando son de naturaleza tal que la fracturan, se produce un rasgo estructural denominado falla geológica.

No hay coincidencia entre los límites de las placas y los continentales; una sola placa puede contener completa o parcialmente continentes y áreas oceánicas. Los límites o márgenes entre las placas pueden ser de tres tipos (fig. 2), considerando que el material se comporta como un cuerpo rígido: divergentes, convergentes y de transformación (o transcurrentes)

El movimiento relativo entre dos placas es divergente cuando estas se alejan o separan una de la otra, lo que produce un hueco en el espacio entre las mismas, por el cual puede ascender material caliente del manto que se solidifica y forma nueva corteza de tipo oceánico. Este movimiento puede dar origen a grandes estructuras como las cordilleras o dorsales oceánicas.

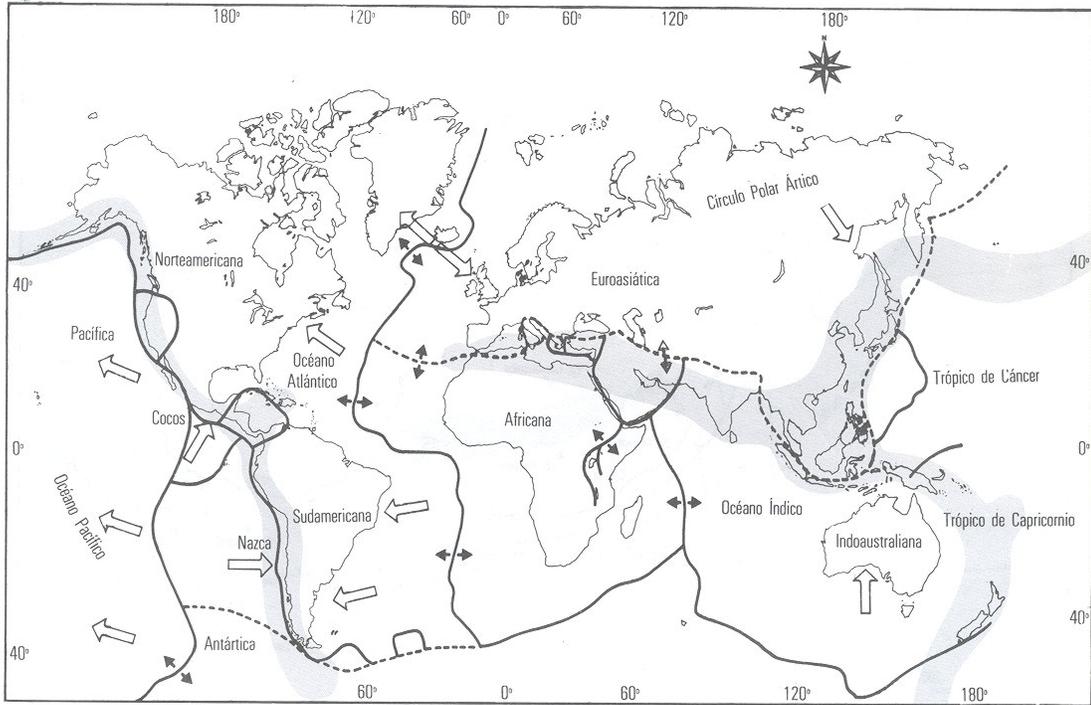


Figura 1. Distribución geográfica de las placas tectónicas en el mundo. (ref. 1)

Como la Tierra no está creciendo, el hecho de que se esté creando nueva corteza implica, necesariamente, que la antigua debe estar siendo destruida de alguna manera. De hecho, esta última está siendo continuamente consumida en las llamadas fosas o trincheras oceánicas, donde el fondo del mar se introduce bajo un continente o bajo otra placa oceánica, regresando al manto. Este proceso es conocido con el nombre de *subducción*, el cual es uno de los dos casos de un margen de tipo convergente; un ejemplo de este caso es la penetración de la placa de Cocos bajo la de Norteamérica. El otro caso que se puede dar es cuando los límites de dos placas chocan entre sí, dando como resultado grandes plegamientos de enormes proporciones; un ejemplo de este último caso es el producido entre las placas Indoaustraliana y Euroasiática, constituyendo la cadena montañosa de los Himalaya.

Cuando el movimiento relativo entre dos placas es tal que se mueven en la misma dirección pero con sentidos diferentes, el contacto o límite entre ellas se produce a lo largo de fallas transcurrentes. Ejemplos de sistemas de fallas transcurrentes muy extensas son la falla de San Andrés, en California, Estados Unidos, y la Alpina, en Nueva Zelanda.

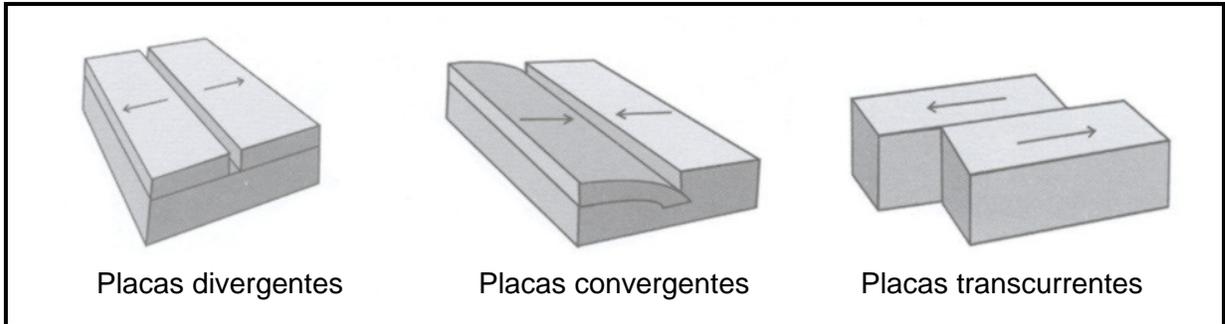


Figura 2. Tipos de límites entre placas (ref. 2)

En los límites entre placas, donde estas hacen contacto, se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una respecto de la otra, generándose tanto esfuerzos como deformaciones en el material que las constituye. De esta manera, se va acumulando energía del tipo elástico, pues si cesaran las fuerzas que obran sobre el material (rocas), también lo harían las deformaciones. Si dichos esfuerzos superan la resistencia de la roca, o se vencen las fuerzas friccionantes, ocurre una ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada, en forma de ondas llamadas sísmicas. Aunque existen otras formas, esta es la manera principal por la cual se generan los sismos, temblores o terremotos. Otras fuentes sísmicas son las de colapso (derrumbes), explosivas (explosiones químicas, nucleares), volcánicas (asociadas a la actividad volcánica) o de impacto (meteoritos).

Podemos definir ahora a un sismo como una perturbación súbita en el interior de la tierra que da origen a vibraciones o movimientos del suelo, producto del fracturamiento de la litosfera como resultado de un proceso gradual de acumulación de energía; generalmente toma sitio a lo largo de una falla o un sistema de fallas preexistentes. Al punto donde comienza la ruptura se le llama hipocentro, y el punto

de la superficie terrestre localizado inmediatamente arriba de él se llama epicentro. Los sismos se consideran someros, si ocurren a una profundidad menor de 60 km; profundos, si ocurren a más de 300 km de profundidad, y en el resto de los casos, de profundidad intermedia (ref. 3).

Como se mencionó, al ocurrir un sismo la energía es liberada en forma de ondas, las cuales pueden ser clasificadas como de cuerpo y superficiales. Con relación a las de cuerpo se pueden mencionar dos tipos, las compresionales y las de cizalla (ref. 4). Las primeras son aquellas que se transmiten cuando las partículas deforman al medio en la dirección de la propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. También son llamadas ondas primarias o simplemente ondas **P**. Son capaces de propagarse a través de materiales sólidos (rocas) y líquidos (el magma y los océanos). El otro tipo de ondas de cuerpo son las llamadas secundarias u ondas **S**, y son aquellas en las cuales las partículas deforman al medio en forma perpendicular a la dirección de propagación. Por esto último, están asociadas con deformaciones del terreno de tipo de cizalla. De estos dos tipos, las ondas P son las que se propagan con mayor velocidad (entre 5 y 11 km/s), mientras que las S son considerablemente más lentas (oscilan entre 0.5 y 4.4 km/s aproximadamente). En las figuras 3 y 4 se ilustran estos dos tipos de ondas.

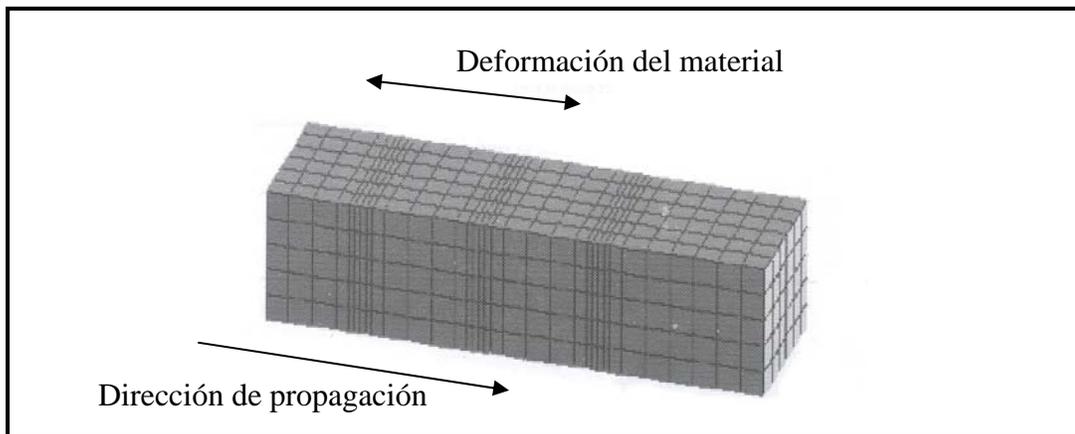


Figura 3. Representación de las ondas compresionales o primarias (P)

Además de las ondas de cuerpo, existen las llamadas ondas superficiales cuya característica principal, como su nombre lo indica, es propagarse por la parte más superficial de la corteza terrestre, su amplitud es máxima en ésta y nula en las grandes profundidades. Se generan por la reflexión y refracción de las ondas de cuerpo al encontrarse medios con diferentes propiedades elásticas. Los dos tipos de ondas superficiales son las de Rayleigh y Love. Las primeras producen movimiento vertical, similar al de las olas marinas. Las segundas deforman las rocas similarmente a las ondas S, aunque únicamente en dirección horizontal. En las figuras 5 y 6 se ilustra la propagación de ambas ondas superficiales.

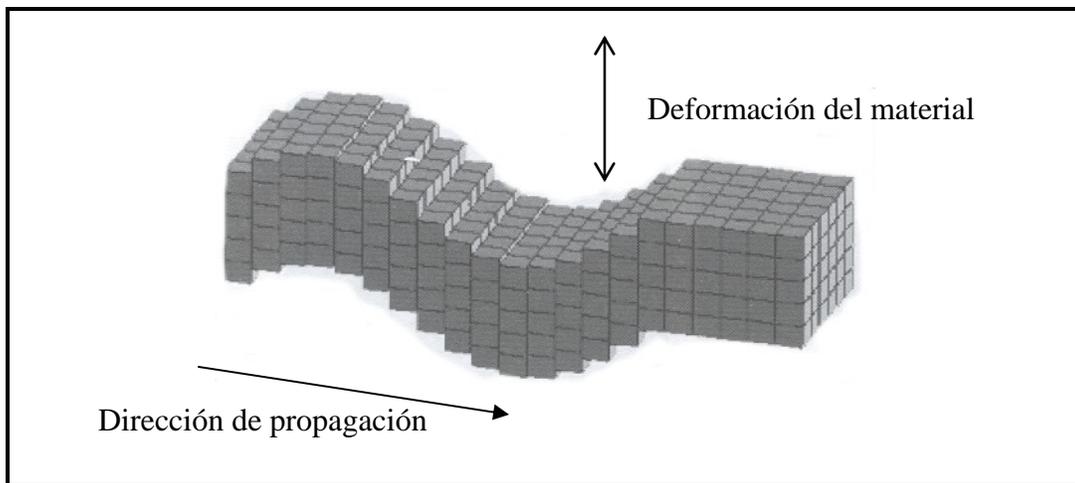


Figura 4. Representación de las ondas de cizalla o secundarias (S)

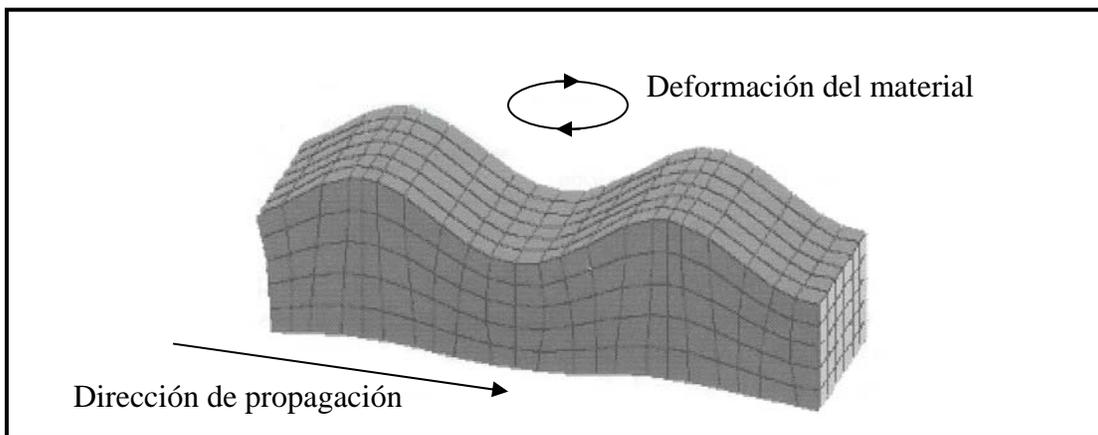


Figura 5. Representación de las ondas tipo Rayleigh

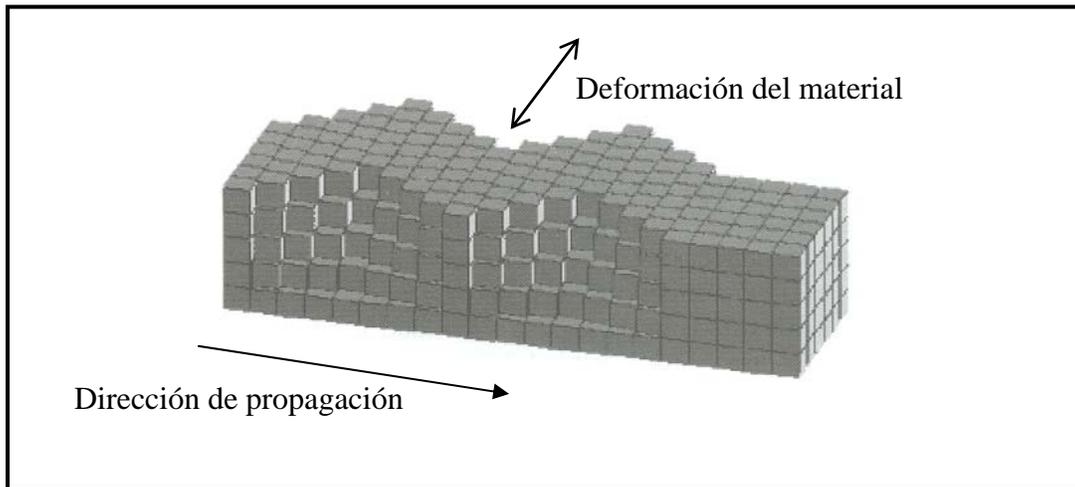


Figura 6. Representación de las ondas tipo Love

México, incluido su mar territorial, está ubicado entre cuatro placas tectónicas (fig. 7): dos muy grandes, la de Norteamérica, que va desde México hasta el Ártico, y la del Pacífico, que abarca parte de México, Estados Unidos y casi todo el Pacífico del norte; una mediana, la placa de Cocos frente a las costas de México y Centroamérica, extendiéndose al sureste hasta Costa Rica; y por último, una placa muy pequeña, la de Rivera, que se localiza en la boca del Golfo de California, y que finaliza en las inmediaciones del estado de Colima.

Existen dos regiones sísmicas que abarcan zonas importantes del país, la primera se ubica en el extremo norte del Golfo de California, donde la placa del Pacífico se mueve horizontalmente hacia el noroeste respecto a la placa Norteamericana, llevando consigo a la península de Baja California. La segunda de estas regiones es la zona de subducción de la costa del Pacífico, en donde las placas de Rivera y Cocos se deslizan bajo la de Norteamérica y producen un alto porcentaje de la actividad sísmica del país. Los sismos de subducción que ocurren sobre la gran falla geológica que marca el contacto entre las placas tectónicas son los más frecuentes y los que presentan las mayores magnitudes, como fue el caso de Jalisco en 1932 ( $M=8.2$ ) y Michoacán en 1985 ( $M=8.5$ ).

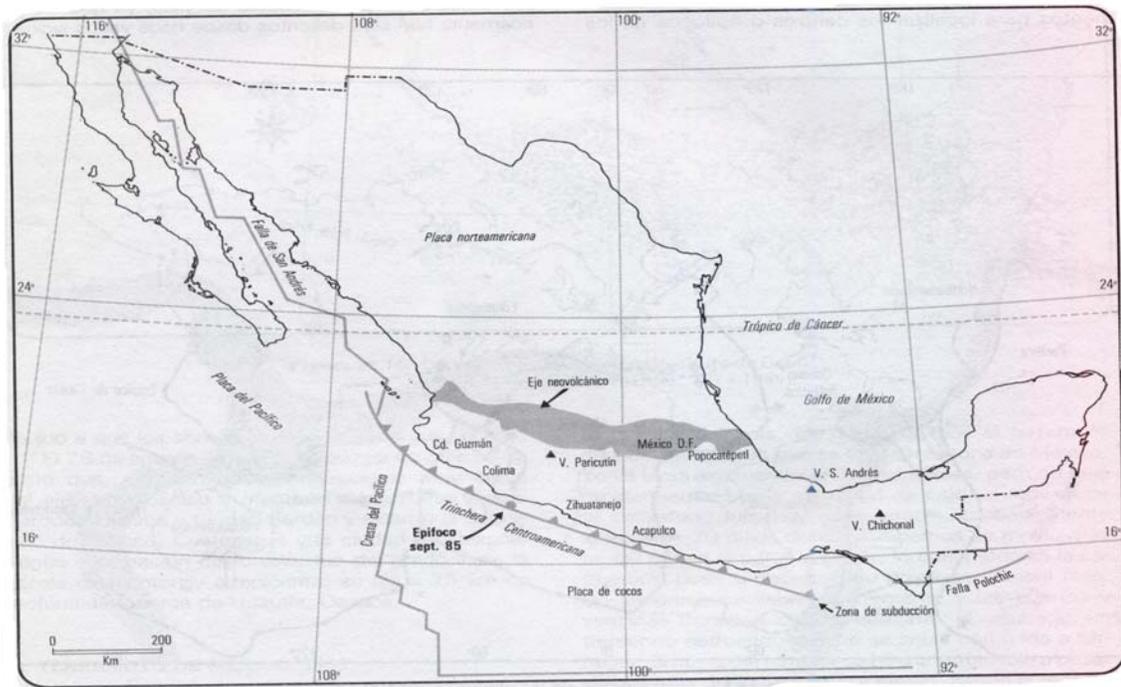


Figura 7. Distribución de las placas tectónicas en México

En la corteza continental del centro de México, ocurren también sismos intraplaca asociados al Eje Volcánico Mexicano, los cuales aparentemente están ligados a los esfuerzos producidos por la inyección de magma en la corteza terrestre, ejemplos de estos son los eventos de Acambay (1912,  $M=7.0$ ) y Orizaba (1973,  $M=7.3$ ).

En México ocurren también sismos en la región del Golfo de México, debido a la deformación compresional de la corteza terrestre por la convergencia de las **placas** de Norteamérica y Cocos.

Es importante señalar que existen segmentos de fallas que en un periodo largo no han sido objeto de un deslizamiento (una zona que ha estado acumulando energía elástica), y por ende de un gran sismo. Las zonas mencionadas reciben el nombre de brechas o vacancias sísmicas, y en México las más importantes son: Tehuantepec ( $94^\circ$  a  $95.2^\circ$  W), Oaxaca Este ( $95.2^\circ$  a  $96.4^\circ$  W), Oaxaca Centro ( $96.4^\circ$  a  $97.3^\circ$  y  $97.3^\circ$  a  $97.7^\circ$  W), Oaxaca Oeste ( $97.7^\circ$  a  $98.2^\circ$  W), Ometepec ( $98.2^\circ$  a  $99.3^\circ$  W), Acapulco-San Marcos ( $99.3^\circ$  a  $100^\circ$  W), Guerrero Centro ( $100^\circ$  a  $101^\circ$  W), Petatlán ( $101^\circ$  a

101.8° W), Michoacán (101.5° a 103° W), Colima (103° a 103.7° y 103.7° a 104.5°) y Jalisco (104.3° a 105.7° W) (ref. 5).

## **b) Sismicidad en el estado de Oaxaca**

La costa del estado de Oaxaca forma parte de la llamada Trinchera Mesoamericana, que se extiende desde la boca del Golfo de California, hasta el extremo sur del país, en Chiapas. En la región de Oaxaca se genera sismicidad por subducción, fallamiento tensional dentro de la placa de Cocos y actividad dentro de la corteza continental no ligada a tectonismo, sin embargo los grandes sismos son causados por la subducción de las placas de Cocos y Norteamérica (aunque no se debe descartar a la de tipo local producto de la deformación de la litosfera generada por rasgos geológicos normales o inversos). En esta región el ángulo de buzamiento de la placa de Cocos es aproximadamente de 14° , la velocidad relativa con respecto a la de Norteamérica es de 6.4 cm/año y su zona de contacto se encuentra a 16 km de profundidad a lo largo de una franja de 80 km (ref. 6).

A profundidades del orden de 40 a 200 km, se producen en el interior de la Placa de Cocos esfuerzos tensionales que están ligados a fallas del tipo normal o inversa (ref. 7) originando sismos, que en lo general, son menos frecuentes y de menor magnitud que los costeros, pero que son muy peligrosos dada su cercanía a grandes núcleos de población. Por su cercanía a éstos últimos han causado graves daños a monumentos históricos y otras obras civiles. Los ejemplos más representativos de este tipo de eventos son los de Oaxaca (1931, M=7.0), Huajuapán de León (1980, M=7.0) y Tehuacán en 1999. En la figura 8 se presenta un corte de la costa de Oaxaca mostrando la placa de Cocos introduciéndose en el sur del país. En ella se pueden diferenciar claramente 3 segmentos: una zona de acoplamiento fuerte, en donde se generan los sismos de subducción; una zona intermedia, que corresponde a sismos de fallamiento normal; finalmente, una última zona en donde se generan sismos asociados al Eje Volcánico Mexicano.

Los principales sistemas de fallas que existen en el estado de Oaxaca (ref. 8) y que producen este tipo de sismicidad son:

**Churumuco- Ometepec.** Cruza los estados de Jalisco, Michoacán y Guerrero y se ubica entre las coordenadas (19.7N, 104.7W) y (16.7N, 98.0W). Presenta una longitud aproximada de 830 km y una profundidad de 25 km. Los sismos generados en esta zona se caracterizan por ser del tipo somero.

**Huacana-Escuintla.** Inicia en la coordenada (19.7N, 103.4W) extendiéndose hasta la coordenada (11.9N, 85.1W), entre los estados de Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Su longitud aproximada es de 2250 km, y se interrumpe en la zona de Tehuantepec. En sus partes norte y sur presenta un ancho que varía entre 80 y 90 km y en el área de Tehuantepec se reduce entre los 30 y 50 km. Los temblores por este sistema de fallas también son del tipo somero.

**Los Azufres-Río Salado.** Se localiza entre las coordenadas (20.1N, 101.0W) y (15.1N, 88.7W), extendiéndose a través de Michoacán, Estado de México, Distrito Federal, Puebla, Oaxaca, Veracruz y Chiapas. Su longitud activa es de 1470 km y se encuentra dividida en varios segmentos de 20 a 60 km. La profundidad máxima, del orden de 200 km, se presenta hacia el norte y decrece en forma considerable en la zona de Tehuantepec con un valor cercano a los 85 km. Se le atribuye la generación de sismos de tipo profundo.

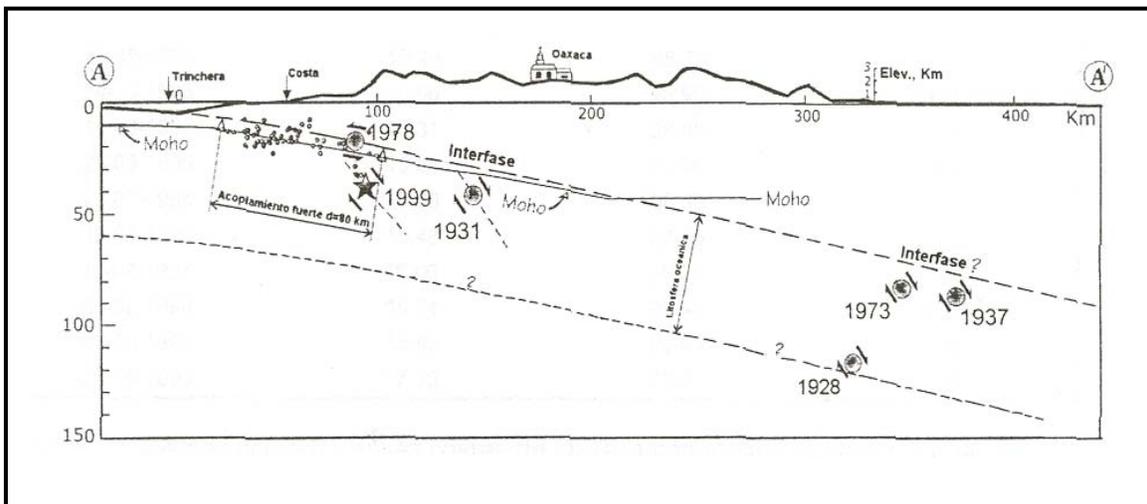


Figura 8. Placa de Cocos introduciéndose por debajo de la parte sur del país (ref. 9)

El estado de Oaxaca se ha dividido en ocho zonas sísmicas (ref. 10):

**Zona 1. Mixteca Media.** Los temblores en esta zona han afectado la frontera de los estados de Guerrero y Oaxaca, sintiéndose con menos intensidad en la costa y Huajuapán, el valle central de Oaxaca y las zonas de Tlapa y Chilapa en Guerrero.

**Zona 2. Huajuapán.** Los temblores en esta zona han causado impacto primordialmente en el noroeste del estado de Oaxaca. Esta zona se caracteriza porque en relación con el epicentro la intensidad es más fuerte en la dirección sur que en la dirección norte

**Zona 3. Norte y Cañada.** Esta zona se caracteriza porque los sismos, en relación con sus epicentros, son más intensos hacia el norte que hacia el sur. Los sismos que han sido estudiados aquí tienen un mecanismo de falla normal y profundidades entre 82 y 95 km. Esta zona es la más extensa y bordea al Eje Volcánico Mexicano.

**Zona 4. Istmo.** Se define esta zona como el área comprendida dentro del estado de Oaxaca, limitada al este por el Istmo de Tehuantepec y al oeste por las zonas 5,6 y7. Existen tan sólo cinco eventos reportados en los últimos 200 años.

**Zona 5. Mixe.** Los temblores en esta zona han causado daños importantes en la ciudad de Oaxaca y el área Mixe. El temblor característico de esta zona es el del 17 de abril de 1928, que tuvo un mecanismo focal de falla normal y una profundidad de 115 km.

**Zona 6. Valle.** Los sismos en esta zona han producido daños en la ciudad de Oaxaca y en la parte sur del Valle de Oaxaca (Miahuatlán, Sola de Vega). El temblor del 15 de enero de 1931, uno de los de mayor impacto, tuvo un mecanismo de falla normal. Es importante señalar que la localización de algunos de los sismos que se ubican en esta zona puede ser ambigua y confundirse con los ocurridos en la zona 5.

**Zona 7. Puerto Escondido.** Las localidades más afectadas en esta región son Puerto Escondido, Pochutla, Puerto Ángel, Huatulco y Loxicha, siendo los temblores más característicos los ocurridos en 1965 y 1978.

**Zona 8. Pinotepa Nacional-Jamiltepec.** Las áreas más afectadas por los temblores de esta zona son Chacahua, Jamiltepec, Pinotepa Nacional y Ometepec. Ejemplos representativos son los eventos ocurridos en 1968 y 1972.

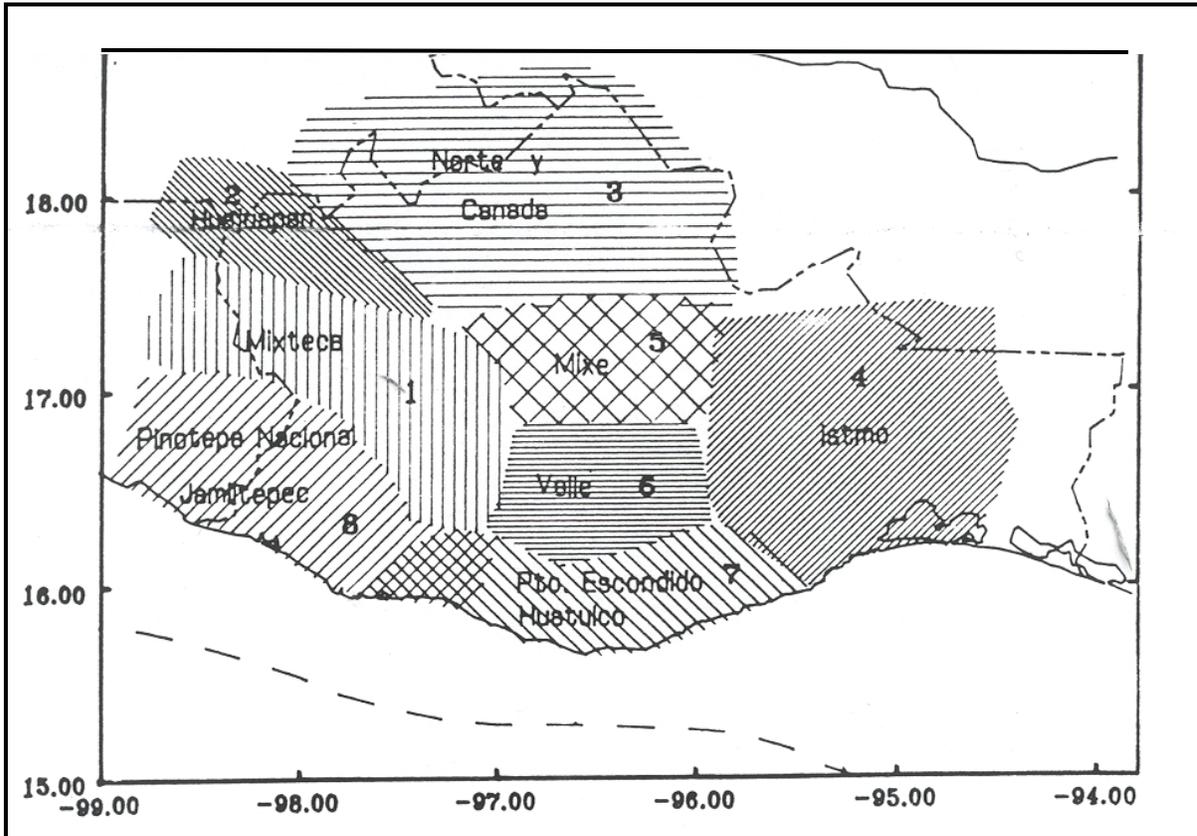


Figura 9. Macrozonificación del estado de Oaxaca

**c) Objetivos de la tesis**

El presente trabajo tiene como principal objetivo establecer algunos de los efectos de amplificación del movimiento sísmico, en diferentes suelos de la ciudad de Oaxaca y sobre los cuales se han instalado equipos de registro sísmico.

**d) Contenido**

En el trabajo se incluye una breve descripción de las principales fuentes sísmicas en México y se hace énfasis en la sismicidad del estado de Oaxaca, además de enunciar los objetivos y contenido de esta tesis. En el primer capítulo se incluyen las propiedades del suelo en la ciudad de Oaxaca, exponiendo un panorama general de la fisiografía en el estado de Oaxaca, y en particular se abunda en las características predominantes en el subsuelo del Valle de Oaxaca. En el segundo capítulo se detalla lo relacionado con la Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca (RAO), señalando las principales detalles de instalación y operación de los equipos en las estaciones que la conforman actualmente. En el capítulo tercero se determina la amplificación del movimiento sísmico en la región, con base en los acelerogramas obtenidos. El análisis se realizó mediante el cálculo de espectros de Fourier y funciones de transferencia, así como la obtención de los espectros de respuesta. Finalmente, se exponen en el capítulo cuarto las conclusiones de esta tesis, junto con los comentarios y recomendaciones pertinentes.

## **I. PROPIEDADES DEL SUELO EN LA CIUDAD DE OAXACA**

### **I.1 Fisiografía en el estado de Oaxaca**

#### **Síntesis geológica del estado de Oaxaca**

La configuración geológica de la entidad es compleja ya que en su territorio afloran diferentes tipos de rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas. En los complejos de rocas metamórficas, se ha podido apreciar que existen diferentes grados y facies de metamorfismo. Las rocas basales de Oaxaca están compuestas por dos complejos metamórficos el Oaxaqueño o basal, que es de edad proterozoica y el Acatlán referido al Paleozoico inferior. También, existe una tercera unidad metamórfica conocida como Complejo Xolapa, de edad controvertida. La secuencia sedimentaria y volcánica tiene un alcance geocronológico que va desde el Paleozoico hasta el Holoceno. De igual manera, se reconocen diferentes épocas de actividad plutónica y volcánica que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cenozoico.

La historia geológica de la región sucedió en el Paleozoico con la formación de rocas que posteriormente fueron metamorfizadas a consecuencia de un movimiento orogénico que se verificó en este periodo. Después de estos fenómenos el mar volvió a invadir estos terrenos en el Triásico hasta el principio del Terciario, periodo en el que se depositaron una serie de rocas como conglomerados, areniscas, lutitas y calizas que posteriormente fueron metamorfizadas durante otro levantamiento orogénico que se verificó en el Terciario. Los únicos depósitos que no presentan evidencia de metamorfismo son las areniscas y lutitas que se encuentran en la porción norte de la ciudad de Oaxaca y que se depositaron a finales del cretácico y principios del terciario. Durante este último a causa del levantamiento orogénico, termina la sedimentación marina y se forman rocas de origen volcánicas como son las tobas andesíticas y los depósitos clásticos continentales depositados por los ríos como consecuencia de la intensa erosión que se verificó en la región. Los últimos acontecimientos geológicos son la sedimentación de los depósitos aluviales cuaternarios en la porción ocupada por los valles.

El territorio oaxaqueño queda comprendido dentro de tres provincias fisiográficas cuyos contornos se muestran en la figura 10. Estas provincias son las siguientes: Sierra Madre del Sur, Llanura Costera del Golfo y Cordillera Centroamericana.

***Provincia Sierra Madre del Sur***

Abarca parte de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, México, Morelos, Puebla, Oaxaca, Veracruz y todo el estado de Guerrero. Está considerada como la más completa y menos conocida del país. Esta provincia se localiza en la parte centro-occidental de la entidad oaxaqueña, desde el centro de la misma hasta las costas del Pacífico y hacia el extremo sudoriental de la Sierra Madre Occidental, que se prolonga hasta el Istmo de Tehuantepec. Las montañas de este sistema y las sierras frontales hacia el mar quedan tan cerca del océano, que prácticamente no existe llanura costera, con excepción de algunas franjas angostas. En algunos lugares los flancos de las sierras que comprenden este sistema son uniformes, excepto en algunos casos en que los picos o cumbres aisladas se levantan sobre el nivel promedio de las cadenas montañosas. El parteaguas de la Sierra Madre del Sur queda comprendido entre los 2000 y los 2200 msnm, sin embargo, existen elevaciones aisladas que alcanzan alturas superiores a 3000 msnm. La subprovincia de las Tierras Altas de Oaxaca se caracteriza por ser un terreno predominantemente montañoso, burdamente dividido por los valles de los ríos Grande y Atoyac, de tal forma que la sierra Mixteca queda en la porción occidental y la sierra de Juárez en la oriental. Existen valles intermontanos como los de Huajuapán y Cañada de Cuicatlán, en los que se desarrollan poblaciones importantes, como las de Putla de Guerrero, Huajuapán de León, Tlaxiaco, Tamazulapán, Yanhuitlán y Nochixtlán, entre otras. También en la porción central del estado se sitúan algunos valles intermontanos conocidos con los nombres de Etlá, Zaachila, Miahuatlán y Tlacolula-Mitla que, en su conjunto, se conocen como Valles Centrales de Oaxaca.

El macizo serrano, que constituye la mayor parte del área, presenta una dirección noroeste-sureste y se encuentra bisectado por profundos cañones que se manifiestan por los ríos Tomellín, Cajones y Salado.

Hacia la porción nororiental se eleva el macizo montañoso de las Sierras Plegadas, conocido como Sierra Madre de Oaxaca, la cual parte desde el Pico de Orizaba, en Veracruz, hasta la región del istmo de Tehuantepec hacia el sureste. Dentro de la

entidad tiene una anchura de 125 km y su altura promedio es de 2500 msnm con elevaciones hasta de 3000 msnm.

La subprovincia de la Cuesta del Sur comprende sierras que alcanzan alturas de 500 a 1850 msnm. A partir de la cota 500, la morfología es de lomeríos y cerros aislados en dirección al mar; las pendientes disminuyen paulatinamente hasta formar una faja costera de amplitud variable, donde se aprecian abanicos aluviales, planicies lacustres y, ocasionalmente, planicies de inundación.

#### ***Provincia Llanura Costera del Golfo***

Esta provincia consiste, principalmente, en una serie de lomeríos en cadena, con pendientes que varían de suaves a fuertes, con rumbos preferenciales de noreste-suroeste y elevaciones hasta de 330 msnm. Esta provincia constituye una franja que se prolonga desde el extremo sudoccidental del estado de Veracruz hacia el Istmo de Tehuantepec.

#### ***Provincia Cordillera Centroamericana***

Esta provincia abarca mayor territorio en los países septentrionales de la América Central, pero tiene una importante extensión en México. La topografía de esta provincia consiste en montañas alineadas en dirección este-oeste, como la sierra Atravesada en la parte nororiental; algunas elevaciones tienen rumbo noroeste-sureste, como la sierra Mixe y la sierra de Soconusco. La altura promedio de la zona es aproximadamente de 1500 msnm; la mayor elevación es de 2850 m (cerro Piedra Larga, localizado al noroeste de Magdalena Tequisistlán). En la región de Matías Romero se desarrollan algunos valles intermontanos. Esta provincia comprende las subprovincias Sierra Norte de Chiapas y la Llanura del Istmo.

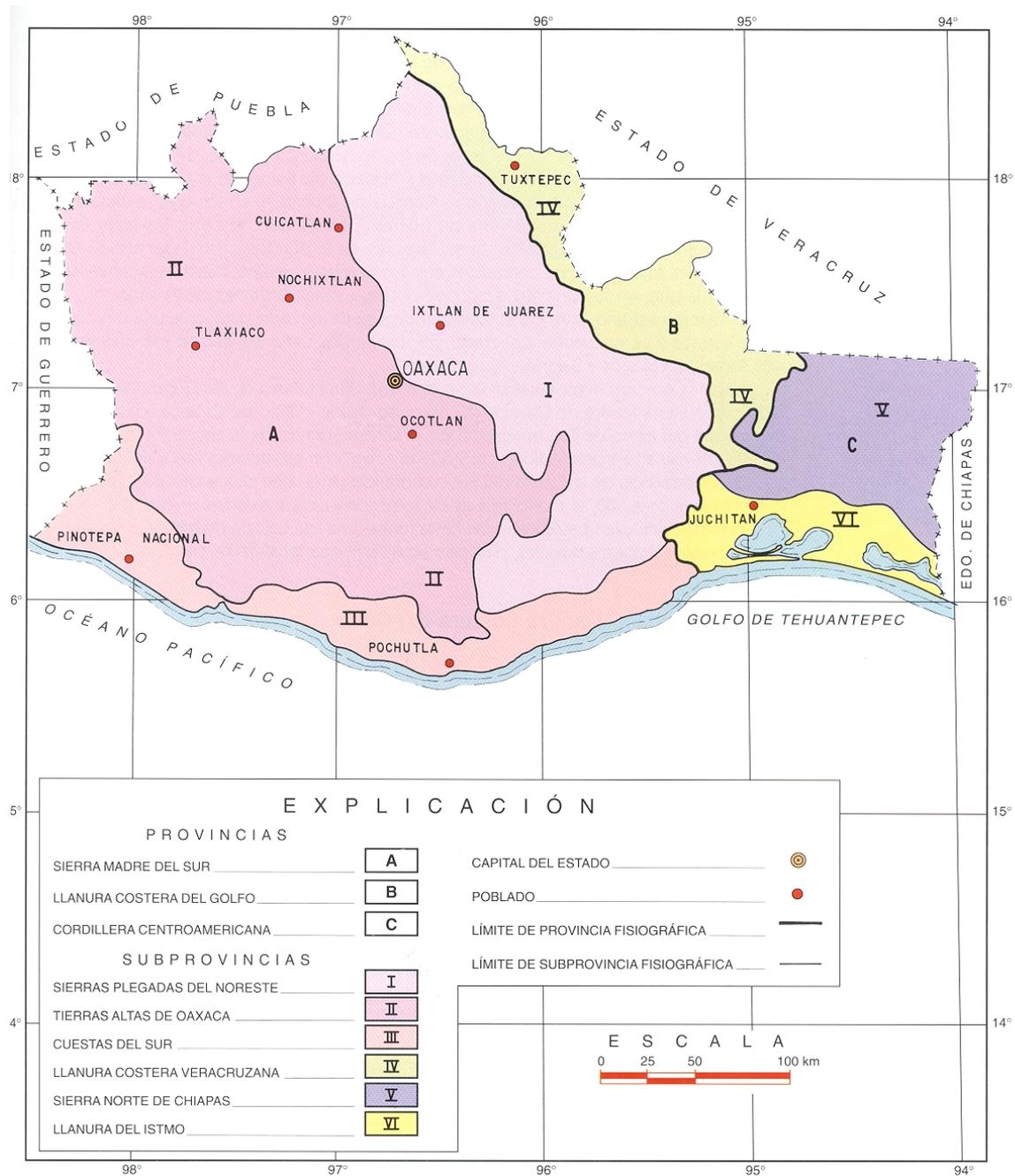


Figura 10. Provincias fisiográficas del estado de Oaxaca (ref. 11)

## I.2 El subsuelo en el Valle de Oaxaca

El Valle de Oaxaca se ubica a una altura aproximada de 1500 metros sobre el nivel del mar en la provincia de la Sierra Madre del Sur, que se extiende desde el sur del eje Neovolcánico hasta el Istmo de Tehuantepec.

Morfológicamente, se pueden diferenciar en el área de la ciudad cuatro zonas (fig. 11):

- a) **Alta** en la que existen afloramientos de rocas metamórficas y sedimentarias (calizas).
- b) **Pendiente pronunciada** en la que se presentan superficialmente depósitos derivados de la alteración de las rocas *in situ*. Zona urbana marginada.
- c) **Pendiente suave** donde afloran depósitos clásticos o tobas andesíticas. Zona colonial de la ciudad de Oaxaca.
- d) **Plana** donde se encuentran los materiales aluviales que constituyen los rellenos del valle de Oaxaca.

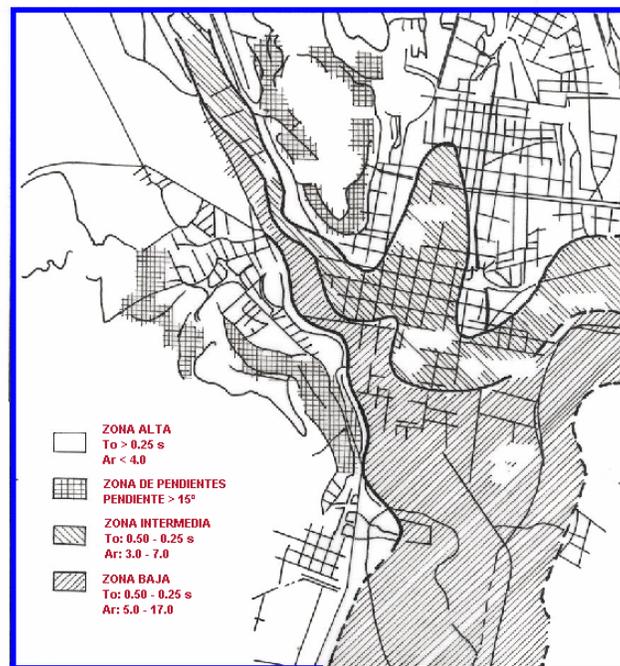


Figura 11. Morfología del Valle de Oaxaca (ref. 12)

En la región afloran rocas de diferente litología cuya edad varía desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. La sucesión estratigráfica y la litología de las formaciones en el área de la ciudad de Oaxaca, se describen a continuación (fig. 12):

- a) Rocas metamórficas (Pm). En la parte oeste de la ciudad, en la zona de los cerros de Monte Albán y al pie del Cerro del Fortín, afloran rocas metamórficas del Paleozoico. Superficialmente, estas rocas presentan un alto grado de intemperización, dando lugar a un suelo limo-arenoso de tono amarillento. En esta formación, que presenta una coloración café clara, prácticamente no existe desarrollo urbano, a excepción de la franja que se ubica en la parte baja del Cerro del Fortín.
  
- b) Calizas, areniscas, lutitas y conglomerados metamorizados (Jm). Sobreyaciendo las rocas paleozoicas (Pm), se encuentra una serie de rocas metamorizadas que se originaron a partir de calizas, areniscas, lutitas y conglomerados. El contacto entre la formación paleozoica y estos materiales está indicado por una falla en la dirección E-W. Dentro de la formación predominan los conglomerados que presentan un grano fino y una fuerte silicificación. La coloración de esta formación es muy variable, observándose en su parte inferior una roca de color blanco en estratos delgados, posiblemente originada a partir de una caliza, mientras que en la parte superior se observa un conglomerado en bancos de 1 m de espesor aproximadamente, de color gris oscuro con intercalaciones de estratos delgados de areniscas y lutitas. A estas rocas se les asigna una edad variable entre el Triásico y el Jurásico. Sobre estos materiales no existe prácticamente desarrollo urbano.
  
- c) Areniscas y lutitas (Tal). Sobreyaciendo las rocas anteriormente descritas se encuentra una sucesión de capas constituidas por areniscas y lutitas del Terciario. Estas rocas presentan un color café amarillento y están recubiertas parcialmente por una capa de materiales intemperizados del mismo color. Las areniscas se forman en estratos de 50 cm a 1 m de potencia mientras que las lutitas se presentan en capas delgadas. Estas rocas presentan una inclinación variable entre 30° y 45° hacia el Noroeste mientras que su dirección es de N20W, habiéndose observado sin embargo algunas pequeñas variaciones en la dirección de las capas. Sobre estas rocas se ha desarrollado parte de la ciudad de Oaxaca en la zona NW.

- d) Tobas andesíticas (Tt). En la porción noreste de la ciudad se observa una toba andesítica del terciario de color verde claro explotada en la zona como piedra para cantera. Esta roca sobreyace la formación antes descrita y está parcialmente recubierta por depósitos clásticos continentales (Tc), razón por la cual no siempre es posible definir con exactitud su límite de afloramiento. Sobre estos materiales se ha desarrollado una pequeña porción de la ciudad.
- e) Depósitos Clásticos Continentales (Tc). Entre fines del Terciario y principios del Cuaternario, se manifiesta en el área una fuerte erosión que dio lugar a la sedimentación de depósitos clásticos. Estos materiales están constituidos en su parte superior por limos arenosos de color café rojizo mientras que a cierta profundidad, como fue posible observar en una noria que se encuentra en los terrenos del INFONAVIT y en las proximidades del pueblo de San Felipe del Agua, el material está constituido por grava compactada dentro de una escasa matriz arenosa. Sobre estos materiales se ha desarrollado la parte colonial de la ciudad de Oaxaca.
- f) Depósitos Aluviales (Qal). En la parte baja de la ciudad, en terrenos dedicados a la agricultura, se encuentran limos y arenas sueltas del Cuaternario que provienen de los aluviones de los ríos que entran al valle. Estos materiales, que en gran parte se localizan a lo largo del río Atoyac, son objeto de explotación de agua subterránea y según información obtenida en las oficinas de la SARH presentan un espesor promedio de 30 m. En los pozos excavados al sureste de la ciudad se observan espesores mayores del aluvión, por lo que se cree que atraviesan los depósitos clásticos continentales anteriormente descritos.
- g) Depósitos de abanico aluvial (Qaa). En las partes bajas del Cerro del Fortín se observan algunos depósitos de abanico aluvial constituidos por grava subredondeada y angulosa en una matriz limo-arenosa. Estos depósitos tienen importancia desde el punto de vista de peligrosidad sísmica ya que en ellos existen construcciones susceptibles de sufrir fuertes deformaciones, desplomes, etc., por estar sobre un material no consolidado.

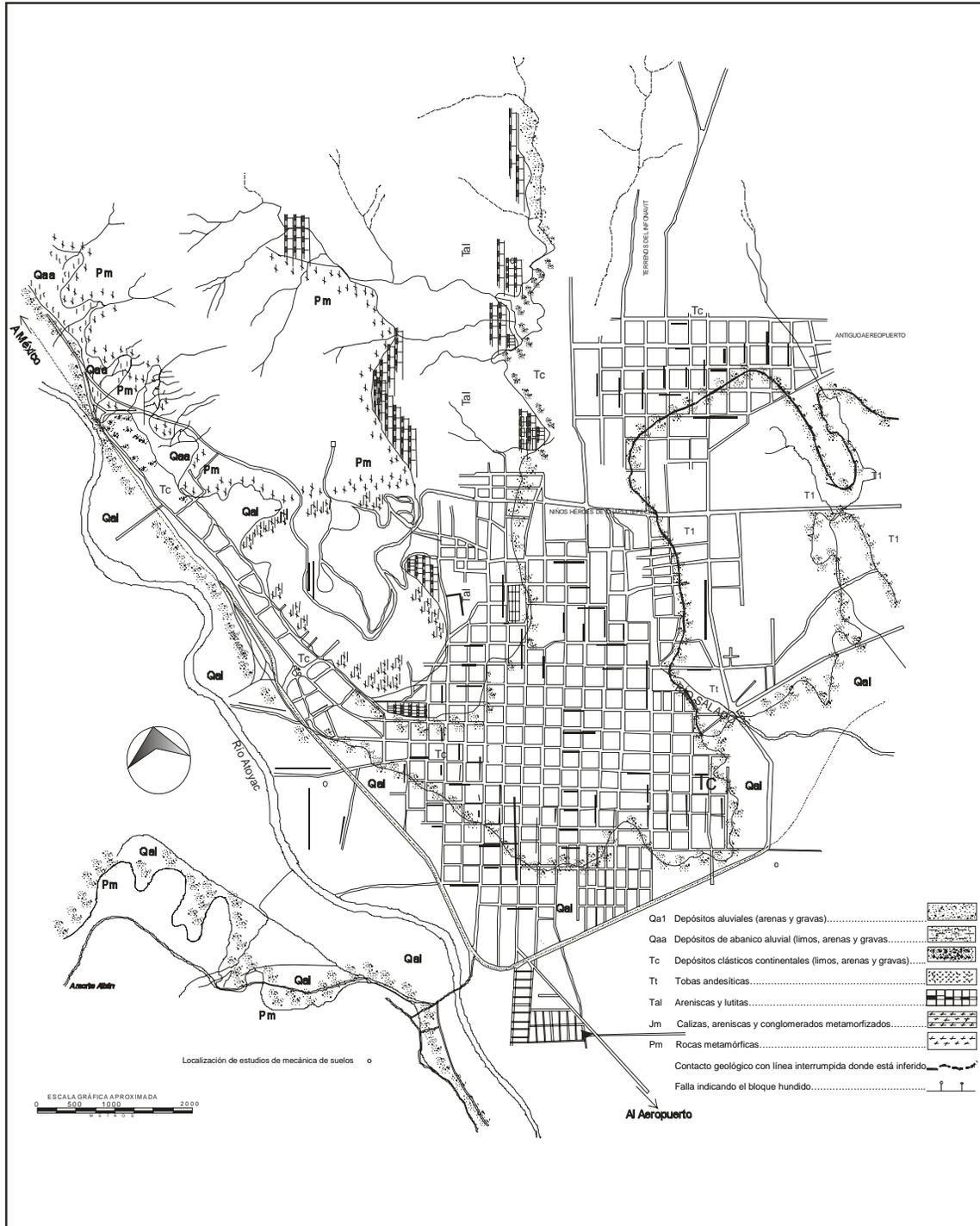


Figura 12. Estratigrafía y litología de la Ciudad de Oaxaca.

**Geología estructural de la ciudad de Oaxaca**

La región no ha sido objeto de ningún estudio detallado de geología estructural. Existen planos generales donde se observan las direcciones de los principales ejes anticlinales de la región (fig. 13), de dirección N20W y la falla que se encuentra en la Fosa Mesoamericana de dirección aproximada N70W.

De observaciones en el campo se puede decir que la región sufrió dos levantamientos orogénicos; uno que se verificó en el Paleozoico y que causó el metamorfismo de las rocas que se habían formado con anterioridad y otro, en el terciario, que provocó el metamorfismo parcial de las rocas que aparecen en el Cerro del Fortín. Los principales ejes estructurales de esta última orogénesis, correspondientes a los levantamientos presentan una dirección N20W, misma que se observa en los estratos de areniscas y lutitas (Tal) que afloran en la porción norte de la ciudad. Además de estos rasgos, se observó que el contacto entre las rocas metamórficas (Pm) y las areniscas, lutitas, calizas y conglomerados metamorizados (Jm), corresponde a una falla de dirección aproximada E-W.

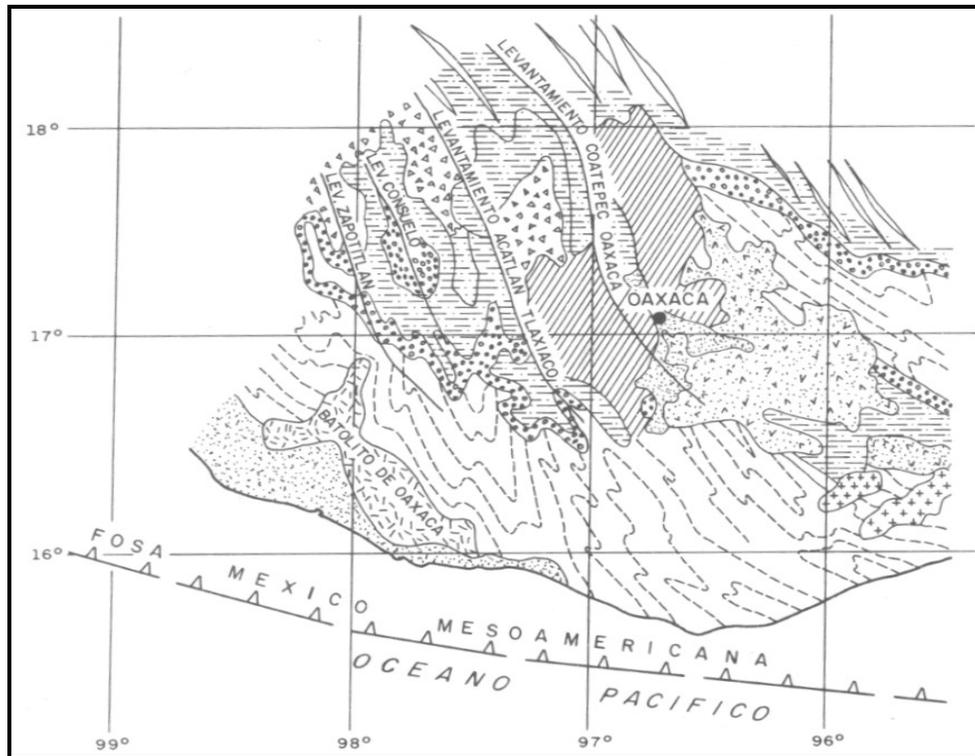


Figura 13. Geología estructural de la ciudad de Oaxaca

### Propiedades y exploración del subsuelo en la ciudad de Oaxaca

La ciudad de Oaxaca está dividida en tres zonas distintas, de acuerdo al tipo de suelo:

*Zona 1.* Corresponde a depósitos aluviales recientes (*Qa1*) que se encuentran en el sur de la ciudad. Los materiales predominantes son arenas y gravas, conteniendo algo de arcilla hacia el este. Estos materiales se encuentran en estado suelto cerca de la superficie y el nivel freático es poco profundo.

*Zona 2.* Corresponde a los depósitos clásticos continentales (*Tc*) que atraviesan de norte a sur la ciudad y a los depósitos de abanico aluvial (*Qaa*). Los materiales predominantes son limos, arenas y gravas; el contenido de arcilla es variable. La capacidad de carga de estos materiales también es variable. El espesor del material sobreyaciendo la roca no se conoce pues los sondeos efectuados no han sido lo suficientemente profundos. Los depósitos de abanico aluvial pueden llegar a encontrarse en estado suelto.

*Zona 3.* Corresponde a areniscas y lutitas (*Ta1*), calizas, areniscas y conglomerados metamorfizados (*Jm*), rocas metamórficas (*Pm*) y tobas andesíticas (*Tr*), todas ellas intemperizadas superficialmente en mayor o menor grado. La capacidad de carga de estos suelos será, en general, buena y la profundidad de la roca, pequeña.

Adicionalmente, se reportan datos de 11 estudios de mecánica de suelos efectuados en esta ciudad (ref. 13). En total se analizaron 25 sondeos y 31 pozos a cielo abierto. Con base en esa información, a continuación se presentan las propiedades índice y mecánicas reportadas en los distintos estudios:

#### a) *Propiedades índice*

*Contenido de agua natural.* Los materiales que corresponden a los depósitos aluviales tienen un contenido de agua que varía de 4 a 38 por ciento. Los materiales de los depósitos clásticos continentales, así como las areniscas y lutitas intemperizadas superficialmente muestran una variación de 5 a 55 por ciento; los valores más bajos corresponden a las partes arenosas.

*Densidad de sólidos.* La variación encontrada en todos los materiales es de 2.59 a 2.79 con un valor excepcional de 2.86.

*Límites de plasticidad.* El límite líquido de todos los materiales varió entre 22 y 74 por ciento. En todos los materiales aluviales, los valores reportados corresponden a las fracciones limo-arenosas y arcillo-arenosas. El índice de plasticidad en todos los materiales varió entre 8 y 50 por ciento.

*Número de golpes en prueba de penetración estándar.* Los materiales aluviales tienen una variación de 4 a 30 golpes para penetrar 30 cm; los materiales de los depósitos clásticos continentales muestran una variación de 10 a 42 golpes.

b) *Propiedades mecánicas*

*Resistencia a la compresión sin confinar.* Aunque se obtuvieron pocos datos, la variación encontrada fue de 0.6 a 0.8 kg/cm<sup>2</sup>.

*Ángulo de fricción.* En las pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas el ángulo varió entre 2° y 12.5°. En las pruebas consolidadas no drenadas el ángulo de fricción varió entre 17.5° y 25°.

*Cohesión.* Se obtuvo una variación de 0.2 a 0.45 kg/cm<sup>2</sup>, excepto en un caso en que se obtuvo un valor de 1.10 kg/cm<sup>2</sup> en prueba consolidada no drenada.

En las figuras 14 a 21, tomadas de la referencia 13, se muestran los perfiles estratigráficos de algunos de los estudios efectuados en la ciudad de Oaxaca.

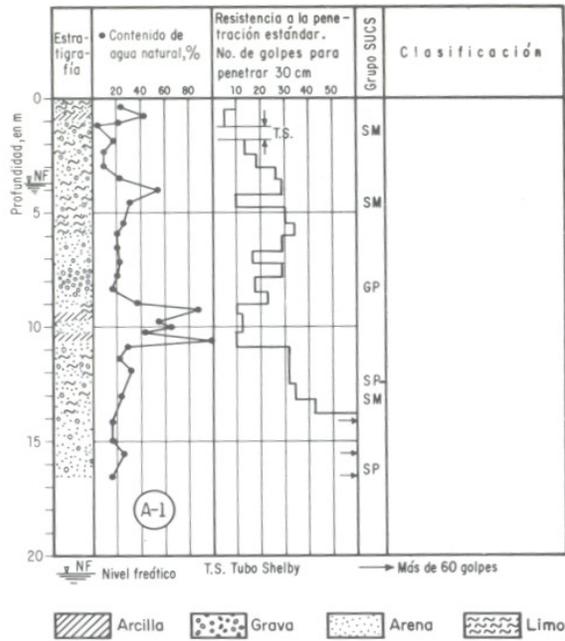


Figura 14. Perfil estratigráfico estudio 1, Central Camionera

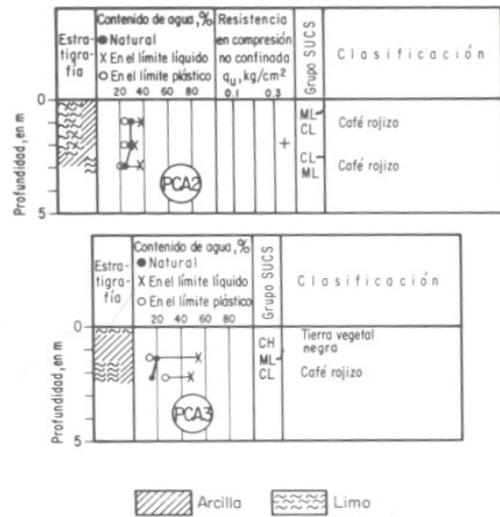


Figura 15. Perfil estratigráfico estudio 2, Hospital IMSS

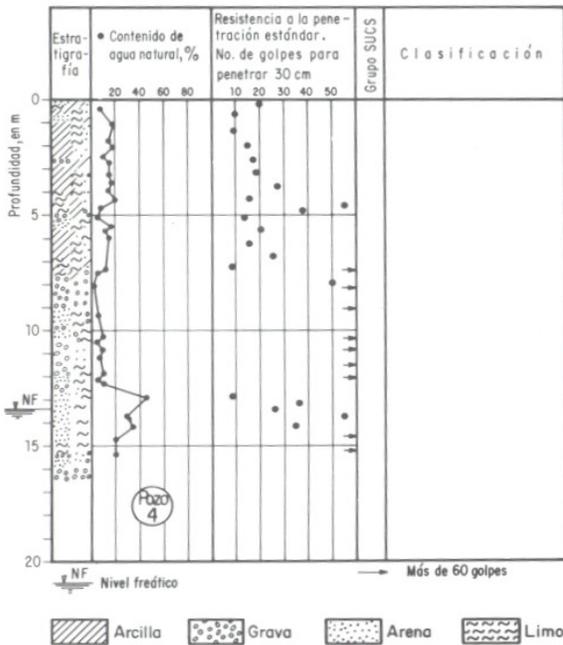


Figura 16. Perfil estratigráfico estudio 3, Hospital SSA

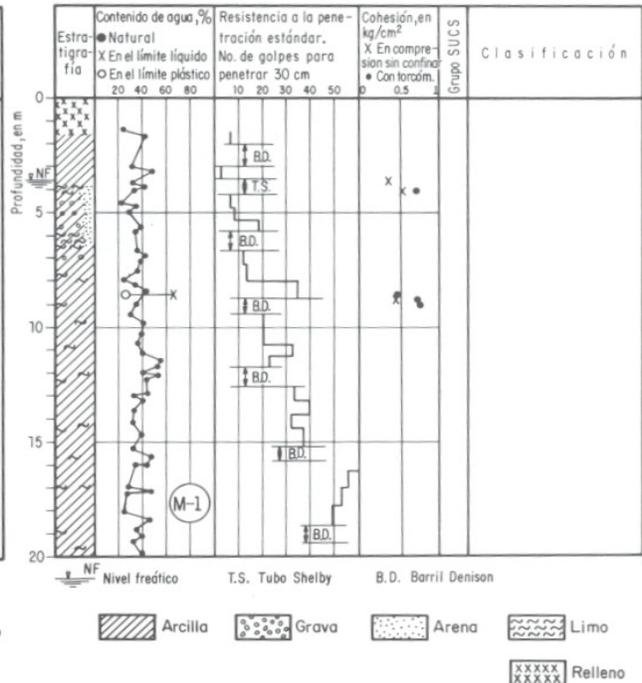
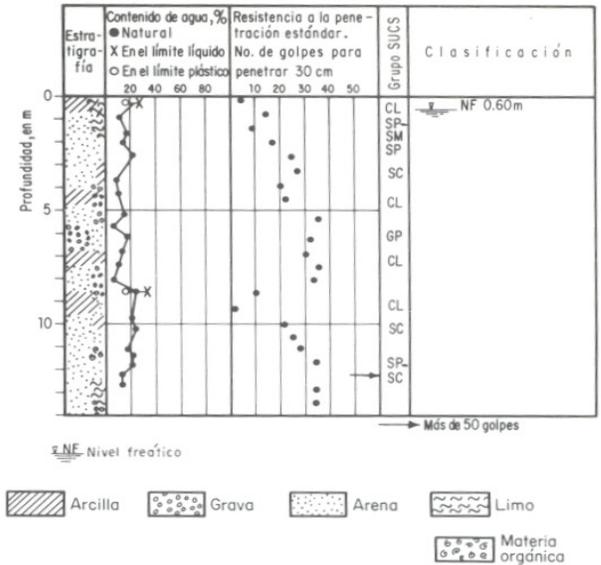
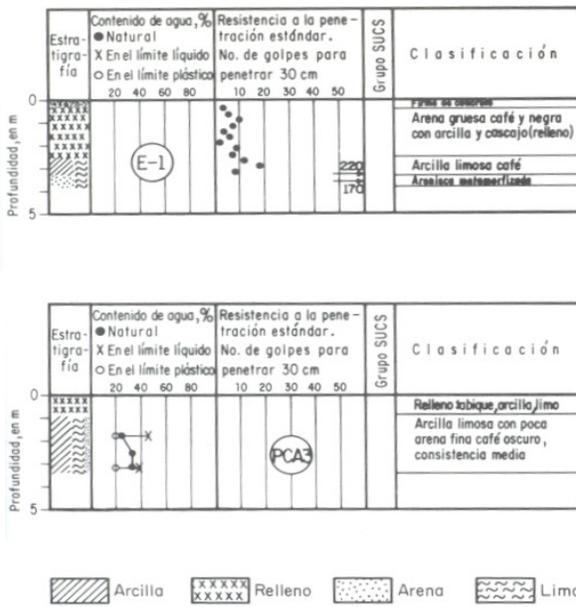


Figura 17. Perfil estratigráfico estudio 5, Centro de Seguridad Social IMSS



Figuras 18 y 19. Perfiles estratigráficos estudio 7 y 8, Central telefónica (superior) y Subestación CFE (inferior)

Figura 20. Perfil estratigráfico estudio 9, Centro para el Bienestar Familiar IMSS

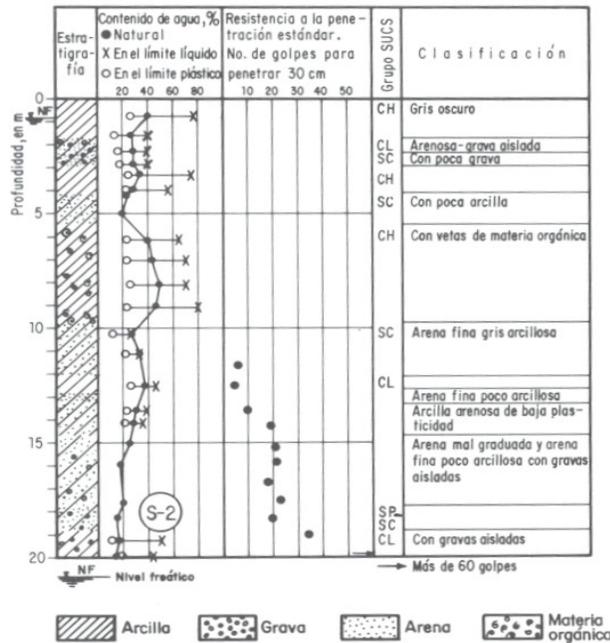


Figura 21. Perfil estratigráfico estudio 11, Unidad Habitacional CAPFCE

## **II. LA RED ACELEROGRÁFICA DE LA CIUDAD DE OAXACA**

### **II.1 Descripción de la red**

Para conocer las características de los temblores es necesario registrarlos, de manera que posteriormente se les pueda estudiar, con el fin de precisar su magnitud, localización, la duración del movimiento, sus direcciones principales, etc. Para ello se emplean primordialmente dos tipos de instrumentos, sismógrafos y acelerógrafos (ref.14), que registran el movimiento del terreno al paso de las ondas sísmicas. El principio de operación de ambos equipos es el mismo y consiste de una masa suspendida por un resorte y un amortiguador (fig. 22); éste permite a la masa permanecer en reposo con respecto al movimiento del terreno. Si se sujeta a la masa una plumilla que pueda dibujar en un papel pegado a un cilindro girando a velocidad constante, se obtiene así un registro del movimiento del suelo llamado sismograma o acelerograma.

Los sismógrafos modernos utilizan este mismo principio de operación, sólo que para su implementación utilizan componentes mecánicos y electrónicos para obtener una señal eléctrica proporcional al movimiento del suelo, la cual puede almacenarse en forma local, convertida a un formato digital y/o ser transmitida por algún medio de comunicación (teléfono, radio, satélite) hasta un centro de registro y evaluación. El sismógrafo se caracteriza por su alta sensibilidad, pues tiene la capacidad de ampliar decenas o centenas de miles de veces la velocidad del movimiento del terreno, ya sea a causa de un sismo cercano muy pequeño o de uno grande y lejano. Sin embargo, cuando a corta distancia ocurre un sismo muy fuerte, el sismógrafo no es capaz de registrarlo íntegramente, pues por su gran sensibilidad produce un sismograma saturado. Para registrar estos movimientos fuertes de gran intensidad, se utiliza otro tipo de instrumentos llamados acelerógrafos.

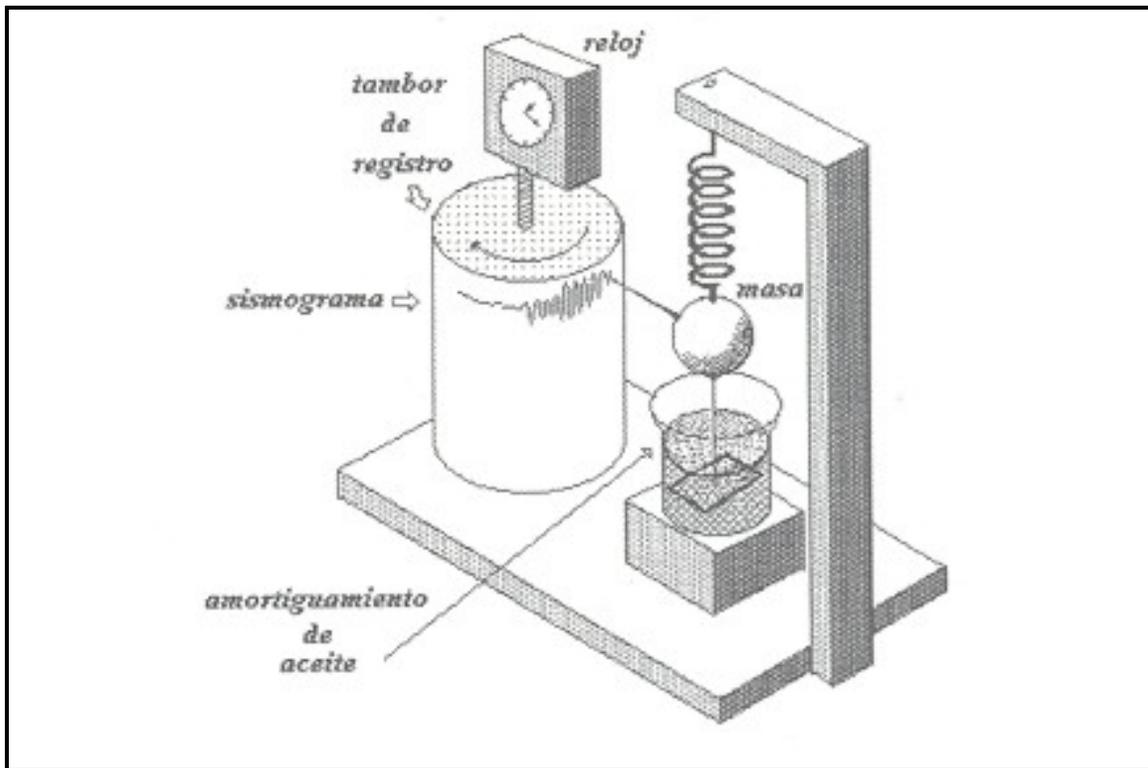


Figura 22. Principio básico de operación y registro de un sismógrafo (ref. 15)

Los acelerógrafos, a diferencia de los sismógrafos, registran la aceleración del terreno al ocurrir un sismo; generalmente son capaces de registrar aceleraciones mayores a la gravedad terrestre y debido a ello, difícilmente se encuentran saturados. Actualmente, la mayor parte de los acelerógrafos son de tipo digital, facilitando el procesamiento de la información mediante el uso de computadoras.

En nuestro país el desarrollo de la instrumentación sísmica empezó a principios del siglo pasado, al decretarse la fundación del Servicio Sismológico Nacional después de una reunión celebrada en Estrasburgo, Francia en donde dieciocho países, entre ellos México, decretaron la formación de la Asociación Sismológica Internacional, en cuyos objetivos plasmó la necesidad de contar con equipos de registro sísmico en todo el mundo, para obtener mayor información sobre la naturaleza de los sismos. A raíz de esto, se instalan entre 1910 y 1923 nueve estaciones sismológicas, dando inicio a la instrumentación sísmica en el país.

Posteriormente, se estableció la necesidad de contar con instrumentos que tuvieran una escala más amplia de registro como es el caso de los acelerógrafos. Los primeros equipos de este tipo fueron instalados en 1960, uno en la Alameda Central y otro en Ciudad Universitaria, en la Ciudad de México (ref. 16).

A principios de 1985 quedó instalada la Red Acelerográfica de Guerrero, constituida por 30 equipos digitales distribuidos en su franja costera y otros hacia el interior del continente. Esta red tuvo como principal objetivo el poder registrar los sismos que pudieran ocurrir en las brechas sísmicas de Acapulco u Ometepec, pues son zonas señaladas como las de mayor probabilidad de generar un evento sísmico de gran intensidad en un periodo relativamente corto. Esta red, junto con su línea de atenuación hacia la Ciudad de México y la red acelerográfica de ésta última han permitido la realización de numerosos estudios para conocer mejor la naturaleza de los eventos sísmicos e intentar mitigar sus efectos tanto en la población como en las estructuras. A pesar de ello, muchos de los resultados obtenidos en investigaciones basadas en los temblores generados en la costa de Guerrero no son necesariamente válidos para aquellos que se producen en la costa de Oaxaca; en esta región también han sido señaladas zonas en donde existe una alta probabilidad de que ocurran eventos de gran intensidad en un breve lapso.

Con base en lo anterior se consideró necesario el establecimiento de una red acelerográfica que abarcara la zona costera de Puerto Ángel, en Oaxaca, a Ometepec, en Guerrero, una línea de atenuación, además de una red acelerográfica propia de la ciudad de Oaxaca.

En el estado de Oaxaca, la instrumentación sísmica se inicia con la instalación de una estación sismológica por parte del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Es hasta el año de 1970 cuando el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Idel), instaló una estación acelerográfica (OAXM) en la Facultad de Medicina de la Universidad de Oaxaca. Lo anterior fue impulsado con el objetivo de poder registrar movimientos fuertes que en ocasiones no podían ser captados en su totalidad por los sismógrafos; después de ésta estación se instalaron dos más en Puerto Escondido y Pinotepa Nacional hasta llegar a conformar las diferentes redes que operan en la actualidad

Entre las redes mencionadas anteriormente se encuentran la Red Acelerográfica de la Costa Oaxaca, la cual está integrada por:

- 1) La instrumentación a lo largo de la franja costera entre Pinotepa Nacional y Salina Cruz, constituida por ocho estaciones: Pinotepa Nacional (PNTN), Jamiltepec (JAMI), Río Grande (RIOG), Las Negras (LANE), Puerto Ángel (PANG), Salina Cruz (SCRU), Huamelula (HUAM), Jalapa del Marquez (OXJM) y Niltepec (NILT).
- 2) la Línea de Atenuación de Puerto Ángel que se proyecta a las ciudades de Oaxaca y Puebla mediante las estaciones de Puerto Ángel (PANG), San Martín Los Canseco (SMLC), Tamazulapan (TAMA), Raboso (RABO) y Chila de las Flores (CHFL).

Además del Instituto de Ingeniería, existen otras instituciones que tienen estaciones operando en el estado, contribuyendo a recabar información importante desde el punto de vista de la ingeniería civil; entre ellas están el Instituto de Geofísica de la UNAM, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) (fig. 23).

Como se mencionó anteriormente, en 1970 se instaló la estación OAXM, iniciando su operación con un equipo del tipo SMA-1 que más adelante fue sustituido por un acelerógrafo DCA-333 que opera hasta la fecha. Posteriormente se instaló la estación OXLC, en la ciudad de las Canteras, con el objetivo de poder contar con una referencia en roca.

Durante 1999 el Idel instaló cinco estaciones más en la ciudad de Oaxaca: una en la Ciudad Universitaria de la Universidad de Oaxaca (OXCU), otra en el Instituto Tecnológico de Oaxaca (OXTO) y tres más en la zona histórica de la ciudad, en la Alameda de León (OXAL) y en las escuelas primarias Mugica (OXPM) y Benito Juárez

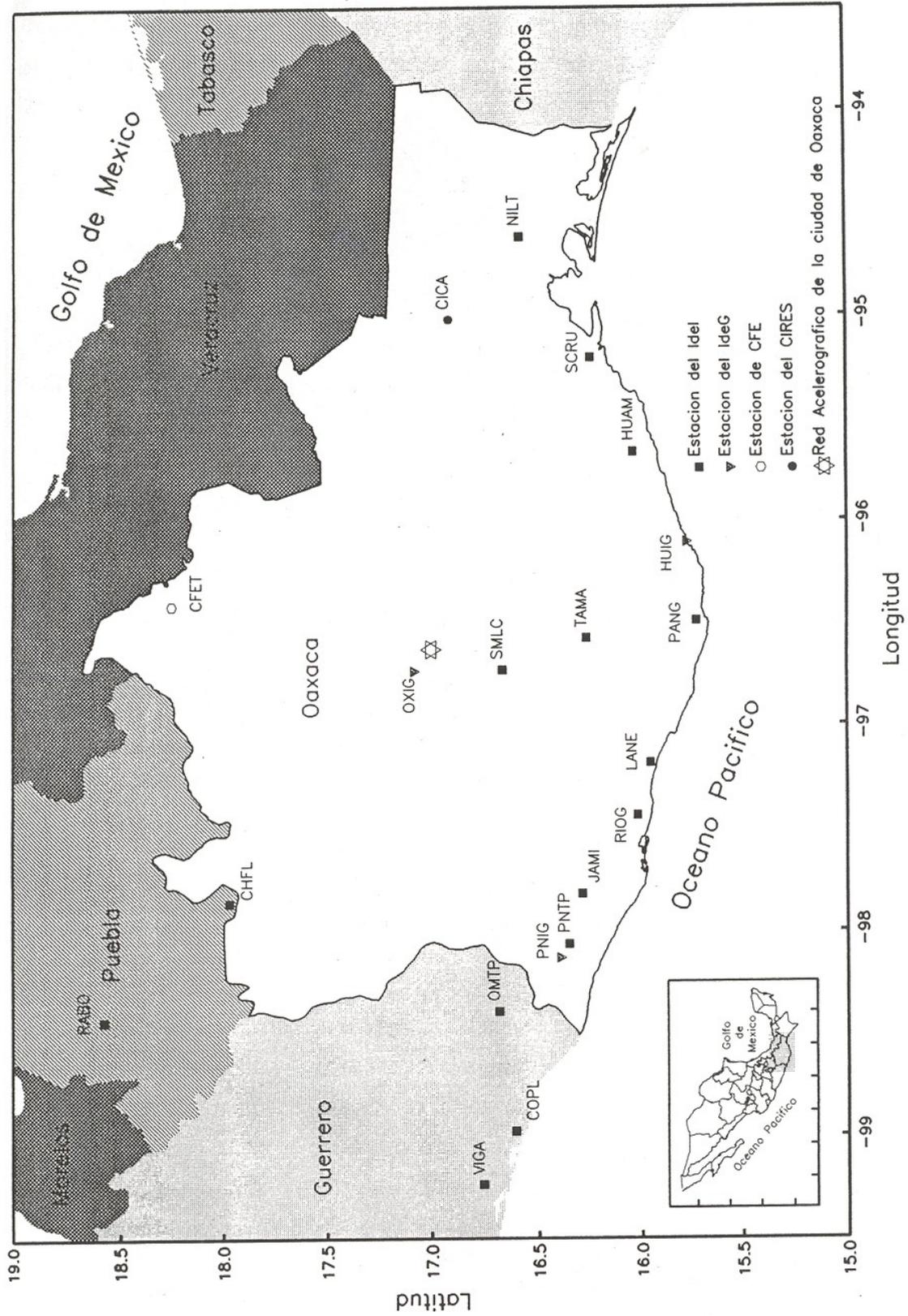


Fig. 23 Localización de estaciones acelerográficas en el estado de Oaxaca

(OXBJ). De esta manera, la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca (RAO) comenzó su operación formal en octubre de 1999 (ref. 17).

La distribución de las estaciones de la RAO se determinó bajo la consideración de los siguientes criterios:

- Alcanzar una cobertura general de una zona urbana de alto riesgo sísmico en la ciudad, de acuerdo a la microzonificación preliminar.
- Instrumentar sitios con diferentes condiciones de subsuelo
- Contar con una referencia en roca

Ya que la instalación de una estación sísmica se planea para que opere por un tiempo indefinido, en la selección de los sitios se consideran localidades apropiadas que puedan brindar seguridad y ofrecer libre acceso para la recolección de datos. Además se debe procurar la mejor protección contra la intemperie y disponer fácilmente de la alimentación de corriente eléctrica. Es por ello que se han preferido áreas dentro de algún parque, escuela u oficina que puedan otorgar las ventajas anotadas anteriormente. En la tabla I se incluye información general sobre la ubicación de las estaciones de la RAO.

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	CLAVE	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		TIPO DE SUELO	EQUIPO (N/S)	LOCALIZACIÓN
		LAT. N	LONG. W			
OAXACA FAC. DE MEDICINA	OAXM	17.084	96.710	Aluvial	DCA-333 (122)	Fuente de las siete regiones a 2 km del centro de Oaxaca
OAXACA LAS CANTERAS	OXLC	17.060	96.700	Roca, cantera	ETNA (1328)	Parque de las canteras, junto al estadio de fútbol
OAXACA PRIMARIA MUGICA	OXPM	17.061	96.717	Roca	ETNA (1917)	Instalaciones de la escuela primaria Mugica
OAXACA PRIMARIA BENITO JUÁREZ	OXBJ	17.067	96.744	Suelo	ETNA (1916)	Instalaciones de la escuela primaria Benito Juárez
OAXACA ALAMEDA	OXAL	17.061	96.726	Suelo	ETNA (1918)	Frente a la catedral, en el centro de Oaxaca
OAXACA CIUDAD UNIVERSITARIA	OXCU	17.049	96.713	Arcilla	DCA-333 (170)	Estacionamiento de la Facultad de Arquitectura en CU, Oaxaca
OAXACA INST. TECNOLÓGICO	OXTO	17.078	96.744	Arcilla	ETNA (1531)	Instalaciones del Instituto Tecnológico de Oaxaca

Tabla I. Ubicación de las estaciones de la RAO

Ya que se ha determinado el sitio, se realizan pruebas de ruido sísmico para detectar probables fuentes de perturbación que originen falsas activaciones de los acelerógrafos, pues éstas pueden saturar su capacidad de almacenamiento e introducir alteraciones significativas en los registros. Estas pruebas consisten en colocar un equipo acelerográfico en un punto previamente escogido, operándolo a diferentes niveles de activación en el lapso de unos minutos. Los registros obtenidos se estudian y si las perturbaciones locales son excesivas, se descarta ese sitio. La figura 24 muestra la distribución de las siete estaciones de la RAO, mientras que las figuras 25 a 31 presentan la localización de cada estación.

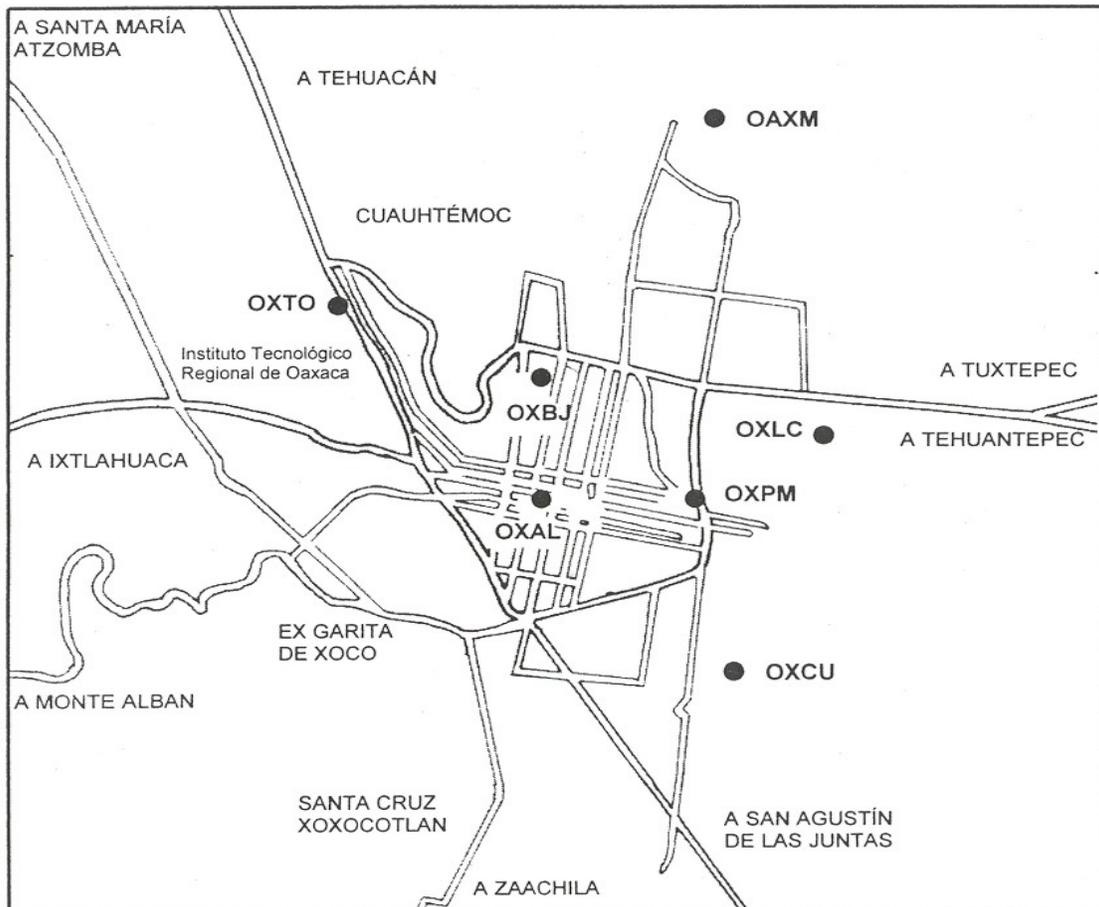


Figura 24. Distribución de las estaciones en la Ciudad de Oaxaca

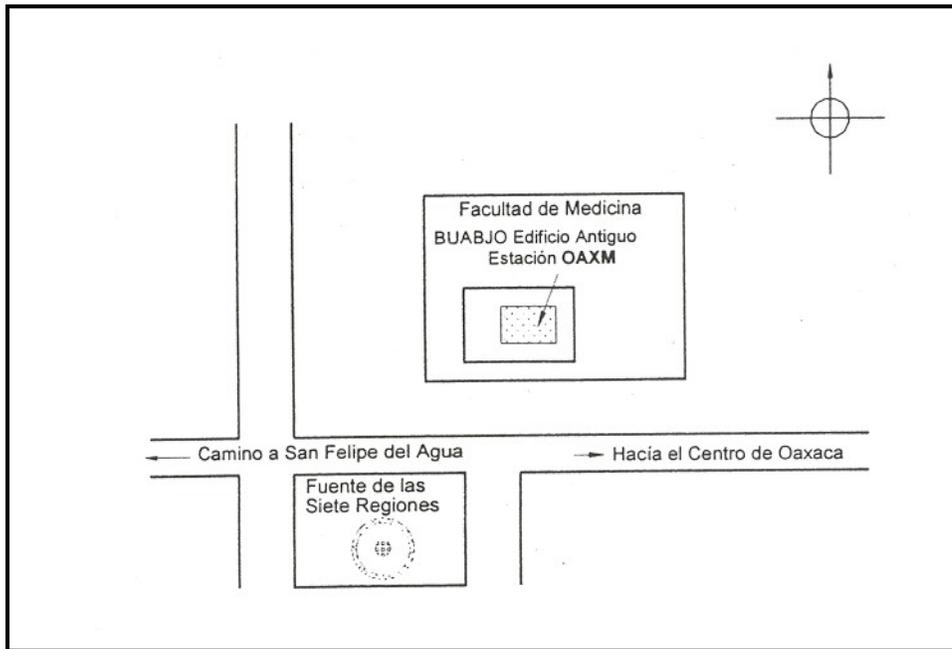


Figura 25. Localización de la estación OAXM

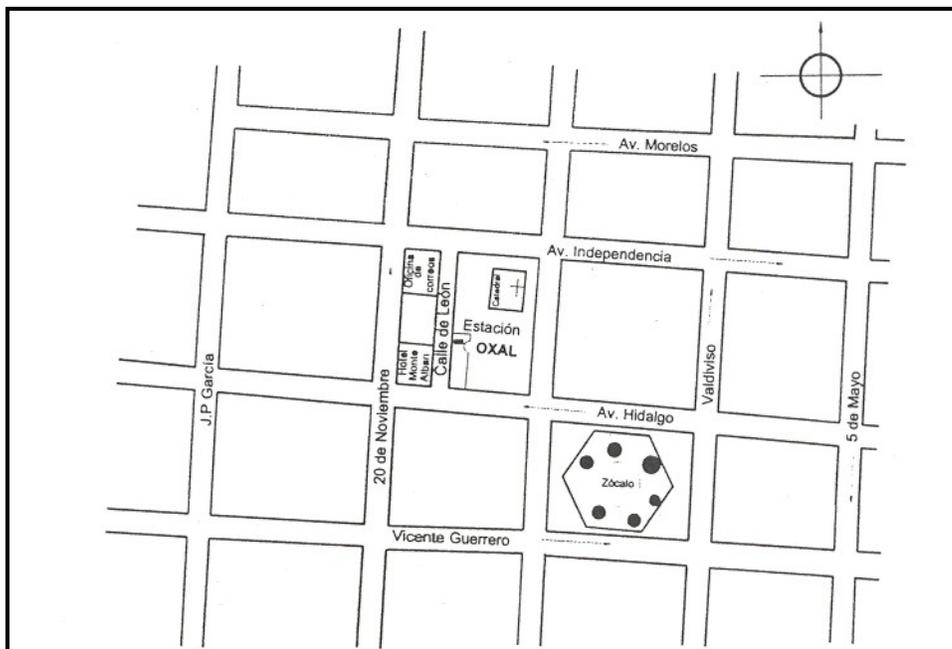


Figura 26. Localización de la estación OXAL

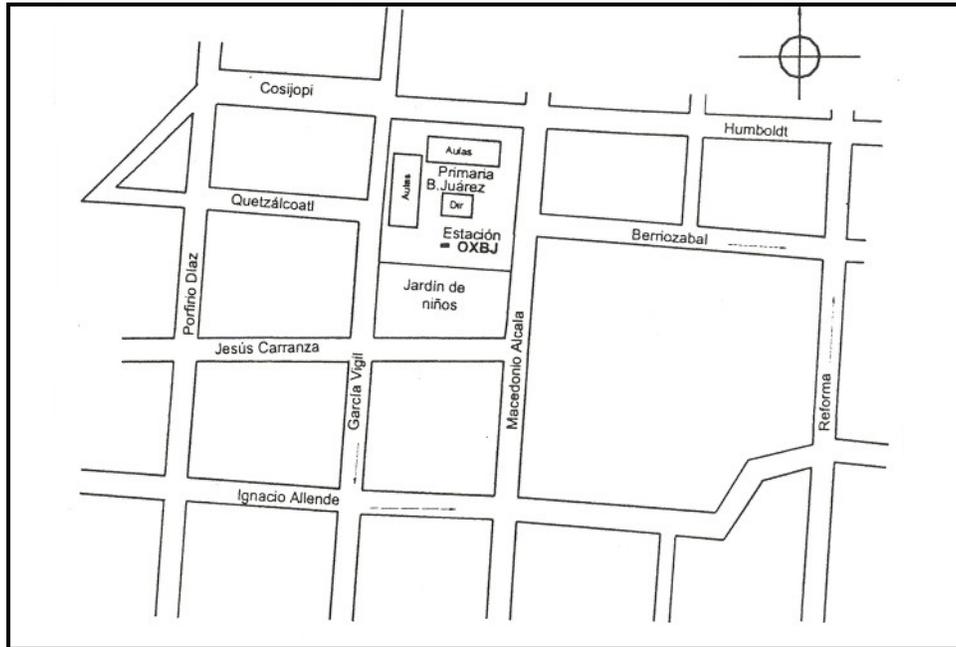


Figura 27. Localización de la estación OXBJ

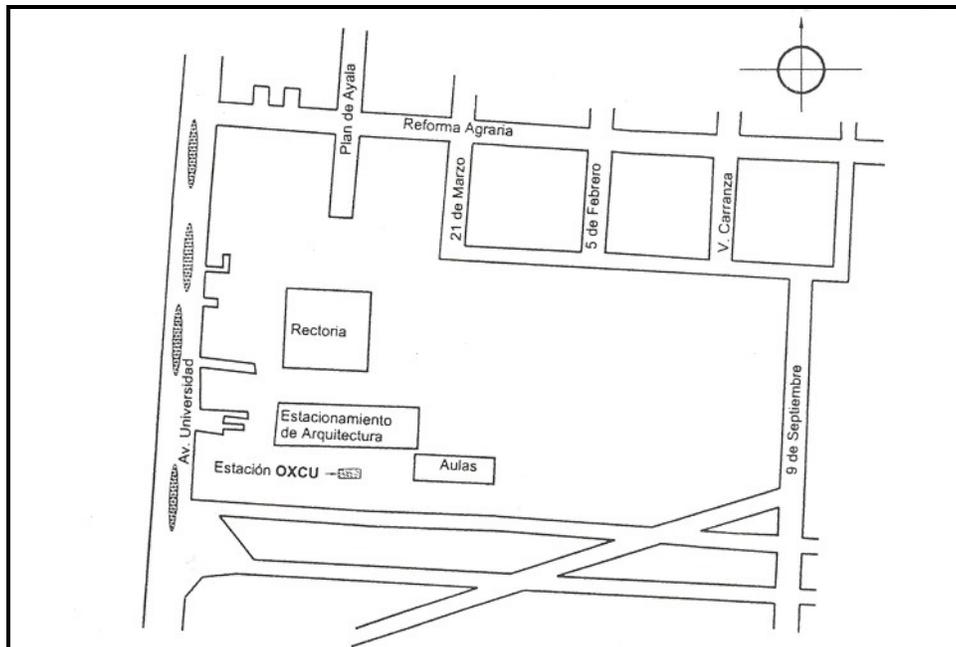


Figura 28. Localización de la estación OXCU

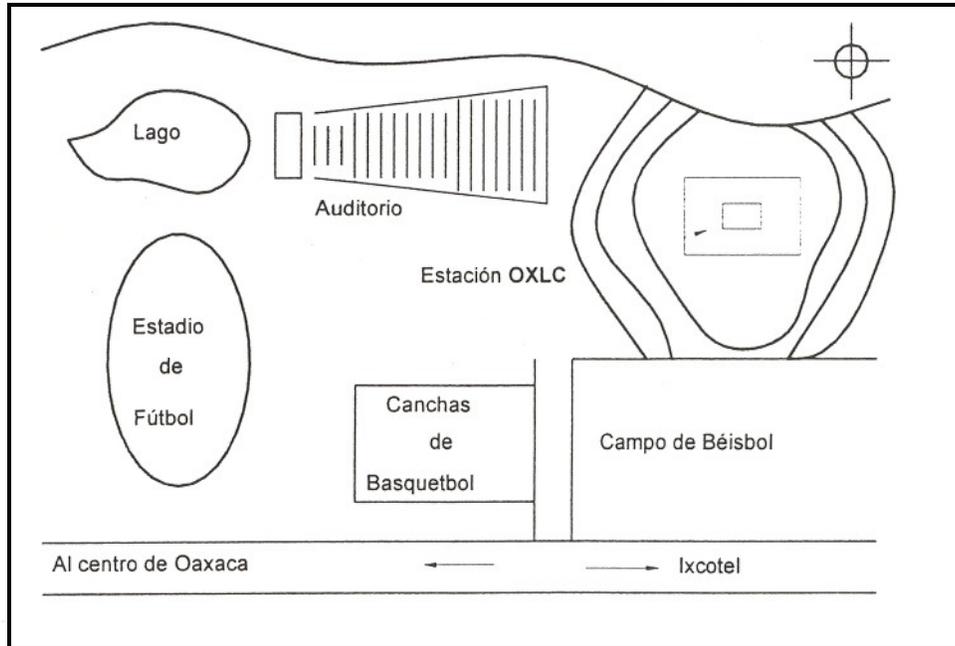


Figura 29. Localización de la estación OXLC

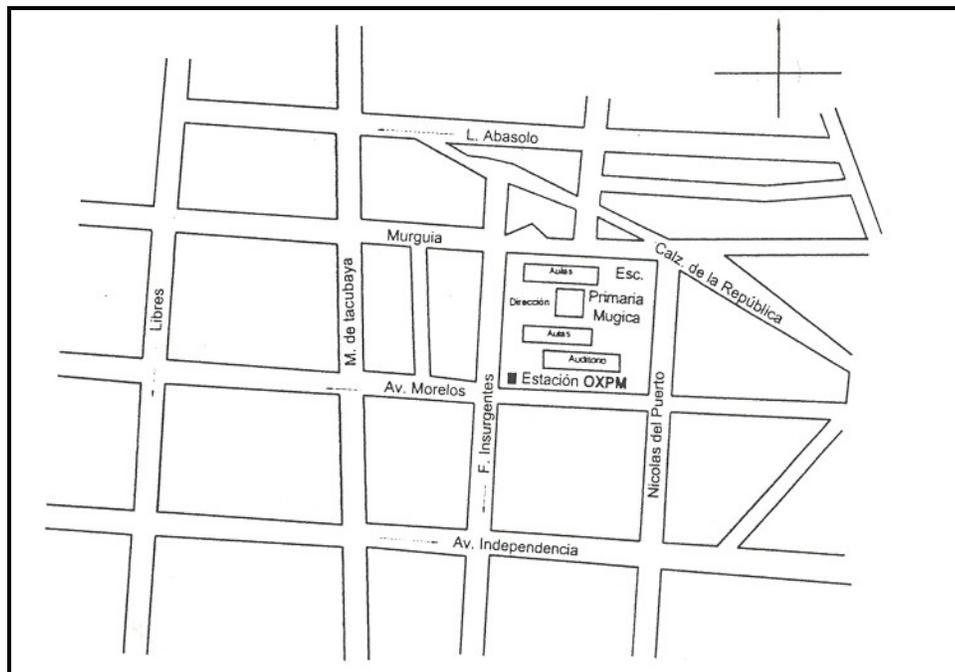


Figura 30. Localización de la estación OXPM

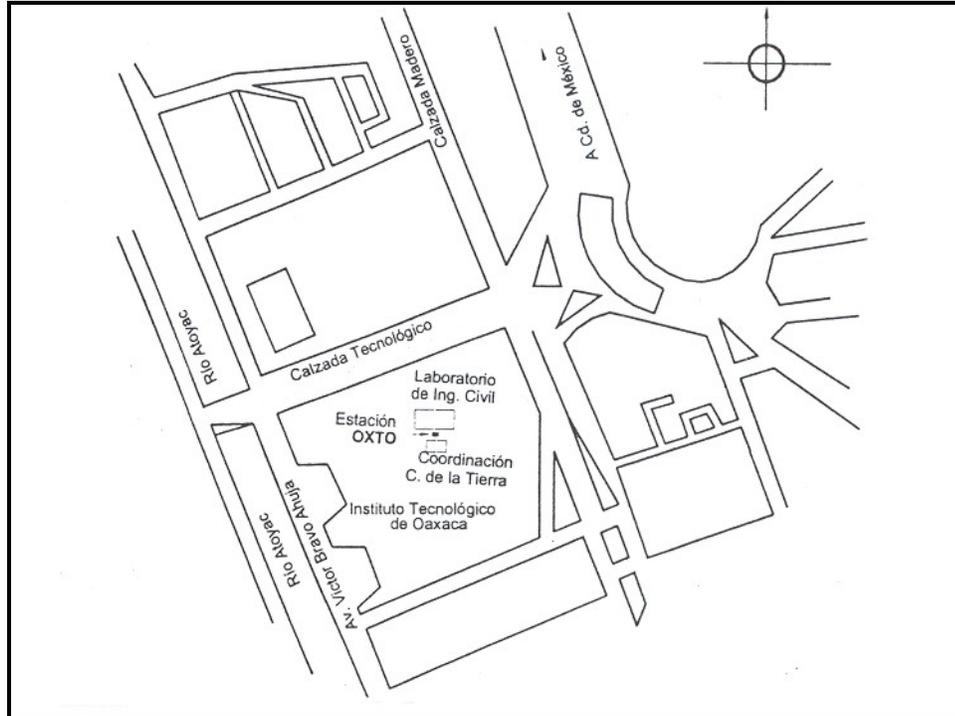


Figura 31. Localización de la estación OXTO

Abundando más en las características de los acelerógrafos digitales, se puede decir que son aparatos autónomos de alta resolución cuyos sensores son servoacelerómetros en un arreglo triaxial (ref. 18). Aunque existen de diferente marca y tipo, todos operan de una manera similar. En general, el instrumento muestrea continuamente las señales analógicas de los sensores y las convierte a muestras digitales; mediante un algoritmo especial de activación va verificando muestra a muestra si ésta se satisface. Cuando el movimiento del suelo alcanza el nivel de activación (umbral de disparo) que se le programó, el aparato *arranca* y empieza a registrar la información digital, ya sea en cinta magnética tipo casete, en memoria RAM de estado sólido o en dispositivos tipo *flash*. Estos instrumentos cuentan con un retardo digital fijo o programable que permite registrar una parte de la señal previa al punto de disparo, también conocida como *memoria de preevento*; así mismo, dispone de una *memoria de posevento*, que al igual que la anterior puede ser fija o programable y registra los valores posteriores al punto disparo que se encuentra por debajo del nivel de activación. Cabe mencionar que los equipos son de bajo consumo de corriente eléctrica y operan con fuentes de alimentación o celdas solares y baterías en flotación.

Los principales componentes de un acelerógrafo típico son el microcontrolador, la tarjeta principal, la tarjeta analógica, los sensores, el sistema de almacenamiento de datos y las interconexiones. Los sensores están constituidos por acelerómetros cuyo número y arreglo dependerá de la aplicación en particular, siendo la disposición triaxial (tres acelerómetros en posición mutuamente ortogonal) la más empleada.

Cada aparato posee un reloj que permite conocer la fecha y hora de ocurrencia del evento, lo cual es de suma importancia para poder identificar los registros obtenidos. Por lo anterior es indispensable que dicho reloj se encuentre correctamente ajustado.

La fabricación de los acelerógrafos se hace en número reducido y por sólo unas cuantas compañías. Cada uno de los diseños presenta ventajas y desventajas técnicas, por ello no existe uno ideal para todos los casos. Principalmente lo que se busca es que los aparatos garanticen un funcionamiento continuo y el registro de los eventos cuando éstos ocurran (días, meses o hasta años). En la elección se buscan instrumentos versátiles, fáciles de manejar y que ofrezcan un amplio margen de grabación tanto de preevento y posevento, como del propio evento. Otro aspecto deseado es la compatibilidad de las señales registradas con las herramientas de computación disponibles para su proceso.

Considerando tanto factores técnicos como económicos, los equipos seleccionados para conformar la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca son todos de las marcas Terra Technology, modelo digital DCA-333, y Kinematics modelo digital ETNA.

**Acelerógrafo DCA-333.** Está integrado por tres servoacelerómetros de fuerza balanceada, montados ortogonalmente dentro del blindaje del equipo, un multiplexor y convertidor de señales análogo-digital, un microprocesador electrónico, una unidad grabadora de cinta magnética intercambiable y dos baterías internas recargables de 6 volts. Un *switch* digital de selección permite verificar en campo la sincronización de sus parámetros de operación. El DCA-333 registra continuamente a razón de 100 muestras por segundo en cada canal; amplifica, filtra y convierte las señales generadas en los tres servoacelerómetros en forma de palabras de 12 bits. En el almacenamiento incluye el tiempo interno de reloj, el número serial del aparato y el número progresivo del registro, grabándolos en un casete de cinta magnética.

El ajuste del umbral de disparo es único, es decir, para los tres canales ortogonales de registro se tiene el mismo nivel de activación. El microprocesador se encarga de detener el avance de la cinta 15 segundos después de que las aceleraciones producidas por el sismo sean menores al nivel preestablecido de disparo. Utilizando la cinta magnética y una velocidad de 4 pulgadas por segundo pueden grabarse datos por espacio de 14 minutos en una sola cinta, a razón de 1200 **bit** por pulgada.

Este equipo es complementado con una unidad reproductora y graficadora SMR-104 (de la misma marca) que consiste en una unidad portátil de graficación, reproducción, calibración y prueba. Dispone de baterías internas que proporcionan 40 minutos de funcionamiento. Con esta unidad se pueden obtener inmediatamente las gráficas correspondientes a las señales grabadas.

**Acelerógrafo ETNA.** Este es un acelerógrafo para registro de movimientos fuertes compuesto de tres canales que incluyen un paquete episenor o un juego de acelerómetros de balance de fuerza dispuestos ortogonalmente, un convertidor de señales análogo-digital, un microprocesador electrónico, una tarjeta *flash* intercambiable en donde se almacenan los datos. Para su funcionamiento requiere una batería de 12 V interna o externa. Al momento de operar, el modelo ETNA puede registrar 100 ó 200 muestras por segundo en cada canal; amplifica, filtra y convierte las señales generadas a palabras de 18 **bit**. En la grabación se incluye el tiempo interno de reloj, el número serial del aparato y el número progresivo del registro, grabando la información en la tarjeta de almacenamiento.

Contrariamente al DCA-333, el nivel de disparo del modelo ETNA puede ajustarse con valores distintos en cada uno de los tres canales y la tarjeta de almacenamiento tiene capacidad máxima de 20 minutos.

En la tabla II se muestran los parámetros de operación de los acelerógrafos anteriormente descritos.

CARACTERÍSTICAS	EQUIPO		
	DCA-333	ETNA (K2)	ETNA (episensor)
Fabricante	Terra Technology	Kinematics	Kinematics
Tipo	Digital	Digital	Digital
Medio de registro	Casete o Ramdeck	Tarjeta <i>flash</i>	Tarjeta <i>flash</i>
Trasductores (3)	Internos por balance de fuerzas	Internos por balance de fuerzas	Internos por balance de fuerzas Episensor Deck
Escala de registros (g)	0.25-1.0	1.0-2.0	0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0
Frecuencia natural (Hz)	30	50	200
Amortiguamiento	0.7	0.7	0.7
Tiempo de registro (min)	14	40	60 con tarjeta de 8 MB
Tasa de muestreo (muestras/s)	100	100, 200 ó 250	100, 200 ó 250
Longitud de palabra (bit)	12	18	18
Rango dinámico (dB)	72	108	108
Referencia de tiempo	Interno	Interno	Interno
Alimentación (volts)	+12	+12	+12

Tabla II. Especificaciones técnicas de los equipos que conforman la RAO

## II.2 Localización de nuevos sitios

Cuando se tiene en mente la localización de nuevos sitios, necesariamente se deben tomar en cuenta dos cuestiones fundamentales, la cantidad de equipos acelerográficos que se piensa operar y qué objetivo se tiene al instalarlos. Para el caso particular de la Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca, y tomando en cuenta los objetivos del presente trabajo, sería de gran interés la obtención de acelerogramas a diferentes niveles de profundidad en los estratos del subsuelo de la ciudad, para estudiar con mayor detalle cómo se amplifica la onda sísmica al pasar por los estratos y llegar a la superficie. Más importante aún resultaría hacerlo al sur de la ciudad, puesto que es ahí donde se encuentran localizados los depósitos más compresibles de suelo. Además, es en esa zona en la que se ha dado un mayor crecimiento demográfico. A grandes rasgos lo que se propone es hacer un pozo de aproximadamente 70 u 80 m de profundidad y

colocar sensores al nivel de los estratos más representativos del subsuelo en ese punto, de manera que por cada evento que pudiera presentarse se obtuvieran registros a las diferentes profundidades. Se podría aprovechar la estación ubicada en Ciudad Universitaria (OXCU) para tener la referencia en superficie y construir el pozo a unos cuantos metros de distancia. Afortunadamente se pudo llevar a cabo la perforación de dicho pozo mediante un camión especialmente equipado con un taladro. Este último penetró en el suelo por medio de una broca de 6 cm de diámetro. Debido a que se presentaron problemas de tipo técnico, sólo se logró que el pozo tuviera una profundidad final de 21 m; además por razones económicas solamente se instaló un equipo (ETNA K2) cuyos sensores se instalaron en el fondo del pozo. Adicionalmente se llevó a cabo una prueba de propagación de velocidad de ondas con un aparato que consistía de tres elementos: una sonda, una polea motorizada y una consola. La sonda generó ondas tipo P y S mediante un sensor estratégicamente colocado. En dicha sonda se registraron los tiempos de arribo de ambas ondas y fueron enviados a la consola. Este procedimiento se repitió a cada metro de profundidad.

Por otra parte, sería conveniente instrumentar estructuras y edificios de monumentos históricos, ya que el Centro Histórico de la ciudad ha sido declarado patrimonio cultural de la humanidad por parte de la UNESCO. Cabe mencionar que sería deseable cambiar los equipos de registro en cassette (DCA-333) por equipos cuya lectura y procesamiento de registros sea más fácil y moderno (ETNA K2 y Episensor).

### **II.3 Construcción de estaciones acelerográficas**

En la construcción de las estaciones se utilizó el diseño del Idel, que consiste en una base de concreto colada en sitio, sobre la cual se fija una caja metálica que da alojamiento al acelerógrafo. Todas las estaciones de la RAO se desplantaron sobre suelo, a excepción de la estación OXLC, que fue anclada en roca. En todos los casos, es de suma importancia que la base de concreto quede perfectamente acoplada al terreno natural, de forma tal que por fuerte que sea el movimiento sísmico, no exista la posibilidad de algún desplazamiento relativo entre ambos. Para lograr lo anterior, en las estaciones desplantadas sobre suelo se hizo una excavación perimetral de un metro de profundidad, colando directamente en ella sin colocar cimbra, a manera de que la masa del terreno natural quede rodeada y sujeta por el concreto. El procedimiento para la

estación en roca consistió en perforar barrenos de aproximadamente 30 cm de profundidad, para poder anclar la base de concreto.

La caja metálica (fig. 32) protege al acelerógrafo de la intemperie y del vandalismo. Está hecha de lámina de acero de 0.64 cm de espesor y adaptada con un candado especial de dos llaves. Por dentro se encuentra dividida en dos compartimentos, uno con espacio suficiente para albergar el acelerógrafo, y otro para resguardar las baterías. La tapa de la caja tiene un par de perforaciones para liberar la acumulación de gases generados por el ácido de la batería, mismos que pueden dañar el equipo electrónico. Finalmente, una lámina de acero que hace las veces de sombrilla, cubre la caja y sobresale ligeramente para evitar la radiación directa del sol durante el día, controlando la variación de la temperatura dentro de la caja.

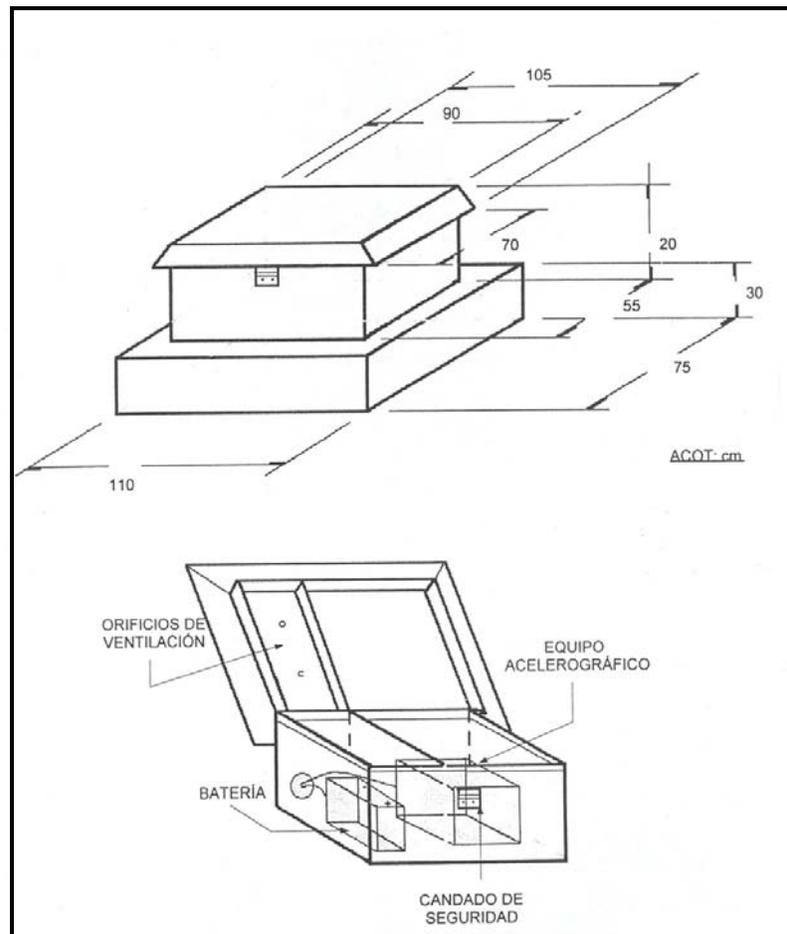


Figura 32. Aspecto y dimensiones de la caja metálica

El tiempo requerido para instalar una estación es sumamente variable, pues cada sitio presenta sus propios imponderables (facilidad de acceso para el acarreo del material de la base, condiciones meteorológicas, características del suelo, etc.); sin embargo, una vez que se ha asegurado el sitio, se puede decir que se necesitan cuando menos dos días para culminar la construcción de la estación, uno para realizar la excavación y el colado de la base y otro para remover la cimbra y colocar la caja metálica. La figuras 33 y 34 muestran el aspecto de las estaciones desplantadas en roca y suelo, respectivamente.

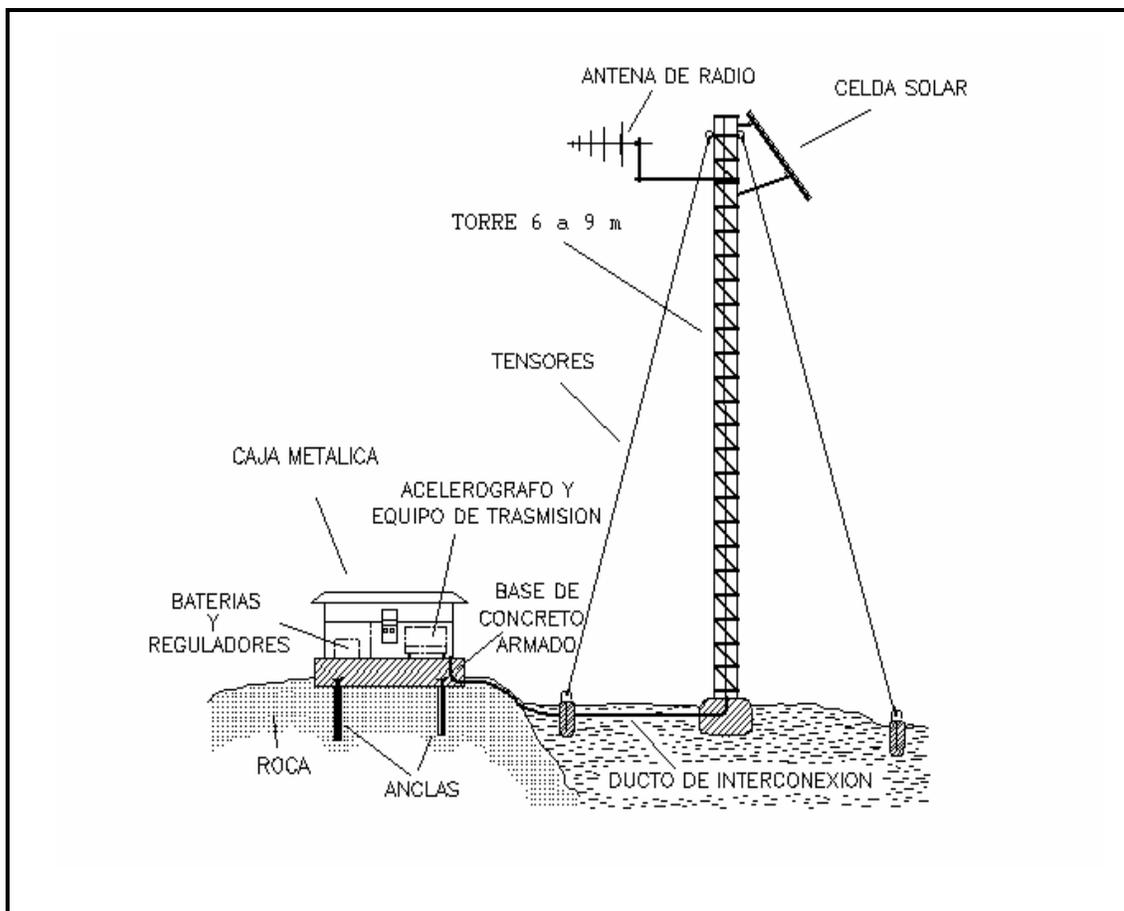


Figura 33. Aspecto de la estación OXLC desplantada en roca

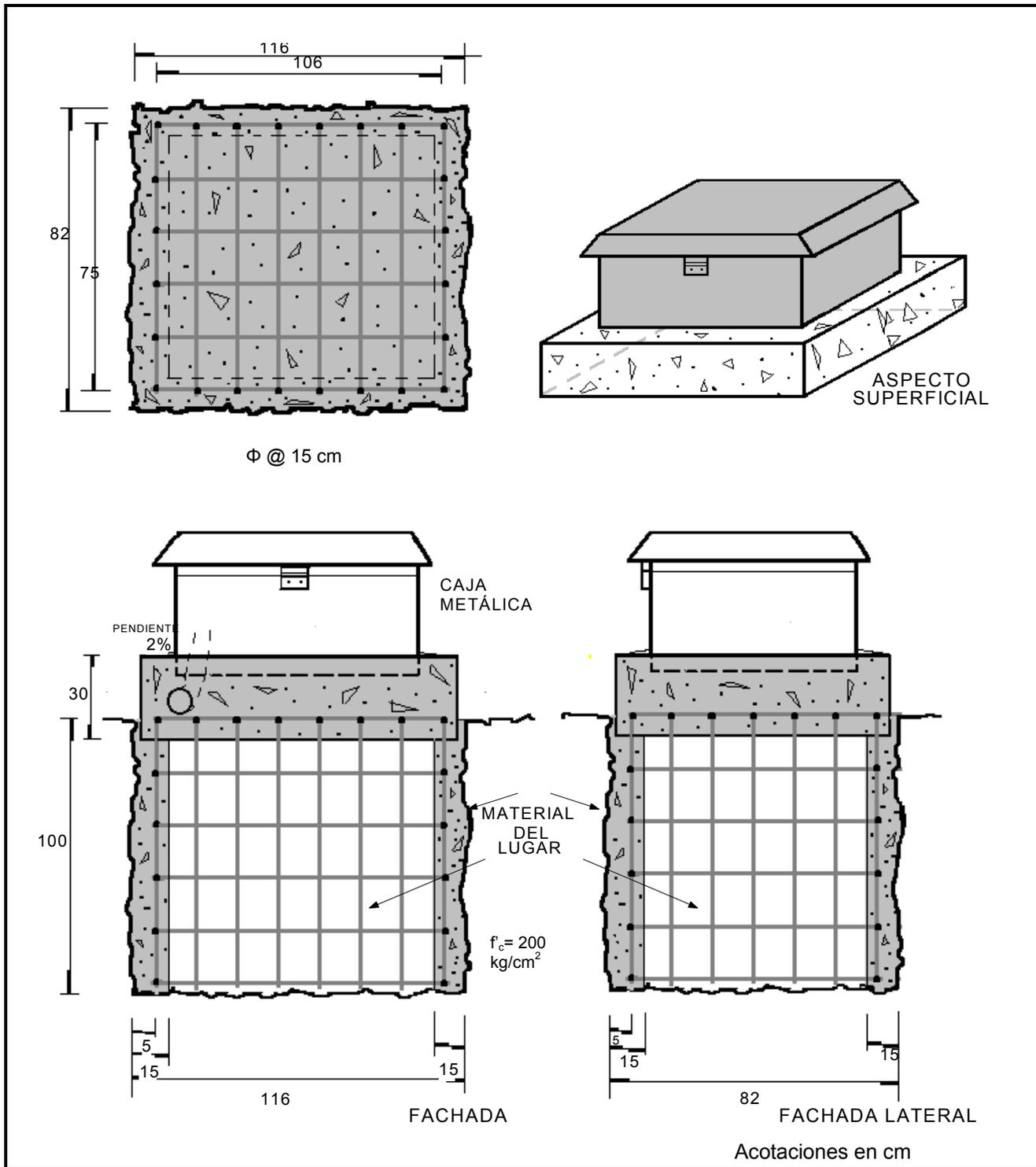


Figura 34. Estaciones OAXM, OXAL, OXBJ, OXCU, OXPM Y OXTO en suelo blando

### **III. LA AMPLIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO SÍSMICO**

#### **III.1 Acelerogramas obtenidos**

Desde que inició sus operaciones, los equipos que conforman la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca han tenido un funcionamiento óptimo. Muestra de ello es la cantidad considerable de registros de aceleración que se han podido captar ante la ocurrencia de sismos en las regiones que tienen influencia en el estado de Oaxaca y cuya intensidad fue la suficiente como para que se alcanzaran los niveles de activación fijados. En la tabla III se detallan las localizaciones epicentrales (la mayor parte de los eventos provienen de la franja costera del estado de Oaxaca) de los 71 eventos considerados para este trabajo, que han generado cuando menos un acelerograma en la RAO. Es de suma importancia señalar que éstos no reflejan toda la actividad sísmica ocurrida en la zona oaxaqueña, sino solamente aquellos sismos que generaron un registro acelerográfico. Se pueden señalar como los registros más importantes los ocurridos en las siguientes fechas: Agosto 28, 1973 (M=6.8), Noviembre 29, 1978 (M=7.8), Octubre 24, 1980 (M=6.4), Junio 7, 1982 (M=6.9), Enero 24, 1983 (M=5.3), Septiembre 14, 1995 (M=7.2), Octubre 21, 1995 (M=6.5), Febrero 3, 1998 (M=4.2), Junio 15, 1999 (M=6.7), Septiembre 30, 1999 (M=7.4), Enero 30, 2002 (M=5.1) y Junio 7, 2002 (M=4.7) (ref.19).

En la tabla IV se presentan las estaciones y fechas en las que se han obtenido los 134 registros considerados para la realización de este trabajo, recabados por la red instalada en la ciudad de Oaxaca.

A continuación se hará una breve descripción acerca del procesamiento de los registros acelerográficos. Como ya se mencionó, los datos de aceleración correspondientes a un registro son almacenados principalmente en cintas magnéticas (cassetes) y disquetes. Estos medios de almacenamiento son recolectados en visitas de campo, o bien, por medio de interrogación remota. El primer paso para la obtención del registro acelerográfico es corroborar que los eventos que han sido registrados se encuentren asociados con algún sismo confirmado por SSN.

No.	Fecha	Hora (GMT)	Coordenadas Epicentrales		Profundidad (km)	Magnitud		
			Lat. N	Long. W		Mc	Ms	Mb
1	10071971	05:05:16.0	18.40	100.2	88	4.2		
2	09071972	03:57:56.9	15.44	97.00	33		5.0	
3	08071972	12:10:49.8	15.87	97.19	33		6.1	
4	28081973	09:50:38.0	18.29	96.45	84			6.8
5	04121975	14:58:20.2	16.59	94.50	89			5.0
6	29111978	19:52:47.3	16.00	96.69	19		7.8	
7	29111978	20:04:45.5	15.74	96.83	33			7.3
8	29111978	20:49:13.0	15.74	96.18	33			4.5
9	24101980	14:53:33.7	18.03	98.29	70			6.4
10	21071981	09:14:16.0	15.91	98.66	33		4.7	5.1
11	07061982	06:52:31.8	16.17	98.36	18		6.9	5.9
12	07061982	10:59:36.5	16.26	98.51	24		7.0	6.3
13	24011983	09:32:48.2	14.93	95.43	33			5.3
14	15011987	08:04:56.0	16.97	94.58	120		5.0	4.6
15	04071994	21:36:43.8	14.83	97.29	31		5.9	
16	27081994	23:04:01.2	16.81	94.72	115		5.0	4.7
17	28081994	15:02:17.4	17.02	96.10	22		5.2	5.4

Tabla III. Datos epicentrales de los sismos registrados por la RAO

No.	Fecha	Hora (GMT)	Coordenadas Epicentrales		Profundidad (km)	Magnitud					
			Lat. N	Long. W		Mc	Ms	Ma	Me	Mb	
18	25091994	23:20:17.0	21.82	104.76	<5	2.4					
19	31031995	07:58:15.5	16.87	96.15	110	4.5					
20	14091995	14:04:30.5	16.31	98.88	22	7.3	7.2				6.4
21	21101995	02:38:59.0	16.92	93.62	98	6.5					6.2
22	25021996	14:27:24.3	15.48	98.04	13	5.2	5.3				5.2
23	27031996	12:34:48.2	16.21	98.25	7	4.6	4.9				5.5
24	01041996	03:43:06.1	16.61	96.02	39	5.0					4.9
25	03061996	11:55:26.6	17.48	94.65	129	4.9					4.9
26	06091996	08:29:21.7	17.13	96.86	80	4.1					
27	10101996	20:31:49.7	16.05	97.03	48	4.8					
28	21011997	21:19:58.0	16.44	98.15	18		5.0				5.1
29	03021998	03:02:01.1	15.69	96.37	33	6.4	6.2	6.4			6.0
30	03021998	07:17:53.5	15.84	96.60	1	4.7	4.2				4.9
31	03031998	07:38:23.0	15.71	96.47	12	4.9	4.5	5.0			5.0
32	02051998	07:36:19.5	17.28	96.81	91	4.4					3.9
33	07061998	23:20:16.1	15.82	94.07	18	5.2	5.6	6.2			5.8
34	20061998	22:07:34.5	16.96	95.21	115	4.8					4.5

Tabla III. (continuación)

No.	Fecha	Hora (GMT)	Coordenadas Epicentrales		Profundidad (km)	Magnitud	
			Lat. N	Long. W		Mc	Ms
35	13011999	02:14:07.0	16.06	97.19	5	4.5	
36	27011999	02:59:43.0	16.24	95.30	104	4.5	
37	15061999	20:42:05.0	18.20	97.47	92		6.7
38	15061999	21:52:10.0	18.52	97.58	60	4.5	
39	30001999	16:31:14.0	15.89	97.07	12		7.4
40	30001999	19:04:45.0	16.09	97.32	70	4.5	
41	01101999	03:33:37.0	15.85	97.17	34	4.6	
42	07101999	09:33:18.0	15.87	97.25	16	4.4	
43	25101999	21:38:14.0	16.69	98.43	55	4.6	
44	06111999	15:03:41.0	17.60	96.79	70	4.5	
45	10111999	01:19:29.0	15.88	96.68	16	4.3	
46	29111999	17:20:41.0	17.45	94.73	140	4.4	
47	17121999	13:51:19.0	17.23	95.96	135	4.3	
48	19012000	19:56:55.0	16.41	96.68	28	4.5	
49	01032000	23:31:26.0	15.86	97.12	16	4.7	
50	03122000	22:21:31.0	14.44	93.00	20	6.4	
51	05102000	15:57:44.0	16.02	97.23	28	4.7	
52	21072000	06:13:40.0	18.09	98.97	47	5.9	
53	17082000	21:32:01.0	17.84	95.47	42	4.4	

Tabla III. (continuación)

No.	Fecha	Hora (GMT)	Coordenadas epicentrales		Profundidad (km)	Magnitud M
			Lat. N	Long. W		
54	29092000	11:31:30.00	16.09	95.89	63	4.7
55	03102001	09:40:26.00	16.95	96.83	66	4.4
56	10112001	17:09:15.00	15.85	98.35	20	6.0
57	28112001	14:32:35.00	15.32	93.57	70	6.0
58	16012002	23:09:56.00	15.58	93.60	36	6.3
59	30012002	08:42:03.00	18.21	96.02	115	5.1
60	26022002	11:54:29.00	16.45	94.17	116	5.0
61	11052002	17:08:09.00	16.17	97.51	30	4.5
62	07062002	16:02:59.00	15.98	96.88	11	4.7
63	07062002	17:00:51.00	15.92	96.96	8	5.6
64	09062002	21:08:12.00	16.21	97.40	13	4.4
65	11062002	02:32:32.00	17.50	94.74	150	4.9
66	18062002	08:38:57.00	15.94	97.26	22	4.5
67	05082002	01:25:19.00	16.51	96.07	10	5.3
68	27082002	17:08:48.00	15.91	97.28	45	4.9
69	08112002	23:20:43.00	16.27	98.17	10	5.2
70	02122002	04:24:49.00	15.79	96.74	7	4.7
71	29122002	07:31:46.00	17.60	95.19	131	4.6

Tabla III. (continuación)

Núm. Reg.	Nombre de la estación	Fecha del sismo	Nombre del archivo CCCC AAMM.DD#	Tiempo inicial hh:mm:ss (GMT)	Duración (s)	Aceleración máxima (gal)			Equipo / NS	Orientación C1-C2-C3
						C1	C2	C3		
01	Oaxaca Fac. Medicina	27/ABR/1971	OAXM7104.271	-----	8.47	17.80	-11.28	20.18	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
02	Oaxaca Fac. Medicina	10/JUL/1971	OAXM7107.101	-----	13.70	27.03	14.28	23.63	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
03	Oaxaca Fac. Medicina	09/JUN/1972	OAXM7206.091	-----	11.68	8.23	12.65	-8.97	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
04	Oaxaca Fac. Medicina	08/JUL/1972	OAXM7207.081	-----	18.00	36.11	21.31	41.97	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
05	Oaxaca Fac. Medicina	28/AGO/1973	OAXM7308.281	-----	40.39	199.4	123.37	163.96	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
06	Oaxaca Fac. Medicina	04/DIC/1975	OAXM7512.041	-----	14.86	-27.50	14.31	15.25	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
07	Oaxaca Fac. Medicina	29/NOV/1978	OAXM7811.291	-----	12.60	216.43	81.08	144.83	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
08	Oaxaca Fac. Medicina	29/NOV/1978	OAXM7811.292	-----	7.46	-56.90	31.94	38.40	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
09	Oaxaca Fac. Medicina	29/NOV/1978	OAXM7811.293	-----	8.97	98.21	-47.31	00.00	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
10	Oaxaca Fac. Medicina	24/OCT/1980	OAXM8010.241	-----	29.04	-117.45	-65.53	162.44	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
11	Oaxaca Fac. Medicina	21/JUL/1981	OAXM8107.211	-----	10.88	40.05	-23.21	-33.41	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
12	Oaxaca Fac. Medicina	07/JUN/1982	OAXM8206.071	-----	16.02	-16.69	-15.12	-19.05	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
13	Oaxaca Fac. Medicina	07/JUN/1982	OAXM8206.072	-----	52.00	35.37	24.14	35.02	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
14	Oaxaca Fac. Medicina	24/ENE/1983	OAXM8301.241	-----	67.90	-46.03	-28.68	29.05	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
15	Oaxaca Fac. Medicina	15/ENE/1987	OAXM8701.151	-----	20.98	11.23	5.86	-6.95	SMA-1/0162	N00E-V-N90W
16	Oaxaca Fac. Medicina	04/JUL/1994	OAXM9407.041	21:37:42.00	26.95	11.48	-22.97	-21.05	DCA-333/122	V-N90E-N00E
17	Oaxaca Fac. Medicina	27/AGO/1994	OAXM9408.271	23:04:59.00	22.17	-7.66	-10.53	-16.27	DCA-333/122	V-N90E-N00E
18	Oaxaca Fac. Medicina	28/AGO/1994	OAXM9408.281	15:02:45.00	24.85	-15.31	-32.54	-27.75	DCA-333/122	V-N90E-N00E

Tabla IV. Registros de aceleración obtenidos por la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca

Núm. Reg.	Nombre de la estación	Fecha del sismo	Nombre del archivo CCCC-AAMM.DD#	Tiempo inicial hh:mm:ss (GMT)	Duración (s)	Aceleración máxima (gal)			Equipo / NS	Orientación C1-C2-C3
						C1	C2	C3		
19	Oaxaca Fac. Medicina	25/SEP/1994	OAXM9409.251	23:18:56.00	15.70	7.66	-9.57	16.27	DCA-333/122	V-N90E-N00E
20	Oaxaca Fac. Medicina	31/MAR/1995	OAXM9503.311	07:58:36.00	15.24	-6.70	-11.48	-9.57	DCA-333/122	V-N90E-N00E
21	Oaxaca Fac. Medicina	14/SEP/1995	OAXM9509.141	14:05:16.00	57.26	-31.29	-40.96	40.02	DCA-333/122	V-N90E-N00E
22	Oaxaca Fac. Medicina	21/OCT/1995	OAXM9510.211	02:39:54.00	84.25	-18.74	-32.99	-34.41	DCA-333/122	V-N90E-N00E
23	Oaxaca Fac. Medicina	25/FEB/1996	OAXM9602.251	14:28:19.00	15.19	5.03	9.13	-9.66	DCA-333/122	V-N90E-N00E
24	Oaxaca Fac. Medicina	27/MAR/1996	OAXM9603.271	12:35:42.00	15.56	-5.32	-10.77	12.60	DCA-333/122	V-N90E-N00E
25	Oaxaca Fac. Medicina	01/ABR/1996	OAXM9604.011	03:43:31.00	19.05	15.10	25.05	24.55	DCA-333/122	V-N90E-N00E
26	Oaxaca Fac. Medicina	03/JUN/1996	OAXM9606.031	11:56:31.00	17.95	-7.21	-11.48	10.81	DCA-333/122	V-N90E-N00E
27	Oaxaca Fac. Medicina	06/SEP/1996	OAXM9609.061	08:29:40.00	15.44	9.40	14.39	24.55	DCA-333/122	V-N90E-N00E
28	Oaxaca Fac. Medicina	10/DIC/1996	OAXM9612.101	20:32:22.00	17.89	-11.04	-9.38	15.60	DCA-333/122	V-N90E-N00E
29	Oaxaca Fac. Medicina	21/ENE/1997	OAXM9701.211	21:20:50.00	19.08	-3.88	10.81	-9.10	DCA-333/122	V-N90E-N00E
30	Oaxaca Fac. Medicina	03/FEB/1998	OAXM9802.031	03:02:29.00	52.63	29.85	-45.68	-71.13	DCA-333/122	V-N90E-N00E
31	Oaxaca Fac. Medicina	03/FEB/1998	OAXM9802.032	07:18:37.00	15.66	-5.31	9.05	12.09	DCA-333/122	V-N90E-N00E
32	Oaxaca Fac. Medicina	03/MAR/1998	OAXM9803.031	07:39:08.00	15.13	-4.39	11.17	7.62	DCA-333/122	V-N90E-N00E
33	Oaxaca Fac. Medicina	02/MAY/1998	OAXM9805.021	03:36:47.00	14.89	-8.36	-10.58	13.91	DCA-333/122	V-N90E-N00E
34	Oaxaca Fac. Medicina	07/JUN/1998	OAXM9806.071	23:21:45.00	27.49	6.06	12.92	14.32	DCA-333/122	V-N90E-N00E
35	Oaxaca Fac. Medicina	20/JUN/1998	OAXM9806.201	22:08:29.00	15.05	-4.76	8.19	-7.87	DCA-333/122	V-N90E-N00E
36	Oaxaca Fac. Medicina	13/ENE/1999	OAXM9901.131	02:14:36.00	15.05	-4.72	10.15	-7.66	DCA-333/122	V-N90E-N00E

Tabla IV. (continuación)

Núm. Reg.	Nombre de la estación	Fecha del Sismo	Nombre del archivo CCCCAAMM.DD#	Tiempo inicial hh:mm:ss (GMT)	Duración (s)	Aceleración máxima (gal)			Equipo / NS	Orientación C1-C2-C3
						C1	C2	C3		
37	Oaxaca Fac. Medicina	27/ENE/1999	OAXM9901.271	03:00:31.00	16.51	6.92	7.77	11.03	DCA-333/122	V-N90E-N00E
38	Oaxaca Fac. Medicina	15/JUN/1999	OAXM9906.151	20:42:29.00	92.41	52.17	-89.10	88.14	DCA-333/122	V-N90E-N00E
39	Oaxaca Las Canteras	15/JUN/1999	OXLC9906.151	20:41:56.00	149.00	18.29	12.98	23.50	ETNA/1328	N90W-V-N00W
40	Oaxaca Fac. Medicina	15/JUN/1999	OAXM9906.152	21:52:53.00	18.05	6.42	-9.83	11.67	DCA-333/122	V-N90E-N00E
41	Oaxaca Las Canteras	15/JUN/1999	OXLC9906.152	21:52:16.00	72.00	-3.35	1.95	1.87	ETNA/1328	N90W-V-N00W
42	Oaxaca Fac. Medicina	30/SEP/1999	OAXM9909.301	16:31:30.00	112.80	-164.56	-352.89	-370.27	DCA-333/122	V-N90E-N00E
43	Oaxaca Las Canteras	30/SEP/1999	OXLC9909.301	16:30:54.00	180.00	-74.65	-48.25	-70.14	ETNA/1328	N90W-V-N00W
44	Oaxaca Fac. Medicina	30/SEP/1999	OAXM9909.304	19:05:15.00	15.50	4.02	7.11	-4.59	DCA-333/122	V-N90E-N00E
45	Oaxaca Fac. Medicina	01/OCT/1999	OAXM9910.012	03:34:07.00	16.11	-4.57	-5.30	8.86	DCA-333/122	V-N90E-N00E
46	Oaxaca Alameda	07/OCT/1999	OXAL9910.071	09:33:24.00	62.00	2.74	3.03	-1.58	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
47	Oaxaca Inst. Tecnológico	07/OCT/1999	OXTO9910.071	09:33:09.00	61.00	1.90	2.98	2.27	ETNAepi/1531	N00W-N90-W-V
48	Oaxaca Alameda	25/OCT/1999	OXAL9910.251	21:38:32.00	62.00	-3.62	-2.37	-1.25	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
49	Oaxaca Inst. Tecnológico	25/OCT/1999	OXTO9910.251	21:38:32.00	71.00	-2.81	2.35	-4.75	ETNAepi/1531	N00W-N90-W-V
50	Oaxaca Fac. Medicina	06/NOV/1999	OAXM9911.061	15:04:00.39	17.12	-7.77	-8.29	-13.22	DCA-333/122	V-N90E-N00E
51	Oaxaca Alameda	06/NOV/1999	OXAL9911.061	15:03:24.00	77.00	-6.46	4.69	3.36	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
52	Oaxaca Las Canteras	06/NOV/1999	OXLC9911.061	15:03:24.00	72.00	2.87	1.61	-3.31	ETNA/1328	N90W-V-N00W
53	Oaxaca Primaria Mugica	06/NOV/1999	OXPM9911.061	15:03:34.00	64.00	-7.07	7.05	3.62	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
54	Oaxaca Inst. Tecnológico	06/NOV/1999	OXTO9911.061	15:03:23.00	84.00	9.10	-5.01	-10.70	ETNAepi/1531	N00W-N90W-V

Tabla IV. (continuación)

Núm. Reg.	Nombre de la estación	Fecha del Sismo	Nombre del archivo CCCCAMM.DD#	Tiempo inicial hh:mm:ss (GMT)	Duración (s)	Aceleración máxima (gal)			Equipo / NS	Orientación C1-C2-C3
						C1	C2	C3		
55	Oaxaca Fac. Medicina	10/NOV/1999	OAXM9911.101	01:19:58.39	14.75	4.85	6.70	10.28	DCA-333/122	V-N90E-N00E
56	Oaxaca Alameda	10/NOV/1999	OXAL9911.101	01:19:31.00	65.00	-4.34	4.98	3.14	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
57	Oaxaca Primaria Mugica	10/NOV/1999	OXPM9911.101	01:19:33.00	61.00	-5.14	4.23	-2.04	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
58	Oaxaca Inst. Tecnológico	10/NOV/1999	OXTO9911.101	01:19:32.00	65.00	4.47	-2.43	-4.72	ETNAepi/1531	N00W-N90-W-V
59	Oaxaca Inst. Tecnológico	29/NOV/1999	OXTO9911.291	17:21:12.00	63.00	4.11	-2.11	-3.26	ETNAepi/1531	N00W-N90-W-V
60	Oaxaca Primaria Mugica	17/DIC/1999	OXPM9912.171	13:51:26.00	63.00	-5.65	-5.83	3.16	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
61	Oaxaca Inst. Tecnológico	17/DIC/1999	OXTO9912.171	13:51:27.00	70.00	-5.43	3.78	-7.77	ETNAepi/1531	N00W-N90-W-V
62	Oaxaca Fac. Medicina	19/ENE/2000	OAXM0001.191	19:57:12.07	17.0	-7.46	-13.56	11.83	DCA-333/122	V-N90E-N00E
63	Oaxaca Las Canteras	19/ENE/2000	OXLC0001.191	19:56:26.00	81.00	6.00	3.80	-3.26	ETNA/1328	N90W-V-N00W
64	Oaxaca Primaria Mugica	19/ENE/2000	OXPM0001.191	19:56:45.00	66.00	10.81	12.69	-7.59	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
65	Oaxaca Inst. Tecnológico	19/ENE/2000	OXTO0001.191	19:56:37.00	80.00	-9.25	-4.73	9.19	ETNAepi/1531	N00W-N90-W-V
66	Oaxaca Fac. Medicina	01/MAR/2000	OAXM0003.011	23:31:53.00	17.85	6.70	-22.01	16.27	DCA-333/122	V-N90E-N00E
67	Oaxaca Cd. Universitaria	01/MAR/2000	OXCJ0003.011	23:31:54.00	12.42	10.53	-44.98	22.01	DCA-333/170	V-N90E-N00E
68	Oaxaca Las Canteras	01/MAR/2000	OXLC0003.011	23:31:17.00	71.00	-2.69	-1.45	-2.40	ETNA/1328	N90W-V-N00W
69	Oaxaca Primaria Mugica	01/MAR/2000	OXPM0003.011	23:31:26.00	63.00	7.06	-7.10	-3.06	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
70	Oaxaca Inst. Tecnológico	01/MAR/2000	OXTO0003.011	23:31:26.00	67.00	-10.29	4.39	-11.30	ETNAepi/1531	N00W-N90-W-V
71	Oaxaca Inst. Tecnológico	12/MAR/2000	OXTO0003.121	22:23:06.00	77.00	5.77	1.85	4.87	ETNAepi/1531	N00W-N90-W-V
72	Oaxaca Las Canteras	12/MAR/2000	OXLC0003.121	22:22:58.00	76.00	2.42	-1.82	-1.72	ETNA/1328	N90W-V-N00W

Tabla IV. (continuación)

Núm. Reg.	Nombre de la estación	Fecha del Sismo	Nombre del archivo CCCC AAMM.DD#	Tiempo inicial hh:mm:ss (GMT)	Duración (s)	Aceleración máxima (gal)			Equipo / NS	Orientación C1-C2-C3
						C1	C2	C3		
73	Oaxaca Fac. Medicina	10/MAY/2000	OAXM0005.101	15:58:13.00	14.67	6.70	12.44	12.44	DCA-333/122	V-N90E-N00E
74	Oaxaca Alameda	10/MAY/2000	OXAL0005.101	15:57:45.00	64.00	5.20	-6.42	-2.88	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
75	Oaxaca Cd. Universitaria	10/MAY/2000	OXCU0005.101	15:58:13.00	16.93	2.39	10.05	-25.36	DCA-333/170	V-N90E-N00E
76	Oaxaca Primaria Mugica	10/MAY/2000	OXPM0005.101	15:57:48.00	61.00	-5.71	-5.84	-2.47	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
77	Oaxaca Inst. Tecnológico	10/MAY/2000	OXT00005.101	15:57:46.00	64.00	10.22	-3.60	5.16	ETNAepi/1531	N00W-N90W-V
78	Oaxaca Cd. Universitaria	21/JUL/2000	OXCU0007.211	06:14:47.00	15.08	2.10	4.57	-8.15	DCA-333/170	V-N90E-N00E
79	Oaxaca Inst. Tecnológico	21/JUL/2000	OXT00007.211	06:14:18.00	81.00	-8.02	-6.95	2.58	ETNAepi/1531	N00W-N90W-V
80	Oaxaca Inst. Tecnológico	17/AGO/2000	OXT00008.171	21:32:13.00	61.00	3.64	4.41	2.53	ETNAepi/1531	N00W-N90W-V
81	Oaxaca Las Canteras	29/SEP/2000	OXLC0009.291	11:31:27.00	72.00	-3.97	1.73	-2.15	ETNA/1328	N90W-V-N00W
82	Oaxaca Primaria Mugica	29/SEP/2000	OXPM0009.291	11:31:39.00	61.00	6.91	8.60	2.37	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
83	Oaxaca Inst. Tecnológico	29/SEP/2000	OXT00009.291	11:31:38.00	67.00	-5.66	-9.45	-4.47	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
84	Oaxaca Fac. Medicina	03/OCT/2001	OAXM0110.031	09:40:32.00	26.17	14.36	-23.66	-30.67	DCA-333/122	V-N90E-N00E
85	Oaxaca Alameda	03/OCT/2001	OXAL0110.031	09:40:06.00	70.00	-15.63	10.41	-23.62	ETNAepi/1531	N00W-N90W-V
86	Oaxaca Las Canteras	03/OCT/2001	OXLC0110.031	09:39:56.00	80.00	9.46	-7.63	6.45	ETNA/1328	N90W-V-N00W
87	Oaxaca Primaria Mugica	03/OCT/2001	OXPM0110.031	09:40:13.00	64.00	-23.19	-19.19	9.39	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
88	Oaxaca Inst. Tecnológico	03/OCT/2001	OXT00110.031	09:40:06.00	72.00	-17.67	18.19	-15.15	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
89	Oaxaca Fac. Medicina	10/NOV/2001	OAXM0110.031	17:10:11.00	18.68	4.55	-8.26	7.25	DCA-333/122	V-N90E-N00E
90	Oaxaca Primaria Mugica	10/NOV/2001	OXPM0110.031	17:09:47.00	62.00	5.65	4.21	3.75	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V

Tabla IV. (continuación)

Núm. Reg.	Nombre de la estación	Fecha del Sismo	Nombre del archivo CCCCAMM.DD#	Tiempo inicial hh:mm:ss (GMT)	Duración (s)	Aceleración máxima (gal)			Equipo / NS	Orientación C1-C2-C3
						C1	C2	C3		
91	Oaxaca Inst. Tecnológico	10/NOV/2001	OXTO0111.101	17:09:43.00	66.00	9.56	7.49	-2.85	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
92	Oaxaca Inst. Tecnológico	28/NOV/2001	OXTO0111.281	14:33:46.00	67.00	-4.47	-4.83	1.81	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
93	Oaxaca Fac. Medicina	16/ENE/2002	OAXM0201.161	23:11:28.00	24.56	-4.60	-8.92	-7.73	DCA-333/122	V-N90E-N00E
94	Oaxaca Las Canteras	16/ENE/2002	OXLC0201.161	23:10:49.00	96.00	4.36	-2.87	-2.69	ETNA/1328	N90W-V-N00W
95	Oaxaca Primaria Mugica	16/ENE/2002	OXPM0201.161	23:11:04.00	70.00	5.75	-8.55	-3.52	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
96	Oaxaca Inst. Tecnológico	16/ENE/2002	OXTO0201.161	23:10:59.00	96.00	14.14	13.29	-5.09	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
97	Oaxaca Fac. Medicina	30/ENE/2002	OAXM0201.301	08:42:24.00	64.90	38.87	-66.88	65.65	DCA-333/122	V-N90E-N00E
98	Oaxaca Cd. Universitaria	30/ENE/2002	OXC0201.301	08:42:23.00	69.15	-42.22	53.60	-55.49	DCA-333/170	V-N90E-N00E
99	Oaxaca Las Canteras	30/ENE/2002	OXLC0201.301	08:41:49.00	105.00	-14.02	12.10	-12.65	ETNA/1328	N90W-V-N00W
100	Oaxaca Primaria Mugica	30/ENE/2002	OXPM0201.301	08:41:58.00	103.00	40.84	-41.20	-27.48	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
101	Oaxaca Inst. Tecnológico	30/ENE/2002	OXTO0201.301	08:41:58.00	118.00	-42.02	64.14	32.02	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
102	Oaxaca Inst. Tecnológico	26/FEB/2002	OXTO0202.261	11:55:02.00	74.00	4.49	5.62	2.36	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
103	Oaxaca Primaria Mugica	11/MAY/2002	OXPM0205.111	17:08:04.00	72.00	-7.92	-5.16	2.73	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
104	Oaxaca Inst. Tecnológico	11/MAY/2002	OXTO0205.111	17:08:03.00	76.00	3.86	-5.31	2.61	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
105	Oaxaca Fac. Medicina	07/JUN/2002	OAXM0206.071	16:02:52.00	71.00	-6.37	3.66	-5.69	ETNA/1021	N90W-V-N00E
106	Oaxaca Cd. Universitaria	07/JUN/2002	OXC0206.071	16:02:52.00	73.00	8.19	-1.96	8.09	ETNA/1022	N90W-V-N00W
107	Oaxaca Inst. Tecnológico	07/JUN/2002	OXTO0206.071	16:02:53.00	75.00	6.46	6.50	3.30	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
108	Oaxaca Fac. Medicina	07/JUN/2002	OAXM0206.072	17:00:43.00	84.00	-26.40	10.99	-29.95	ETNA/1021	N90W-V-N00E

Tabla IV. (continuación)

Núm. Reg.	Nombre de la estación	Fecha del Sismo	Nombre del archivo CCCAAMM.DD#	Tiempo inicial hh:mm:ss (GMT)	Duración (s)	Aceleración máxima (gal)			Equipo / NS	Orientación
						C1	C2	C3		
109	Oaxaca Alameda	07/JUN/2002	OXAL0206.071	17:00:45.00	79.00	-16.43	6.98	-13.75	ETNAepi/1531	N00W-N90W-V
110	Oaxaca Cd. Universitaria	07/JUN/2002	OXC0206.072	17:00:44.00	88.00	-23.42	-6.59	26.23	ETNA/1022	N90W-V-N00W
111	Oaxaca Las Canteras	07/JUN/2002	OXLC0206.071	17:00:45.00	82.00	-8.85	5.26	-6.94	ETNA/1328	N90W-V-N00W
112	Oaxaca Primaria Mugica	07/JUN/2002	OXPM0206.071	17:00:45.00	81.00	16.76	-12.22	9.46	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
113	Oaxaca Inst. Tecnológico	07/JUN/2002	OXTO0206.072	17:00:31.00	114.00	-18.23	24.04	-11.36	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
114	Oaxaca Alameda	09/JUN/2002	OXAL0206.091	21:08:05.00	71.00	-11.21	6.25	7.70	ETNAepi/1531	N00W-N90W-V
115	Oaxaca Cd. Universitaria	09/JUN/2002	OXC0206.091	21:08:04.00	71.00	6.19	1.72	-9.00	ETNA/1022	N90W-V-N00W
116	Oaxaca Inst. Tecnológico	11/JUN/2002	OXTO0206.111	02:32:57.00	71.00	3.47	-4.93	4.31	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
117	Oaxaca Fac. Medicina	18/JUN/2002	OAXM0206.181	08:38:50.00	71.00	9.51	5.57	4.55	ETNA/1021	N90W-V-N00E
118	Oaxaca Fac. Medicina	05/AGO/2002	OAXM0208.051	01:25:25.00	73.00	5.37	3.87	7.77	ETNA/1021	N90W-V-N00E
119	Oaxaca Cd. Universitaria	05/AGO/2002	OXC0208.051	01:25:26.00	73.00	8.01	2.17	-7.86	ETNA/1022	N90W-V-N00W
120	Oaxaca Las Canteras	05/AGO/2002	OXLC0208.051	01:25:25.00	73.00	-2.47	1.37	1.99	ETNA/1328	N90W-V-N00W
121	Oaxaca Primaria Mugica	05/AGO/2002	OXPM0208.051	01:25:27.00	71.00	6.55	5.44	-2.64	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
122	Oaxaca Inst. Tecnológico	05/AGO/2002	OXTO0208.051	01:25:25.00	81.00	-9.69	-7.19	4.25	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
123	Oaxaca Fac. Medicina	27/AGO/2002	OAXM0208.271	17:08:44.00	79.00	-13.90	-6.24	15.35	ETNA/1021	N90W-V-N00E
124	Oaxaca Alameda	27/AGO/2002	OXAL0208.271	17:08:45.00	74.00	10.80	-4.20	11.28	ETNAepi/1531	N00W-N90W-V
125	Oaxaca Cd. Universitaria	27/AGO/2002	OXC0208.271	17:08:45.00	82.00	-11.05	3.78	-12.15	ETNA/1022	N90W-V-N00W
126	Oaxaca Las Canteras	27/AGO/2002	OXLC0208.271	17:08:46.00	75.00	-3.67	-2.42	-2.43	ETNA/1328	N90W-V-N00W

Tabla IV. (continuación)

Núm. Reg.	Nombre de la estación	Fecha del Sismo	Nombre del archivo CCCC AAMI.DD#	Tiempo inicial hh:mm:ss (GMT)	Duración (s)	Aceleración máxima (gal)			Equipo / NS	Orientación
						C1	C2	C3		
127	Oaxaca Primaria Mugica	27/AGO/2002	OXP0208.271	17:08:46.00	76.00	-12.82	8.78	-4.16	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
128	Oaxaca Inst. Tecnológico	27/AGO/2002	OXT0208.271	17:08:45.00	85.00	-13.79	-15.34	-5.45	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
129	Oaxaca Inst. Tecnológico	08/NOV/2002	OXT0211.081	23:20:52.00	71.00	-3.99	-3.08	1.52	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
130	Oaxaca Inst. Tecnológico	02/DIC/2002	OXT0212.021	04:24:47.00	76.00	8.03	-6.25	-2.83	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V
131	Oaxaca Fac. Medicina	29/DIC/2002	OAXM0212.291	07:32:01.00	71.00	-8.87	4.87	-6.98	ETNAV1021	N90W-V-N00E
132	Oaxaca Cd. Universitaria	29/DIC/2002	OXC0212.291	07:32:02.00	71.00	6.49	-3.60	-5.86	ETNAV1022	N90W-V-N00W
133	Oaxaca Primaria Mugica	29/DIC/2002	OXP0212.291	07:32:00.00	71.00	4.82	-5.42	-3.24	ETNAepi/1917	N00W-N90W-V
134	Oaxaca Inst. Tecnológico	29/DIC/2002	OXT0212.291	07:31:58.00	79.00	-6.29	-6.32	4.41	ETNAepi/1918	N00W-N90W-V

Tabla IV. (continuación)

Lo anterior es importante pues no todos los disparos de los acelerógrafos se deben a movimientos sísmicos, ya que los niveles de activación pueden ser alcanzados por vibraciones producidas por otras fuentes, tales como tránsito pesado en las calles cercanas a la estación, golpes fortuitos, etc.

El contenido de las cintas y disquetes se reporta en hojas de lectura, en donde se indican los datos del cassette y la estación en la cual se realizó la grabación, la fecha y hora de los disparos encontrados, los valores máximos de aceleración por canal y el nombre con el cual se denotará el archivo. Como el contenido de las cintas y disquetes se encuentra en lenguaje binario, es necesario transformar estos archivos al formato ASCII mediante el uso de programas de computación ("TERRAII50" en el caso de las cintas, y "KW2V1" para los disquetes). Como resultado se obtiene un archivo *nativo* o de transición que servirá para finalmente obtener, mediante el uso del programa "STDV4.EXE", un archivo en formato ASCIISTD ó ASA (ASCII-estándar de aceleración) para los tres canales de registro.

El archivo ASCIISTD es un archivo de texto con caracteres ASCII estándar, que puede desplegarse fácilmente y modificarse con cualquier editor de texto. Consiste principalmente de dos bloques de datos, uno que contiene el encabezado, y otro para los datos numéricos de aceleración. El encabezado contiene información tanto de la estación (nombre, código asignado, coordenadas, modelo y número de serie, escala completa de registro, memoria de preevento y posevento, etc.), como del epicentro (datos del sismo como fecha y tiempo GMT de origen del evento, magnitud, localización, profundidad focal, etc.).

Finalmente, se llevan a cabo los procesos para la generación de la gráfica de los tres canales del archivo ASCIISTD, mediante el uso de los programas CREAPXY6.EXE y PLOTSH.EXE. En la figura 35 se muestra la gráfica de un archivo ASCII estándar de aceleración.

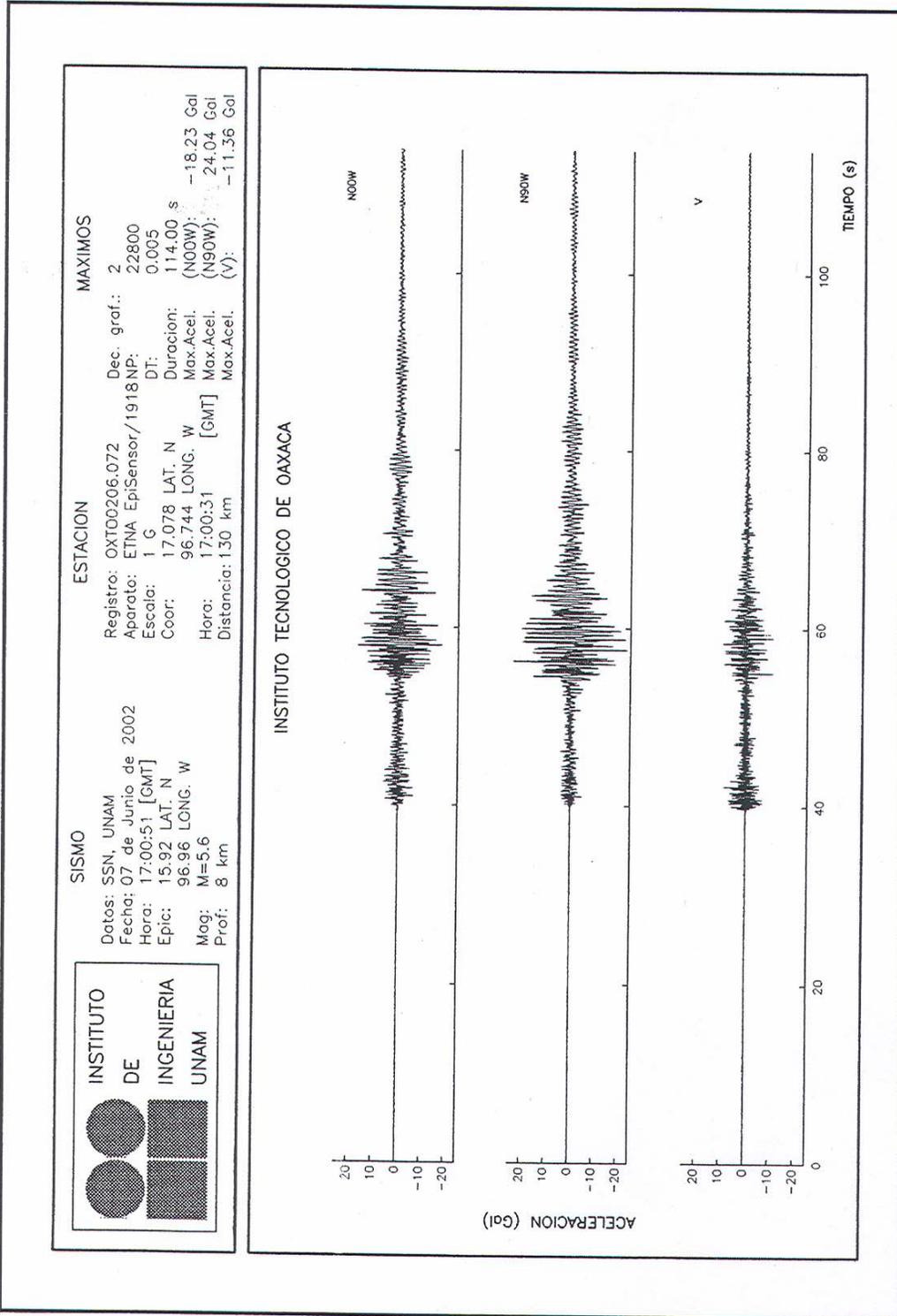


Figura 35. Acelerograma en formato ASCII estándar de aceleración (ASCIISTD)

### III.2 Espectros de Fourier y funciones de transferencia

Una herramienta matemática muy útil para el análisis de señales son las llamadas transformadas lineales, pues permiten reordenar los datos originales tomando en cuenta la frecuencia en lugar del tiempo. En especial, las transformadas de Fourier tienen un amplio uso en diversos campos de la ciencia para poder resolver algunos problemas; gracias al teorema desarrollado por el matemático Jean Baptiste Joseph Fourier y completado por el matemático alemán Dirichlet, es posible demostrar que toda función periódica continua, con un número finito de máximos y mínimos en cualquier período, puede desarrollarse en una única serie trigonométrica uniformemente a dicha función, conocida como serie de Fourier. La extensión de estas series a funciones continuas nos lleva a expresiones integrales como las transformadas de Fourier que son relaciones matemáticas con las cuales es posible determinar la relación existente entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia (ref. 20). La esencia de la transformada de Fourier de una señal es descomponerla o separarla en una serie de senoides de diferentes frecuencias, las cuales corresponden a la suma de la original. Lo anterior permite distinguir o identificar las diferentes frecuencias y sus respectivas amplitudes.

Mediante la siguiente expresión se define a la transformada de Fourier:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

$F(\omega)$ = Señal transformada en el dominio de la frecuencia ( $\omega$ )

$f(t)$ = Señal en el dominio del tiempo

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

$\omega$  = Frecuencia en Hz.

$T$ = Período en s.

Ya que los registros obtenidos sólo contienen datos de aceleración de tipo discreto, el cálculo numérico realizado por las computadoras digitales requiere ese tipo de muestras. Por ello se desarrolló la transformada discreta de Fourier (DFT), la cual permite su empleo en aplicaciones numéricas calculadas con un algoritmo más sencillo conocido como transformada rápida de Fourier (FFT). El objetivo de este algoritmo es reducir considerablemente el número de cálculos matemáticos y funciona partiendo la señal en un determinado número de subseñales más cortas y calculando la DFT de cada una de éstas; después la FFT combina estas DFT para obtener la DFT de la señal original.

Cuando se aplica la transformada rápida de Fourier a una señal, se determina la relación de esta en el dominio de las frecuencias. El espectro de Fourier se obtiene al graficar esta relación; de esta manera se puede hacer una adecuada selección del rango en el que se encuentran las frecuencias altas y bajas relacionadas con otro tipo de fenómenos. Este espectro relaciona las amplitudes con el contenido de frecuencias de una señal; se calcula como el valor absoluto de la raíz de la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria de la señal en el dominio de la frecuencia, mediante las siguientes expresiones:

$$|F(\omega)| = \left[ R(\omega)^2 + jX(\omega)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt \tag{4}$$

$$X(\omega) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \text{sen}(\omega t) dt \tag{5}$$

$F(\omega)$  = Señal transformada al dominio de la frecuencia ( $\omega$ )

$\omega$  = frecuencia en Hz

$f(t)$  = Señal en el dominio del tiempo

$J^2 = -1$

El espectro de Fourier es utilizado en el estudio de acelerogramas ya que es una herramienta que permite hacer un análisis del contenido de las frecuencias de los movimientos del terreno, producidas al propagarse las ondas sísmicas a través de éste, al mismo tiempo que las relaciona con el valor correspondiente de amplitud.

Los espectros de Fourier también se pueden utilizar para determinar relaciones denominadas como *Funciones de transferencia*. Estas últimas resultan útiles para poder inferir la variación del movimiento sísmico de un sitio a otro diferente, al momento en que se propaga la onda y se filtra a través de los distintos estratos que conforman el suelo. Dichas funciones se calculan por medio de los cocientes espectrales de Fourier, de manera tal que se puede establecer la proporcionalidad de amplificación o atenuación en relación a un sitio determinado.

Resulta importante señalar que se deben hacer dos operaciones al registro antes de dar inicio al cálculo propio de los espectros de Fourier: *corrección de línea base y filtrado*. Lo anterior se debe a que los registros de los movimientos del suelo producidos por un temblor, muchas veces incluyen vibraciones ajenas al propio evento sísmico, como aquellas producidas por el tránsito local, paso de algún vehículo, etc. A continuación se enumeran algunas causas que pueden conducir a la existencia de alteraciones y corrimientos en el acelerograma original:

- Distorsiones inducidas por los sensores, el medio de registro y/o la forma de convertir los datos de una señal continua en el tiempo (como lo es la aceleración inducida por un temblor) a valores discretos que la representan en una gráfica adecuadamente.
- Efectos de temperatura y humedad que causen deformaciones en el medio de registro.
- El desconocimiento de los valores inicial y final del movimiento en el sitio de registro, aunque esto se puede minimizar con la implementación de los tiempos de preevento y posevento programados en los acelerógrafos.
- El corrimiento del cero del registro con respecto al cero real de aceleración; podría deberse a la respuesta del sensor ante aceleraciones transversales a su eje de medición o a la no linealidad en algunos circuitos de amplificación.

### III.3 Espectros de Respuesta

La función que nos relaciona la respuesta máxima de una estructura, modelada como un sistema de comportamiento lineal y de un grado de libertad sometida a una excitación sísmica, con su período de vibración se le conoce como espectro de respuesta (ref 21). A continuación se presenta una explicación sencilla acerca de los sistemas lineales de un grado de libertad.

El número de grados de libertad de un sistema, desde el punto de vista de la dinámica, corresponde al número mínimo de coordenadas necesarias para definir la posición, tanto en el espacio como en el tiempo, de todas las partículas de masa del sistema. La posición original de equilibrio de un sistema elástico estáticamente cargado cambia al ser movido de alguna manera; las fuerzas y los momentos internos ya no estarán en balance con las cargas externas y comenzarán a presentarse vibraciones. De manera general, un sistema elástico puede presentar distintos modos de vibrar. El más simple de los casos la configuración de un sistema de vibración en cualquier instante puede determinarse con sólo una coordenada; a tales casos se les llama *sistemas de un grado de libertad* (ref. 22). La masa, la elasticidad y el amortiguamiento son propiedades físicas esenciales de todo sistema linealmente elástico sujeto a cargas dinámicas; además todas ellas son afectadas por la fuente externa de excitación o fuerza. En el caso de un sistema de un grado de libertad, se asume que todas estas propiedades se encuentran concentradas en un solo elemento físico.

De manera general, todo cuerpo que no se encuentra en reposo tiende a disminuir su movimiento con el tiempo. Esta disminución se puede explicar por la pérdida de la energía presente en el sistema. Esta pérdida puede ser producida por fuerzas de amortiguamiento o de fricción que actúan sobre el sistema. Las causas de este amortiguamiento están asociadas con diferentes fenómenos, dentro de los cuales se puede mencionar la fricción de la masa sobre la superficie de apoyo, el efecto del aire que rodea la masa, el cual tiende a impedir el movimiento, la no linealidad del material, entre otros. Se tienen varias maneras para describir el amortiguamiento, siendo las más empleadas (ref. 23): 1) *Viscoso*. Un cuerpo que se encuentra en movimiento dentro de un fluido tiende a perder energía debido a que la viscosidad del fluido se opone al movimiento; 2) *De Coulomb*. Corresponde al fenómeno físico de fricción entre

superficies secas. 3) Histerético. La histéresis es un fenómeno mediante el cual se relacionan dos ó más propiedades físicas de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo. Este tipo de amortiguamiento se presenta cuando el elemento estructural es sometido a inversiones en el sentido de la carga aplicada.

La figura 36 presenta el esquema de un sistema lineal de un grado de libertad, en cuyo caso la ordenada  $x$  indica la posición de la masa  $m$ . Esta está colocada sobre una superficie sin fricción, conectada a un resorte que representa la rigidez  $k$  del sistema y a un elemento amortiguador de viscosidad lineal.

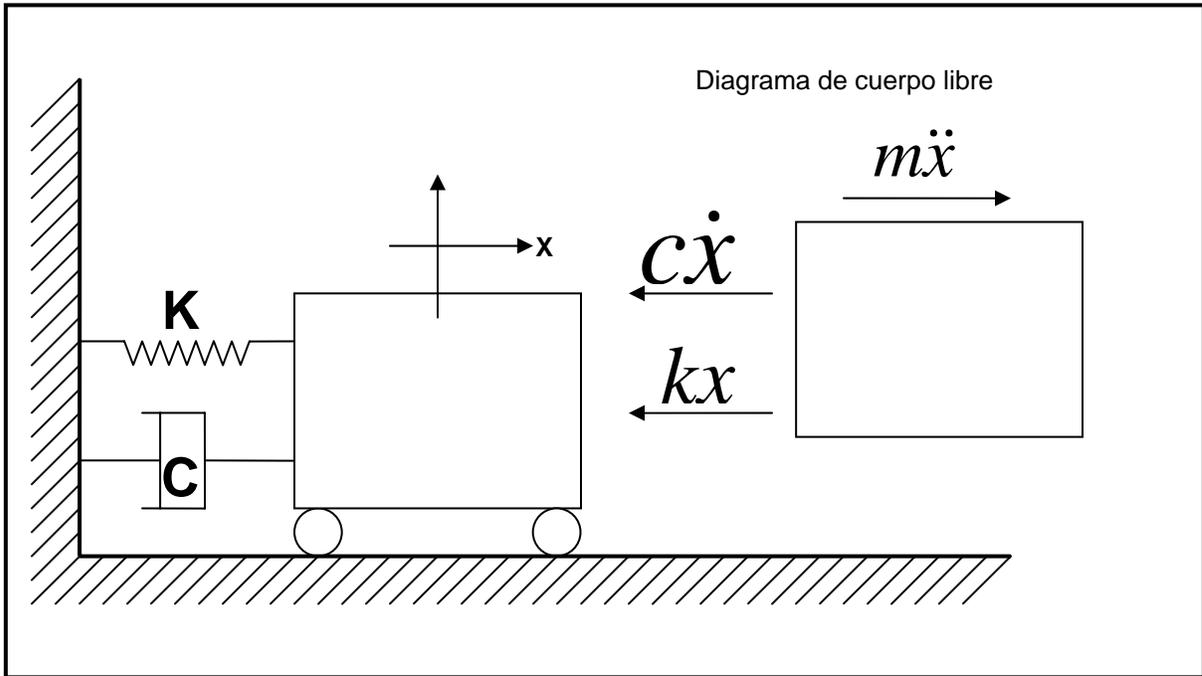


Figura 36. Sistema de un grado de libertad con su diagrama de cuerpo libre

La siguiente ecuación emana del diagrama de cuerpo libre incluido en la misma figura 37:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \tag{6}$$

cuyas raíces son:

$$\lambda = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} \quad (7)$$

Por lo tanto la solución de la ecuación diferencial de equilibrio del sistema es:

$$x(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \quad (8)$$

$A$  y  $B$  son constantes que dependen de las condiciones iniciales del movimiento

Cuando el radical de la ecuación (7) es igual a cero, la cantidad de amortiguamiento  $c$ , se denomina amortiguamiento crítico y se denota como  $c_c$ , obteniéndose de la siguiente forma:

$$c_c^2 - 4mk = 0 \quad (9)$$

$$\text{de donde} \quad c_c = 2\sqrt{mk} = 2\sqrt{mk \left(\frac{m}{m}\right)} = 2m\omega \quad (10)$$

Si se define a  $\xi$  como el coeficiente de amortiguamiento crítico, igual al cociente  $\frac{c}{c_c}$  se

obtiene:

$$c = 2\xi m\omega \quad (11)$$

Que al reemplazarlo en la ecuación (7) se obtiene:

$$\lambda = \left( -\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega \quad (12)$$

De esta manera se tienen tres casos: cuando  $\xi = 1$ ,  $\xi < 1$  y  $\xi > 1$ , que se denominan amortiguamiento igual, menor y mayor del crítico respectivamente. El caso que es de mayor interés es cuando  $\xi < 1$ , ya que la mayoría de las aplicaciones prácticas en vibraciones están regidas por este caso, debido a que gran parte de los sistemas estructurales tienen valores de amortiguamiento bajos.

En la figura 37 se ilustra el caso especial en el que un sistema lineal de un grado de libertad es excitado en su base por una onda sísmica (para este caso se trata de un acelerograma). La ecuación que describe el movimiento está dada por:

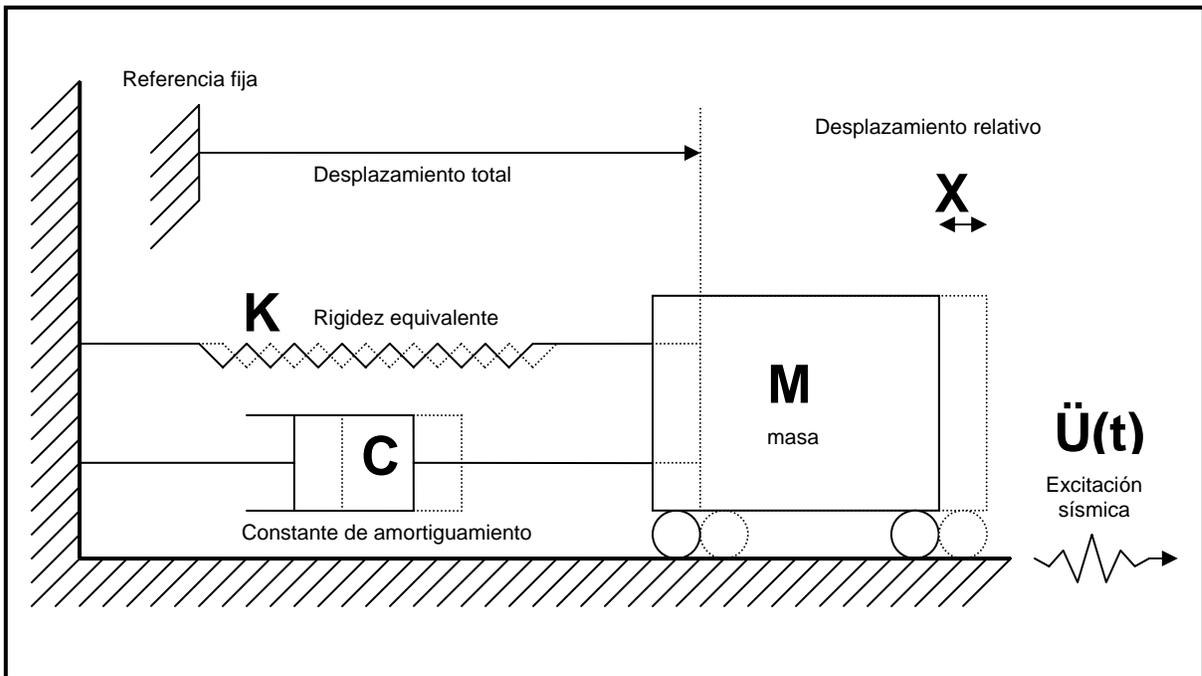


Figura 37. Sistema de un grado de libertad sometido a una excitación sísmica

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m\ddot{u} \quad (13)$$

En la ecuación anterior ( $x$ ) es el desplazamiento relativo entre la estructura y su base; ( $m\ddot{x}$ ) representa la fuerza de inercia aplicada a la masa ( $m$ ), la cual tiene una rigidez equivalente ( $k$ ); la disipación de la energía se supone de naturaleza viscosa (la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad relativa entre la masa y su base); ( $c$ ) es la constante de amortiguamiento. La frecuencia natural y el porcentaje de amortiguamiento se expresan de la siguiente manera:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (14)$$

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (15)$$

$\omega$  : Frecuencia angular

$\xi$  : Porcentaje de amortiguamiento crítico

$c$  : Coeficiente de amortiguamiento

$c_c$  : Amortiguamiento crítico

Si dividimos la ecuación (13) entre la masa  $m$  y sustituimos en ella las ecuaciones (14) y (15), tendremos la ecuación que describe el movimiento expresada como una función de la frecuencia angular y del porcentaje del amortiguamiento crítico, como se alcanza a apreciar en la siguiente expresión:

$$\ddot{x} + 2\omega\xi\dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{u} \quad (16)$$

La solución general de la ecuación (16) se logra considerando que cuando un sistema como el de la figura 38 es sometido a una excitación arbitraria en términos de fuerza, es posible dividir ésta en una serie de impulsos que se aplican en el tiempo  $\tau$  y que tiene

una duración  $d\tau$ . Al integrar todos estos impulsos diferenciales variando  $\tau$ , se tiene la siguiente expresión, con la cual es posible conocer el desplazamiento relativo:

$$x(t) = -\frac{1}{\omega^2 \psi} \int_0^t \ddot{u}_0(t) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \text{sen} \omega\psi(t-\tau) dt \quad (19)$$

$$\psi = (1 - \xi^2)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$x(t)$ : Desplazamiento relativo

$\psi$  : Frecuencia natural amortiguada del sistema

El obtener la respuesta mediante la integral anterior implica un proceso de cálculo laborioso, por lo que para estimar las respuestas de un sistema dado se puede utilizar el método Beta de Newmark, el cual supone que la respuesta del sistema es lineal entre dos puntos consecutivos cuando el incremento de tiempo tiende a cero.

De los datos de aceleración dados (mediante un acelerograma para este caso), se pueden calcular los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento, para valores distintos de amortiguamiento crítico. Para relacionar los espectros de respuesta entre sí de manera sencilla, es suficiente con calcular unos de ellos (generalmente el de desplazamiento) para poder así determinar los otros dos. Cuando los espectros se determinan de esta manera, se les conoce como espectros de seudovelocidad y seudoaceleración; las siguientes expresiones nos muestran cómo se relacionan los espectros entre sí:

$$S_a = -\omega^2 S_d \quad (21)$$

$$S_v = \omega S_d = \frac{S_a}{\omega} \quad (22)$$

$S_a$  = Seudoaceleración

$S_v$  = Seudovelocidad

De esta forma, una vez que se tiene procesada la información de un acelerograma, es posible estimar la máxima respuesta que se presenta en una estructura, (representada como un sistema de un grado de libertad) para un periodo de tiempo dado. Lograr lo anterior se obtiene al graficar el máximo valor de desplazamiento relativo de la masa, contra el periodo de vibración del sistema, lo que se conoce como *espectro de respuesta de desplazamiento*. Este espectro representa la respuesta máxima del sistema cuando éste es excitado en su base. Tal cálculo se puede realizar para distintos valores de amortiguamiento crítico, entre los cuales los más comunes son 0, 2, 5, 10 y 20 por ciento del valor del amortiguamiento crítico. De la misma manera se pueden construir gráficos de la máxima velocidad y aceleración relativa a las que se expone el sistema. Estos gráficos son conocidos como espectros de respuesta de velocidad y aceleración, respectivamente. Mediante estas técnicas es posible inferir información relevante del comportamiento de suelos y estructuras ante la acción de un evento sísmico. Justamente, el tipo de terreno en que haya sido obtenido el acelerograma es importante, pues las características dinámicas de la acción sísmica varían en función de las propiedades de éste. Estas últimas determinan la forma de los espectros de respuesta y el movimiento de una estructura. A manera de ejemplo, en suelos firmes las mayores amplitudes del movimiento se presentan a frecuencias mayores que las correspondientes a los suelos blandos. Los espectros de respuesta tienen aplicación y resultan muy útiles para la observación del comportamiento de las estructuras (puentes, presas, edificios, etc.), para el estudio de la amplificación local de sismos debida al tipo de suelo y para la generación de espectros de diseño.

III.4 Análisis de los resultados

Para el cálculo de los espectros de Fourier y funciones de transferencia, se escogieron aquellos eventos para los cuales se obtuvieron registros en la estación Oaxaca Las Canteras (OXLC), y en por lo menos una de las estaciones en suelo. De esta manera se determinaron los espectros de Fourier para 53 registros en cada una de las direcciones de las respectivas componentes. En la tabla V se detallan los eventos seleccionados y las estaciones en donde se obtuvieron registro. En general las amplitudes máximas se encuentran oscilando en el rango de frecuencias comprendidos entre 2 a 10 Hz. Para las estaciones OXCU y OXLC, se tienen espectros con formas uniformes, es decir, no se presentan picos muy agudos en alguna frecuencia determinada. En tanto que los espectros de los registros correspondientes a las estaciones OAXM, OXAL, OXPM y OXTO sí se presentan picos tanto mediana, como altamente distinguibles. En la figura 38.a, 38.b y 38.c se muestran, a manera de ejemplo y por cuestiones de espacio, únicamente los espectros de Fourier calculados para las componentes correspondientes a la estación Oaxaca Instituto Tecnológico (OXTO).

EVENTO (AAMMDD.#)	ESTACIÓN EN LA QUE SE OBTUVO REGISTRO					
990615.1	Las Canteras	Fac. de Medicina				
990615.2	Las Canteras	Fac. de Medicina				
990930.1	Las Canteras	Fac. de Medicina				
991106.1	Las Canteras	Fac. de Medicina		Alameda de León	Primaria Mugica	Tec. Oaxaca
000119.1	Las Canteras	Fac. de Medicina			Primaria Mugica	Tec. Oaxaca
000301.1	Las Canteras	Fac. de Medicina			Primaria Mugica	Tec. Oaxaca
000929.1	Las Canteras				Primaria Mugica	Tec. Oaxaca
011003.1	Las Canteras	Fac. de Medicina		Alameda de León	Primaria Mugica	Tec. Oaxaca
020116.1	Las Canteras	Fac. de Medicina			Primaria Mugica	Tec. Oaxaca
020130.1	Las Canteras	Fac. de Medicina	Cd. Universitaria		Primaria Mugica	Tec. Oaxaca
020607.1	Las Canteras	Fac. de Medicina	Cd. Universitaria	Alameda de León	Primaria Mugica	Tec. Oaxaca
020805.1	Las Canteras	Fac. de Medicina	Cd. Universitaria		Primaria Mugica	Tec. Oaxaca
020827.1	Las Canteras	Fac. de Medicina	Cd. Universitaria	Alameda de León	Primaria Mugica	Tec. Oaxaca

Tabla V. Estaciones y eventos seleccionados para el análisis

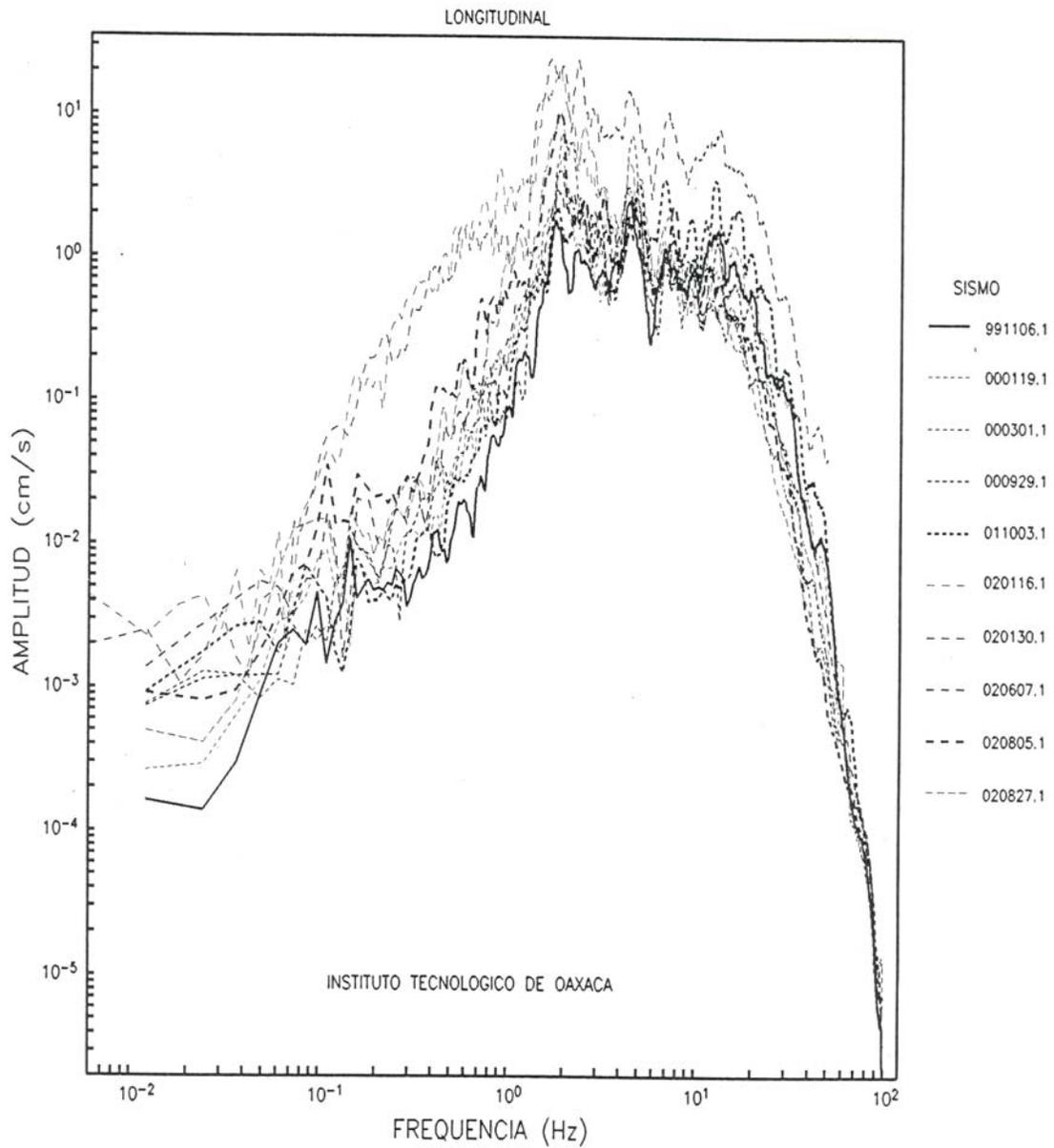


Figura 38.a Espectros de Fourier para la estación OXTO (componente longitudinal)

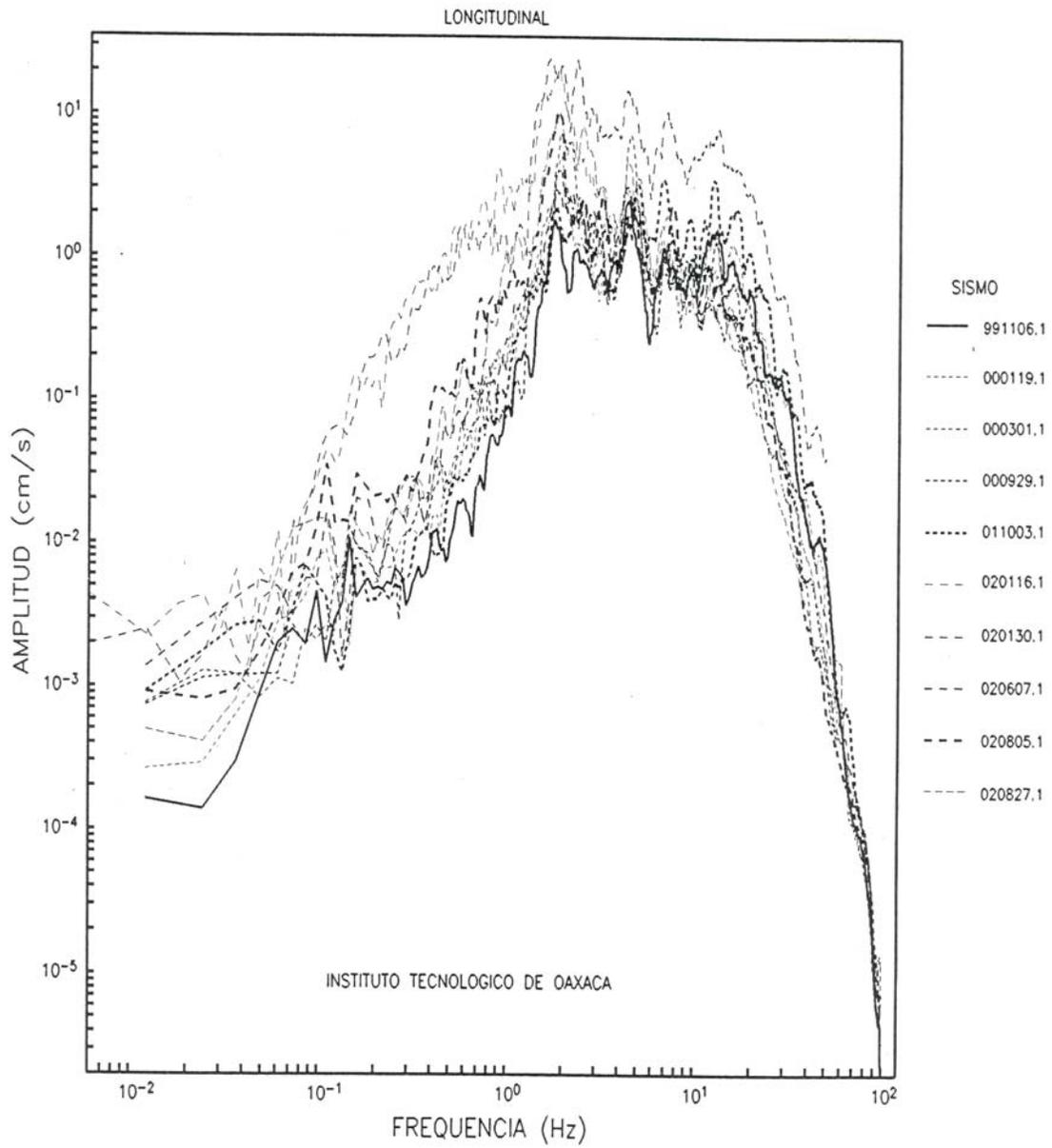


Figura 38.b Espectros de Fourier para la estación OXTO (componente transversal)

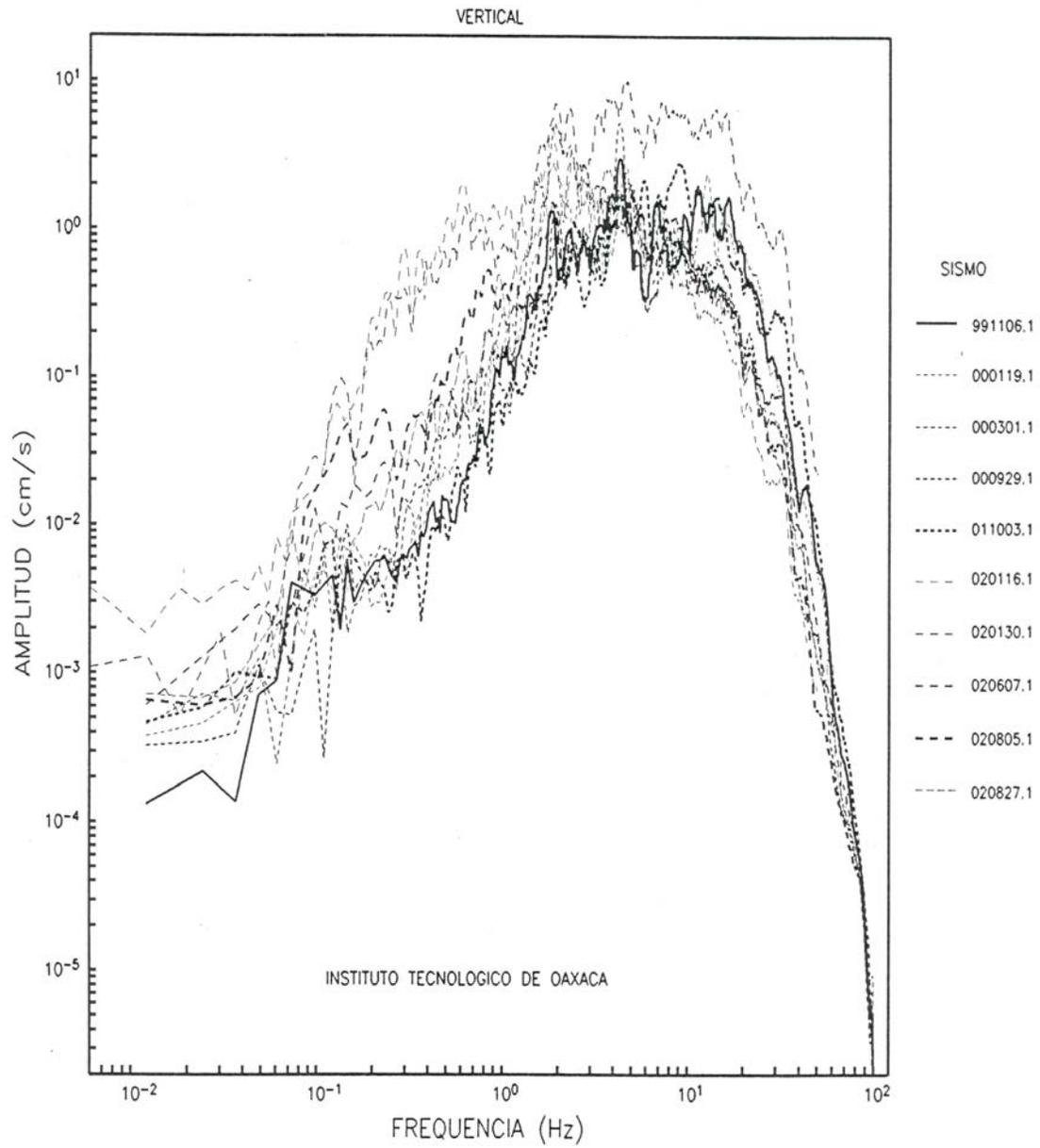


Figura 38.c Espectros de Fourier para la estación OXTO (componente vertical)

Para la estación Oaxaca Facultad de Medicina (OAXM) el rango de frecuencias en donde se encuentran las principales amplitudes es de 2 a 10 Hz, teniendo picos máximos entre 4 y 5 Hz para los canales longitudinal y transversal, y de 7 a 8 Hz para el canal vertical. Así mismo se observa una clara tendencia de los espectros correspondientes a registros cuyas aceleraciones máximas no son considerablemente altas.

Para la estación Oaxaca Ciudad Universitaria, las amplitudes máximas se presentaron, de manera general, en el rango de frecuencias de 2 a 10 Hz, con picos máximos de 2 a 3 Hz para las direcciones longitudinal y transversal, y de 5 Hz para la dirección vertical.. Igualmente se observa que el único espectro que no concuerda con la tendencia del resto, es aquel cuyas aceleraciones máximas son considerablemente altas.

En la estación Oaxaca Alameda de León (OXAL) se presentan amplitudes máximas en el rango de los 4 a 11 Hz, cuyos picos máximos corresponden a frecuencias de 5 y 6 Hz para las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente. Mientras tanto, en la componente vertical el pico máximo corresponde a la frecuencia de 11 Hz. Se observa también que los espectros de Fourier de los registros siguen una tendencia bastante acentuada.

Para la estación Oaxaca Las Canteras (OXLC) las amplitudes máximas las encontramos en el rango de los 2 a 10 Hz, de manera general, con picos máximos de 2 a 4 Hz en las componentes longitudinal y transversal, mientras que para la dirección vertical las amplitudes máximas se observan en la frecuencia de 6 hz. Cabe mencionar que en el evento del 30 de Septiembre de 1999 se presentaron las amplitudes máximas, diferenciándose claramente del resto de los espectros de los demás registros, cuyas aceleraciones no son considerablemente altas.

En la estación Oaxaca Primaria Mugica encontramos amplitudes máximas, a grandes rasgos, en el rango de los 2 a 10 Hz, con picos máximos de 5 y 6 Hz para las componentes transversal y longitudinal, respectivamente. Ahora bien, en la componente vertical éstos se presentan la frecuencia de 10 Hz. Nuevamente los espectros de los registros presentan una tendencia significativamente clara.

Por último, en la estación Oaxaca Instituto Tecnológico, el rango de frecuencias donde se presentan las amplitudes máximas oscila entre los 3 a 10 Hz, de manera general. Particularmente, los picos máximos los encontramos en las frecuencias de 3 y 4 Hz para las direcciones transversal y longitudinal, mientras que en dirección vertical se distinguen picos máximos en la frecuencia de 10 Hz.

En las figuras 39 a 41 se presentan las funciones de transferencia calculadas para dos estaciones, Oaxaca Alameda de León (figura 39) y Oaxaca Facultad de Medicina (figura 40), y para el evento del 7 de Junio de 2002 (figura 41).

Con respecto a las funciones de transferencia calculadas para la estación OXAL (figura 39), con respecto a la referencia en roca (OXLC), se presentan amplificaciones considerables tanto en la componente transversal como longitudinal del orden de 4 a 8 veces. En la dirección vertical prácticamente el efecto de amplificación es nulo o despreciable. Destaca particularmente el evento del 3 de Octubre de 2001, con amplificaciones de hasta casi 18 veces con respecto a la roca, en la componente Norte-Sur, en tanto que para la componente Este-Oeste se distingue el evento del 27 de Agosto de 2002, con amplificaciones de hasta 16 veces con respecto a la roca.

En cuanto a las funciones de transferencia determinadas para la estación Oaxaca Facultad de Medicina (figura 40), se aprecian amplificaciones distinguibles en las tres direcciones, del orden de 5 a 10 veces de manera general. En la componente Norte-Sur destaca el evento del 1 de Marzo de 2000, con amplificaciones de hasta 25 veces respecto de la roca. En la componente Este-Oeste se observa una tendencia más uniforme, sin destacar algún evento en particular, mientras que para la componente vertical se puede decir que es notorio el evento del 30 de Enero de 2002, con amplificaciones de hasta 15 veces con respecto a la roca.

En la figura 41 se aprecian las funciones de transferencia calculadas para un mismo evento que fue registrado en diferentes estaciones de la red acelerográfica. Puede apreciarse que la estación OAXM presenta picos considerables (amplificaciones), al igual que las estaciones OXCU y OXTO. Cabe señalar que este tipo de comparaciones son en especial importantes, puesto que se aprecian los efectos de sitio producidos por

un mismo evento para las diferentes estaciones que conforman la red. Sin embargo, debido a que hasta fechas recientes se implementó en su totalidad el funcionamiento de la red, es muy reducido el número de eventos para los cuales se tiene registro en todas las estaciones de la red acelerográfica de la ciudad de Oaxaca.

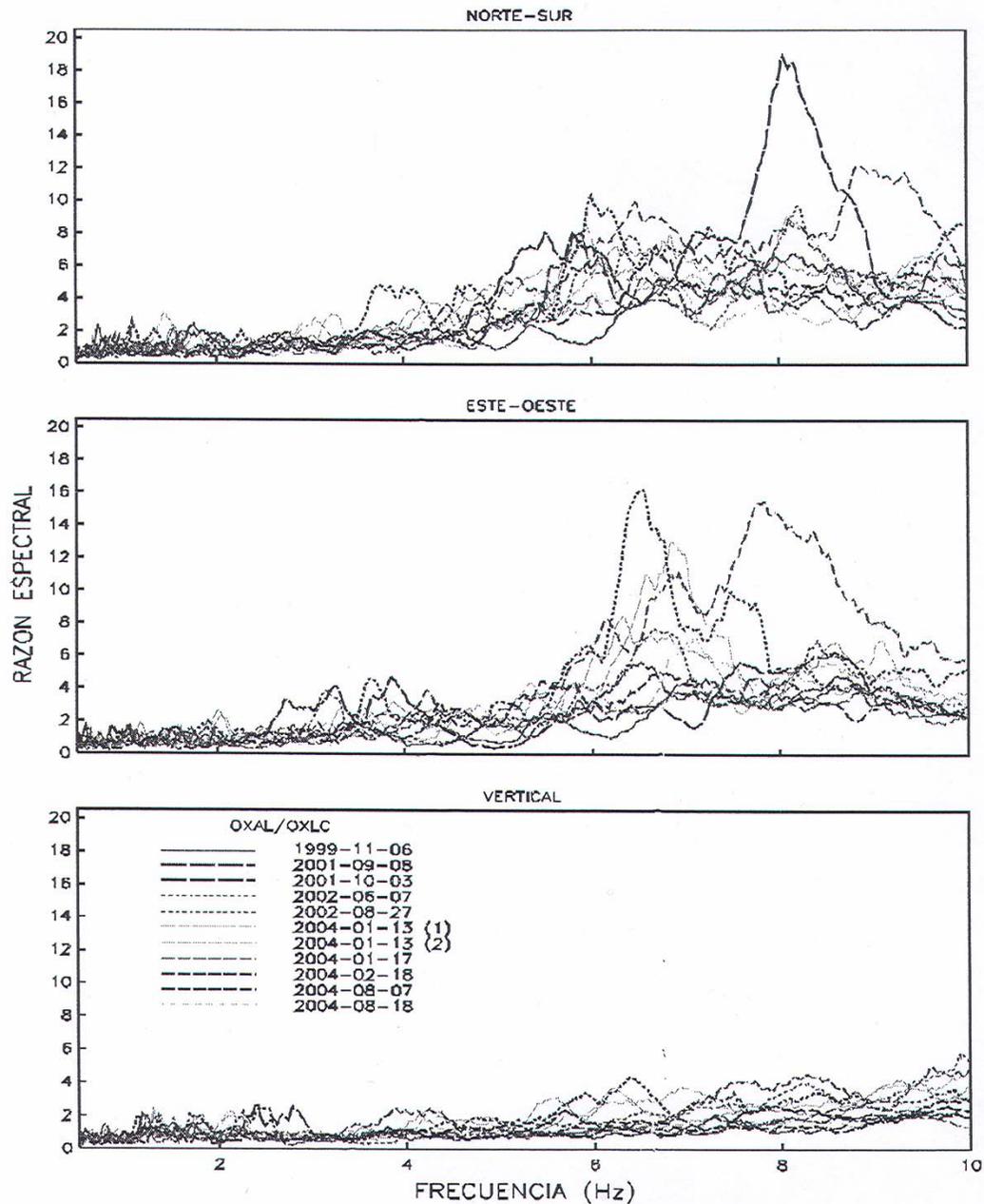


Figura 39. Funciones de transferencia para eventos registrados por la estación OXAL

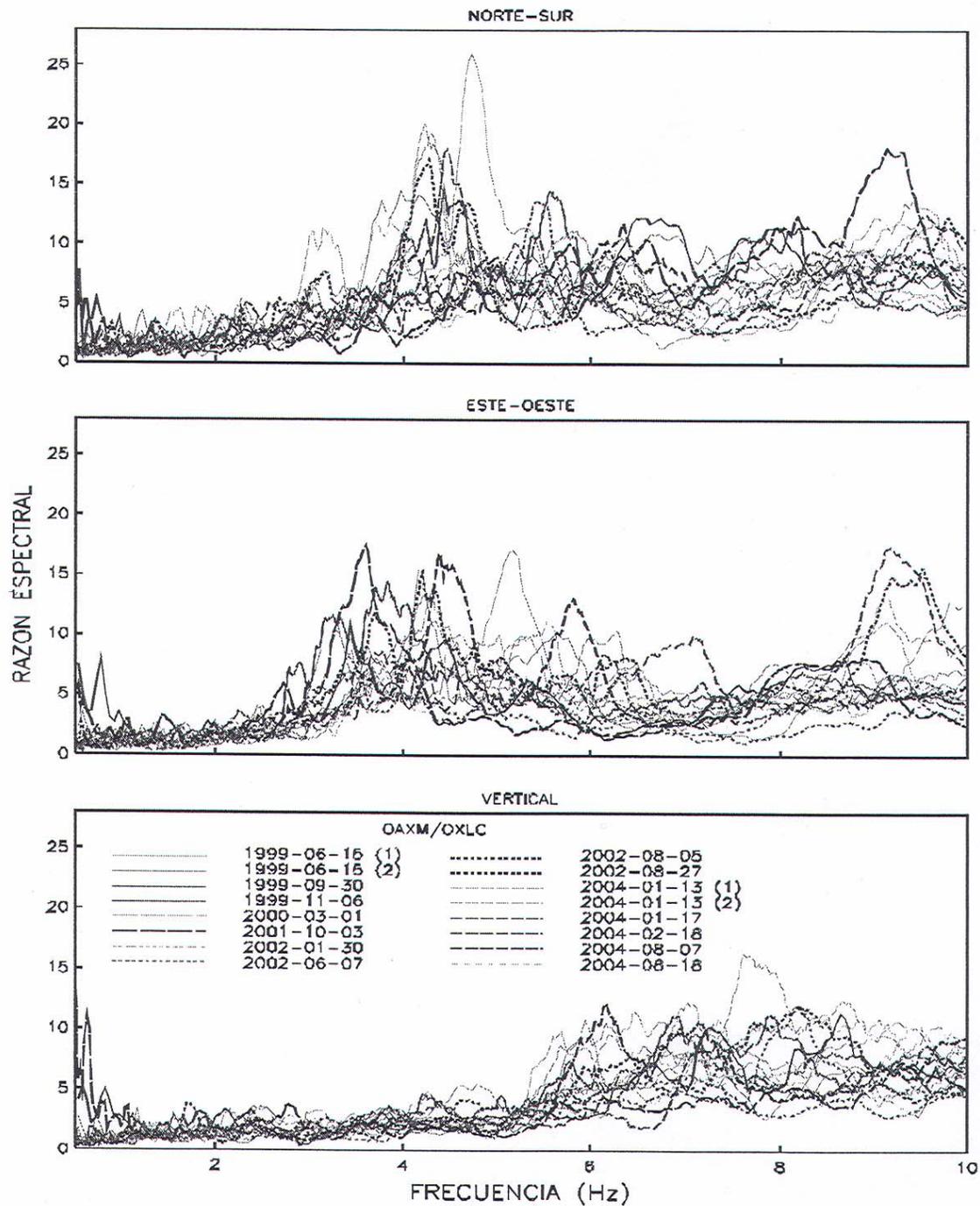


Figura 40. Funciones de trasferencia para eventos registrados por la estación OAXM

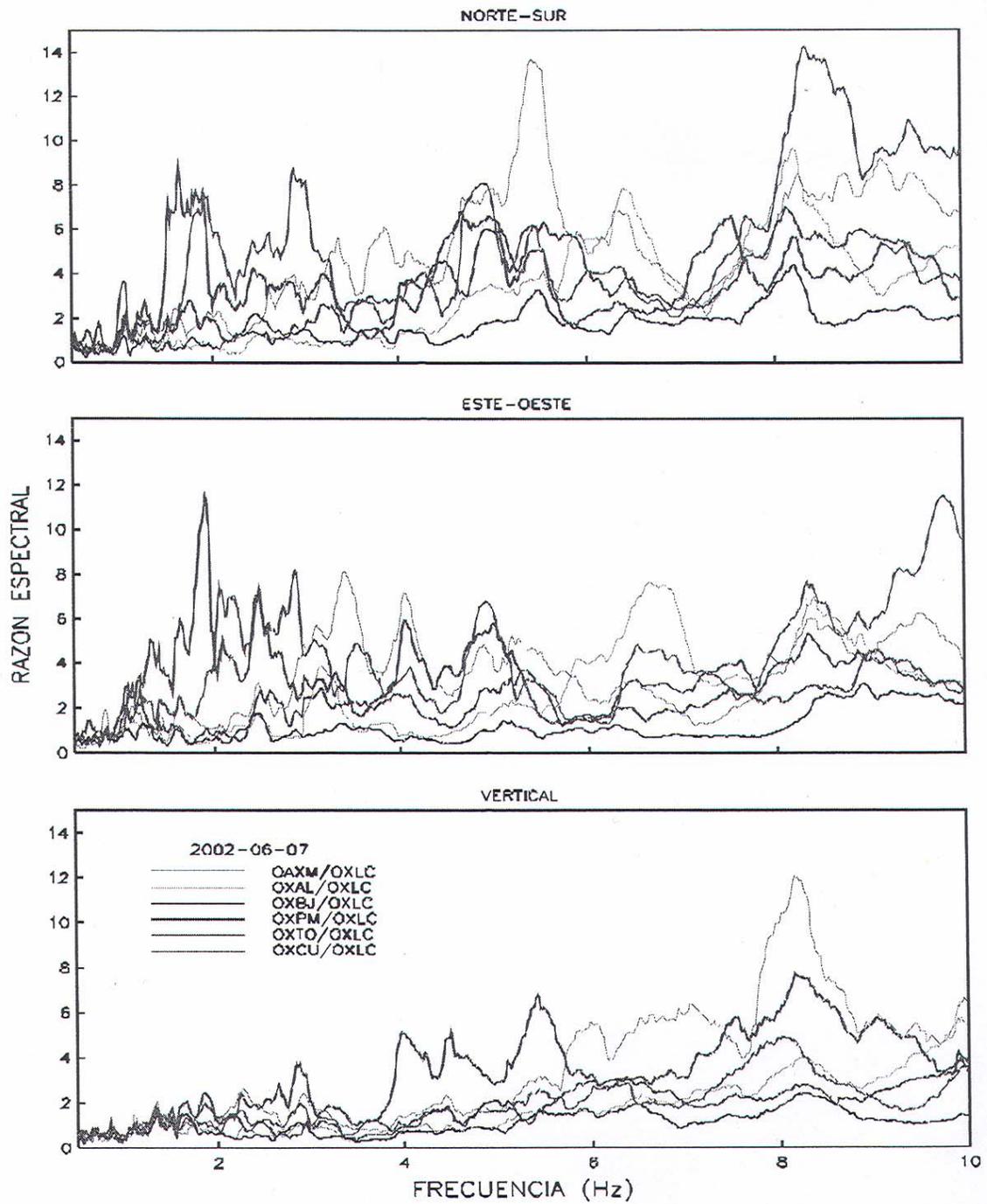


Figura 41. Funciones de trasferencia del evento del 7 de Junio de 2002

En las figuras 42 a 44 se muestran los espectros de respuesta calculados para los registros obtenidos en tres diferentes estaciones de la red acelerográfica: OAXM, OXAL y OXLC. En cuanto a las dos primeras estaciones se encuentra una tendencia muy clara en las tres direcciones, es decir, se observa un periodo dominante de aproximadamente 0.2 segundos y respuestas máximas correspondientes a aceleraciones del orden de 5 a 7  $\text{cm/s}^2$ . Aunque para la estación ubicada sobre la roca también se aprecia una cierta tendencia, ésta no es tan clara como en las dos primeras estaciones.

Es importante señalar que los espectros de Respuesta están normalizados con relación a la aceleración del terreno, con el propósito de ver más claramente el nivel de amplificación.

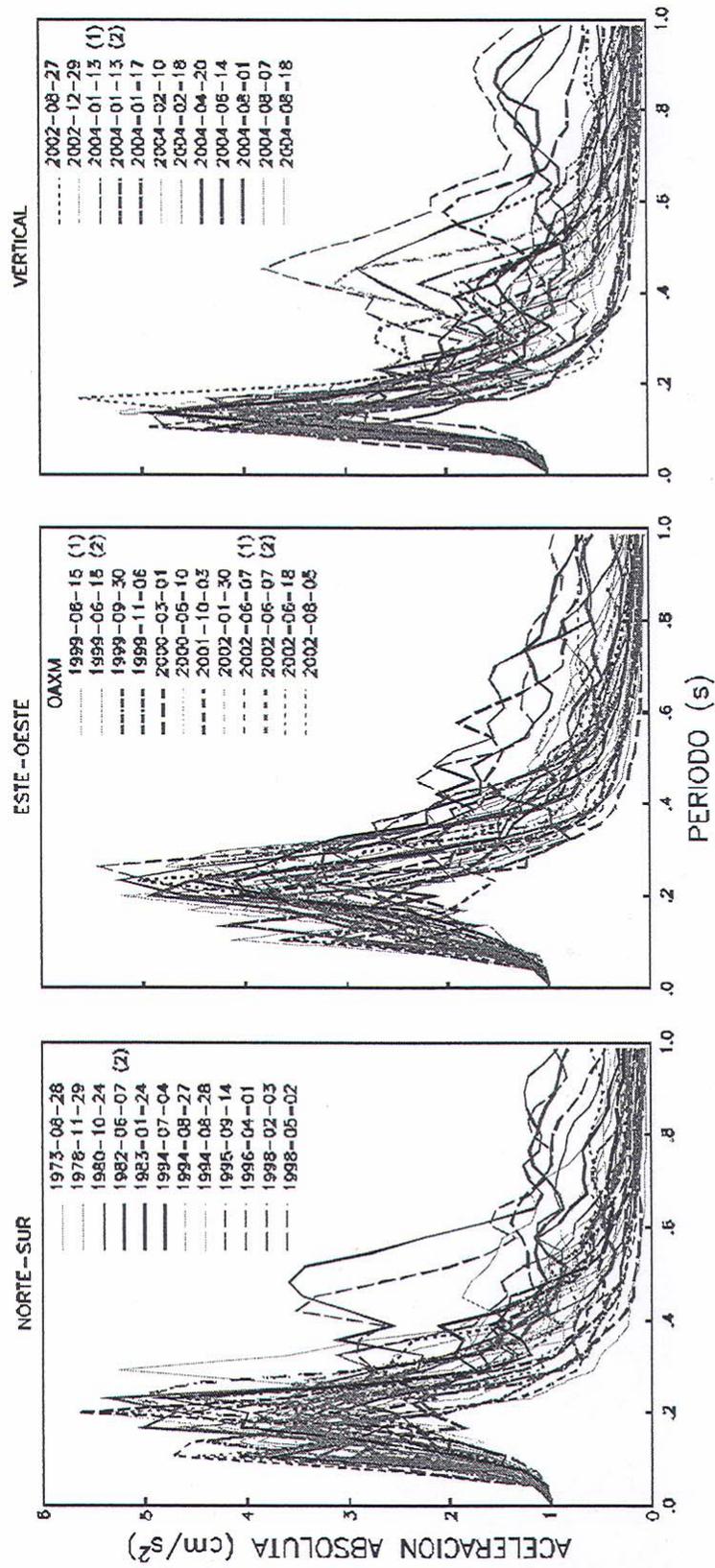


Figura 42. Espectros de Respuesta para los eventos registrados en la estación Oaxaca Facultad de Medicina (OAXM)

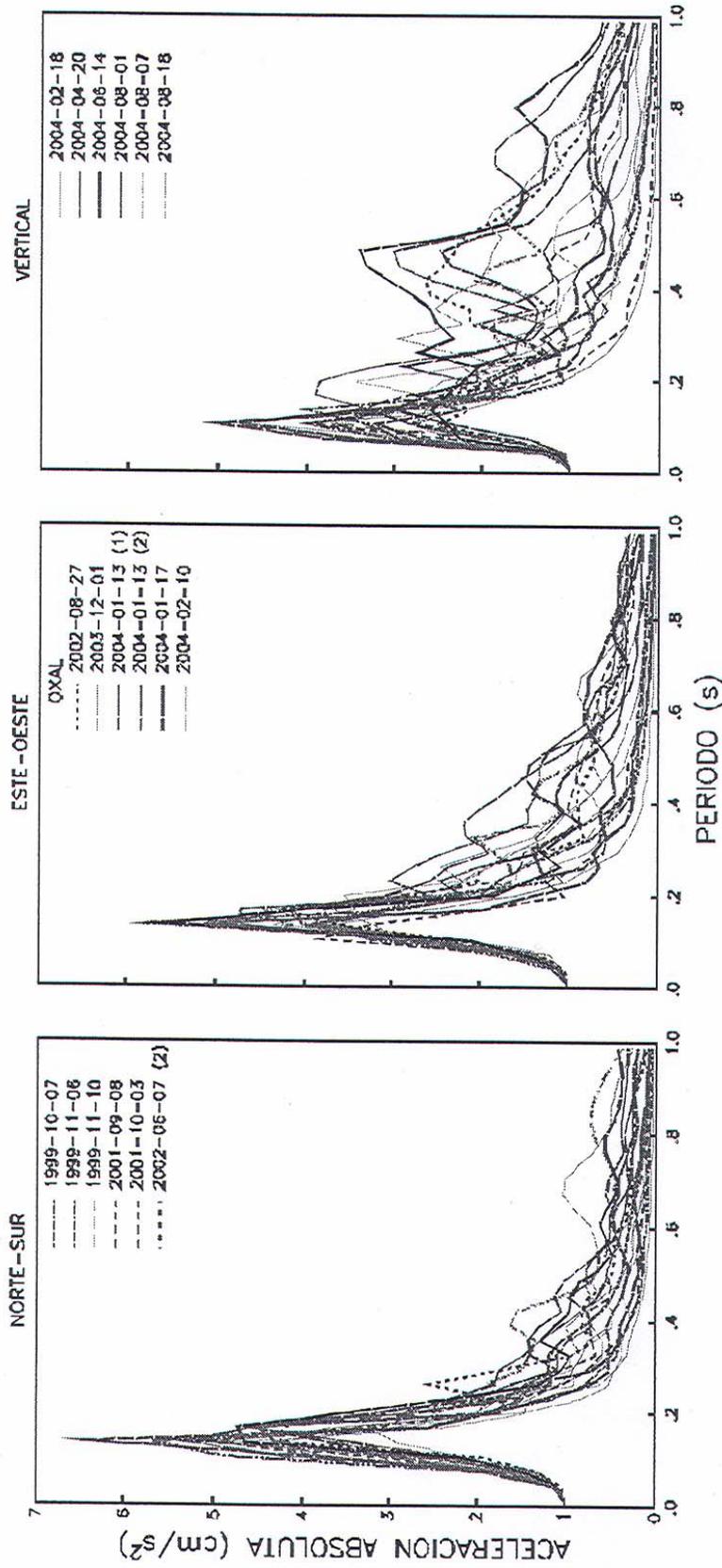


Figura 43. Espectros de Respuesta para los eventos registrados en la estación Oaxaca Alameda de León (OXAL)

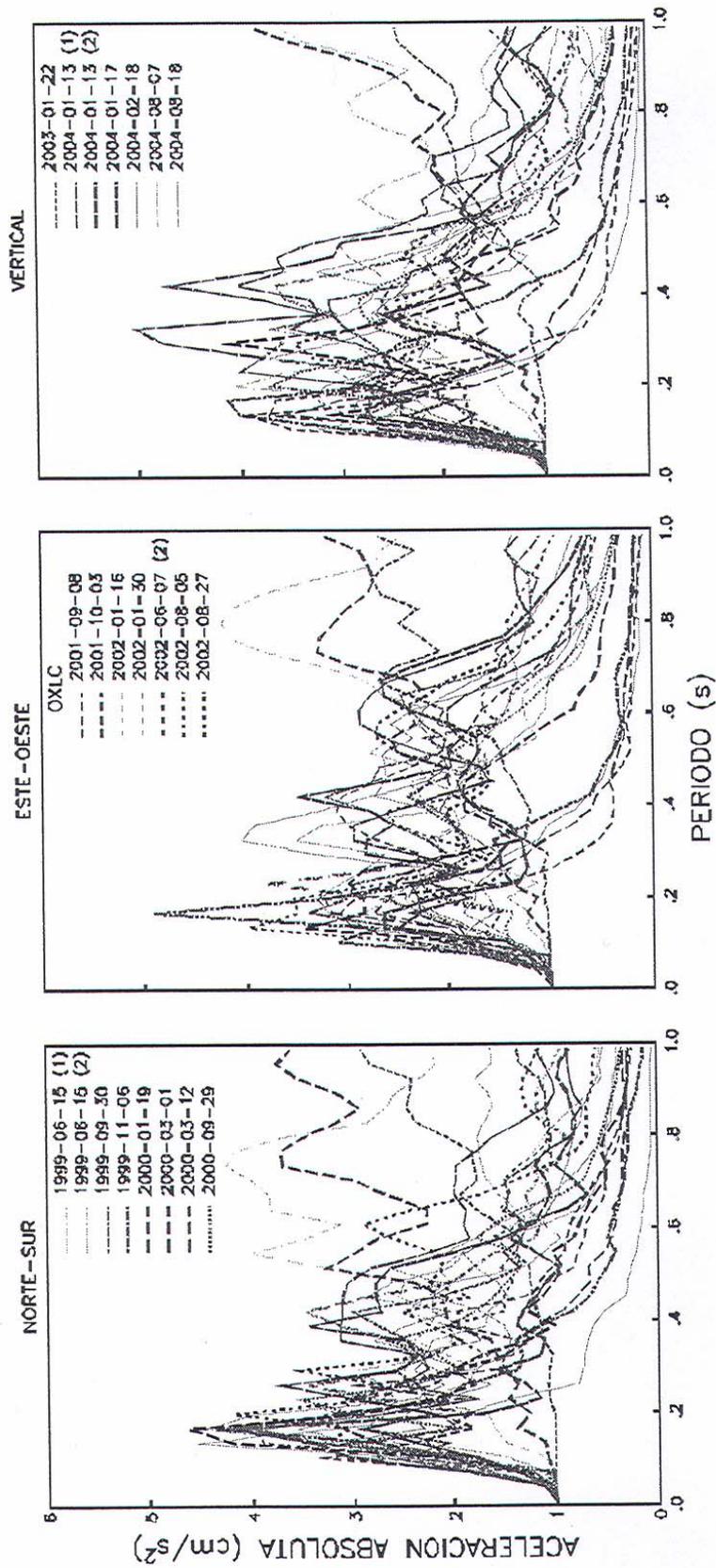


Figura 44. Espectros de Respuesta para los eventos registrados en la estación Oaxaca Las Canteras

## **IV. CONCLUSIONES**

### **IV.1 Comentarios y recomendaciones**

- Dada su posición geográfica, el estado de Oaxaca está ubicado en una región en donde el fenómeno de subducción junto con las fallas geológicas activas mencionadas, lo hacen uno de los estados de la República de mayor actividad y potencial sísmico. Esto hace que en cualquier momento puedan presentarse eventos y fenómenos sísmicos de gran intensidad, que pudieran ocasionar enormes daños tanto a la población como a la infraestructura. Por esto último es de vital importancia llevar a cabo estudios que faciliten una mayor y mejor comprensión del fenómeno sísmico generado en la región, con el objetivo de poder atenuar y mitigar sus efectos y consecuencias.
  
- Existen vacancias o brechas sísmicas localizadas a lo largo de la costa del Pacífico, en especial las de Guerrero, Tehuantepec, Michoacán y Ometepec, con una muy alta probabilidad de generar un evento sísmico de magnitud considerable, en un periodo relativamente corto. Dado lo anterior, es necesario contar con una instrumentación sísmica adecuada (en tamaño y distribución), tanto en dichas regiones como en las poblaciones más cercanas a ellas.
  
- La implementación y operación de la Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca forma parte de un proyecto global, junto con la infraestructura sísmica que también integran la Red de la Costa de Oaxaca y la Línea de Atenuación de Puerto Ángel. Con este proyecto podrán llevarse a cabo estudios sobre los fenómenos sísmicos que tienen como origen las costas oaxaqueñas; sobre la propagación de las ondas sísmicas en dirección paralela a la costa, así como continente adentro; la atenuación sufrida por la señal sísmica al ir arribando a los diferentes núcleos poblacionales de la región, como las ciudades de Puebla y Oaxaca, así como la amplificación de las ondas sísmicas al filtrarse y penetrar en los diferentes estratos que componen el subsuelo.
  
- La Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca está conformada por siete estaciones acelerográficas, localizadas en el área urbana; seis de ellas están

desplantadas sobre suelo y una en roca. Esto permitirá hacer una evaluación de los efectos de sitio y realizar estudios acerca de la respuesta sísmica en diferentes zonas de la ciudad.

- La aceleración máxima registrada en la red alcanzó un valor de 370 gal, (estación OAXM) y fue producida por el evento del 30 de Septiembre de 1999 ( $M_s=7.4$ ). Esta aceleración fue aproximadamente 5 veces más grande que la registrada por la estación OXLC desplantada sobre roca.
- Los registros obtenidos y acumulados tienen como objetivo analizar la respuesta sísmica que se presenta en los suelos de la ciudad; mediante éstos y con los estudios del subsuelo será posible generar espectros del sitio, así como obtener funciones de transferencia empíricas. También se podrán determinar los efectos locales al momento de suscitarse eventos sísmicos, con lo que se contribuirá a un mayor entendimiento del fenómeno sísmico de la región, así como a la zonificación sísmica de la ciudad.
- Se puede inferir, tanto de las funciones de transferencia, como de los espectros de respuesta calculados, que la zona en donde la onda sísmica tiende a amplificarse más es aquella en donde está localizada la estación Oaxaca Facultad de Medicina (OAXM) y coincide, como se mencionó en capítulos anteriores, con la zona en donde se encuentran los depósitos aluviales que constituyen los rellenos del Valle de Oaxaca. Por ello, sería muy recomendable expandir la red con la implementación de más y mejores equipos en esta parte de la ciudad.
- La instrumentación acelerográfica que se ha llevado a cabo en la ciudad de Oaxaca ha funcionado, de manera general, en forma satisfactoria, sobre todo debido al mantenimiento y correcta operación de los equipos que conforman la red acelerográfica. No obstante, es muy importante tomar en cuenta que existen equipos con tecnología un tanto obsoleta y deberían ser sustituidos a la brevedad. En particular se sugiere la implementación de un sistema de interrogación o monitoreo remoto, vía internet de banda ancha por ejemplo, cuando menos en las estaciones que lo pudieran permitir, como son el caso de las estaciones OXLC, OXTO y OAXM. Ello permitiría tener información inmediata y de primera mano

acerca de las aceleraciones generadas ante la excitación sísmica en el sitio sobre roca y su efecto de amplificación en suelo blando.

- El crecimiento exponencial que ha experimentado la ciudad en los últimos años hace patente la imperiosa necesidad de expandir la red hacia otras zonas, con un mayor número de equipos de tecnología más reciente. De igual forma resulta evidente considerar la enorme importancia de instrumentar algunas edificaciones y monumentos históricos que pudieran llegar a sufrir graves daños ante la acción de un sismo, máxime habiendo sido declarado el Centro Histórico de la ciudad patrimonio cultural de la humanidad.

1. López E, "Geología General y de México", Trillas, México (1993)
2. Gutiérrez C, et al, "Sismos", Serie Fascículos, CENAPRED, México (2001)
3. Nava A, "Terremotos", Colección la ciencia desde México, No. 34, Fondo de Cultura Económica, México (1995)
4. Flores E, "Sismicidad en Pinotepa Nacional, Oaxaca", Tesis de Licenciatura, UNAM, México (1996)
5. Nishenko S P, Singh S K, "Conditional Probabilities for the Recurrence of large and great interpolate earthquakes along the Mexican subduction zone", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 77, No. 6, 2095-2114 (1987)
6. Lermo J, et al, "Microzonificación Sísmica y Análisis de amplificación relativa en la ciudad de Oaxaca", Primera Parte, Informe elaborado para el CENAPRED, México (1991)
7. Singh S K, Ordaz M, "Sismicidad y movimientos fuertes en México: Una visión actual", CENAPRED, Coordinación de Investigación, Riesgos Geológicos, México (1990)
8. Hanus V, Vanek J, "Subduction of the Cocos Plate and deep active fracture zones of Mexico", Geofísica Internacional, Vol. 17, No. 1, 14-53 (1977-78)
9. Singh S K, et al, "The Oaxaca earthquake of 30 September 1999 ( $M_w=7.5$ ): A Normal-faulting Event in the Subducted Cocos Plate", Seismological Research Letters, Vol. 71, No. 1, 67-78 (2000)
10. Núñez-Cornu F, Ponce L, "Zonas Sísmicas de Oaxaca, México: Sismos máximos y tiempos de recurrencia para el periodo 1542-1988", Geofísica Internacional, Vol. 28, No. 4, 587-641 (1989)

11. "Monografía Geológico-Minera del Estado de Oaxaca", Consejo de Recursos Minerales, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI), (1996)
12. Alcántara L, et al, "Propagación de las ondas sísmicas de temblores generados en la costa de Oaxaca y los efectos locales producidos en la ciudad de Puebla (2ª. Etapa)", Informe del segundo año de avance elaborado para CONACYT, México (2000)
13. León J, "Información general acerca del subsuelo de 17 ciudades de México", VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Tomo II, Oaxaca (1976)
14. Fundación ICA AC, "Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985", LIMUSA, México (1988)
15. Espíndola J M, Jiménez Z, "Terremotos y ondas sísmicas", Cuadernos del Instituto de Geofísica, No. 1, UNAM, México (1994)
16. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica AC, "Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes", Catálogo de Acelerogramas 1960-1993, Gráficas Zeta, México (1995)
17. Carmona G, "Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca", Tesis de Licenciatura, UNAM, México (2000)
18. Velazco J, "Especificaciones Técnicas de los Equipos de Registro", Curso de Instrumentación Sísmica (Aplicaciones prácticas en las estructuras), Colegio de Ingenieros Civiles de México AC y Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica AC, México (1997)
19. Lira V H, "Aplicación de los conocimientos de Ingeniería Civil en los efectos de sitio observados en una ciudad de mediano desarrollo ante acción sísmica", Tesis de Licenciatura, UNAM, México (2003)
20. Brigham E O, "The Fast Fourier Transform and its Applications", Prentice-Hall Inc, EUA (1988)

21. Mendoza S, "Estudio de la respuesta sísmica mediante el establecimiento de un modelo geodinámico en suelos de la ciudad de Puebla", Tesis de Licenciatura, UNAM, México (2003)
22. Timoshenko S, "Vibration Problems in Engineering", John Wiley and Sons, EUA (1974)
23. Rosenblueth E, Newmark N M, "Fundamentos de Ingeniería Sísmica", Diana, México (1976)