



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

La Instrumentación Sísmica en México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Civil

PRESENTA:

Salvador Israel Lagos Ortíz

TUTOR:

Dr. Leonardo Alcántara Nolasco

MÉXICO, D.F.

OCTUBRE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/028/13

Señor
SALVADOR ISRAEL LAGOS ORTIZ
Presente

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

"LA INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA EN MÉXICO"

- INTRODUCCIÓN
- I. SISMICIDAD EN MÉXICO
- II. SISTEMAS DE MONITOREO SÍSMICO
- III. INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA EN MÉXICO
- IV. CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 10 de septiembre del 2013.
EL PRESIDENTE

M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

Vo Bo
29/09/2014

A Deméngli C

Vo. Bo.

Tesis concluida

Dr. Leonardo Alcántara Nolasco

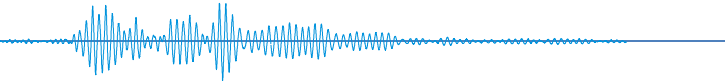
Vo. Bo.

Alba B. Vázquez González

Vo. Bo.

Marco A. Macías Castillo

Luis Candelas Nájera
29-09-14



La Instrumentación Sísmica en México

Objetivo:

Realizar un diagnóstico de las redes sísmicas y acelerográficas existentes en el país que permita obtener un planteamiento para la integración de la Red Sísmica Mexicana.

Índice

Introducción

1. Sismicidad en México

- 1.1. Sismicidad Mundial
 - 1.1.1. Generación de sismos
 - 1.1.2. Ondas sísmicas
- 1.2. Fuentes sísmicas en México
- 1.3. Temblores históricos en México

2. Sistemas de monitoreo sísmico

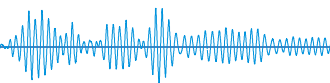
- 2.1. Redes Sismológicas
- 2.2. Redes Acelerográficas
 - 2.2.1. Campo libre y Subsuelo
 - 2.2.2. Estructuras

3. Instrumentación sísmica en México

- 3.1. Antecedentes
- 3.2. Cobertura Instrumental
 - 3.2.1. Base Mexicana de Sismos Fuertes
 - 3.2.2. Descripción de la Instrumentación existente
- 3.3. La Red Sísmica Mexicana
 - 3.3.1. Planteamiento General de un Observatorio Sísmico Estándar
 - 3.3.2. Análisis y evaluación de las Redes Sísmicas y Acelerográficas del país
 - 3.3.3. Integración de Estaciones Sismológicas y Acelerográficas a La Red Sísmica Mexicana

4. Conclusiones

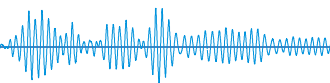
Referencias



El relieve de los continentes ha sido formado por los movimientos de las placas de la corteza terrestre dando lugar a la existencia de montañas, mesetas, llanuras y depresiones o hundimientos, las montañas generalmente se encuentran agrupadas en cadenas o cordilleras ya que los plegamientos que las forman abarcan regiones muy extensas, existen elevaciones que resultan de la acumulación de material que sale del subsuelo para liberar la energía acumulada dando lugar a la formación de los volcanes. Los movimientos de las placas provocan sismos de diferentes magnitudes, los de origen tectónico afectan a grandes regiones y los causados por un volcán afectan a zonas de menor tamaño pero el desastre puede ser de igual dimensión.

Los sismos son perturbaciones súbitas en el interior de la tierra que dan origen a vibraciones o movimientos del suelo, la causa principal y responsable de la mayoría de los sismos es la ruptura y fracturamiento de las rocas en las capas más exteriores de la tierra, como resultado de un proceso gradual de acumulación de energía debido a los fenómenos geológicos que deforman la superficie de la tierra. En su interior ocurren fracturamientos súbitos que, cuando la energía acumulada excede la resistencia de las rocas ocurre la ruptura y se propaga en el interior de la tierra una serie de ondas sísmicas que al llegar a la superficie sentimos como un temblor, generalmente los sismos ocurren en zonas de debilidad de la corteza terrestre que llamamos fallas geológicas. El sitio donde se inicia la ruptura se llama foco y su proyección en la superficie de la tierra es el epicentro.

México está ubicado dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, por tal razón es sacudido con frecuencia por sismos de magnitud considerable causados generalmente por deslizamientos de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica. Este movimiento de subducción se genera principalmente frente a las costas de los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco. Un sismo de subducción se produce después de que una sección de una de las placas continentales se desliza sobre la otra, al romperse las rocas trabadas desaparece la tensión generada y la tierra se sacude. La falla de San Andrés afecta los estados de Baja California y la parte norte de Sonora. Con el estudio de la topografía se ha realizado una clasificación de todas las entidades de la república de acuerdo a su propensión a la actividad sísmica, de esta manera debido al grado de ocurrencia de estos fenómenos naturales existen 3 regiones principales en México: La región sísmica (con alto grado de sismicidad, como los estados de Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Colima, Jalisco, Distrito Federal, Estado de México, Puebla), Pensísmica (zonas donde los sismos son poco frecuentes, como los estados de San Luis Potosí, Guanajuato) y Asísmica (donde raramente o nunca ocurre un movimiento telúrico, como la península de Yucatán). Los sismos son impredecibles, ya que no se cuenta con algún mecanismo que pueda detectar con precisión las zonas donde habrá una liberación de energía, sólo queda tener la conciencia de que seguirán ocurriendo y de que tenemos que estar preparados y prevenidos, en caso de que habitemos alguna zona sísmica. La situación expuesta siempre ha sido un asunto de interés para el país, en 1904 se crea la Asociación Sismológica Internacional para el mejoramiento de la instrumentación sísmica a nivel mundial, en el cual participan 18 países incluido México; para cumplir con los objetivos adquiridos en esta reunión el gobierno Mexicano ha implantado sistemas de medición y monitoreo de la actividad sísmica, comenzando con la fundación del Servicio Sismológico Nacional SSN en 1910, instalando una estación central de registro en Tacubaya y estaciones sismológicas mecánicas autónomas en las ciudades de Oaxaca, Mérida, Chihuahua, Veracruz, Guadalajara, Monterrey y Zacatecas, el cual queda a cargo de del Instituto de Geológico nacional.



Los primeros estudios que se realizaron usando los datos generados por la red sismológica que sirvieron para la elaboración de la primera carta sísmica de la República Mexicana, fue hasta los años sesenta que en pleno auge de la construcción de los grandes proyectos hidroeléctricos, surge la instrumentación acelerográfica cuyo objetivo era estudiar la respuesta dinámica de dichas estructuras cuando son sometidas a la acción sísmica. Entre las responsabilidades del SSN se encuentra el proporcionamiento de la información oportuna sobre la ocurrencia de sismos en el territorio nacional, además de determinar sus principales parámetros como son la magnitud y el epicentro, por otra parte también se encarga de proporcionar la información necesaria para mejorar nuestra capacidad de evaluar y prevenir el riesgo sísmico y volcánico a nivel nacional.

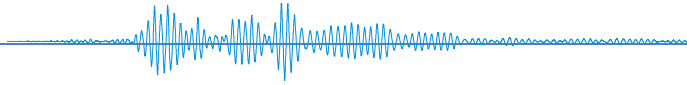
La implementación de este sistema de monitoreo ha permitido determinar la localización epicentral y la magnitud de los eventos sísmicos en el país, esta información no es suficiente para entender el tipo de daños que ocurren en las estructuras cuando son sometidas a este tipo de sollicitaciones, sin embargo es hasta 1957 después de la ocurrencia del sismo de magnitud 7.5 en San Marcos, cuando se reconoce la necesidad de medir y estudiar las ondas sísmicas generadas por los temblores fuertes, desde su origen hasta su arribo a importantes áreas de la población y estudiar la respuesta del suelo. Por lo que en 1960 se inicia la instrumentación para el registro de sismos fuertes al instalarse los dos primeros acelerógrafos en la Ciudad de México, uno en la Alameda Central y otro en Ciudad Universitaria, posteriormente en 1978 se establece la importancia del potencial sísmico de la brecha de Guerrero por lo que se pone en marcha la Red Acelerográfica de Guerrero, tal suceso resulto afortunado ya que con la instalación de esa instrumentación permitió registrar los sismos del 19 y 21 de Septiembre de 1985 con magnitud de 8.1 y 7.6 respectivamente.

Con ello se establece una nueva visión de la instrumentación sísmica en México, ya que varias instituciones se dan a la tarea de instalar estaciones acelerográficas en sitios que pueden ser severamente afectados por los eventos sísmicos, como lo es el caso del Instituto de ingeniería de la UNAM, que implementa un proyecto constante de expansión de su red que permite mejorar la cobertura de registro sísmico, especialmente en las regiones costeras del Pacífico, este proyecto es fortalecido con la implementación de la Red Sísmica Mexicana que incluye la instalación y puesta en marcha de sus estaciones, permitiendo mejorar la cobertura de registro desde Nayarit hasta Tapachula, en la costa del Golfo, en la región central del país y en ciudades como Oaxaca, Puebla y Acapulco.

El objetivo de esta tesis es evaluar toda la instrumentación para el registro de temblores en el país, así como presentar una propuesta mínima y clara para poder reforzar el monitoreo sísmico, planteando si es necesaria su ampliación, tener una mayor cobertura en todo el territorio nacional y modernizar la infraestructura existente.

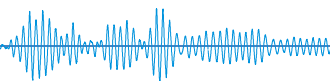
El trabajo presente consiste en un diagnóstico de las redes sísmicas y acelerográficas del país haciendo un planteamiento sobre las necesidades que tienen las estaciones para tener una mayor concentración de información, ampliando las redes con nuevas estaciones para lograr una mayor cobertura y recabar información más certera sobre los fenómenos sísmicos. En el capítulo 1 de esta tesis se habla sobre la sismicidad en México, como se generan los sismos, los tipos de onda que existen o que se pueden generar en las capas de suelo, indicando los tipos de fallas sísmica

dependiendo del esfuerzo que haya tenido el suelo por la energía liberada y la forma de localización de la fuente sísmica; también se señalan los temblores históricos que se han generado a lo largo del tiempo ya que estos son de gran importancia para recabar información y tener una base de datos para poder tener estadísticas sobre la cantidad de sismos y su magnitud y así evitar un riesgo. En el capítulo 2 se aborda el tema del monitoreo sísmico que es la herramienta fundamental para tener toda esta información requerida, se definen las redes sísmicas, el conjunto de estaciones que llevan a cabo el monitoreo, se da a conocer los tipos de estaciones que tenemos en nuestro país ya sean sismológicas y/o acelerográficas de campo libre y/o de subsuelo, explicando sus funciones y aplicaciones, instaladas en estructuras como edificios, presas y puentes. Particularmente en el capítulo 3 se hace un planteamiento sobre la instrumentación sísmica que se tiene en el país, la evolución que ha tenido a lo largo del tiempo para dar una evaluación de las estaciones y ver como están funcionando en este momento la red, para ello, se hace el diagnóstico para lograr cumplir con el objetivo de este trabajo, presentando una mínima propuesta para reforzar el monitoreo sísmico con la implementación, renovación, ampliación, modernización de las redes y obtener una mayor concentración de la información en tiempo real y lograr integrarlas a la Red Sísmica Mexicana.



CAPÍTULO I

SISMICIDAD EN MÉXICO



1. Sismicidad en México

Por su ubicación geográfica México se encuentra sujeto al efecto de diversos fenómenos naturales tales como erupciones volcánicas, derrumbes, inundaciones, sismos y sequías que pueden derivar en situaciones de desastre. En el caso de los sismos, en el transcurso de la historia han sido de mucha importancia tanto por su frecuencia como por los daños que han ocasionado, particularmente los ocurridos el 19 y 21 de Septiembre de 1985. En la dinámica de la corteza de nuestro país, la presencia de fallas geológicas activas y la acción de las placas tectónicas son factores siempre presentes, en la ciudad capital y en otras ciudades del país, a estos elementos se adicionan características adversas del subsuelo y una gran densidad poblacional que propician el riesgo sísmico.

Ante tales hechos, se tiene que orientar, informar y capacitar a los ciudadanos para enfrentar eficazmente los fenómenos sísmicos, con base en conocimientos e información que permita contribuir a la consolidación de cultura de protección civil, sobre la cual, se habrán de sustentar las acciones en pro de la prevención de desastres.

1.1 Sismicidad Mundial

Los sismos son movimientos vibratorios que modifican el estado de reposo del suelo, las causas que originan este fenómeno son diversas como impactos de meteoritos, colapsos naturales o explosiones ocasionadas por el hombre, pero la causa principal de las perturbaciones súbitas en el interior de la tierra que dan origen a vibraciones o movimientos, son la ruptura y fracturamiento de las rocas en las capas más exteriores de la tierra, como resultado de un proceso gradual de acumulación de energía debido a los fenómenos geológicos que deforman la superficie de la misma.

Nuestro planeta está compuesto de diversas capas que se formaron mientras los materiales pesados caían hacia el centro y los más ligeros salían a la superficie. Entre algunas de las capas se producen cambios químicos o estructurales que provocan discontinuidades, los elementos menos pesados componen la corteza exterior. Las placas que forman la corteza terrestre se encuentran sometidas a fuertes presiones desplazándose lentamente unas con respecto a las otras, debido a estos movimientos y a la presión sobre los materiales internos se producen diversos fenómenos: plegamientos del terreno, fallas y grietas sobre la superficie terrestre que, lejos de permanecer estable va cambiando a lo largo del tiempo. El conocimiento actual acerca del interior de la Tierra es resultado de numerosos estudios científicos, basados en la propagación de las ondas sísmicas a través del propio material terrestre, de esta manera ha sido posible determinar su composición y se divide en varias capas concéntricas como son: corteza, manto, núcleo externo y núcleo interno.

Para el estudio de la actividad sísmica, es de particular importancia la cubierta rígida de nuestro planeta, constituida por la corteza y la parte superior del manto que es completamente sólida y fracturable, a esta cubierta se le denomina litosfera la cual tiene un espesor promedio de 100 km. La Corteza se inicia en la superficie y llega hasta una profundidad promedio de 35 km. El Manto comprende desde la parte inferior de la Corteza hasta aproximadamente 2,900 km de profundidad debido a las condiciones de temperatura y presiones imperantes en el material de esta capa, su estado físico oscila entre sólido y plástico.

El Núcleo exterior tiene un espesor de unos 2,200 km comprendidos entre los 2,900 y los 5,100 km de profundidad, con base en datos sismológicos se ha podido inferir que es líquido, esto se puede deber a condiciones de temperatura elevada. Por último el Núcleo Interno localizado en el centro de la Tierra a 6370 km según se ha calculado se encuentra en estado sólido como se muestra en la *Figura 1.1* (ref. 1).

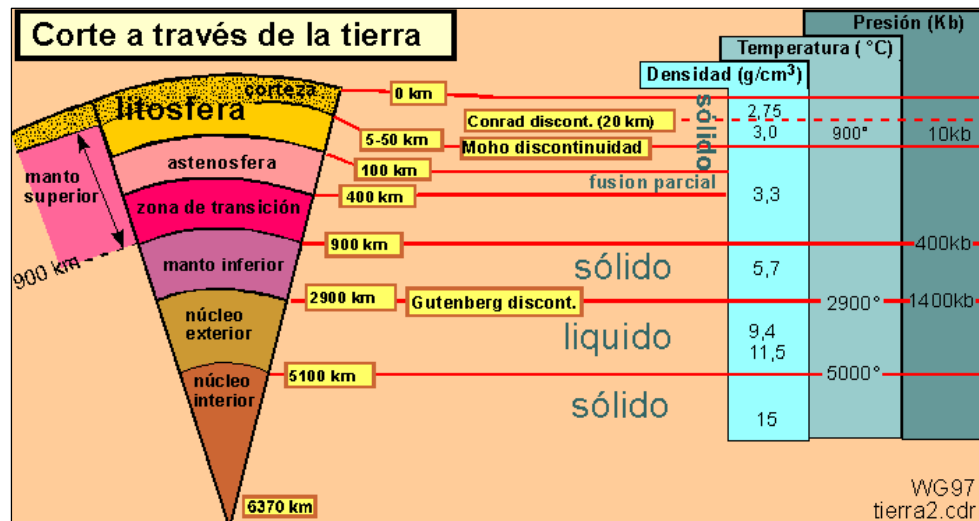


Figura 1.1 Estructura interna de la Tierra (ref. 2)

Deriva Continental

Se le conoce como deriva continental al desplazamiento de las masas continentales unas respecto a otras a lo largo de millones de años de la historia geológica de la Tierra. Esta teoría fue desarrollada en 1912 por el alemán Alfred Wegener a partir de diversas observaciones empírico-rationales, pero no fue hasta los años 60 con el desarrollo de la tectónica de placas cuando pudo explicarse de manera adecuada el movimiento de los continentes. Este movimiento se debe a que continuamente emerge material del manto por debajo de la corteza oceánica y se crea una fuerza que empuja las zonas ocupadas por los continentes, en consecuencia las hace cambiar de posición. Según esta teoría los continentes de la Tierra habían estado unidos en algún momento en un único "supercontinente" al que se le llamó Pangea. El cual, posteriormente se dividió en fragmentos que fueran alejándose lentamente de sus posiciones de partida hasta alcanzar las que ahora ocupan, como se muestra en la *Figura 1.2*. Las pruebas más importantes que aportó Wegener para demostrar la deriva de los continentes fueron: los contornos de los continentes embonan, la coincidencia de fósiles y estratos geológicos a uno y otro lado del Atlántico, los estratos geológicos depositados en climas tropicales y que hoy se encuentran en climas fríos; indicios de una misma glaciación en lugares muy separados como África, América del Sur, Australia, India y la Antártida (ref. 3).

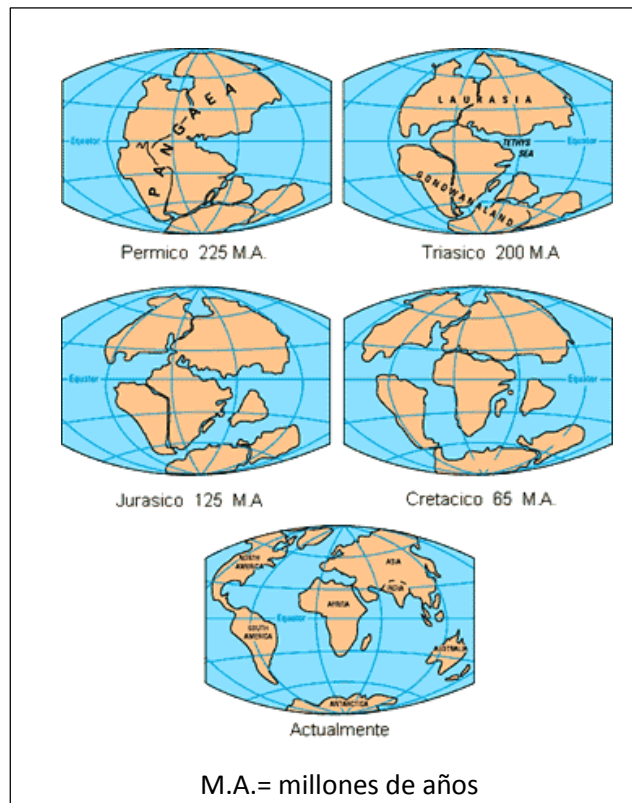


Figura 1.2 Deriva continental (ref. 4)

Los continentes se unen entre sí o se fragmentan, los océanos se abren, se levantan montañas, se modifica el clima; influyendo todo esto de forma muy importante en la evolución y desarrollo de los seres vivos. Se crea nueva corteza en los fondos marinos, se destruye corteza en las trincheras oceánicas y se producen colisiones entre continentes que modifican el relieve, originando la llamada "tectónica de placas", esta teoría que complementa y explica la deriva continental.

Tectónica de placas

Una placa tectónica es una de las numerosas secciones rígidas de la litosfera que se mueven como una unidad sobre el material de la astenósfera. La teoría de la tectónica de placas se ha consolidado como paradigma en la geología moderna, a la que ha proporcionado un marco teórico explicativo de la estructura, historia y dinámica de la corteza terrestre, la cual está integrada en unas veinte placas semirrígidas *Figura 1.3*. En realidad no hay coincidencia entre los límites de las placas y los límites continentales, una sola placa puede contener completa o parcialmente continentes y áreas oceánicas. Las regiones fronterizas de estas placas son zonas con actividad tectónica donde se concentran sismos y erupciones volcánicas (ref. 5).

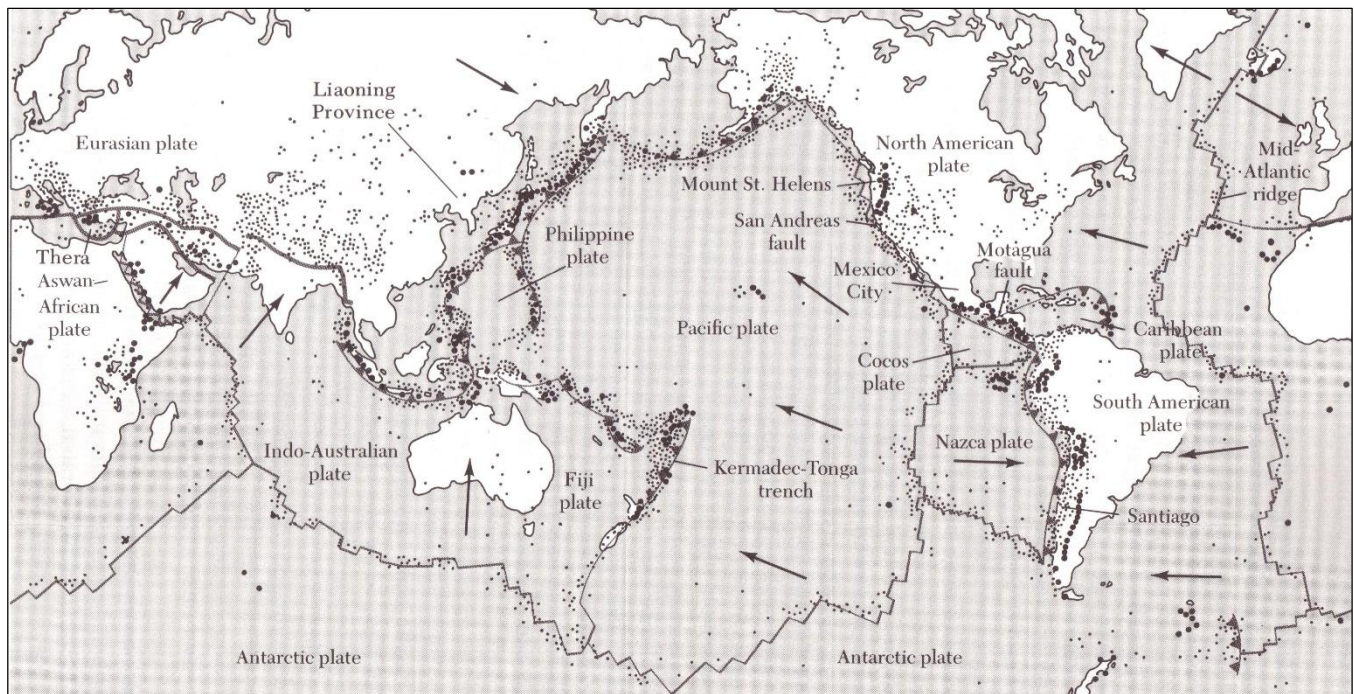


Figura 1.3 Distribución de las placas tectónicas (ref. 6)

Estos bloques descansan sobre una capa de roca caliente y flexible que fluye lentamente a modo de “goma caliente”, el movimiento del material espeso y fundido, fuerza a las placas superiores a moverse, hundirse o levantarse, el calor asciende por encima del aire frío y las corrientes de agua caliente flotan por encima de las de agua fría. El mismo principio se aplica a las rocas calientes que están bajo la superficie terrestre: el material fundido del magma sube, mientras que la materia fría y endurecida se hunde dentro del manto. La roca que se hunde finalmente alcanza las elevadas temperaturas de la astenósfera inferior, se calienta y comienza a ascender otra vez.

Este movimiento continuo y en cierta forma circular se denomina convección. En los bordes de las placas divergentes y en las zonas calientes de la litosfera sólida, el material fundido fluye hacia la superficie, formando nueva corteza, este fenómeno mencionado ocurre en las dorsales marinas como se muestra en la *Figura 1.4*.

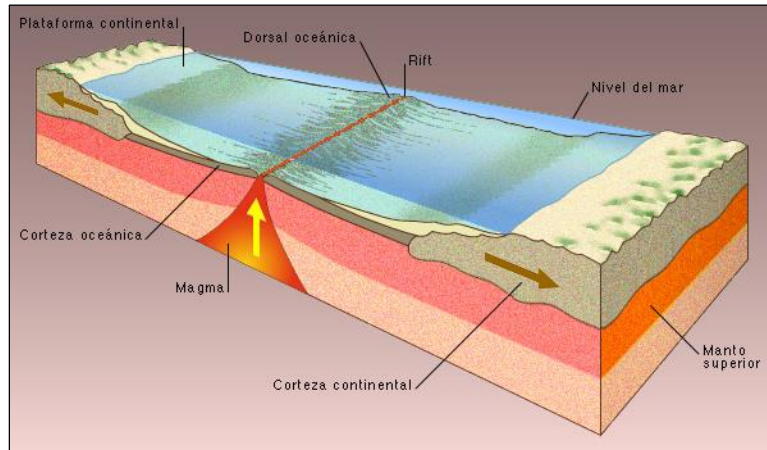


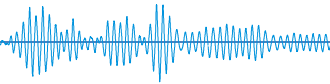
Figura 1.4 Dorsales marinas (ref. 7)

Cinturón de Fuego del Pacífico

Está situado en las costas del océano Pacífico y se caracteriza por concentrar algunas de las zonas de subducción más importantes del mundo, lo que ocasiona una intensa actividad sísmica y volcánica. Reposa sobre varias placas tectónicas las cuales están en permanente fricción y acumulan tensión, originando que las placas de la corteza terrestre se hundan a velocidades de 2 a 10 cm por año. El Cinturón de Fuego, *Figura 1.5*, se extiende sobre una longitud de 40 000 km y tiene la forma de una herradura, cuenta con alrededor de 452 volcanes lo que representa aproximadamente el 75% de este tipo de estructuras, por otra parte el 80 % de los terremotos más grandes del mundo se producen a lo largo de esta región.



Figura 1.5 Cinturón de Fuego del Pacífico (ref. 8)



1.1.1. **Generación de sismos**

De acuerdo a su actividad sísmica la superficie terrestre se ha dividido en tres regiones:

- **Sísmicas:** son zonas de la corteza terrestre muy propensas a sufrir grandes movimientos sísmicos, suelen coincidir con regiones donde se levantan cadenas montañosas de reciente formación y en otras en donde existe fricción entre placas.
- **Penisísmicas:** son áreas en las que sólo se registran sismos débiles y no con mucha frecuencia.
- **Asísmicas:** son regiones muy estables de la corteza terrestre en las que raramente se registran movimientos.

Fallas sísmicas

Una falla es una fractura en la corteza terrestre en la cual ha ocurrido un desplazamiento en bloques de la misma en ambos lados. Los temblores ocurren en las fallas sísmicas, estas zonas almacenan esfuerzo durante un período prolongado, deformando al medio hasta que llega el momento en que las fuerzas de uno y otro bloque son tan grandes que terminan moviéndose súbitamente, al ocurrir esto se generan ondas sísmicas que se propagan en todas direcciones.

Tipos de fallamiento

Falla Normal: se caracteriza porque uno de sus bloques cae bajo la acción de la gravedad y de las fuerzas de tensión que actúan en la corteza, las fuerzas tectónicas actúan dilatando o expandiendo el medio en forma perpendicular a la falla como se muestra en la *Figura 1.6* parte A.

Falla Inversa: en este caso uno de sus bloques es empujado hacia arriba, producto de las fuerzas de compresión que actúan en la corteza, las fuerzas tectónicas actúan comprimiendo el medio y en forma perpendicular a la falla como se muestra en el esquema B de la *Figura 1.6*.

Falla Longitudinal: el movimiento se produce cuando las fuerzas tectónicas actúan en dirección opuesta a ambos lados de la falla pero en forma paralela a ésta, como consecuencia, los bloques son desplazados horizontalmente tal como lo muestra el esquema C de la misma *Figura 1.6*.

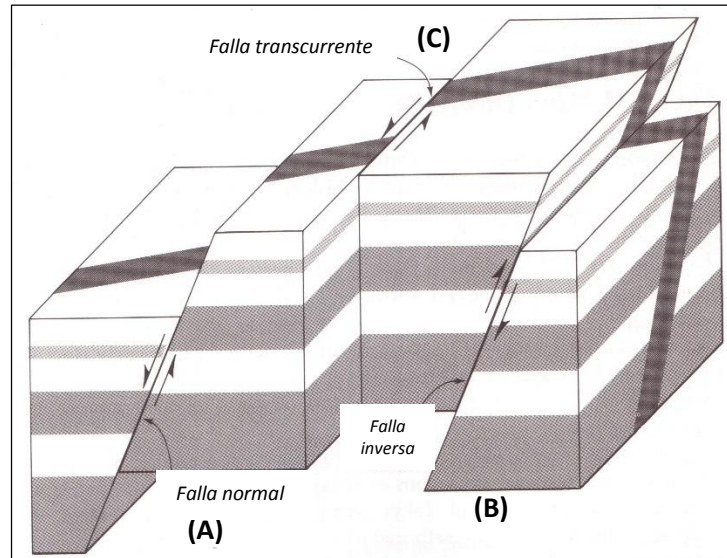


Figura 1.6 Tipos de fallas sísmicas (ref. 9)

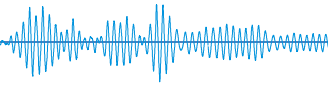
Las placas divergentes son las placas que se separan, un ejemplo son las cordilleras oceánicas. Las convergentes es la acción de introducirse una bajo la otra, o bien, dos placas chocan entre sí, ejemplo de ello es la penetración de la Placa de Cocos en la Placa de Norteamérica en la costa occidental de nuestro país, el efecto más representativo del segundo caso es la colisión entre las placas Indoaustraliana y Euroasiática, cuyos resultados son los plegamientos de grandes proporciones que constituyen la cadena montañosa de los Himalaya. Las placas de transformación o transcurrentes son placas que se mueven entre sí lateralmente un ejemplo de ellos es la falla de San Andrés, cruza el estado de California en los Estados Unidos y que llega a afectar la parte norte de la península de Baja California en México (ref. 10).

Tipos de sismos

Los sismos se pueden clasificar por su origen en (volcánicos y tectónicos), por su magnitud e intensidad en (microsismos y macrosismos), anteriormente por la dirección del movimiento se les dividía en oscilatorios (horizontales) y trepidatorios (verticales), aunque esta clasificación ha caído en desuso debido a que las vibraciones sísmicas generan movimientos en todas direcciones. Los sismos de Colapso son producidos por derrumbamiento del techo de cavernas y minas, generalmente estos sismos ocurren cerca de la superficie y se llegan a sentir en un área reducida.

Los Sismos Tectónicos son aquellos producidos por la interacción de las placas tectónicas y se clasifican en:

- a) Sismos interplaca: se producen cuando se vence la fuerza de fricción del contacto entre placas.
- b) Sismos intraplaca: ocurren dentro de la placa tectónica, un caso particular son los sismos corticales que se generan en la corteza y a poca profundidad.



Los Sismos Volcánicos acompañan a las erupciones volcánicas y son ocasionadas principalmente por el fracturamiento de rocas debido al movimiento del magma. Este tipo de sismos generalmente no llegan a ser tan grandes como los tectónicos.

1.1.2. Ondas sísmicas

Las perforaciones más profundas no son más que un rasguño sobre la superficie comparándolas con el radio terrestre, sin embargo, conocemos varias de las características principales de la estructura interna de la Tierra gracias al estudio de las ondas sísmicas que la atraviesan. El fallamiento de la roca consiste precisamente en la liberación repentina de los esfuerzos que está sometido, de esta manera la tierra es puesta en vibración, produciendo ondas sísmicas que se transmiten en todas direcciones.

Ondas de cuerpo

Viajan a través del interior de la Tierra siguiendo caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de sus capas, las ondas de cuerpo son compresionales y transversales por ello son divididas en dos grupos: primarias P y secundarias S.

Las ondas P comprimen y dilatan el medio para propagarse en dirección longitudinal, *Figura 1.7*. Se pueden propagar en cualquier medio a través de cualquier tipo de material, con velocidades típicas de 330 m/s en el aire, 1450 m/s en el agua y cerca de 5000 m/s en el granito (ref. 11).

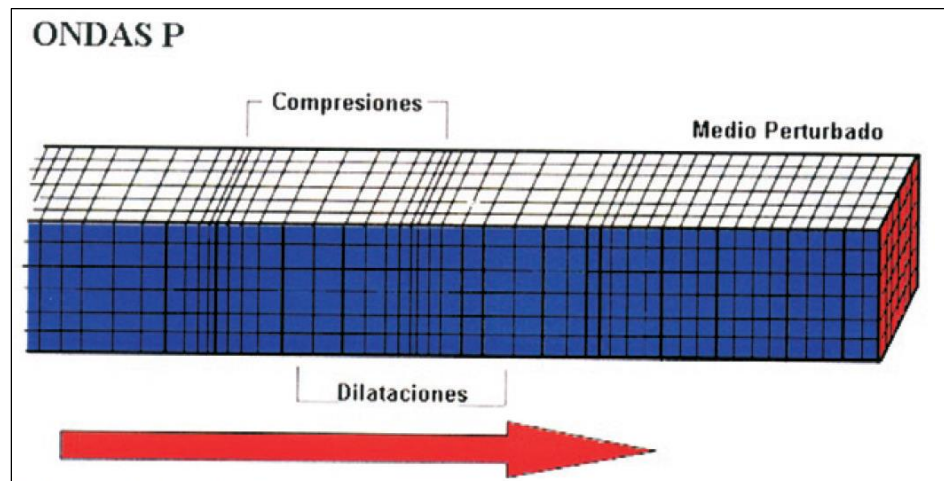


Figura 1.7 Onda P, compresión y dilatación del medio (ref. 12)

Las ondas S son ondas transversales o de corte, el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro, pueden viajar a través de medios sólidos. Su velocidad es menor a la de una onda P, se pueden propagar en cualquier medio a través de cualquier tipo de material con velocidades típicas de 190 m/s en el aire, 840 m/s en el agua y cerca de 2900 m/s en el granito, *Figura 1.8*.

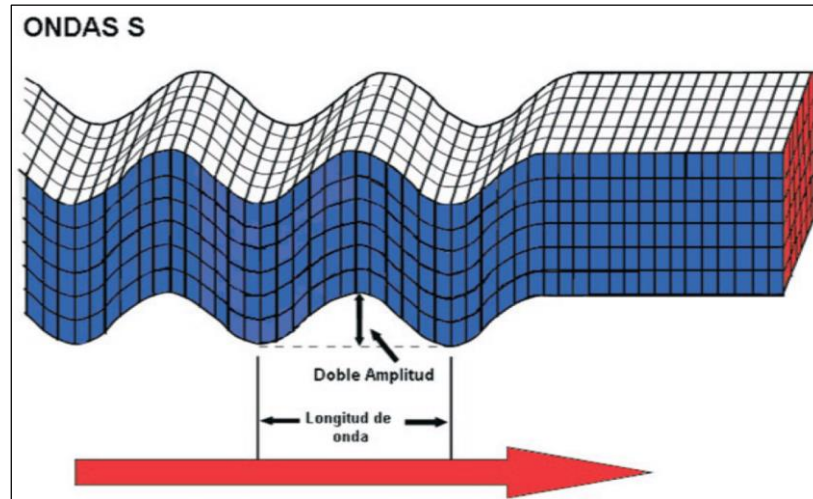


Figura 1.8 Onda S, transversales o de corte con respecto al medio (ref. 13)

Ondas superficiales

Son más lentas que las de cuerpo y se desplazan solamente en la capa externa de la Tierra, cuando un sólido posee una superficie libre pueden generarse ondas que viajan a lo largo de ella. Estas ondas tienen su máxima amplitud en el medio y va decreciendo exponencialmente con la profundidad, estas ondas se dividen en ondas Rayleigh y Love, (ref. 14).

Las ondas *Rayleigh* se propagan mediante un movimiento elíptico y retrógrado del medio, su velocidad de propagación es aproximadamente un 70% de las ondas S, *Figura 1.9*.

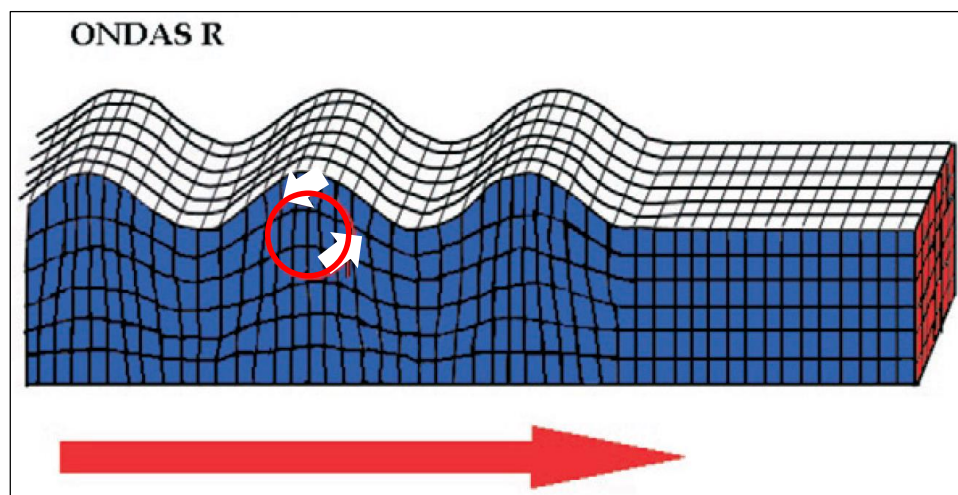
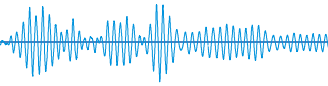


Figura 1.9 Onda Rayleigh, su propagación es elíptica en dirección al plano (ref. 15)



Las ondas Love *Figura 1.10*, producen un movimiento de corte en la superficie del medio, el cual es perpendicular a la dirección de propagación.

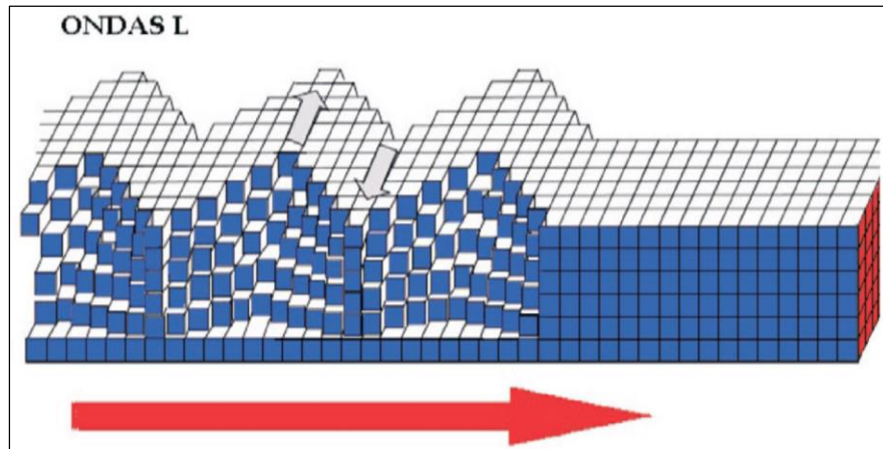


Figura 1.10 Onda Love, su movimiento es perpendicular a la dirección de propagación (ref. 16)

Propagación de ondas

Las ondas sísmicas tienen las mismas propiedades que cualquier otro tipo de onda como por ejemplo las ondas sonoras. Su amplitud A es del pico máximo medido desde la línea central, el período P se refiere al tiempo que transcurre para completar un ciclo, por lo general las ondas de período corto son las que poseen amplitudes mayores, mientras que las de períodos largos poseen amplitudes menores como se muestra en la *Figura 1.11*.

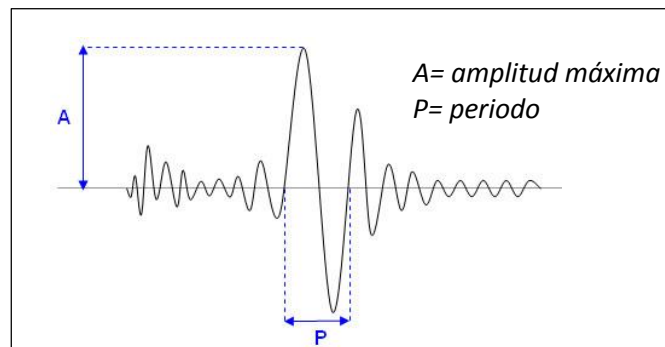


Figura 1.11 Onda sísmica (ref. 17)

Cuando se genera un sismo, la energía liberada tiene mayor efecto en las zonas cercanas al epicentro, las ondas sísmicas que arriban a esa región se caracterizan por poseer amplitudes altas y períodos cortos como se muestra en la *Figura 1.12* en el punto A, conforme las ondas se propagan por todas direcciones éstas empiezan a perder energía, claramente se ve la disminución de la amplitud de la onda cuando se aleja del epicentro, es por esta razón que una persona ubicada cerca del punto A experimentará un movimiento mucho más fuerte que una ubicada en el punto C, también

una persona en el punto A sentirá que el sismo dura solo unos instantes, mientras que una persona en el punto B sentirá que éste dura un poco más y así sucesivamente. Todo esto es debido precisamente a que los períodos largos tienden a predominar conforme aumenta la distancia; a distancias mayores, el sismo no pasará de ser un leve movimiento del suelo perceptible solo para personas en estado de reposo.

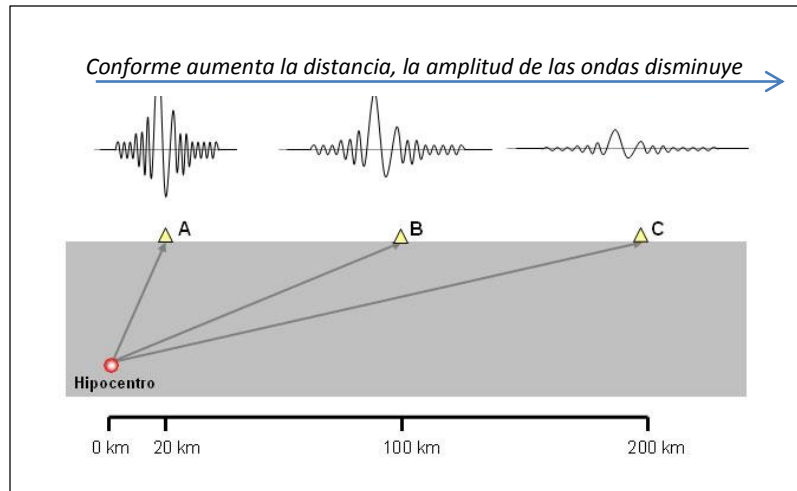


Figura 1.12 Trayectoria de la onda sísmica (ref. 18)

Ruptura sísmica

La energía que estaba almacenada en forma de esfuerzos en la roca deformada crea la falla, rompe la roca y vence la fricción entre ambas caras de la fractura que tratan de frenar el movimiento (ref. 19). Al punto donde comienza la ruptura se le llama hipocentro y su proyección en la superficie terrestre se le conoce como epicentro *Figura 1.13*.

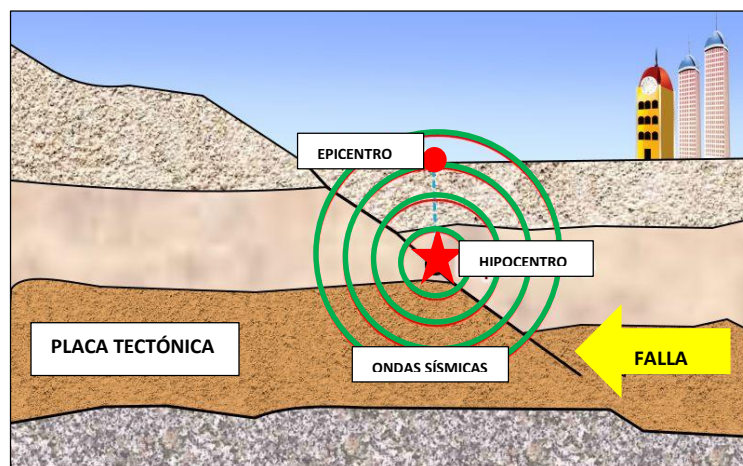
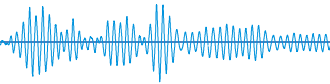


Figura 1.13 Puntos de proyección de un sismo



En general los sismos se consideran someros si ocurren a profundidades menores a los 30 kilómetros, de profundidad intermedia si están en el rango de 30 a 60 kilómetros y profundos si se generan a profundidades mayores a las indicadas (ref. 20). Los movimientos sísmicos que ocurren antes de un temblor grande o principal se conocen como preeventos y tienen el efecto de concentrar los esfuerzos que darán lugar a este. También existen movimientos después del sismo principal estos son llamados réplicas cuyos focos están localizados en el área de ruptura del evento principal o en su periferia, eso se debe a que parte de la energía almacenada en las rocas de la región que rodea la falla alimenta a esta posteriormente; la ocurrencia de réplicas puede durar desde días hasta años, dependiendo de la magnitud del evento principal y del tipo de fuente sísmica.

Magnitud e Intensidad

La magnitud es una medida del tamaño de un sismo, se determina a partir de un sismograma o un acelerograma obtenido en las distintas estaciones sísmicas que registran las ondas producidas por el mismo.

La definición propuesta por Charles F. Richter expuso una escala de magnitud basada en sismos locales, propuso que la magnitud es el logaritmo en base diez de la máxima amplitud de las ondas sísmicas registradas con un sismógrafo standard tipo Wood-Anderson, a una distancia de 100 km del epicentro del temblor, y a esto le restaba el logaritmo de una amplitud base. Esta definición es aplicada únicamente para temblores registrados al sur de California (ref. 21).

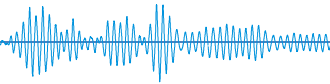
El cálculo de la magnitud es un proceso iterativo que se obtiene por algoritmos computacionales de forma automática para una estimación de manera expedita, en general, los valores finales de magnitud que reportan las instituciones encargadas en recabar esta información coinciden, sin embargo pueden existir pequeñas diferencias debido al método que utilicen, por lo cual existen varios tipos de magnitudes tales como:

Magnitud local (MI): es la que normalmente se conoce como magnitud Richter, esta escala ha sido calibrada para poder ser usada en diferentes partes del mundo utilizando registros de otros instrumentos. Sin embargo por limitaciones y por el tipo de datos sismológicos que emplea, esta escala ya no es usada. Ha sido remplazada por otras escalas de magnitud más sólidas y generales como la de magnitud de momento.

Magnitud de coda (Mc): esta magnitud se obtiene a partir de la duración del registro sísmico. La coda de un sismograma corresponde a la parte tardía de la señal que decrece conforme pasa el tiempo hasta alcanzar su nivel original previo al sismo, la duración de la coda es proporcional al tamaño del sismo.

Magnitud de ondas de cuerpo (Mb): su valor se obtiene a partir de la amplitud máxima observada en los sismogramas, de las ondas de cuerpo P con períodos de oscilación de 1 segundo.

Magnitud de ondas superficiales (Ms): se obtiene a partir de la amplitud máxima observada en los sismogramas de las ondas superficiales, por lo general con las ondas Rayleigh con períodos de oscilación entre 18 y 22 segundos.



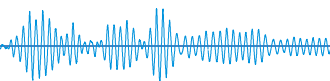
Magnitud de momento (M_w): esta magnitud se determina a partir del momento sísmico, que es una cantidad proporcional al área de ruptura y al deslizamiento que ocurra en la falla, su estimación es compleja y puede llevarse a cabo empleando diversos métodos y tipos de datos.

En general, su cálculo requiere por lo menos, de los 15 minutos después de ocurrido el evento sísmico en el caso de que se empleen datos locales y hasta 30 minutos si se emplean datos de estaciones lejanas (ref. 22).

Magnitud de energía (M_e): es proporcional a la energía que irradió el sismo en forma de ondas, para un sismo dado, este valor puede ser diferente al determinado para M_w , pues M_e cuantifica un aspecto diferente del sismo. Su cálculo es laborioso por lo que generalmente esta magnitud no es reportada por las instituciones durante los primeros días de sucedido el sismo (ref. 23).

La Intensidad sísmica es una medida de los efectos causados por un sismo en un lugar determinado de la superficie terrestre, un sismo pequeño pero muy cercano puede causar grandes daños en cuyo caso se dice que su intensidad es grande; en cambio un sismo muy grande pero muy lejano puede apenas ser sentido, su intensidad es baja (ref. 24). La escala de intensidad fue propuesta por primera vez en Italia por el científico Giuseppe Mercalli, la escala original constaba de diez grados y la que se usa actualmente se llama escala de Mercalli Modificada que consta de doce grados. A diferencia de la magnitud la intensidad se relaciona con los efectos sobre las personas y el nivel de daño de las estructuras.

Los valores bajos por lo general están asociados con la forma como las personas sintieron el sismo, mientras que valores mayores con la forma como fue afectado el paisaje o las construcciones hechas por el hombre. La *Tabla 1.1* define los grados de la escala de intensidad de Mercalli.

**Tabla 1.1** Escala de Mercalli Modificada (MM)

I	Sacudida sentida por pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
II	Se percibe sólo por personas en reposo, particularmente las ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
III	Se percibe en los interiores de los edificios y casas, las personas no distinguen claramente que la naturaleza del fenómeno es sísmica por su semejanza con la vibración por el paso de un vehículo.
IV	Los objetos colgantes oscilan visiblemente, muchas personas lo notan en el interior de los edificios. En el exterior la percepción no es tan general. Se escuchan las vibraciones de la vajilla, puerta y ventanas, se sienten crujir algunos tabiques de madera y los automóviles detenidos se mecen.
V	La mayoría de las personas lo percibe aún en el exterior, los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y aún pueden derramarse. Los objetos inestables se mueven o se vuelcan, los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
VI	Lo perciben todas las personas, se atemorizan y huyen hacia el exterior, se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los juguetes, libros y otros objetos caen de los armarios, los cuadros suspendidos de las paredes caen, los muebles se desplazan o se vuelcan, se producen grietas en algunas paredes. Se hace visible el movimiento de los árboles, se siente el tañido de las campanas pequeñas de iglesias y escuelas.
VII	Los objetos colgantes se estremecen; se experimenta dificultad para mantenerse en pie, el fenómeno es percibido por los conductores de automóviles en marcha, se producen daños de consideración en estructuras mal construidas o mal proyectadas. Sufren daños menores (grietas) las estructuras corrientes de albañilería bien construidas. Se dañan los muebles. Caen trozos de ladrillos y diversos elementos arquitectónicos. Las chimeneas débiles se quiebran al nivel de la techumbre, se producen ondas en los lagos; el agua se enturbia. Los terraplenes y taludes de arena o grava experimentan pequeños deslizamientos o hundimientos.
VIII	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos, se producen daños de consideración y aún el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. En estructuras de albañilería bien proyectadas y construidas sólo se producen daños leves, caen chimeneas en casa e industrias; caen igualmente monumentos, columnas, torres y estanques elevados. Los tabiques se desprenden, se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos y aparecen grietas en el suelo húmedo.
IX	Se produce pánico general, las estructuras de albañilería mal construidas se destruyen. Las estructuras de albañilería bien construidas se dañan seriamente y a veces se derrumban totalmente, sufren daños considerables los depósitos de agua y gas. Se quiebran las tuberías subterráneas. Aparecen grietas aún en suelos secos. En las regiones aluviales, pequeñas cantidades de lodo y arena son expelidas del suelo.
X	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. Se destruyen los cimientos de las estructuras de madera bien construidas, incluso puentes se destruyen, se producen daños en represas, diques y malecones. Se producen grandes desplazamientos del terreno en los taludes. El agua de canales, ríos, lagos, etc. sale proyectada a las riberas. Cantidades apreciables de lodo y arena se desplazan horizontalmente sobre las playas y terrenos planos. Los rieles de las vías férreas quedan ligeramente deformados.
XI	Muy pocas estructuras de albañilerías quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las tuberías quedan totalmente fuera de servicio.
XII	El daño es casi total, se desplazan grandes masas de roca y los objetos saltan al aire.

Localización de la fuente sísmica

Se necesitan al menos tres estaciones sísmicas para localizar el epicentro de un sismo, esto se lleva a cabo midiendo las diferencias de los tiempos entre la llegada de la onda P y la onda S en cada estación, esa diferencia se multiplicaría por un factor de 5 a 8 km/s, que es la velocidad relativa de propagación de la onda P a través de los estratos del suelo, con esto se obtiene la distancia que recorrió esa onda a cualquier estación en dicho tiempo. En la *Figura 1.14* se muestran los sismogramas registrados en las estaciones A, B y C. Los símbolos T_A , T_B y T_C corresponden a la diferencia de tiempos entre los arribos de las ondas P y S por estación. El epicentro debe estar más lejos de la estación C ya que es la que posee mayor diferencia de tiempo le sigue la estación A y por último la estación B.

Cada estación tiene una diferencia de tiempos distinta por consiguiente tendrá diferentes sus longitudes de recorrido de onda, la forma de dar con el epicentro es trazando círculos cuyos radios sean esas distancias (d) y cuyos centros sean las estaciones mismas, el punto donde los tres círculos se intercepten será el epicentro.

El método antes descrito, aunque es bastante ilustrativo no es el mejor empleado, la Tierra está formada por capas de diferente constitución que afectan la forma en que se propagan las ondas sísmicas, haciendo que estas viajen algunas veces más rápido y otras veces más lento, es necesario considerar el espesor, la densidad y la velocidad que viajan las ondas por las rocas que conforman la corteza, para obtener una ubicación precisa del origen del sismo se deben usar todas las estaciones disponibles.

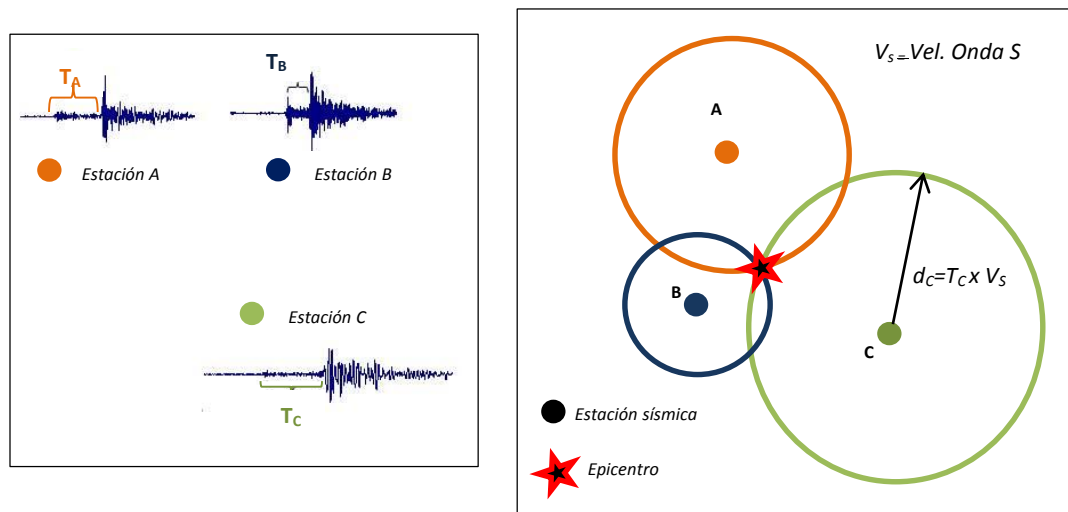


Figura 1.14 Localización del epicentro

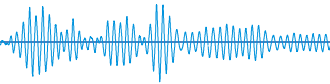
1.2. Fuentes sísmicas en México

El territorio mexicano se encuentra repartido en cinco placas tectónicas, la mayor parte del país se encuentra sobre la Placa Norteamericana. Esta placa contiene también a toda Norteamérica, parte del océano Atlántico y parte de Asia. La península de Baja California, así como el oeste de California y el Océano Pacífico, se encuentran sobre la Placa del Pacífico. El sur de Chiapas, las islas caribeñas y los países de Centroamérica se encuentran en la Placa del Caribe. Las otras dos placas que conforman el rompecabezas tectónico de México, Cocos y Rivera, son oceánicas y se encuentran bajo el océano pacífico. La Placa Norteamericana se separa de la del Pacífico, pero roza con la del Caribe y choca contra la de Rivera y la de Cocos, *Figura 1.15*.



Figura 1.15 Placas tectónicas en la República Mexicana

La configuración geográfica actual es consecuencia de la interacción del bloque continental con las oceánicas, es decir, en la región del Pacífico, la Península de Baja California se están separando del resto del continente con un movimiento hacia el noroeste, desde Cabo Corrientes en el estado de Jalisco hacia Centroamérica. El estado de Guerrero es uno de los más activos sísmicamente del país, en esta zona la placa de Cocos se está introduciendo por debajo de la placa de Norteamérica, en la región se registra alrededor del 25 % de la sismicidad que ocurre en territorio mexicano. Esto se debe a la subducción de la placa de Cocos (placa oceánica) por debajo de la placa Norteamericana (placa continental), el contacto de estas dos placas tectónicas ocurre frente a las costas del Pacífico, desde el estado de Jalisco hasta Chiapas, esta subducción forma parte del cinturón de fuego del pacífico, estableciendo zonas de expansión en los límites de las placas Norteamericana y del Pacífico, la actividad sísmica y volcánica de México es causada por las fallas geológicas y puntos calientes que generan las mencionadas placas tectónicas, tales como la falla de San Andrés, la falla Mesoamericana, o el eje Volcánico Transversal.



Por otro lado, en el Golfo de México y el Caribe, se tienen esfuerzos tectónicos de separación cortical identificados también como de tensión, que están actuando en los márgenes continentales, éstos a su vez avanzan sobre las profundidades de las cuencas oceánicas como consecuencia del desplazamiento de la placa tectónica continental de Norteamérica hacia el poniente y de la del Caribe hacia el oriente.

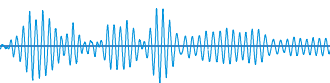
Los sismos con profundidades mayores a los 40 km se localizan dentro de las placas oceánicas que se subducen bajo el continente, sometándose a fuerzas gravitacionales que producen resquebrajamiento de la corteza. La magnitud de un sismo va a depender de la región que sufre el resquebrajamiento; entre mayor sea el área que se rompe por la acción de las fuerzas tectónicas mayor es su tamaño.

Regionalización Sísmica

La República Mexicana hipotéticamente se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas con fines de diseño antisísmico, para realizar esta zonificación se manejaron los datos de los sismos que se tienen desde inicios de siglo, los más importantes y los de mayor impacto hacia las edificaciones aparecen en los registros históricos y en los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en este siglo. La zona (A) representa la región donde no se tenían registros históricos de sismos, no se habían reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad. La zona (D) es la franja donde se han reportado grandes sismos históricos, en esta región la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las otras dos regiones (B y C) son zonas intermedias donde se registran sismos no tan frecuentemente, aunque son afectadas por altas aceleraciones que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo *Figura 1.16*. La Ciudad de México se encuentra ubicada en la zona B, pero debido a las condiciones del subsuelo, pueden esperarse altas aceleraciones.



Figura 1.16 Regiones Sísmicas en México (ref. 25)



También se subdivide en tres regiones como son: sísmicas, penisísmicas y asísmicas. La zona sísmica está localizada al sur y suroeste de la República, abarca los estados de México, Colima, Michoacán, Guerrero, Morelos, Oaxaca, sur de Veracruz, Chiapas, Jalisco, Puebla y Distrito Federal; la zona penisísmica abarcan la Sierra Madre Occidental, las llanuras de Sonora, Sinaloa, Nayarit, así como la región transversal que va del sur de Durango al centro de Veracruz y la zona asísmica se sitúa en la parte norte y noreste de México, en casi toda la península de Baja California y en la península de Yucatán.

Tipos de sismos en Territorio Nacional

Sismos de Subducción

Estos sismos de subducción Interplaca ocurren por el desgaste entre la placa Norteamericana y las oceánicas (Cocos y Rivera), la longitud de ruptura por el friccionamiento entre estas va de 50 hasta los 200 km. Las placas oceánicas al penetrar el manto terrestre se deforman, presentándose en diferentes regiones del país bajo Jalisco y Colima, la placa de Rivera cae abruptamente a un ángulo mayor a 45° bajo Michoacán y Guerrero, la placa de Cocos se mueve horizontalmente teniendo un roce de 300 km de longitud con respecto a la Norteamericana, para recaer a un ángulo mayor bajo Oaxaca, mientras que bajo Chiapas esta misma placa subduce con un ángulo mayor a los 45° (ref. 26).

Los sismos representativos que ocurrieron por este movimiento de subducción fue el del 3 de Junio de 1932, en las costas de Jalisco con una magnitud de 8.2 y una longitud de ruptura de 280 km. Otro sismo importante tanto por su tamaño como por los daños producidos fue el sismo de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 que se reportó con una magnitud de 8.1 y una ruptura que abarcó toda la costa del estado de Michoacán, 180 km aproximadamente. A pesar de que su epicentro se encontraba a 200 km de la ciudad de México fue aquí donde se produjo el mayor daño. El sismo de Colima-Jalisco en Octubre de 1995 produjo un maremoto con olas que llegaron a sobrepasar los 5 metros de altura en algunos lugares (ref. 27). En esta franja de subducción se encuentra una región donde no se tiene evidencia de la ocurrencia de grandes sismos durante este siglo, se localiza en la costa Grande de Guerrero, esta región se denominan brecha sísmica por su ausencia de grandes sismos y porque es la zona donde aún no se a liberado energía como en las demás regiones del pacífico.

Sismos Corticales

Ocurren dentro de la placa Norteamericana, son movimientos intraplaca muy superficiales que no llegan a sobrepasar los 35 km de profundidad, sus magnitudes son menores a las de los sismos de subducción, incluso menores a la de los sismos profundos, ocurren principalmente a lo largo del Eje Volcánico Mexicano donde se concentra la mayoría de la población en el país. El sismo aunado a este fenómeno es el de Acambay de 1912 tuvo una magnitud de 7, ocasionando grandes daños en los pueblos de Acambay y Tixmadejé en el estado de México, también provocando algunos daños en la ciudad de México. En 1920 ocurrió el sismo de Jalapa con una magnitud de 6.4 el cual provocó graves daños a esta ciudad veracruzana.

En la *Figura 1.17* se muestra la localización de los sismos más característicos ocasionados por el roce de la placa de Norteamérica con la de Cocos, Rivera y la placa del Caribe, dando origen a los sismos de subducción en el interior de la placa Norteamericana y los sismos corticales, ambos en la región sur de la República mexicana.

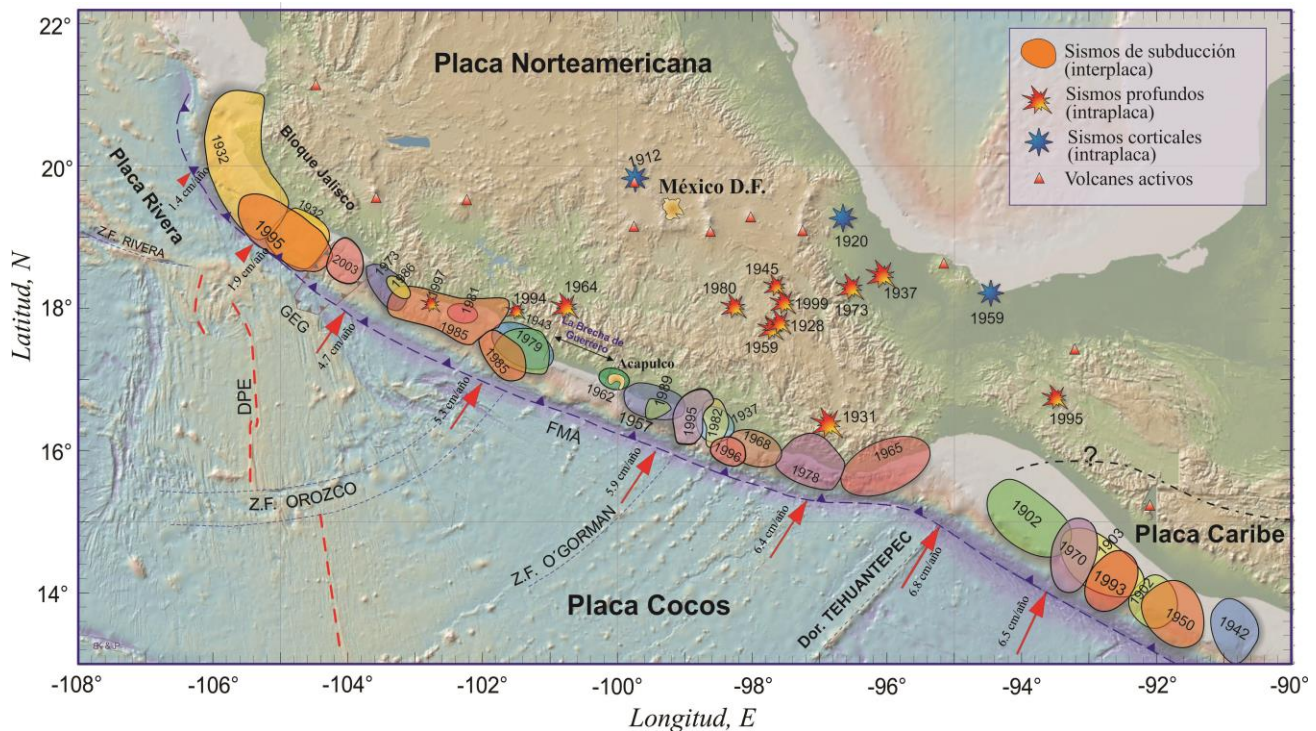


Figura 1.17 Sismos más importantes en México (ref. 28)

Sismos Interplaca

Se llevan a cabo entre las placas de Norteamérica y Pacífico a lo largo de las fallas del Cerro Prieto hasta el Imperial al norte de Baja California, estos sismos ocurren a profundidades muy someras y llegan a alcanzar magnitudes de 7. Los acontecimientos más importantes que ocurrieron en esa zona fueron en los años 1915 y 1934 que sobrepasaron la magnitud de 6.5, debido a que son sismos superficiales que provocan grandes daños a las poblaciones cercanas (ref. 29). En situación similar se encuentran las ciudades de Tijuana, Tecate, Mexicali y otras de Baja California Norte y Sur por su ubicación sobre la frontera entre las placas, estas ciudades comparten peligros similares a las ciudades de Los Ángeles y San Francisco ya que las fallas de Baja California se conectan más al norte con el sistema de fallas de San Andrés, donde se produjo el sismo de 1906 en San Francisco California.

En la actualidad los sismos interplaca son más concurrentes que los intraplaca pero ambos son de igual importancia ya que se extienden a lo largo de todo el territorio nacional, anteriormente solo se tenían registros de la zona de subducción al sur de la República por la gran cantidad de

acontecimientos sentidos en esa región, con el paso del tiempo se llegaron a registrar otro tipo de sismos como son los corticales, ya que se generan en regiones donde no se tenía contemplado que pudiera temblar. En la Figura 1.18 se muestra la cantidad de sismos ocurridos en el año 2013 en las diferentes zonas sísmicas del territorio Mexicano, tal es el caso del límite entre la placa Norteamericana con la del Caribe, en esta zona no se registra una gran número de movimientos telúricos. En el caso de la zona de subducción entre la placa de Norteamericana con las placas Cocos y Rivera, es donde se generan la mayor cantidad de sismos en la parte norte, hasta llegar a la región de Baja California donde el cizallamiento entre estas dos placas (Norteamericana y Pacífico), componen otra gran cantidad importante de temblores. También se ilustran los sismos corticales, de menor magnitud pero de igual importancia ya que se están generando con mayor frecuencia.

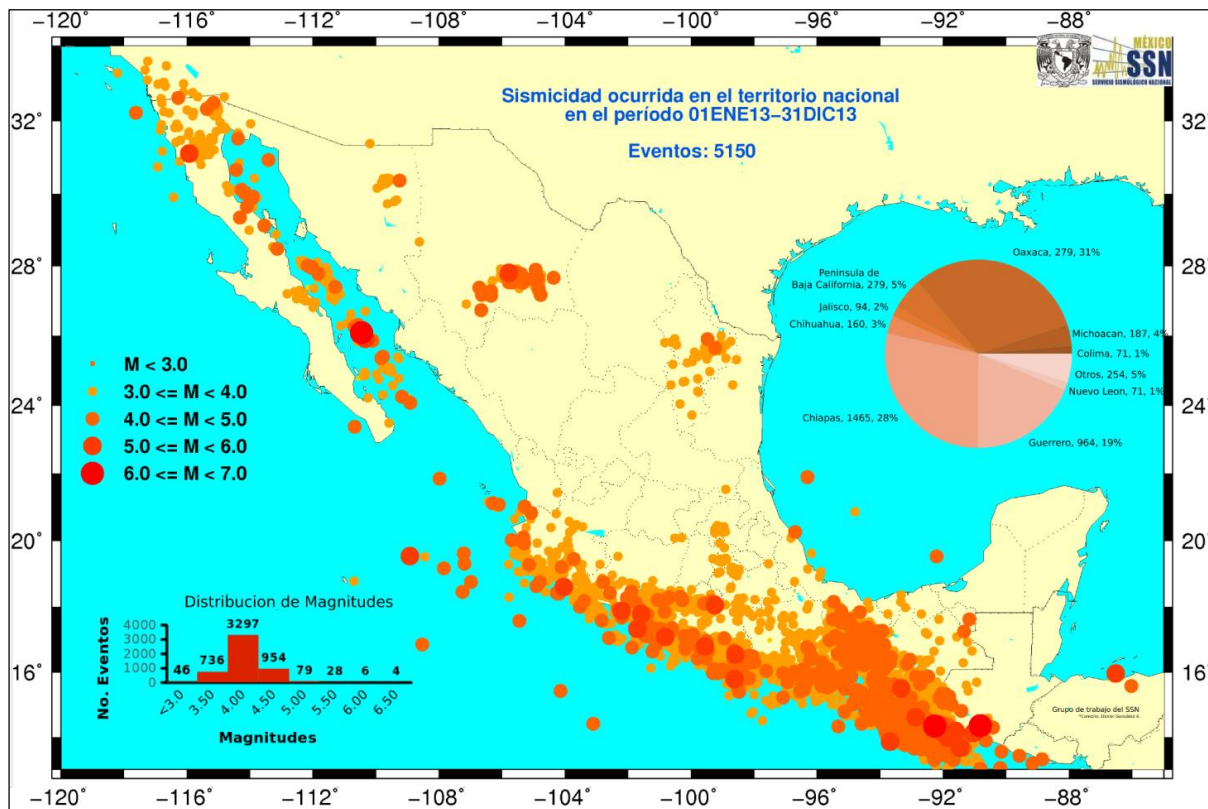


Figura 1.18 Sismos más importantes en México (ref. 30)

1.3. Temblores históricos en México

Cuando se siente un temblor en la Ciudad de México es frecuente pensar que se originó en las costas de Guerrero, Oaxaca o Michoacán y es muy probable que se acierte, pues la actividad sísmica relacionada a la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa Norteamericana es más frecuente y conocida, también debido a que los sismos que ahí se generan son de mayor magnitud y por tanto muy destructivos, estos temblores se perciben como largas mecidas horizontales por lo que la gente los califica como temblores oscilatorios.

El día 3 de junio de 1932 ocurrió un sismo con magnitud de 8.2 localizado en las costas de Colima y Jalisco, a este acontecimiento le siguieron otros dos de magnitud 7.8 y 6.9 los días 18 y 22 de junio del mismo año. Estos sismos surgieron entre las placas de Rivera y Norteamérica. Este último el del 22 de junio, generó un tsunami más devastador que el del sismo principal a pesar de que la magnitud sísmica fue mucho más pequeña. A este se le ha calificado como “terremoto tsunami” (ref. 31). Otro temblor importante en esta misma región es el del 9 de octubre de 1995, de poca profundidad y de magnitud 8.0, tuvo un área de ruptura de 150 km y fue seguido por un tsunami de 5 metros de alto. Dos meses después, el 11 de diciembre se originó otro movimiento con magnitud 6.4, el mecanismo focal obtenido para ese evento fue un deslizamiento lateral, lo que sugiere que puede haber tenido lugar en el límite de Rivera y Cocos. Más recientemente, el 22 de enero de 2003 cerca de las zonas de origen de los terremotos de 1932 y 1995, ocurrió un sismo de subducción con una magnitud de 7.2, teniendo un área de ruptura de 45 km. La ocurrencia de temblores en los estados de Colima y Jalisco es frecuente, hasta la fecha no se cuenta con técnicas científicas en ninguna parte del mundo que puedan determinar cuándo o dónde ocurrirá un sismo, tampoco se puede saber qué tan grande será o qué efectos tendrá en la población.

En la parte central de la República también se generan movimientos sísmicos, aunque menos frecuentes como los que ocurren a lo largo del Eje Neovolcánico y localmente en el Valle de México, como en Acambay en el Estado de México en 1912 de magnitud 7, en esta región se localizan numerosas fallas geológicas regionales con gran actividad sísmica. El graben o fosa geotectónica de Acambay es una estructura que tiene 40 km de longitud y 15 km de ancho aproximadamente y está definida por la extensión del sistema de fallas Acambay-Tixmadejé, y la falla de Pastores *Figura 1.19*. Ya se cumplieron más de cien años de este acontecimiento y es uno de los acontecimientos más representativos de la historia sísmica. Tan representativo, que incluso sismos con las mismas características se les conoce como de tipo Acambay. Con este acontecimiento se deja el precedente de que puede haber sismos grandes en el centro del país y que pueden afectar al Valle de México de forma importante.

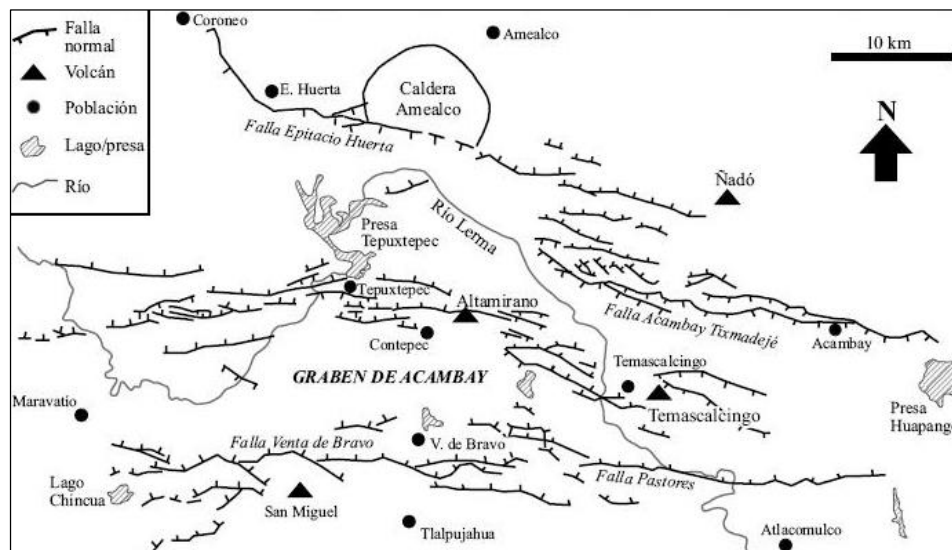
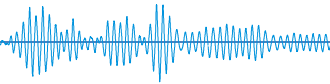


Figura 1.19 Localización de las fallas en el graben de Acambay en el Valle de México (ref. 32)



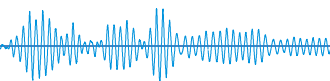
El sismo del 19 de septiembre de 1985 es uno de estos frecuentes sismos de subducción que tienen lugar en la costa, se originó en la brecha de Michoacana, en este segmento de falla activa que durante un largo lapso de tiempo no había sido objeto de un deslizamiento, y por ende, indicaba que debió existir una acumulación importante de energía y tendría que liberarse irremediablemente. En el caso de Michoacán el primer gran sismo del que tenemos noticia es un temblor de magnitud 7.9 en el año de 1911, que curiosamente ocurrió el mismo día en que Madero entraba triunfalmente a la ciudad de México.

Otro sismo de tamaño moderado cerca de Playa Azul en 1981, la magnitud del sismo fue $M = 7.3$ sin embargo no fue lo suficientemente grande para liberar la energía acumulada en la brecha desde 1911. Este acontecimiento deslizó un gran segmento de la falla de subducción de sólo 440 km de largo (ref. 33). Resultaba evidente que para liberar la energía sísmica acumulada en la brecha de Michoacán desde 1911 haría falta un sismo mucho más grande que el temblor de Playa Azul, esta zona sísmica quedaba claramente delineada por las áreas de ruptura de falla de los sismos de Colima de 1973 y de Petatlán en 1979. Este último, del 14 de marzo de 1979 en la Ciudad de México se sintió en el centro, sureste y occidente del país con una magnitud de 7.6 y 11 réplicas seguidas. A causa del movimiento quedó destruida la Universidad Iberoamericana de la capital, motivo por el cual el hecho es conocido como el Terremoto de la Ibero, además la red eléctrica se vio afectada en 20 por ciento del territorio nacional, debido al movimiento telúrico.

El temblor en la Ciudad de México del 12 de mayo de 1776 sentido fuertemente como un movimiento trepidatorio corto pero de gran intensidad, lo cual, sus características sugieren ser de fuente local. El estudio de la sismicidad de la Cuenca de México en el siglo XX se inicia con la fundación del Servicio Sismológico Nacional (SSN), estos estudios de sismicidad del valle muestran varios movimientos locales. El 28 de julio de 1957, ocurrió un sismo que tuvo su epicentro en Acapulco, en la costa del estado de Guerrero con una magnitud de 8, la zona más afectada por este terremoto fue la zona centro, en particular la Ciudad de México, debido al daño en el Ángel de la Independencia este movimiento telúrico suele ser llamado el sismo del Ángel.

Para el 9 de octubre de 1995 en Colima, Nayarit y Jalisco, ocurrió un temblor con magnitud 8. En Tepic se reportaron caídas de bardas y postes, fuertes daños en la torre derecha de la Catedral, daños en el Templo del Panteón Hidalgo, daños en el revestimiento del edificio del sindicato del ISSSTE, rompimiento de ventanas en varios edificios y agrietamientos en casas de particulares. En Colima, el colapso de construcciones, particularmente en las zonas de la playa, se cayó una parte del centro comercial Plaza Santiago en Manzanillo, y se provocó un tsunami moderado con olas que alcanzaron los cinco metros de altura que afectó alrededor de mil viviendas.

Ya para el 21 de enero del 2003, el terremoto de Colima se sintió en algunas zonas de Michoacán y Jalisco, de forma moderada en Aguascalientes, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Morelos, Puebla, Nayarit, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala, Veracruz, Zacatecas y el Distrito Federal. Según el reporte sísmico publicó que el temblor tuvo una magnitud de 7.6, lo cual 2 mil viviendas resultaron destruidas y 6 mil resultaron afectadas a consecuencia del sismo, este movimiento produjo un pequeño maremoto que pegó en las costas entre 6 y 12 minutos después del sismo.



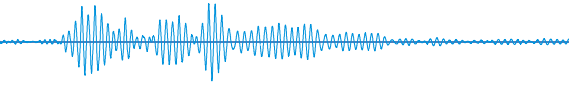
Análisis de sismos fuertes

Es evidente que México por su ubicación geográfica y geológica ha estado sujeto a lo largo de su historia a la actividad sísmica, en el caso de la actividad volcánica es menos frecuente y debemos esperar a que se presente a largo plazo. Estos fenómenos no sólo nos acechan en forma sorpresiva e impredecible, sino que también es más frecuente que ocurran en cualquier momento. A pesar del rico registro histórico de sismos sentidos en la República Mexicana, se espera que siga siendo castigada en el futuro por grandes temblores. El movimiento de placas tectónicas que los originan ha existido desde hace millones de años y seguramente continuará inevitablemente en el futuro, el desarrollo científico actual está aún lejos de poder efectuar predicciones inminentes con un alto grado de confiabilidad. Los daños sufridos en el país se dan a raíz de los sismos de gran magnitud como los del 19 y 20 de septiembre de 1985 por la gran pérdida de vidas a causa del daño de grandes estructuras, esto muestran que durante su incontrolable crecimiento la ciudad se ha hecho más vulnerable a los fenómenos sísmicos, debido al número y tipo de edificaciones construidas en los últimos treinta años. La tabla 1.4 nos da una estadística de la cantidad de sismos registrados por año y sus magnitudes.

Tabla 1.4 Estadísticas de los sismos reportados por el Servicio Sismológico Nacional de 1990 al 2012 (ref. 34)

AÑO	TOTAL DE SISMOS	SISMOS DE MAGNITUD						
		0-2.9	3 - 3.9	4 - 4.9	5 - 5.9	6 - 6.9	7 - 7.9	8 - 8.9
1990	792	13	246	509	23	1	0	0
1991	732	6	184	510	30	2	0	0
1992	613	5	183	398	27	0	0	0
1993	917	48	275	548	40	5	1	0
1994	622	20	192	383	24	3	0	0
1995	676	16	188	438	26	6	2	0
1996	790	9	203	543	32	3	0	0
1997	1019	57	388	533	34	5	2	0
1998	1023	13	453	531	21	5	0	0
1999	1097	13	540	527	11	4	2	0
2000	1052	37	463	531	18	2	1	0
2001	1344	17	704	585	32	6	0	0
2002	1688	4	879	761	40	4	0	0
2003	1324	5	729	568	18	3	1	0
2004	945	1	429	491	24	0	0	0
2005	847	1	459	373	12	2	0	0
2006	1077	0	589	464	23	1	0	0
2007	1234	0	533	670	27	4	0	0
2008	1772	4	1037	709	18	4	0	0
2009	2184	4	1552	594	31	3	0	0
2010	3425	12	2386	995	28	3	1	0
2011	4168	25	3321	788	30	4	0	0
2012	5105	24	3951	1062	55	11	2	0

Con base en un estudio realizado en el Instituto de Geofísica de la UNAM sobre los Sismos ocurridos en México durante el Siglo XX, se tuvo como resultado estadístico que cada año se registran más de 100 sismos con magnitudes mayores o iguales a 4.5, ocurren 5 sismos de magnitud mayor o igual a 6.5 cada 4 años y se espera un sismo con magnitud mayor o igual a 7.5 cada 10 años (ref. 35).



CAPÍTULO II

SISTEMAS DE MONITOREO

SÍSMICO

2. Sistemas de monitoreo sísmico

Uno de los fenómenos que mayor impacto tiene en la sociedad es el sismo, de aquí que es la implementación de sistemas que permitan medirlo y observarlo. En México el programa de instrumentación sísmico se remonta a 1910 cuando se inicia la instalación de las primeras estaciones sismológicas que posteriormente integrarían lo que hoy conocemos como Servicio Sismológico Nacional. Esta infraestructura ha permitido durante muchos años determinar la magnitud y la localización epicentral de muchos de los sismos ocurridos en territorio nacional; sin embargo, fue insuficiente para explicar, por ejemplo; el daño ocasionado en las estructuras durante la ocurrencia del sismo del 28 de Julio de 1957 conocido como el sismo de Ángel.

Debido al evento anterior se consideró necesario instalar un tipo de infraestructura complementaria a la sismología y de ahí surge el concepto de Redes Acelerográficas, las que miden el parámetro aceleración muy directamente relacionado con las fuerzas a las que son sometidas las estructuras durante la acción sísmica.

2.1 Redes sismológicas

Es una infraestructura integrada por un conjunto de estaciones que operan entre sí para el envío y almacenamiento de la información, así como para el monitoreo de la sismicidad local o regional en las zonas con mayor potencial de sismos, estas redes refuerzan e integran los sistemas actuales de observación sísmica, mediante sistemas de comunicación y estructuras de recepción de información como son las estaciones sismológicas. Una estación sismológica es una instalación donde se lleva a cabo la medición y la observación, permitiendo obtener los registros de velocidad al paso de las ondas sísmicas que se producen en el sitio donde está instalada, los elementos que integran una estación son, la caseta que resguarda el sistema de registro, un sistema de control de tiempo, los sistemas de alimentación de energía eléctrica, así como también el sistema de comunicación.

La objetivo de la caseta es resguardar los componentes que integran la estación sismológica, por consiguiente debe ser segura y de dimensiones que permitan su funcionalidad, con muros de concreto reforzado, una puerta de acero y ductos de ventilación. En su interior contiene una base de concreto con una caja metálica para la colocación de la instrumentación, repisas para la colocación de los sistemas de alimentación y comunicación. El sistema de suministro de energía es implementado por medio de celdas solares que se colocan en la azotea; estas celdas se conectan a un regulador o a una batería recargable para llevar la corriente a los aparatos de registro, también se utiliza corriente alterna comercial en el caso de que la estación este cerca a sitios con esta disponibilidad. En el sistema de control de tiempo se utiliza el sistema de posicionamiento global *GPS*, con la finalidad de conocer el desplazamiento relativo que experimentan las placas tectónicas, este sistema se compone de un equipo receptor y de una antena colocada de igual manera en la parte superior de la estación, para comunicar y recibir los datos. El sistema de comunicación se puede llevar a cabo de diferentes maneras, puede ser a base de transmisión satelital, por medio de un radio o por vía telefónica. Por último el sistema de registro está compuesto por un registrador y un sensor de velocidad, un sismógrafo.

El sismógrafo es un instrumento que sirve para registrar la amplitud de las oscilaciones del terreno en sentido vertical y horizontal producidas por un sismo, originando un registro de velocidad en función del tiempo transcurrido. En la actualidad estos instrumentos han alcanzado un alto grado de desarrollo electrónico pero el principio básico empleado no ha cambiado. El mecanismo consiste de una masa (M) suspendida de un resorte de rigidez (K) ligado a un soporte acoplado al suelo; cuando el soporte se sacude al paso de las ondas sísmicas la inercia de la masa (M) hace que ésta permanezca un instante en el mismo sitio de reposo, cuando la masa sale del reposo oscila. El movimiento posterior del péndulo no refleja el movimiento del suelo, por lo cual se ha incorporado un elemento amortiguador, que permite a la masa volver a su posición inicial. En este caso dicho elemento se representa por una lámina sumergida en aceite, proporcionando un valor (C) de amortiguamiento al sistema. En la *Figura 2.1* se muestra esquemáticamente el principio y funcionamiento de un sismógrafo para la componente transversal de las ondas sísmicas. Si se sujeta un lápiz de la masa suspendida, para que pueda inscribir sobre un papel pegado en el cilindro que gira a velocidad constante, se podrá registrar sucesivamente el movimiento del suelo. Este instrumento descrito se conoce como sismógrafo vertical y el papel donde se inscribe se llama registro o sismograma.

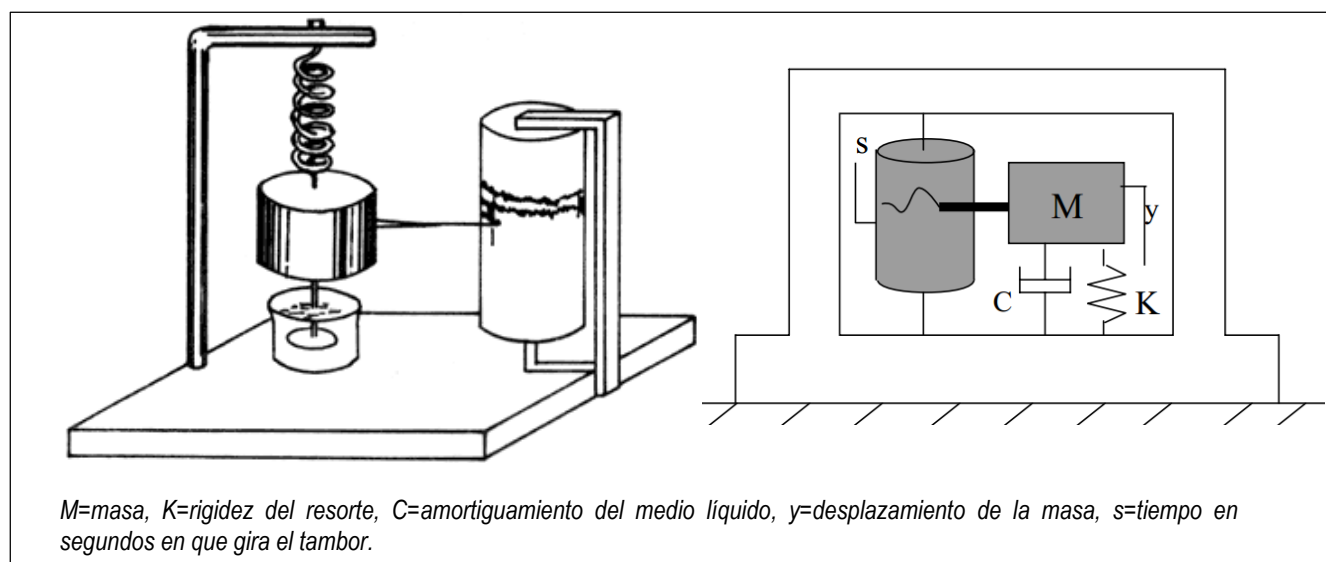


Figura 2.1 Principio del funcionamiento de un sismógrafo (ref. 36)

Los sismógrafos que se emplean actualmente tienen, en general, masas que pueden ser de unos cuantos gramos. Los sismógrafos antiguos solían tener grandes masas con el fin de vencer las fuerzas de rozamiento, tal es el caso del sismógrafo horizontal Wiechert de 17 000 kg de la Estación Sismológica de Tacubaya; el amortiguamiento es por medio de imanes, la amplificación por medio de palancas o galvanómetros y la inscripción se hace en papel ahumado o cinta magnética (ref. 37). Los sismógrafos modernos son electrónicos y de banda ancha, en vez de utilizar marcador y tambor el movimiento relativo entre la masa y la base generan un voltaje eléctrico que es registrado por una computadora. Modificando la posición del resorte, la masa y la base se registrarán movimientos en todas direcciones, estos aparatos son sumamente sensibles a los movimientos de la tierra, esta

característica los hace útiles para el monitoreo de sismos cercanos y lejanos para magnitudes grandes, cuando se acorta la distancia y el evento es fuerte el aparato no es capaz de obtener el registro completo debido a su gran sensibilidad ya que no se registraran correctamente los valores de amplitud del movimiento y serán erróneos, a este caso se le conoce como registro saturado. Es necesario conocer con detalle la magnitud que da el instrumento para calcular el movimiento real del suelo a partir de los sismogramas. Los sismómetros más avanzados son los llamados de banda ancha, ya que hacen posible obtener un registro de movimientos con un gran intervalo de frecuencias más amplio, ya que fueron diseñados para detectar un intervalo más grande de frecuencias con la misma respuesta *Figura 2.2*



Figura 2.2 Sismógrafo de Banda Ancha (ref. 38)

En México contamos con estaciones sismológicas para el análisis de los sismos alrededor de presas, puentes, edificios y en zonas con alto riesgo sísmico, en la *Figura 2.3* se muestra una estación típica con todos sus componentes para la recepción, almacenamiento y distribución de datos a las fuentes de registro.

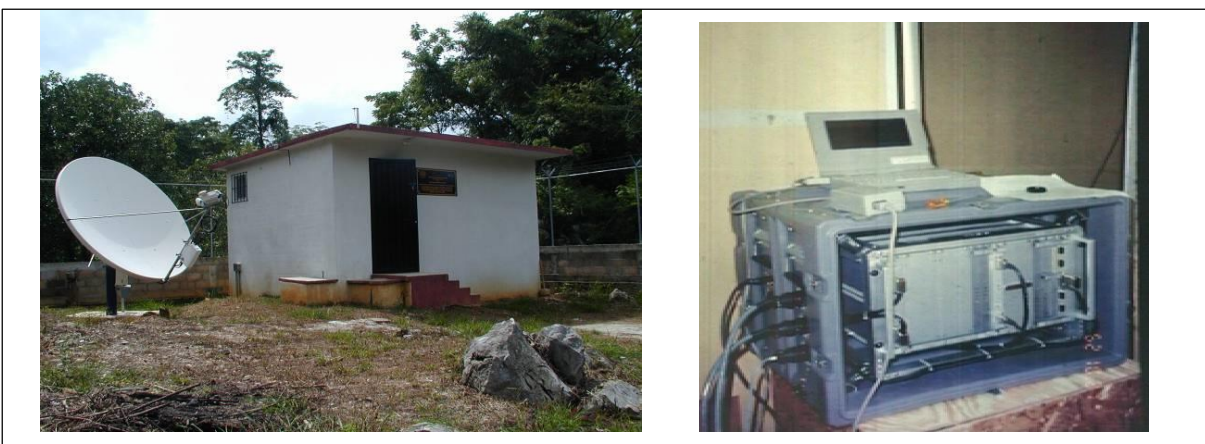


Figura 2.3 Infraestructura de una estación sismológica (ref. 39)

Otro tipo de instrumentos emparentados con los sismógrafos y que son muy utilizados en sismología e ingeniería son los acelerógrafos, instrumentos con el mismo principio pero diseñados para responder a la aceleración del terreno más que a su velocidad.

2.2 Redes acelerográficas

Una estación acelerográfica es una infraestructura de medición y observación adecuada para obtener los registros de aceleración de las ondas sísmicas, pueden estar construidas sobre roca o suelos naturales, los elementos que integran una estación son, la caseta, el sistema de registro, un sistema de control de tiempo, los sistemas de alimentación de energía eléctrica y el sistema de comunicación. A grandes rasgos la estación acelerográfica es similar a la sismológica, ya que está integrada por una caja metálica empotrada en una base de concreto armado, en el interior de ella se encuentra el acelerógrafo o registrador sísmico, cuenta con un regulador de corriente y las baterías que abastecen de energía al todo el equipo. Por otra parte una torre metálica donde se instala el sistema de posicionamiento global *GPS* y las celdas solares conectados al equipo por medio de cables que van en un ducto en el suelo hasta llegar a la estación como lo muestra la *Figura 2.4*. La estación acelerográfica también cuenta con una caseta de muros de concreto.

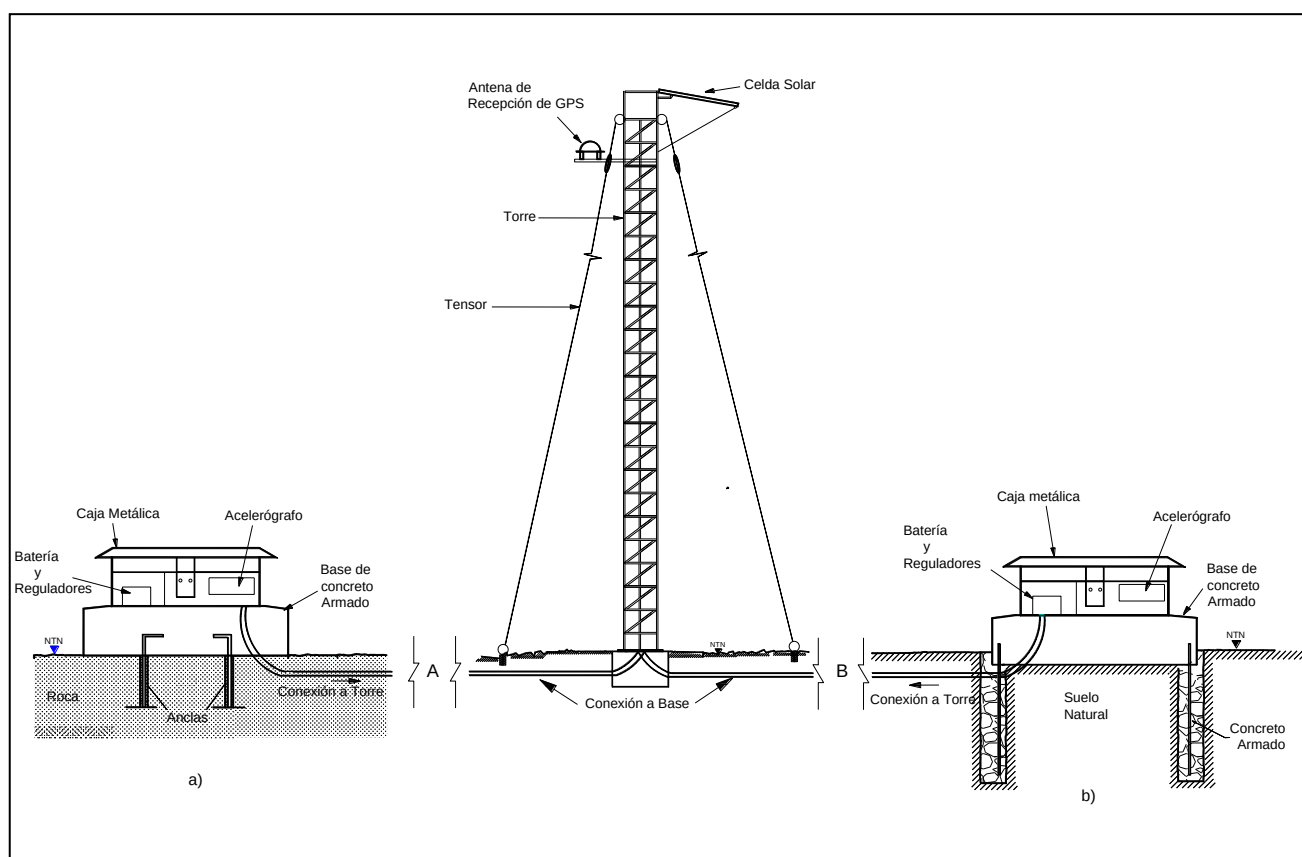


Figura 2.4 Estación Acelerográfica (ref. 40)

El Acelerógrafo es un dispositivo que mide la aceleración que actúa sobre los suelos y los edificios, funcionan con los mismos principios que un sismógrafo pero sus características dinámicas son tales, que son más sensibles a los cambios de aceleración que a los de velocidad, su relación masa/rigidez es más pequeña que la de un sismógrafo ya que la rigidez es mucho mayor para poder tener una amplificación menor y captar un registro sísmico completo en el acelerograma, su sensibilidad disminuye haciéndolo apto para registrar eventos sísmicos de mayor magnitud. Poseen dispositivos de arranque que se activan cuando el movimiento alcanza cierta magnitud, entra en operación solo cuando se sobrepasa el umbral establecido, Han evolucionado considerablemente desde los años 30, los más modernos captan la información en una memoria o en cinta magnética, esto propicia una ventaja ya que se puede procesar dicha información rápidamente con ayuda de un programa de computadora, normalmente registran los cambios de aceleración en función del tiempo en las direcciones de los tres ejes coordenados (ref. 41).

El acelerógrafo tiene una memoria de pre-evento, que es el almacenamiento disponible para guardar los valores anteriores al umbral de activación, este umbral es un valor de aceleración predeterminado, que una vez que se alcanza, permite que el equipo almacene la información. También posee una memoria de pos-evento, para el almacenamiento después de cierto tiempo que se haya dejado de cumplir con el umbral de activación para poder tener el registro completo del sismo.

Este dispositivo está comprendido por dos partes principales que son los sensores y el registrador; los primeros se componen de acelerómetros con arreglos triaxiales en forma ortogonal, el registrador tiene tres componentes, la primera de sus partes realiza la conversión analógica-digital, la segunda se encarga del control de datos y la última de su almacenamiento. Su operación consiste en convertir las señales análogas de los sensores a muestras digitales *Figura 2.5*.

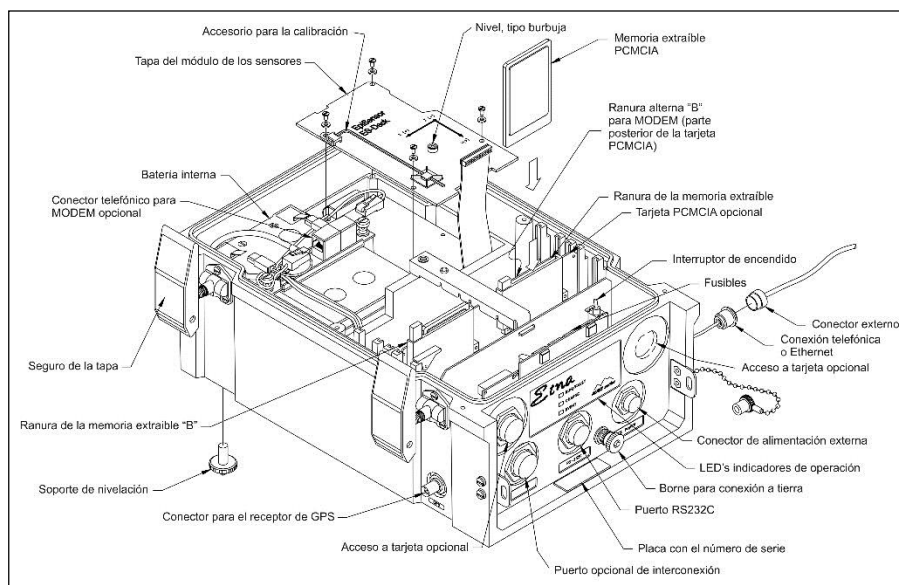


Figura 2.5 Componentes de un acelerógrafo K2 (ref. 42)

Los siguientes diagramas muestran ejemplos de los sistemas de comunicación utilizados en una Red Sísmica (Sismológica y/o Acelerográfica), las señales recibidas en el Puesto Central de Registro son enviadas vía internet o vía satélite *Figura 2.6*.

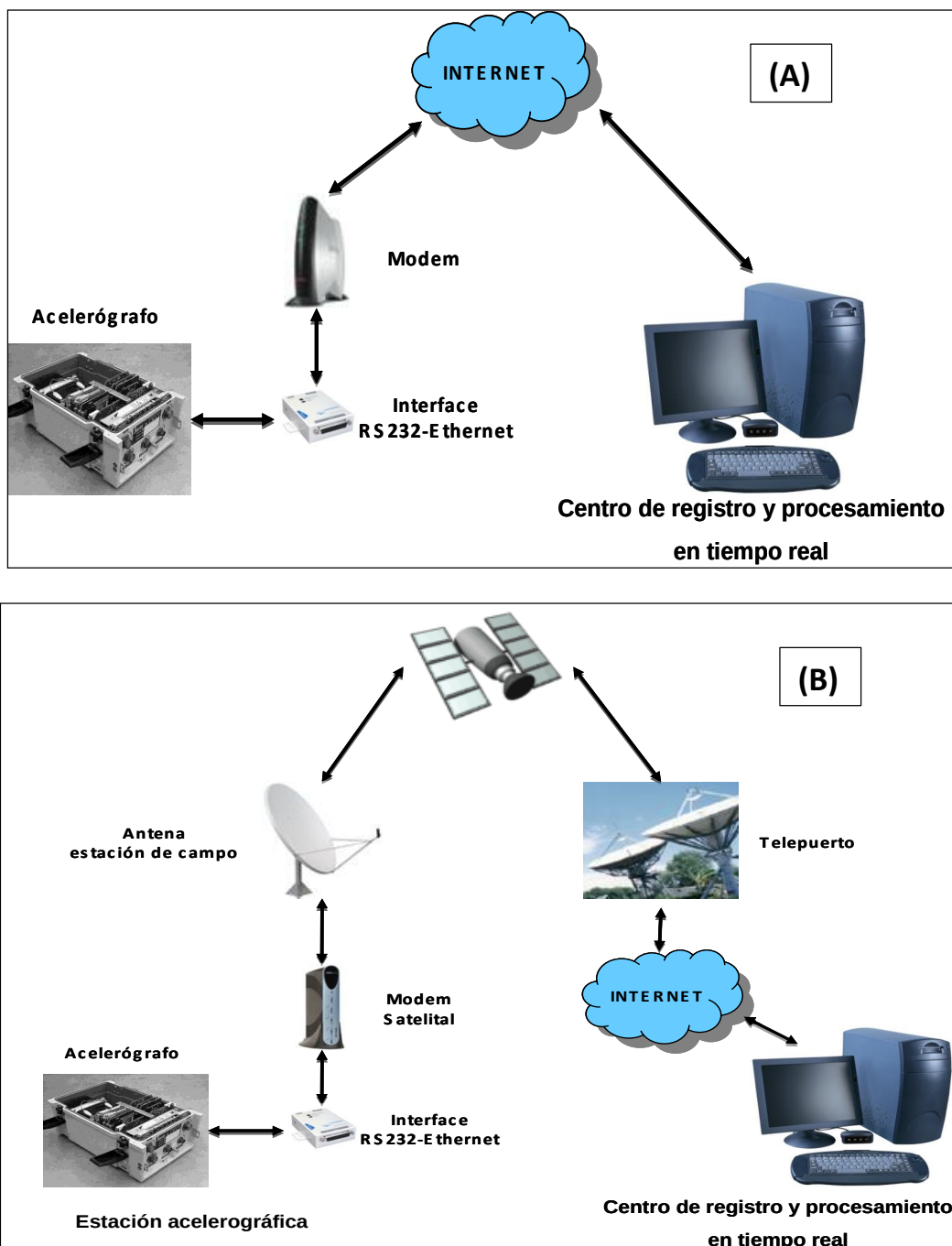


Figura 2.6 Sistema de comunicación empleada A) línea telefónica con servicio de tipo Infinitum y B) una antena satelital con servicio de Internet (ref. 43)

2.2.1. Campo libre y subsuelo

Estación de campo libre

Es de gran importancia para el estudio del comportamiento sísmico ya que permite establecer los elementos que rigen la interacción del suelo con la estructura en la medida de lo posible, esta estación se debe desplantar sobre el terreno natural del sitio, se construye una base de concreto reforzado, sobre la cual se coloca un sensor triaxial. La base queda aislada del perímetro para evitar la influencia de movimientos sobre esta ante la ocurrencia de un sismo. Este aislamiento se hace con una caja metálica ahogada en la base, también está integrada por una torre de 6 metros de altura y 30 centímetros de ancho de cara, en la torre se colocan las celdas solares y una antena receptora de señal *GPS*, las celdas solares suministran la energía necesaria para la recarga de las baterías automotrices que alimentan a cada registrador, este sistema cuenta con un regulador de corriente. Por otro lado la antena *GPS* habilita el tiempo correcto que sincroniza el reloj interno de los registradores, además proporciona la ubicación geográfica de las estaciones. Por su parte, la caja metálica resguarda al registrador, batería, regulador de voltaje y en general al cableado propio de la instrumentación *Figura 2.7*.



Figura 2.7 Estación de campo libre (ref. 44)

En la parte superior de la tapa se coloca la placa de control térmico, cubre la caja para evitar la radiación directa del sol durante el día, lo que permite controlar la variación de la temperatura en el interior, en general las actividades que se realizan para la integración de una estación son: la limpieza del lugar y sus alrededores, se localiza el norte magnético, se hace el trazo para la construcción de la base, la perforación sobre la roca o excavación perimetral en la masa de suelo para el anclaje de la base de concreto, se colocan las anclas o la malla perimetral y se procede al

anclaje de la base de torre, en la *Figura 2.8* se muestra el detalle de la instalación de la estación tanto en roca (*esquema A*), como el suelo natural (*esquema B*).

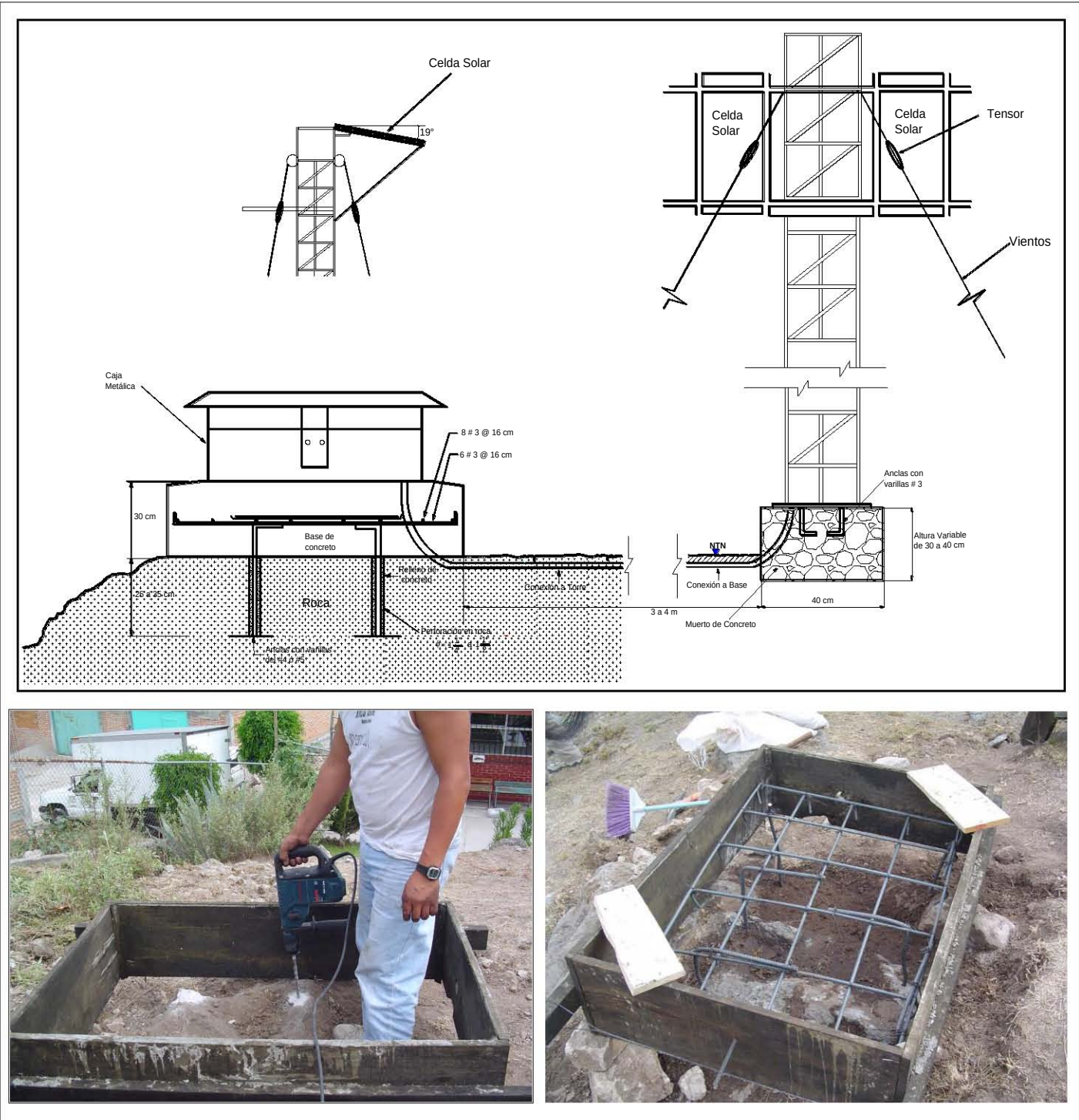


Figura 2.8-A Estación de campo libre instalación sobre roca (ref. 45)

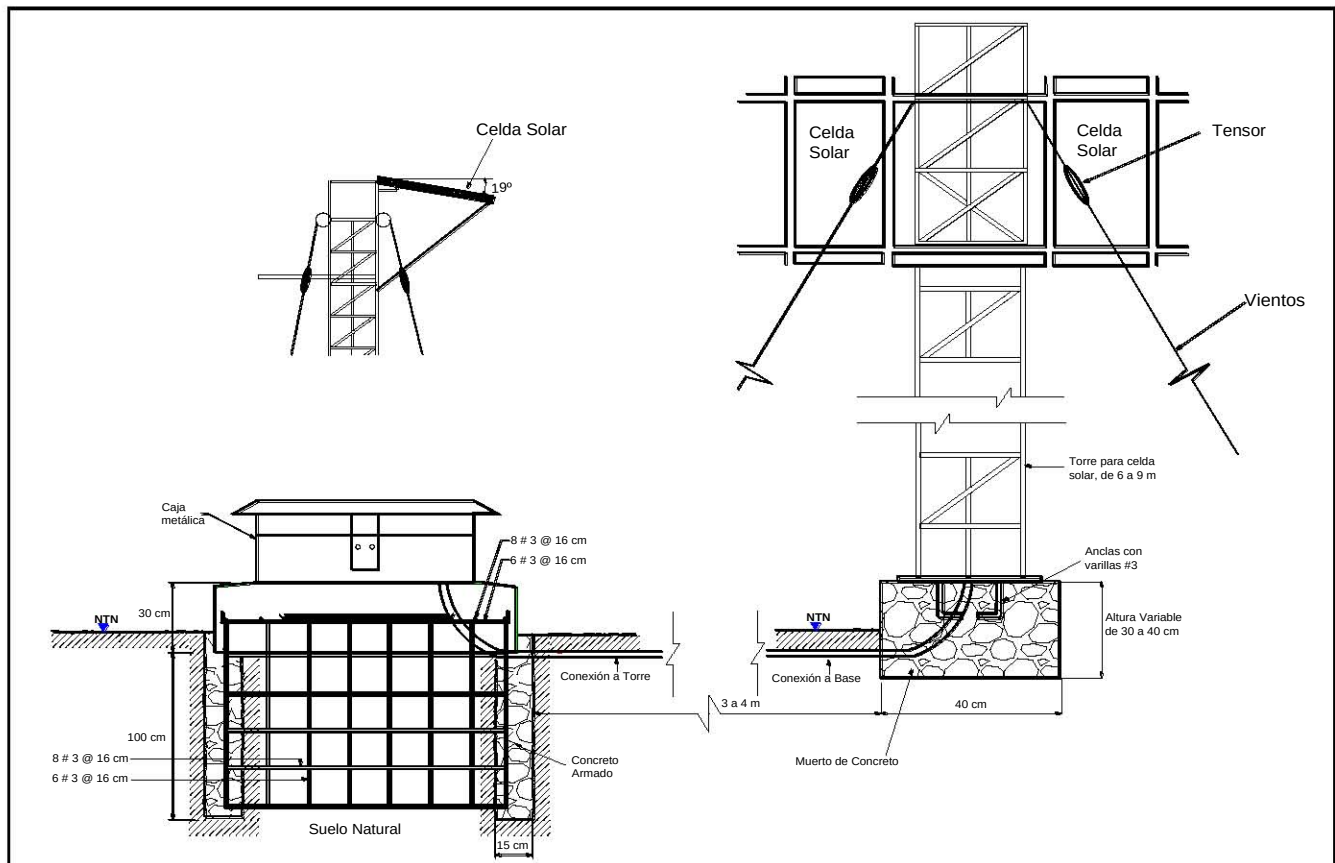


Figura 2.8-B Estación de campo libre instalación sobre suelo natural (ref. 46)

Sensores en el Subsuelo

La colocación de un sensor en el subsuelo obedece a la necesidad de conocer los niveles de amplificación de la señal sísmica al pasar por los diferentes estratos. Aunado a la instrumentación en la estructura y campo libre, la estación de pozo o de subsuelo aporta datos valiosos para los estudios de cómo se propaga la onda sísmica en el suelo y como puede llegar a afectar a las estructuras. La colocación de los sensores se realizan por lo regular junto a la estación de campo libre, ya que esto permite evaluar los niveles de aceleración directamente en la superficie y en un punto exactamente debajo de este (ref. 47). Para estudiar el comportamiento dinámico del evento sísmico, se colocan sensores a diferentes profundidades y en un sitio del terreno natural apartado de las estructuras, para conocer las variaciones que el movimiento sufre al filtrarse la señal sísmica en los diferentes estratos hasta que llega a la superficie. En la perforación de suelo, el tubo guía cuenta con cuatro ranuras a lo largo del mismo, especialmente para guiar la bajada del sensor y reduciendo la posibilidad de una desviación en espiral, que introduciría un error en las direcciones de medición, para tal fin es importante que durante la colocación se orienten esas cuatro ranuras hacia los cuatro puntos cardinales a manera de dejarlos fijos como referencia *Figura 2.9*.



Figura 2.9 Colocación de sensores de pozo (ref. 48)

2.2.2. Estructuras

Con el fin de determinar el comportamiento sísmico o dinámico de estructuras es posible colocar diversos tipos de sensores que dependiendo de la magnitud física que se pretenda registrar, se puede medir aceleración y/o velocidad, generalmente la aceleración es la magnitud que más suele utilizarse para determinar comportamiento sísmico o dinámico.

Un sistema de registro está formado por acelerógrafos que se colocan en diversos puntos del sitio en medición, los cuales envían información a un registro central, de forma análoga o digital dependiendo de la forma de almacenamiento de la unidad, con el fin es estudiar el comportamiento de estructuras durante eventos sísmicos. La información que se obtiene de los registros de aceleraciones es importante para el diseño de estructuras más seguras, la verificación de criterios de diseño empleados durante el proyecto, así como la verificación experimental del funcionamiento de aislación sísmica y el desarrollo de normativas para el diseño sísmico.

Edificios

Para la evaluación de los daños producidos por sismos intensos, se procede a la colocación de sensores para obtener una respuesta estructural, se han generado especulaciones en varios aspectos del comportamiento que pueda tener el edificio, así como los sistemas y técnicas de rehabilitación que deben aplicarse a las edificaciones dañadas. Esto indica que hay necesidad de contar con datos experimentales para explicar tales controversias, es necesario instrumentar estructuras típicas debido a sus características estructurales y a las características de los suelos en donde están desplantadas, con la finalidad de mejorar los criterios de diseño y evaluación estructural de las excitaciones a las que estará sometida y por lo tanto de su respuesta dinámica.

Con la instrumentación sísmica de estructuras podemos disponer de información que permita esclarecer aspectos relacionados con su respuesta sísmica, sobre todo ante sismos de gran magnitud. Tales esfuerzos se concretaban únicamente para el caso de las grandes presas, pero no para los edificios, es hasta 1987 cuando se consigue iniciar formalmente en México estos estudios experimentales y dos años más tarde inicia su operación la primera red sísmica en un edificio de concreto reforzado (ref. 49). La ubicación de un acelerógrafo sobre un edificio tiene sus implicaciones especiales, ya que al no ser de campo libre presenta efectos en la señal, lo cual es necesario tener en cuenta cuando se analicen estos datos, la localización del equipo seleccionando debe ser en el lugar más indicado para colocar el acelerógrafo para que quede anclado a la estructura, ya sea en el centro o en uno de sus extremos. Todo depende del criterio para el cual fue instalado, el sitio debe estar libre de tránsito, así como de vibraciones inducidas por maquinarias, equipos como plantas eléctricas, bombas de agua, tuberías de presión y ascensores, ya que estos ruidos pueden en algún momento exceder el nivel de disparo del equipo y producir un evento no sísmico, la suma de estos eventos no sísmicos pueden llenar la memoria del equipo y afectar su funcionamiento cuando ocurra un sismo. La importancia del sitio destinado, radica principalmente en que debe resistir y preservar su integridad física después de estar sometido a un sismo intenso, además la funcionalidad de esta debe preservarse.

La Catedral Metropolitana es un monumento colonial histórico, el cual ha sufrido los hundimientos diferenciales de la Ciudad de México, esta edificación presentaba un desnivel de 2.4 m con respecto a su nivel inicial, se instrumentó en 1997 para conocer su comportamiento durante el proceso de nivelación, así como para registrar la ocurrencia de temblores; a la fecha se han registrado del orden de 16 sismos y la información que han arrojado ha servido para la toma de decisiones correctivas, que han llevado al monumento a condiciones de seguridad aceptables al disminuir el desnivel a 1 m. La red acelerográfica está integrada por 6 acelerógrafos triaxiales, 5 colocados en su estructura y uno de referencia fuera de la misma *Figura 2.10*.

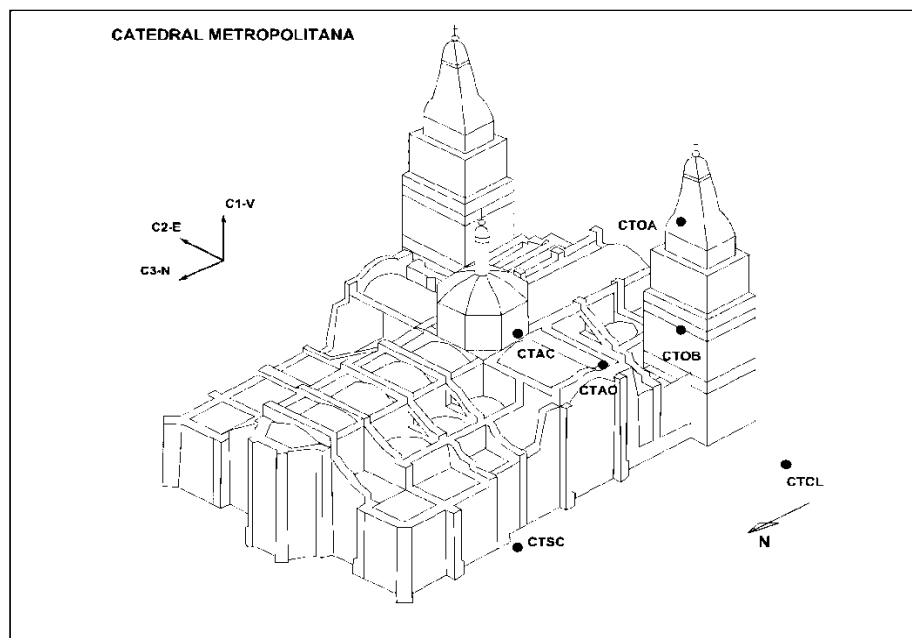


Figura 2.10 Instrumentación Acelerográfica de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México (ref. 50)

Presas

Las catástrofes y diversos incidentes generados con la falla de presas, con pérdidas de vidas y bienes así como con importantes daños al medio ambiente, han demostrado claramente la necesidad de disponer y aplicar adecuadas prácticas de seguridad implementadas en normativas de seguridad sísmica. Las presas constituyen estructuras especiales, cada una dispone de características particulares en cuanto a su geometría, geología, materiales constructivos, etc., que no permiten utilizar tipos de diseño unificados, cada presa debe ser tratada individualmente considerando todos los factores intervinientes, en la *Figura 2.11* se muestra el esquema de la instrumentación de la presa La Villita que está localizada sobre el río Balsas en el límite de los estados de Guerrero y Michoacán, construida entre los años 1965 y 1967, la presa es de materiales

graduados con núcleo arcilloso de alta plasticidad. La instrumentación establecida en la presa es a base de acelerógrafos instalados en su mayoría en varios puntos de toda la estructura de la cortina, así como en puntos específicos donde se pueden obtener registros ante el fenómeno sísmico.

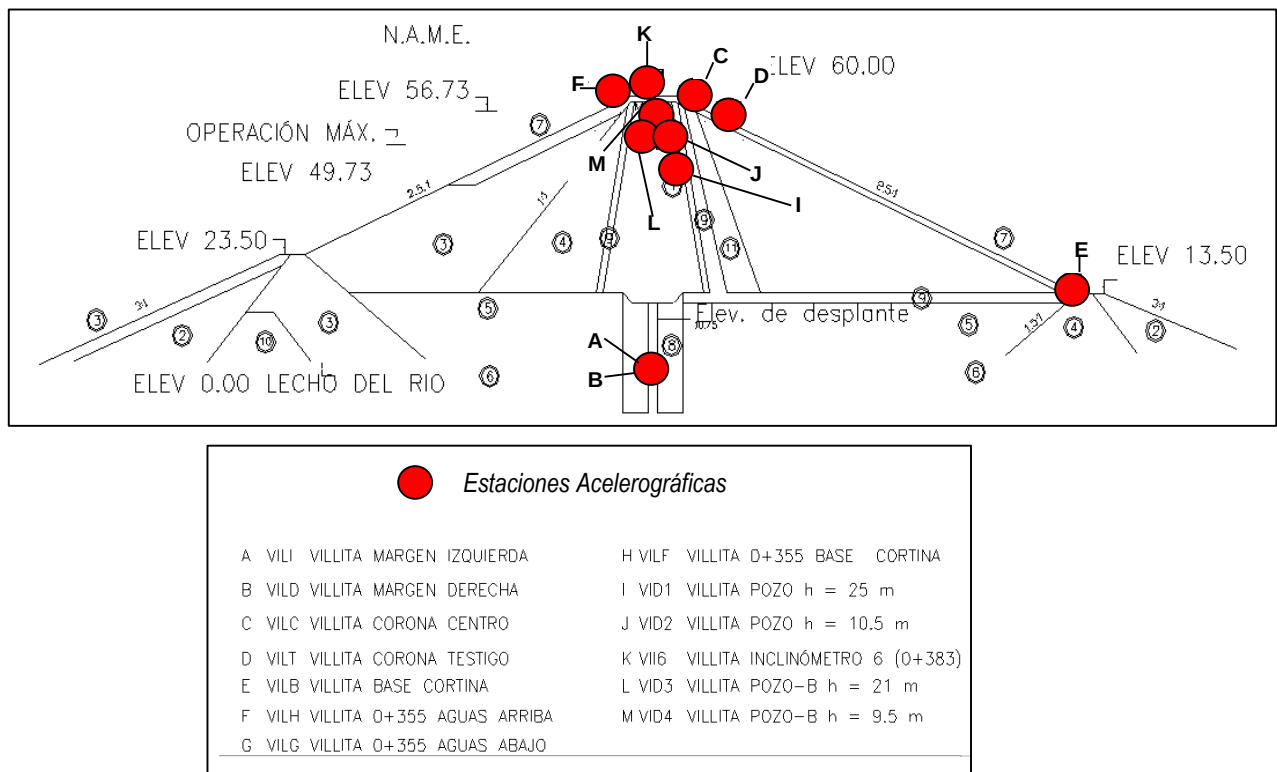
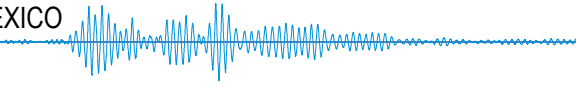


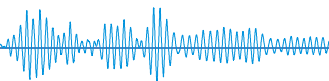
Figura 2.11 Instrumentación de la presa La Villita (ref. 51)



CAPÍTULO III

INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

EN MÉXICO



3. Instrumentación sísmica en México

La participación de México en el desarrollo de la sismología moderna se inició propiamente el 1 de Abril de 1904. En esta fecha se reunieron en Estrasburgo dieciocho países, entre ellos México, con el fin de formar la Asociación Sismológica Internacional. Los países firmantes de la Asociación se comprometían a instalar en su territorio nacional una red de instrumentos sismológicos que permitiría mejorar notablemente las localizaciones epicentrales e iniciar el estudio metódico de los sismos utilizando instrumentos modernos distribuidos en todo el mundo, desde entonces nuestro país comprendió con mayor amplitud en fenómeno sísmico, con la ayuda de la instalación y creación de instituciones dedicadas al registro de los temblores.

3.1. Antecedentes

El desarrollo de una cultura sísmica siempre ha sido, es y será imprescindible, en el caso de México los sismos han marcado la ruta del inicio de la instrumentación sísmica. Para cumplir con los compromisos adquiridos en la reunión de Estrasburgo, el gobierno mexicano decretó la fundación del Servicio Sismológico Nacional (SSN) el 5 de septiembre de 1910, en ese momento el SSN quedó bajo el cargo del Instituto Geológico Nacional dependiente de la Secretaría de Minería y Fomento. Entre 1910 y 1923 se instalaron 9 estaciones sismológicas mecánicas autónomas en las ciudades de Oaxaca, Mérida, Chihuahua, Veracruz, Guadalajara, Monterrey y Zacatecas, la central fue instalada en Tacubaya *Figura 3.1*, se eligieron sismógrafos Wiechert de fabricación alemana, siete de estos todavía operan en la actualidad y constituyen probablemente el sistema más antiguo de América, que ha operado por mayor tiempo en forma continua y que aún están en fructífera y continua operación. Los primeros estudios que se realizaron usando los datos generados por la red sismológica sirvieron para la elaboración de la primera carta sísmica de la República Mexicana (ref. 52). El SSN pasó a ser parte de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM en 1929 y desde 1948 quedó adscrito al Instituto de Geofísica de la UNAM, en sus inicios el SSN contó con los instrumentos más moderno de la época, fue hasta los años sesenta que se comienza la instalación de sismógrafos electromagnéticos, llegando a tener aproximadamente 20 instrumentos autónomos, con grabación de las señales sísmicas en papel ahumado y fotográfico.

Desde entonces ha operado ininterrumpidamente, con el objetivo principal de proporcionar información oportuna sobre la ocurrencia de sismos en el territorio nacional y la determinación de algunos de sus principales parámetros como son la magnitud y el epicentro. Actualmente, también coadyuva con actividades que permitan mejorar nuestra capacidad para evaluar y prevenir el riesgo sísmico y volcánico.



Figura 3.1 Sismógrafo horizontal Wiechert de 17,000 kilos 1910 (ref. 53)

Posteriormente en 1957 en San Marcos ocurrió un sismo de magnitud 7.5 que derribó el Ángel de la Independencia, de ahí se llegaron a muchas conjeturas para reconocer la necesidad de medir y tener más información sobre temblores fuertes, esta información se debe obtener desde el origen del movimiento en la falla, así como su llegada a la superficie y su efecto en la población, estudiando sus efectos en el suelo y especialmente en estructuras vulnerables a daños que les pueda ocasionar este fenómeno. Ya se contaba con la instrumentación de la red del SSN, que sólo eran sismógrafos y siempre se saturaba su capacidad de registro durante los eventos de mediana a gran magnitud, la información era poco adecuada porque no se tenían los datos completos de las amplitudes de onda, por estas razones se instalaron los primeros instrumentos de registro de movimientos fuertes conocidos como acelerógrafos.

Estos equipos fueron instalados principalmente en el parque de la Alameda Central, en Ciudad Universitaria y en el edificio de la Torre Latinoamericana. Estos aparatos registraron los sismos de Acapulco en 1962, la Figura 3.2 muestra el acelerograma obtenido en la Alameda Central durante el sismo cuya aceleración máxima registrada fue de 49 cm/s^2 (ref. 54).

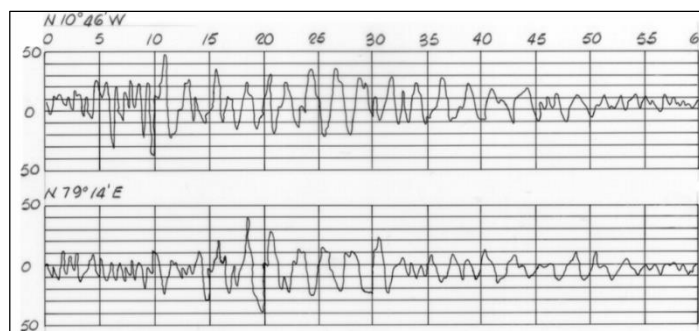


Figura 3.2 Registro del sismo del 11 de mayo de 1962, en la Alameda Central de la ciudad de México (ref. 55)

Con la gran cantidad de datos obtenidos hubo motivación para la instalación aislada de más equipos en la ciudad de México y en otros estados, pero en donde se le dió más importancia fue a la instrumentación de las obras hidroeléctricas que estaban en construcción, por lo que el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) y de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se dieron a la tarea de implementar y operar las redes acelerográficas en esas grandes obras, ejemplos importantes son las presas La Villita, El Infiernillo, El Caracol, La Angostura, Chicoasén y Peñitas.

El II-UNAM en 1973 instala el Sistema de Información Sismo Telemétrica de México (SISMEX), el cual fue un proyecto de registro en tiempo real sobre la actividad sísmica en el valle de México y estados aledaños, el sistema ha operado de manera ininterrumpida y es de gran importancia para la detección y localización de temblores, así como también para la realización de diversos estudios sismológicos, la red estuvo integrada por 9 estaciones remotas que contaban con sismómetros verticales de alta ganancia y cuya señal es enviada mediante un sistema de radio a un puesto central de registro ubicado en la ciudad universitaria, en la *Figura 3.3* se presenta la configuración de la red y su sistema de enlace.

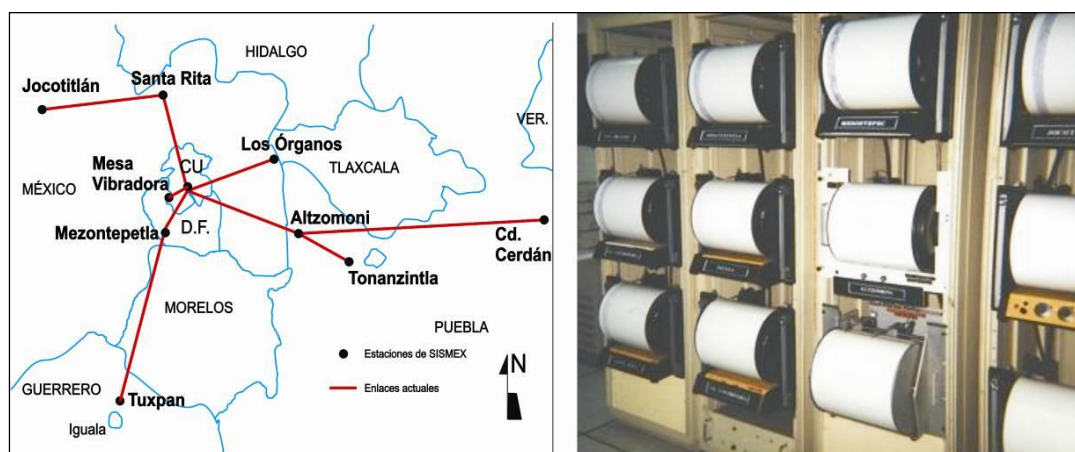


Figura 3.3 Localización de la red SISMEX y puesto central de registro (ref. 56)

No es hasta 1978, cuando se establece el potencial sísmico de la brecha de Guerrero, ya que se originaron grandes sismos como: en 1899 ($M=7.9$), 1907 ($M=7.6$), 1908 ($M=7.5$ y 7.0), 1909 ($M=7.2$) y 1911 ($M=7.5$); desde entonces no han ocurrido temblores importantes en esa zona. En la porción sureste de esta brecha desde Acapulco hasta los límites con Oaxaca, no se han verificado eventos de importancia después de los terremotos de: 1957 ($M=7.8$), 1962 ($M=7.2$ y 7.1) y 1989 ($M=6.9$); de acuerdo con el tamaño de la brecha, la magnitud del sismo que se llegaría a presentar puede ser superior a una magnitud de 8, existe la posibilidad de que no ocurra un solo sismo grande, si no que sucedan varios de menor magnitud en un periodo relativamente corto. Es necesario aclarar que no se puede precisar una fecha de ocurrencia del sismo, solamente se definen zonas con mayor probabilidad de ocurrencia por lo que se decide ubicar un arreglo de instrumentos sísmicos en dicho estado. El progreso de la instrumentación sísmica en México está sujeta a la evolución de la tecnología de los acelerógrafos, ya que con anterioridad se utilizaban equipos analógicos, cuyos

medios de registro eran el papel y la película fotográfica, en los setentas aparecieron los instrumentos digitales *Figura 3.4*, dotados con sistemas de registro en cinta magnética, después surgen los primeros dispositivos con almacenamiento en módulos de memoria *RAM* sustituyendo a las cintas en casete.

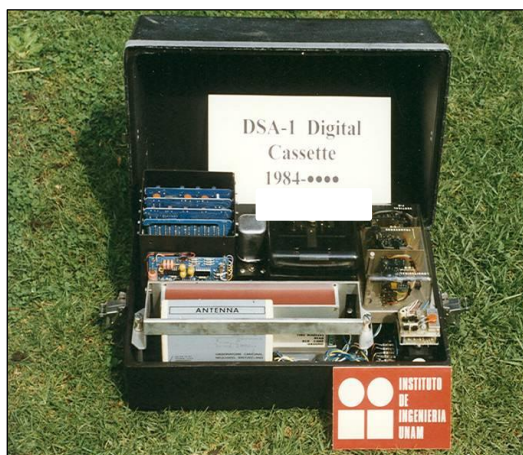


Figura 3.4 Tipos de acelerógrafos analógicos y digitales (ref. 57)

Estas adaptaciones a los modelos anteriores siguieron presentando deficiencias con relación a la velocidad que se obtiene en los registros, por el limitado intervalo de pre y pos evento. Es hasta mucho después, hasta los años ochenta cuando surge la era del registro sísmico digital de alta resolución por la comercialización de equipos con una metodología y plataforma tecnológica diferente, los cuales están conformados por sistemas de almacenamiento en tarjetas tipo *flash*, intervalos de pre y pos evento variables, velocidad de muestreo ajustable, sistemas de activación con diferentes criterios, referencia de tiempo tipo *GPS* y con opciones de monitoreo remoto para el control y transferencia de información. Poco después surgen los registradores de más de 3 canales, creando el concepto de los sistemas centralizados de registro los cuales tienen gran aceptación en la instrumentación de estructuras.

En la actualidad estos instrumentos de registro ofrecen gran utilidad, economía y versatilidad, ya que permiten hacer con mayor facilidad las diferentes configuraciones técnicas para establecer las interconexiones entre los sensores y determinar las características de operación del registrador asociado, cuando el avance tecnológico de la instrumentación sísmica ha permitido cada vez tener más y mejores datos, nos permite entender que la instrumentación depende del tipo de proyecto en cuestión y de lo que se pretenda medir, ya que la decisión que se tome no podrá ser a la ligera, dado que la oferta comercial no puede satisfacer la necesidad de un proyecto en particular. En 1985, la UNAM y la Universidad de Nevada-Reno instaló 20 estaciones acelerográficas en la región de Guerrero, resultó totalmente virtuoso ya que permitió registrar los sismos del 19 y 21 de Septiembre de 1985 con magnitudes $M = 8.1$ y 7.6 respectivamente, para obtener una colección de registros en zonas próximas al epicentro como en otras más alejadas, la ocurrencia de estos sismos y los graves daños que se han surgido en el país generan una perspectiva sobre la importancia de tener una

adecuada instrumentación para el registro de movimientos fuertes. A pesar de todos estos avances recientes, es evidente que el número de estaciones sísmicas en México es aún insuficiente para un país que tiene una gran actividad sísmica. La red acelerográfica creció pero no tanto como se requería, no existían tantos instrumentos para el registro sísmico y la cobertura en el territorio era muy escasa, de tal manera que cuando ocurrieron los macrosismos de 1985 sólo se encontraban operando 20 acelerógrafos en el estado Guerrero y 9 en la ciudad de México, instalados al nivel del suelo y con la finalidad de cubrir toda la región de la brecha de Guerrero.

Con la instrumentación de ese momento se registró por primera vez un sismo de gran magnitud en una región muy cercana al epicentro y en la ciudad de México a 400 Km de distancia, de tal forma que las ondas sísmicas fueron fuertemente amplificadas por los depósitos de suelo, causando un gran número de daños a la infraestructura, no se supo cómo fue la interacción del sismo con la estructura ya dañada, porque para entonces en la ciudad no se contaba con alguna estructura instrumentada. En la *Figura 3.5* se muestran los acelerogramas obtenidos durante el sismo del 19 de Septiembre de 1985 en la Red de Guerrero y en la inicial red de la ciudad de México. En Guerrero los acelerogramas obtenidos se localizan a unos kilómetros del epicentro en las estaciones Caleta de Campos y La Villita, que presentan aceleraciones máximas del orden de 160 cm/s^2 . En el caso de la ciudad de México se alcanzó un valor pico de 168 cm/s^2 en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, ubicada en suelo muy compresible en donde se presentaron los mayores daños, en el caso de terreno firme pero no de roca se obtuvieron aceleraciones de 35 cm/s^2 en la estación de Ciudad Universitaria (ref. 58).

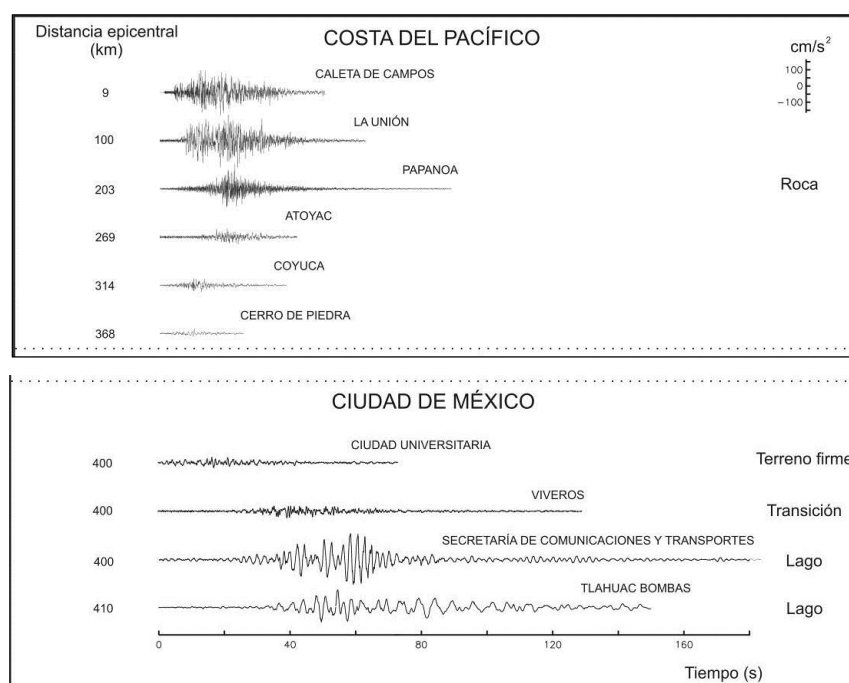


Figura 3.5 Acelerogramas obtenidos durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la red de Guerrero y en la red de la ciudad de México (ref. 59)

Debido a la poca extensión de instrumentación sísmica, el II-UNAM se expandió por la costa hacia Oaxaca y Chiapas, teniendo líneas de atenuación como la que va de Acapulco y Puerto Ángel hacia la ciudad de México. El número de estaciones de campo libre sobre la costa y las líneas de atenuación pasaron de las 20 que había durante el sismo de 1985 a 70 que existen actualmente. También se han instrumentado las ciudades de Puebla, Oaxaca, la red del Valle de México ha experimentado un crecimiento importante ya que cuenta con unas 200 estaciones acelerográficas de campo libre y algunas en pozo profundo, la mayoría de ellas son operadas por el CIRES, en la *Figura 3.6* se muestra la distribución de la red en la zona del valle de México.

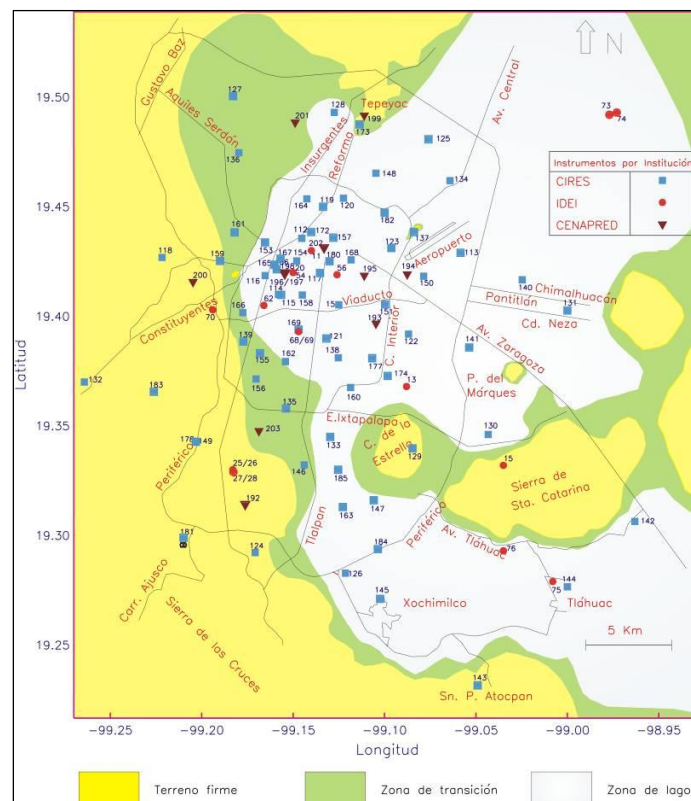
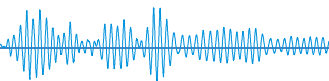


Figura 3.6 Estaciones acelerográficas en el Valle de México (ref. 60)

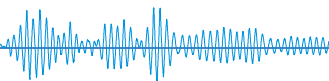


El CIRES fue fundado en 1986 para promover la investigación y desarrollo de tecnología aplicada a la instrumentación sísmica, como medio útil para mitigar posibles desastres sísmicos, como los que sufrió la Ciudad de México en 1985. Las autoridades del Gobierno del Distrito Federal han patrocinado en el diseño y desarrollo de la actual Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM). Esto ha permitido obtener información para comprender y adecuar eventualmente los factores de diseño sísmico del Reglamento de Construcción del DF y para señalar el efecto que causan los sismos fuertes que ocurren eventualmente en la costa de Guerrero, en Diciembre de 1989, el CIRES desarrolló el Sistema de Alerta Sísmica (SAS) que se basa principalmente en el hecho de que los sismos que más afectan a la ciudad ocurren a gran distancia de la misma, por lo que las ondas que producen la vibración del terreno y los daños, tardan cerca de un minuto en llegar a la ciudad, lo que permite instalar una red de instrumentos a lo largo de la costa que detecte el sismo en el momento en que ocurre y envíe una señal de radio a una estación de control en la ciudad de México, esta red puede disparar una señal de alerta con cerca de 50 segundos de anticipación antes de que lleguen las ondas sísmicas. El sistema ha sido utilizado en planteles escolares y en algunos edificios públicos donde se espera que la población desaloje rápida y ordenadamente los edificios y se reúna en las zonas de seguridad al escuchar la señal de alarma.

En Oaxaca después de los sismos de 1999 que afectaron a esa entidad el CIRES desarrolló en el 2000 el Sistema de Alerta Sísmica de Oaxaca (SASO), puesto en operación en el 2003 con el patrocinio del Gobierno de ese estado. Se han integrado los sistemas SAS y SASO para constituir en su primera etapa el llamado Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX) (ref. 61), adicionalmente se inició el proyecto de ampliación de la cobertura ante el peligro sísmico, abarcando las costas de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, y el estado de Puebla para hacer más eficaz los avisos de Alerta Sísmica en la Ciudad de México ante la eventual ocurrencia de sismos que pudieran generar daño.

3.2. Cobertura Instrumental

La instrumentación ha jugado un papel muy importante en el desarrollo de la ingeniería sísmica en México, actualmente cuenta con una significativa infraestructura de estaciones y sistemas de observación de sismos fuertes, siendo en su mayoría digitales, esta red se distribuye en las principales zonas sísmicas del país, gracias a esto se ha conseguido producir un extenso catálogo de información sísmica, esta información ha sido publicada por distintas instituciones para ponerla a disposición y la puedan utilizar según sea el caso. Al integrar toda esta información en una sola base de datos, poniendo en marcha la instalación y operación de la infraestructura de medición y registro, se podrá aprovechar grandiosamente la gran cantidad de información que será relevante para la investigación, ya que se harán estudios estadísticos o investigaciones sobre el comportamiento y modelado de superestructuras como las del valle de México (ref. 62).



3.2.1. Base Mexicana de Sismos Fuertes

Existe una base de datos de acelerogramas producidos por las estaciones sismológicas y acelerográficas, instrumentos instalados en pozo profundo, campo libre y estructuras, esta información permanecía en condiciones tales, que resultaba difícil condensar toda aquella información asociada a un determinado evento sísmico, por tales razones surgió el grupo de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF), el cual quedó integrado por el II-UNAM, el IG-UNAM, la Gerencia de Ingeniería Experimental y Control de la CFE (GIEC-CFE), CICESE, CIRES, RIIS y la Fundación ICA. Debido a la amplitud de la red de observación, la cantidad y tipos de instrumentos de registro, el enorme acervo de datos sísmicos recopilados, fue necesario integrarlos para facilitar su captura, almacenamiento, procesamiento y distribución para visualizar en forma objetiva y clara la infraestructura existente. La evolución de las técnicas e instrumentos de medición provocaron que a lo largo de los años estas redes crecieran con muchos tipos de acelerógrafos y medios de grabación, que por consiguiente produjeron los datos en una amplia gama de formatos, lo cual dificultó su intercambio y procesamiento, la mayor parte de esta cantidad de información solo ha sido publicada parcialmente por las instituciones de investigación que operan las redes. Con el objetivo de organizar y repartir toda esta información sobre instrumentación y registros de movimientos fuertes disponibles en México, en 1992 varias instituciones que operan redes de acelerógrafos y procesan datos, establecieron un acuerdo para comenzar de manera coordinada una estructura general de la BMSF y está constituida por cuatro bases o bancos de datos.

- 1) Información sobre las redes, (estaciones e instrumentación).
- 2) Datos sobre los sismos registrados.
- 3) Información sobre los acelerogramas.
- 4) Acelerogramas reprocesados y convertidos a un formato estándar.

El primer banco de datos es esencialmente un inventario de la instrumentación de movimientos fuertes disponible en el país, contiene información detallada de estaciones acelerográficas hasta ahora operadas, datos sobre la institución y personal responsable a cargo del funcionamiento de los acelerógrafos. El banco de datos 2 se creó para manejar la información de 2,062 sismos capturados, para cada uno se tienen los siguientes datos: código del evento, fecha y hora de ocurrencia, localización epicentral, profundidad, magnitud y la fuente que los proporcionó. De una manera similar, el tercer banco de datos está relacionado con los movimientos fuertes hasta ahora producidos, más de 13,835 acelerogramas han sido analizados y cuidadosamente catalogados junto con datos del movimiento e instrumento que produjo cada registro. Para cada acelerograma se tiene la información siguiente: institución, código y nombre de la estación, código de identificación, fecha y hora de inicio, exactitud del tiempo, duración, aceleración máxima de cada componente, tipo y número de serie del instrumento y comentarios sobre su calidad y disponibilidad. El banco de datos 4 constituye la parte principal del sistema, contiene archivos originales de aceleración, convirtiéndolos a un formato de archivos estándar. Esta plataforma homogénea se diseñó para facilitar la diseminación y procesamiento de la información, cada archivo con este formato contiene datos detallados sobre el instrumento de grabación, estación, institución, tiempo, datos epicentrales del sismo, datos sobre el registro mismo y finalmente, los datos numéricos con posibilidad de hasta 12 componentes de aceleración (ref. 63).

3.2.2. Descripción de la Instrumentación existente

Servicio Sismológico Nacional SSN

El SSN dependiente del IG-UNAM, para cumplir con su misión cuenta en la actualidad con 98 estaciones desplegadas en todo el país, divididas en cuatro sub-redes las cuales son:

- *Red Nacional de Observatorios Sismológicos de Banda Ancha RNOS*

Está integrada por 54 estaciones como se muestra en la *figura 3.7¹*, la mayor parte de los observatorios están equipados con un digitalizador *Quanterra* 24 bits, un sensor de velocidad STS-2 y un acelerómetro FBA-23, en 39 estaciones de esta red se utilizan sistemas de comunicación satelital para la transmisión de datos en tiempo real y en las estaciones restantes se emplean sistemas de comunicación basados en radios de espectro disperso, líneas de comunicación telefónica y comunicación vía internet, en algunas estaciones se usan sistemas híbridos basados en la combinación de algunos de los medios de comunicación ya mencionados.



Figura 3.7 Distribución de estaciones de la Red Nacional de Banda Ancha (ref. 64)

1. A partir de la Figura 3.7 a la Figura 3.24 del capítulo 3.2.2, todas las imágenes serán de la referencia: Informe elaborado para la Secretaría de Gobernación bajo el convenio específico de colaboración para la construcción de la Plataforma de funcionamiento de la Red Sísmica Mexicana "RSM" segunda fase, celebrado entre las Secretaría de Gobernación y la UNAM, Diagnóstico de toda la infraestructura sísmica del país que permita hacer un planteamiento de las necesidades de ampliación, modernización, reforzamiento e integración y concentración de información en tiempo real, Diagnóstico de las redes sísmicas y acelerográficas del país.

La gran mayoría utilizan sistemas de protección contra descargas atmosféricas y un suministro eléctrico de corriente alterna, los sistemas de comunicación utilizan *UPS* para asegurar su operación durante cortes en el suministro eléctrico de corta duración, también cuentan con reguladores para el acondicionamiento de los niveles de voltaje. Los digitalizadores se alimentan a través de un sistema de corriente directa de baterías que asegura su operación continua, aún durante periodos prolongados de interrupción en el suministro eléctrico. Una gran parte de las estaciones cuentan con casetas de doble pared para el control de temperatura, con un cuarto de sensores y otro de comunicaciones, algunas estaciones son operadas en colaboración con otras instituciones como el CICESE (3 estaciones), el Centro de Geociencias de Juriquilla (1 estación), la Facultad de Ciencias de la Tierra de Linares. (1) y la Red Sísmica de Sinaloa (1). Las estaciones restantes conforman por su distribución estratégica la infraestructura central de la red, para el monitoreo de la actividad sísmica en el país, realizado por el SSN (ref. 65).

- *Red Sismológica del Valle de México RSVM*

Cuenta a la fecha con 34 estaciones digitales, su distribución se puede observar en la *figura 3.8*, en cada delegación de la Ciudad de México está desplegada al menos una estación de monitoreo sísmico, cada una de ellas está compuesta por un digitalizador y un sensor de velocidad, en los estados aledaños a la ciudad se encuentran otras estaciones, la mayor parte equipadas con digitalizadores y sensores de velocidad además de un sensor de aceleración. La transmisión de datos se realiza principalmente a través del uso de radios de espectro disperso, internet, satélite y combinaciones de los mismos. Para el caso de las estaciones ubicadas en la Ciudad de México el suministro eléctrico es de corriente alterna.

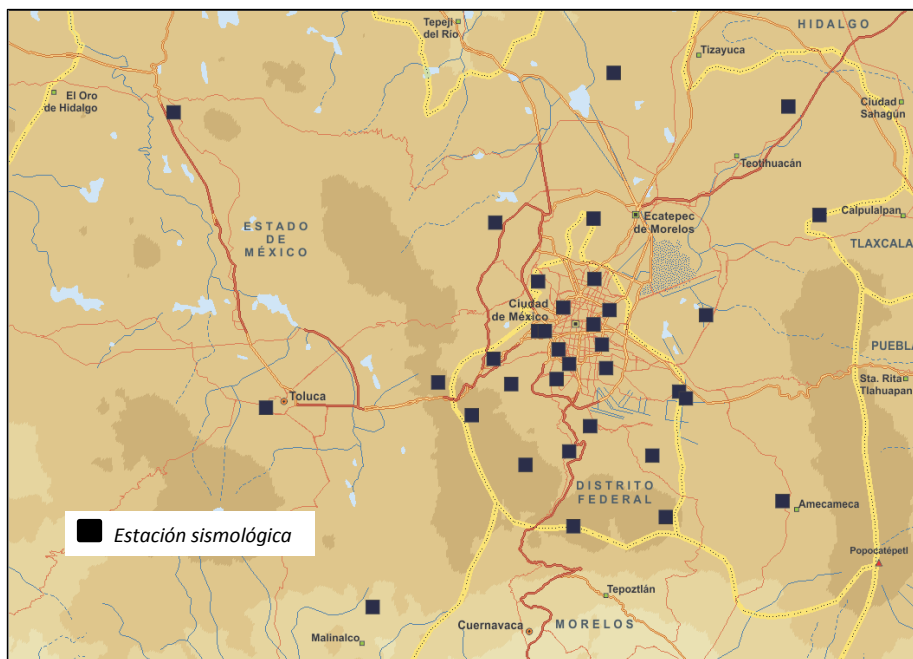
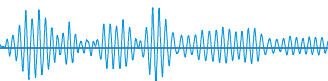


Figura 3.8 Distribución de estaciones de la Red Sísmica del Valle de México



- *Red Sismológica Convencional*

Esta red está formada por 2 estaciones analógicas y una digital, su operación se remonta desde los años 80's y debido a los buenos resultados obtenidos y a su localización estratégica, los datos generados son utilizados de manera cotidiana con fines de localización epicentral. En el centro de monitoreo sísmico del SSN se utiliza un convertidor analógico digital para permitir la integración de los registros de las dos estaciones analógicas a los sistemas de monitoreo.

- *Red Hidroacústica de Isla Socorro*

Consta de tres estaciones de monitoreo, con sensores triaxiales de velocidad que transmiten sus datos en tiempo real a través de tres enlaces satelitales al Telepuerto del SSN ubicado en Ciudad Universitaria. El satélite utilizado es el Satmex 6. Las estaciones son alimentadas mediante el uso de paneles solares, los datos son compartidos con el *International Monitoring System* con sede en Viena, que depende de la Comisión Preparatoria para la Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (CTBTO).

- *Red Sismológica del Volcán Tacaná*

El Tacaná es un volcán peligroso cuyos efectos eruptivos pueden tener consecuencias severas para la población y economía de la región de Chiapas y de Guatemala, mediante un monitoreo sísmico en tiempo real es posible detectar cambios en el estado de la actividad del volcán, para tomar acciones preventivas ante este fenómeno se instalaron 4 estaciones sísmicas triaxiales, estas utilizan paneles solares como fuente de alimentación, la transmisión de datos se realiza en una primera etapa mediante radios de espectro disperso hacia la ciudad de Tapachula, donde son canalizados en una segunda etapa a través de un enlace satelital al centro de monitoreo del SSN en la Ciudad de México.

Red Sismológica Telemétrica del Estado de Colima

El estado de Colima puso en marcha la instrumentación de una red sísmica de 8 estaciones para el estudio y vigilancia del volcán de Colima, el equipo fue entregado a la Universidad de dicha entidad, encargándose de su instalación y operación a partir de 1989, los primeros resultados de la red provocaron su crecimiento, llegando a contar con un máximo de 15 estaciones *Figura 3.9*. A partir de año 2001 se instalaron las primeras estaciones de banda ancha y en el 2006 se reciben 7 estaciones más del mismo tipo que las anteriores *Tabla 3.1*.

Tabla 3.1 Estaciones de la Red Sismológica Telemétrica del Estado de Colima

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación	Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	EZV1	C. ALCOMÚN	12	ESUC	UNIVERSIDAD
2	EZV2	C. GRANDE	13	ESPJ	PABLO JUÁREZ
3	EZV3	NEVADO	14	COL	C. LA CUMBRE
4	EZV4	SOMA	15	EFRE	FRESNAL
5	EZV5	FRESNAL	16	BBPJ	PUEBLO JUÁREZ
6	EZV6	YERBABUENA	17	MNGR	MONTEGRANDE
7	EZV7	VOLCANCITO	18	SOMA	SOMA
8	ESSG	C. SAN GABRIEL	19	JUBA	J. BARRAGÁN
9	ZLGC	MANZANILLO	20	INCA	INICIO CALDERA
10	ESPC	PEÑA COLORADA	21	ESLC	LA CURVA
11	ESAR	ARMERIA	22	COLI	C. LA CUMBRE

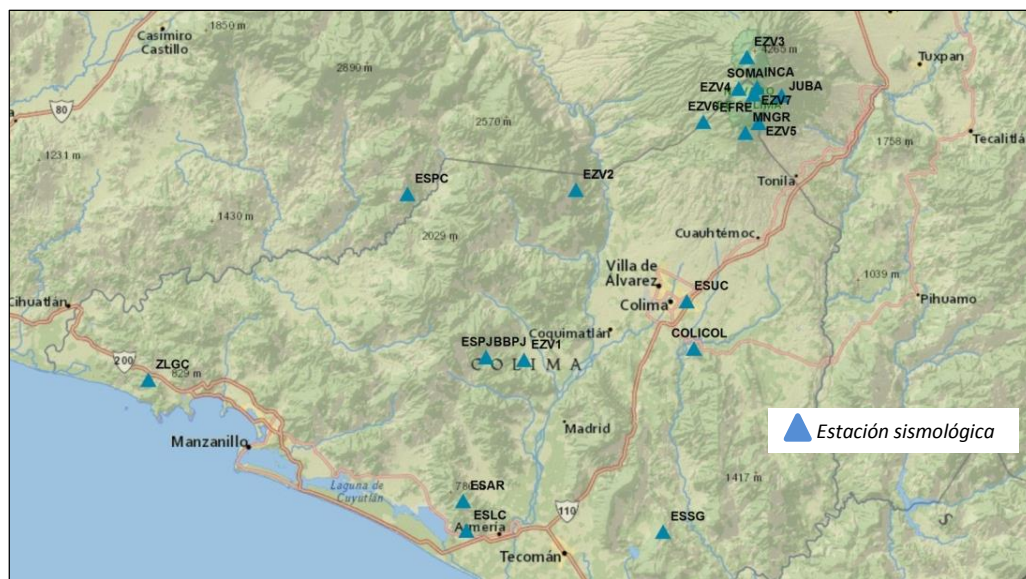


Figura 3.9 Ubicación de las estaciones de la Red Sismológica Telemétrica del Estado de Colima

Red Sismológica del Centro de Geociencias de Juriquilla, Querétaro CGE

Se han llevado a cabo varios monitoreos sísmicos en Querétaro, Guanajuato, San Luis Potosí, Durango, Aguascalientes, Jalisco, Michoacán y Chiapas, su objetivo es caracterizar la sismicidad de sismos regionales y nacionales, para apoyar a las autoridades y a la sociedad en la prevención del riesgo sísmico y para trabajar en el estudio de diferentes fenómenos, existe una la red que cuenta con 20 estaciones sismológicas, *Figura 3.10 y Tabla 3.2.*

Tabla 3.2 Estaciones de la Red Sismológica del Centro de Geociencias de Juriquilla

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación	Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	JRQG	JURIQUILLA	11	AMQG	AMEALCO
2	SJQG	SAN JOAQUÍN	12	ARSG	ARMADILLO
3	PAQG	PINAL DE AMOLES	13	NRSG	EL NARANJO
4	ASQG	ARROYO SECO	14	AQSG	AQUISMÓN
5	JPQG	JALPAN	15	CRSG	CERRITOS
6	SAQG	JALPAN	16	VHSG	VILLA HIDALGO
7	LMQG	LANDA	17	LRSG	LA REFORMA
8	VGQG	VALLE DE GUADALUPE	18	TMSG	TAMASOPO
9	TLQG	TOLIMÁN	19	CVSG	C.D. VALLES
10	TXQG	TEQUISQUIAPAN	20	SCSG	SAN CIRO DE ACOSTA



Figura 3.10 Estaciones de la Red Sismológica del Centro de Geociencias de Juriquilla, Querétaro

Red Sismológica de la Universidad de Guadalajara

El departamento de Ingeniería Civil y Topografía a través del Centro de Ciencias de la Tierra tiene instalada una red Sismológica, con el objetivo de monitorear el campo Geotérmico Cerritos Colorados en la Caldera Volcánica de la Primavera, esta red cuenta con 7 estaciones equipadas cada una con un sensor de velocidad, de las 7 estaciones, 6 son autónomas y una telemétrica, adicionalmente también se monitorea la Zona Metropolitana de Guadalajara con una red sismológica de 3 estaciones con sensor de velocidad; así mismo se tienen considerados 3 sitios para ampliar la red, en la *Tabla 3.1* se muestra el listado de las estaciones que componen la red sismológica y en la *Figura 3.3* la localización de cada una de ellas.

Tabla 3.3 Estaciones de la Red Sismológica de la Universidad de Guadalajara

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación	Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	CCOR	CERRITOS COLORADOS	8	CCTR	CIENCIAS DE LA TIERRA
2	CAMP	EL CAMPAMENTO	9	IXTL	IXTLAHUACAN
3	CUES	LA CUESTA	10	PALO	EL PALOMAR
4	BARR	LA BARRANCA	11	CHAP	CHAPALA
5	AZUF	LA AZUFRERA	12	STFE	SANTA FE
6	AGUV	AGUA DE VICTORIANO	13	TQUI	TEQUILA
7	RIOC	RIO CALIENTE			



Figura 3.11 Ubicación de las estaciones de la Red Sismológica de la Universidad de Guadalajara

Red Sismológica de Banda Ancha de Veracruz

El proyecto considera la instalación de 8 estaciones sísmicas de banda ancha *Figura 3.12*, similares a las del SSN, tres de ellas forman parte de la red de monitoreo sísmico del volcán San Martín. Se estableció que el equipo de comunicaciones y el enlace satelital serán aportados por el SSN como parte de la colaboración conjunta, por lo que se ha previsto que las señales que se generen serán transmitidas vía satélite a estas mismas instalaciones en tiempo real, mismas que serán reenviadas al Puesto Central de Registro del Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana con sede en la Ciudad de Xalapa y se prevé realizar el mismo ejercicio para las estaciones sísmicas del volcán San Martín, *Tabla 3.4*.

Tabla 3.4 Estaciones de la Red Sismológica de Banda Ancha de Veracruz

NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN	CLAVE ÚNICA DE ESTACIÓN	NOMBRE DE LA ESTACIÓN
1	JAIG	JALCOMULCO
2	NEIG	LA NUEVA ERA
3	CTIG	TEMPOAL (EL CANTARITO)
4	CQIG	COXQUIHUI
5	LBIG	LOS LIBERALES
6	PMIG	LA PERLA DE SAN MARTIN
7	RAIG	REVOLUCIÓN DE ARRIBA
8	CZIG	EL CENIZO



Figura 3.12 Ubicación de las estaciones de la Red Sismológica de Banda Ancha de Veracruz

Red Interuniversitaria de instrumentación Sísmica

El objetivo de la Red interuniversitaria de Instrumentación Sísmica es obtener registros de movimientos de temblores fuertes medidos en los principales centros urbanos de México *Tabla 3.5*.

Tabla 3.5 Estaciones de la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	RIDS	LA SALLE
2	RIMS	MORELIA S
3	RIXU	UNICACH
4	RITB	CEBETIS #32
5	RITC	CENTRAL UAEM
6	RITE	CETIS #23
7	RITL	CELE
8	RITP	PREPARATORIA #5 UAEM
9	RITS	FACULTAD DE PSICOLOGÍA UAEM
10	RIGU	CENTRAL ITESO
11	RICC	COLIMA

Red de Monitoreo Sísmico Volcánico en Chiapas

En el 2009 se construye y entra en operación el Centro de Investigación en Gestión Riesgos y Cambio Climático, con el cual se fortalece la red de monitoreo sísmico-volcánico en Chiapas. Actualmente la red sísmica del volcán Chichón está conformada por tres estaciones (Viejo Volcán, Francisco León y Nicapa); la red sísmica del volcán Tacaná integrada por las estaciones (Pavencul, Chiquihuites y La Patria), y finalmente la red sísmica del Estado de Chiapas con las estaciones (Tuxtla Gutiérrez, Comitán, Pijijiapan y Tapachula) *Figura 3.13*.

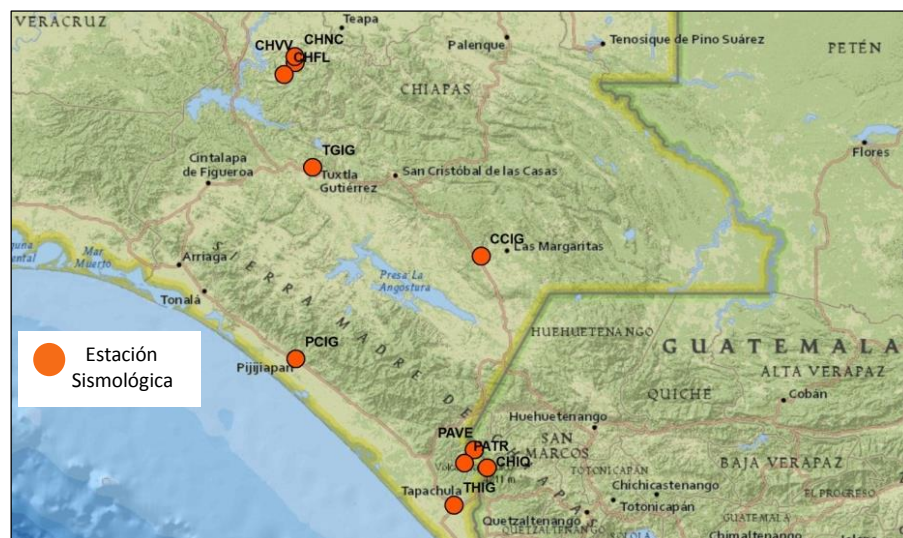
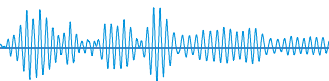


Figura 3.13 Ubicación de las estaciones de la Red de Monitoreo Sísmico Volcánico en Chiapas



Red Sismológica Telemétrica de Jalisco

El objetivo general de este proyecto es instalar un red sísmica y acelerométrica, para generar los datos que permitan conocer y estudiar el peligro sísmico asociado a los procesos tectónicos en el bloque de Jalisco, para la elaboración una microzonificación adecuada a los parámetros sísmicos de cada zona, para que se llegue a la elaboración de reglamentos de construcción que garanticen que las construcciones sean sismoresistentes. La red aún se encuentra en desarrollo (ref. 66).

Red Sismológica de Nuevo León

Cuenta con dos observatorios sismológicos en los campus de la Universidad Autónoma de Nuevo León, el primero de ellos en la Facultad de Ciencias de la Tierra, localizada en Linares, con clave de estación (LNIG). En el campus Mederos ubicado en la ciudad de Monterrey se encuentra la otra estación, con clave MNIG. Las estaciones sismológicas forman parte de la red del SSN en colaboración con la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Red Sísmica Sinaloense

El objetivo de la red sísmica local del Centro de Ciencias de Sinaloa es realizar el monitoreo sísmico en tiempo real de los sismos que ocurren en el estado al igual que los sismos regionales, proporcionando información al SSN, la red está conformada por tres estaciones sismológicas, que son: Topolomampo (TSIG), Sanalona (SCUL), Huites (CHOIX).

Estación Sismológica de la Universidad Autónoma de Yucatán

Está integrada por la estación (MYIG) localizada en Mérida, misma que pertenece a la Red de Estaciones de Banda Ancha del SSN, cuyo objetivo es monitorear la respuesta sísmica del norte de la península de Yucatán ante sismos locales y telesismos, además de esta estación existen dos más, una en Tepich Municipio de Quintana Roo y otra en Sabancuy Campeche. La estación MYIG es operada por la Universidad Autónoma de Yucatán a través de su Facultad de Ingeniería, mediante un convenio con la UNAM y con el apoyo del SSN al cual pertenece.

Red Sismológica de la Universidad Estatal de Sonora

Se inició en el año 2000 las iniciativas interinstitucionales del Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora (CESUES), el CICESE, la Unidad de Protección Civil del Estado de Sonora y del Centro Ecológico de Sonora, instalando la primera estación sismológica en Hermosillo para comprender y prever el efecto de los sismos que ocurrieran en la región, ya que se tiene el conocimiento de la existencia de dos grandes zonas sismogénicas: La primera al noreste de Sonora que en 1887, que produjo un sismo de magnitud $M=7.4$ provocando grandes daños en la ciudad y en la zona serrana. Una segunda zona sismogénica se localiza en la parte central del Golfo de California que delimita la frontera entre las placas tectónicas del Pacífico y de Norteamérica, en donde se han presentado sismos de magnitud mayores de 7.

Redes Acelerográficas del Instituto de Ingeniería

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México mantiene en operación una red de estaciones con equipo acelerográfico, las estaciones cuentan con un arreglo de tres sensores de aceleración colocados en disposición ortogonal, esta disposición permite conocer el movimiento de una partícula en tres direcciones del espacio. Se ha expandido a lo largo de la costa hacia los estados de Oaxaca, Chiapas y en ciudades como Puebla, Acapulco y líneas de atenuación como la que va de Acapulco hacia la Ciudad de México y de Puerto Ángel a la Ciudad de México. En la *figura 3.14* se muestra la distribución de la red acelerográfica actual sobre la costa, en la cual se puede observar el crecimiento hacia el sureste de la República Mexicana, el número de estaciones de campo libre sobre la costa y las líneas de atenuación pasaron de 20 que había durante el sismo de 1985 al orden de más de 100 en 2011. A continuación se describe el crecimiento de las redes implementadas en ciudades: como la del Valle de México, Puebla, Oaxaca y Acapulco, las redes del II-UNAM son:



Figura 3.14 Cobertura de la red acelerográfica en 2011

- *Red Acelerográfica del Valle de México*

La red de la Ciudad de México ha experimentado un crecimiento importante y hoy en día cuenta con 200 estaciones acelerográficas de campo libre y algunas de pozo profundo, la mayoría de ellas son operadas por el CIRES; el II-UNAM mantiene en funcionamiento 6 estaciones de campo libre y 5 de campo libre en estructuras, la *figura 3.15* muestra la distribución actual de la red, la mayoría de ellas localizadas sobre la zona de lago, lo anterior ha servido para mejorar el reglamento de construcciones de la ciudad de México.



Figura 3.15 Estaciones que existen actualmente en el Valle de México

- *Red Acelerográfica de la ciudad de Puebla*

El II-UNAM y la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla acordaron iniciar la operación conjunta de la Red de Acelerógrafos de la Ciudad de Puebla, actualmente cuenta con diez estaciones acelerográficas como se muestra en la *figura 3.16*, distribuidas en diferentes tipos de zonas, con la finalidad de estudiar la respuesta sísmica de los suelos de la ciudad y por consiguiente determinar los efectos de sitio locales en los diferentes tipos de suelo de la ciudad.



Figura 3.16 Red Acelerográfica Ciudad de Puebla

- *Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca*

Otra de las ciudades instrumentadas es la Ciudad de Oaxaca, en ella se instaló en el año 1999 una red de once estaciones de registro acelerográfico como se muestra en la figura 3.17, ésta es complementaria al proyecto general de la Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca y de la línea de atenuación de Puerto Ángel a la Ciudad de México. Con la finalidad de investigar la forma en que las ondas sísmicas se propagan tanto a lo largo de la costa como continente adentro.

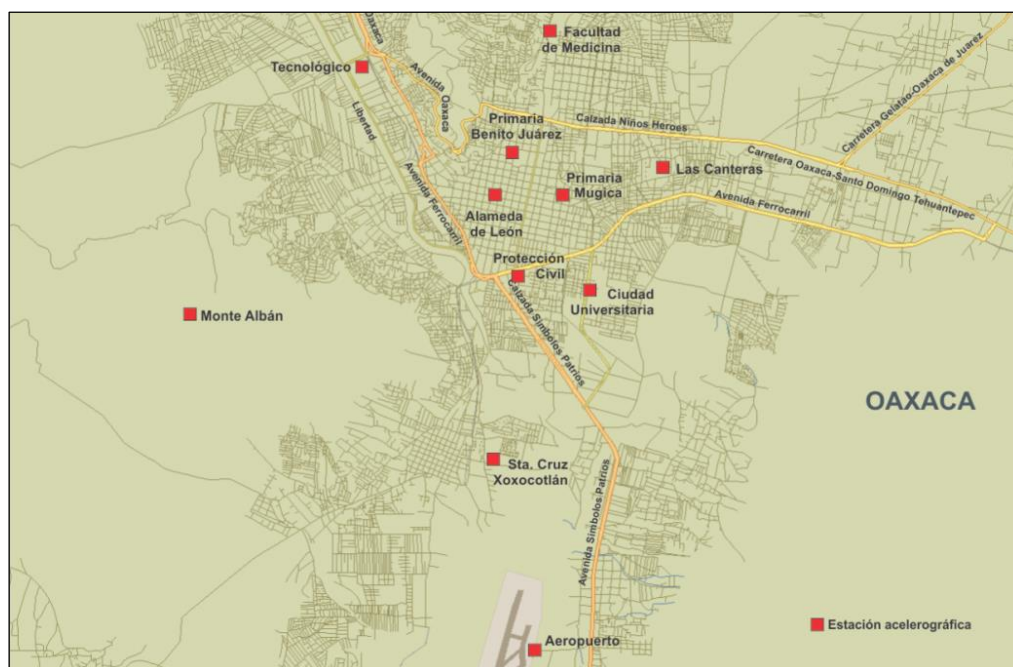


Figura 3.17 Red Acelerográfica de la Ciudad de Oaxaca

- *Red Acelerográfica de la Ciudad de Acapulco*

Acapulco es una de las ciudades que también se ha instrumentado debido a la alta ocurrencia de movimientos sísmicos que acontecen frente a sus costas y por el elevado número de edificaciones que existen en la Ciudad, pero sobre todo porque se sigue esperando el macrosismo de la brecha de Guerrero, el cual sería importante registrar. La red actual cuenta con siete estaciones acelerográficas figura 3.18 en diferentes tipos de suelo y una de pozo (ACPD) a 63 m de profundidad.



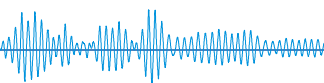
Figura 3.18 Red acelerográfica de la Ciudad de Acapulco

La Red Sismológica y Acelerográfica del CIRES

Su objetivo es promover la investigación y desarrollo de tecnología aplicada a la instrumentación sísmica como medio útil para mitigar posibles desastres sísmicos, esto ha permitido obtener información para comprender y adecuar eventualmente los factores de diseño sísmico del Reglamento de Construcción del DF, para advertir el efecto que causan los sismos grandes que ocurren eventualmente en la costa de Guerrero, el CIRES desarrolló el Sistema de Alerta Sísmica, SAS, de la Ciudad de México en operación desde 1991, como servicio público desde 1993 y SASO en Oaxaca, la red CIRES cuenta con 123 estaciones *Tabla 3.11* repartidas en las zonas de alto impacto sísmico *Figura 3.6*.

Tabla 3.6 Estaciones de la Red Acelerográfica del CIREs

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación	Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	AL01-RACM	ALAMEDA	63	SI53-RACM	SAN SIMÓN
2	AE02-RACM	ESC. PRIM. GONZÁLEZ GARZÓN	64	SP51-RACM	SECTOR POPULAR
3	AO24-RACM	ALBERCA OLÍMPICA	65	TH35-RACM	TLÁHUAC
4	AP68-RACM	JARDÍN DE NIÑOS "JUAN BAUTISTA DE LA SALLE"	66	TL08-RACM	DEPORTIVO ANTONIO CASO T-II
5	AR14-RACM	ESCUELA PRIMARIA JOSÉ ORDAZ LÓPEZ	67	TL55-RACM	TLATELOLCO
6	AU11-RACM	AUTÓDROMO	68	TP13-RACM	TLALPAN
7	AU46-RACM	ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA NO. 14	69	UC44-RACM	UNIDAD COLONIA IMSS
8	BA49-RACM	BUENOS AIRES	70	UI21-RACM	UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA
9	BL45-RACM	BALDERAS	71	VG09-RACM	VALLE GÓMEZ



10	BO39-RACM	BONDOJITO	72	VM29-RACM	VILLA DEL MAR
11	SS66, C166, C266,	CENTRAL DE ABASTOS	73	XO06-RACM	JARDÍN DE NIÑOS XOCHIPILLI
12	CA20-RACM	LABORATORIO, CIRES, PLANTA BAJA	74	XO36-RACM	JARDÍN DE NIÑOS XOCHIMILCO
13	CA59-RACM	CANDELARIA	75	PN01-SAS	PAPANOA
14	C266, C366-RACM	CENTRAL DE ABASTOS	76	VN02-SAS	EL VEINTE
15	CB43-RACM	EDIFICIO, CIRES, AZOTEA	77	TT03-SAS	TETITLAN
16	CC55-RACM	CUBÍCULO GSTE, CIRES	78	CA04-SAS	CACALUTLA
17	CE18-RACM	ESCUELA PRIMARIA "RAMÓN ESPINOZA VILLANUEVA"	79	PJ05-SAS	PENJAMO
18	CE23-RACM	CETIS ARAGÓN	80	JD06-SAS	EL JARDIN
19	CE32-RACM	CETIS NO. 57	81	SP07-SAS	SAN PEDRO
20	CH84-RACM	CULHUACÁN	82	CT08-SAS	EL CORTES
21	CI05-RACM	CIBELES	83	VI09-SAS	LAS VIGAS
22	CJ03-RACM	CENTRO URBANO JUÁREZ	84	CR10-SAS	EL CARRIZO
23	CO47-RACM	COYOACÁN	85	MQ11-SAS	MARQUELIA
24	CO56-RACM	ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA NO. 18	86	HU12-SAS	HUEHUETAN
25	CP28-RACM	CERRO DEL PEÑÓN	87	LG01-SASO	LLANO GRANDE
26	CS78-RACM	ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA NO. 243	88	MT02-SASO	MÁRTIRES DE TACUBAYA
27	CT64-RACM	CERRO DEL TEPEYAC	89	LA03-SASO	LLANOS DE AMUZGOS
28	CJ04-RACM	MULTIFAMILIAR JUÁREZ II	90	HZ04-SASO	STA. MA. HUAZOLOTITLAN
29	CU80-RACM	ESCUELA PRIMARIA "AURORA LÓPEZ VELARDE"	91	TU05-SASO	SAN PEDRO TUTUTEPEC
30	DM12-RACM	DEPORTIVO MOCTEZUMA	92	LV06-SASO	LA VIRGEN
31	DR16-RACM	DEPORTIVO REYNOSA	93	MX07-SASO	SAN PEDRO MIXTEPEC
32	DX37-RACM	DGCOH XOTEPINGO	94	TN08-SASO	LA RIVERA DE TONAMECA
33	EO30-RACM	JARDÍN "ESPARZA OTEO"	95	PA09-SASO	PUERTO ÁNGEL
34	ES57-RACM	ESCANDÓN	96	TG10-SASO	TANGOLUNDA
35	EX08-RACM	ESCUELA SECUNDARIA NO. 3	97	HM11-SASO	SAN PEDRO HUAMELULA
36	EX09-RACM	ESCUELA SECUNDARIA NO. 3	98	MZ12-SASO	SAN VICENTE MAZATÁN
37	EX12-RACM	ESCUELA SECUNDARIA NO. 3	99	TE13-SASO	SAN MIGUEL TENANGO
38	FJ74-RACM	FUNDACIÓN JAVIER BARROS SIERRA	100	LA14-SASO	LA REFORMA
39	GA62-RACM	ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA NO. 2	101	CP15-SASO	CORRAL DE PIEDRA
40	GC38-RACM	JARDÍN DE NIÑOS "LUZ GARCÍA CAMPILLO"	102	TJ16-SASO	STO. DOMINGO TEOJOMULCO
41	GR27-RACM	GRANJAS	103	SV17-SASO	SOLA DE VEGA
42	HJ72-RACM	HOSPITAL JUÁREZ	104	GX19-SASO	GUIXE
43	IB22-RACM	ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA NO.95	105	CN19-SASO	CIENEGUILLA
44	IM40V	INSTITUTO MÉDICO PEDAGÓGICO	106	YC20-SASO	YUCUDAA
45	IM40, D270-RACM	INSTITUTO MÉDICO PEDAGÓGICO	107	EV21-SASO	EL VENADO
46	JA43-RACM	JAMAICA	108	VH22-SASO	SAN LORENZO VISTA HERMOSA
47	JC54-RACM	PARQUE JARDINES DE COYOACÁN	109	TC23-SASO	SAN MIGUEL TECOMATLAN
48	LI33-RACM	LICONSA	110	HC24-SASO	HUMO CHICO
49	LI58-RACM	ESCUELA SECUNDARIA NO. 23	111	CO25-SASO	CERRO DE ORO
50	LV17-RACM	LINDAVISTA	112	TM26-SASO	TEMASCAL
51	ME52-RACM	ESCUELA SECUNDARIA TÉCNICA "RAFAEL DONDE"	113	CH27-SASO	CHAZUMBA
52	MI15-RACM	MIRAMONTES	114	PG28-SASO	PIEDRA GRANDE
53	MT50-RACM	MARISCAL TITO	115	OX29-SASO	OAXACA
54	MY19-RACM	MEYEHUALCO	116	TQ30-SASO	TEQUIXTEPEC
55	NZ20-RACM	NEZAHUALCÓYOTL	117	CJ31-SASO	CUAJIMOLOYAS
56	NZ31-RACM	NEZAHUALCÓYOTL	118	TA32-SASO	TEMAZULAPAM
57	PA34-RACM	ESCUELA PRIMARIA "ÁLVARO OBREGÓN"	119	CS33-SASO	CONSTITUCIÓN
58	PD42-RACM	PALACIO DE LOS DEPORTES	120	LC34-SASO	SANTIAGO LACHIGUIRI
59	PE10-RACM	ESCUELA PRIMARIA "PLUTARCO ELÍAS CALLES"	121	MA35-SASO	STA. MARÍA MIXTEQUILLA
60	RI76-RACM	REPÚBLICA DE ITALIA	122	PS36-SASO	PALMA SOLA
61	RM48-RACM	ESCUELA PRIMARIA "RODOLFO MENÉNDEZ"	123	SL37-SASO	SANTA LUCÍA
62	SS60, C360-RACM	SCT-CENDI-SEDESOL			

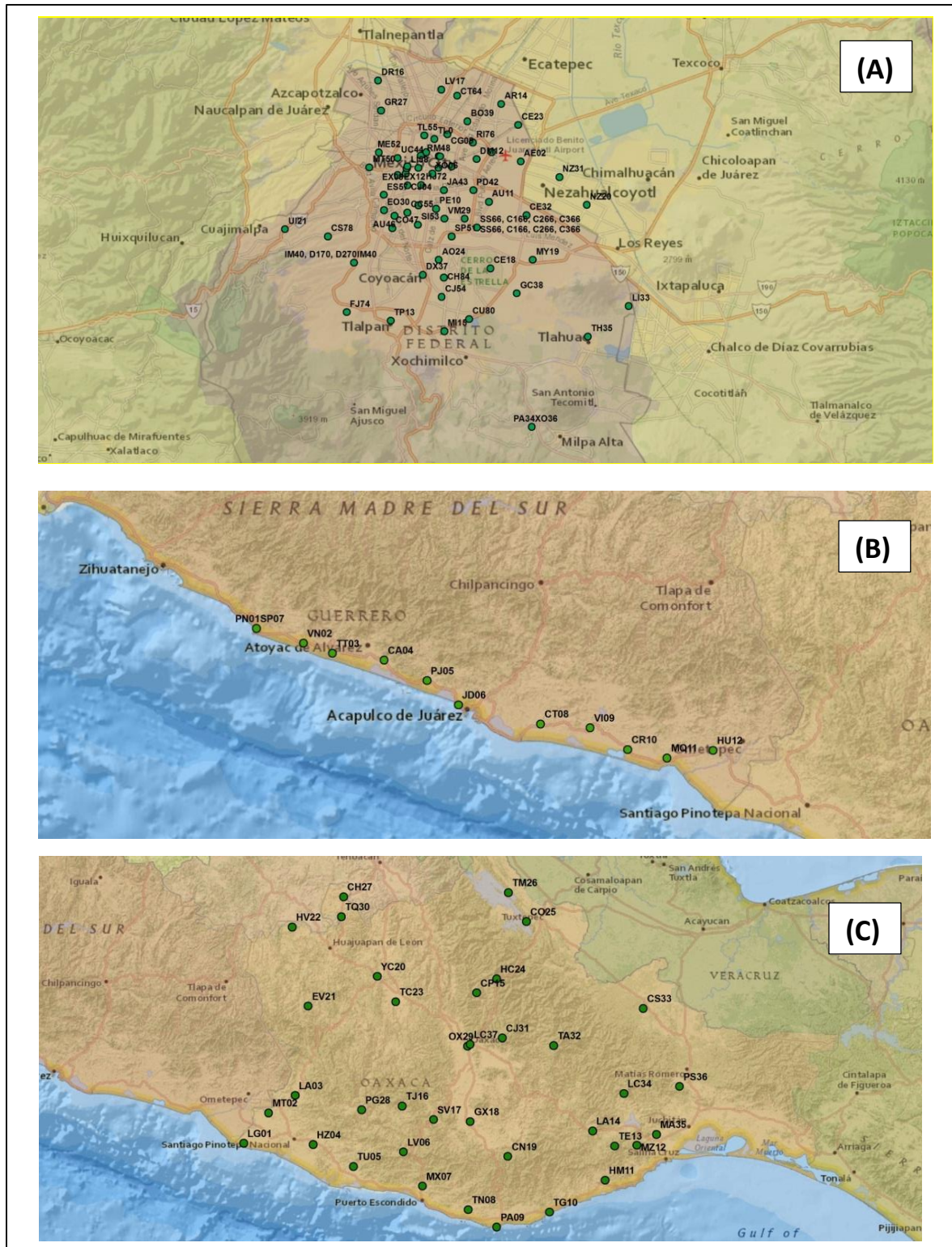


Figura 3.19 Estaciones de la Red Acelerográfica del CIRES: a) RACM, b) SAS y c) SASO

Red Sismológica y Acelerográfica del CICESE

El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) cuenta con equipos sismológicos, entre sensores de velocidad de Banda Ancha y acelerómetros de periodo corto para el registro de temblores en el noroeste de México, organizados en diferentes subredes:

- Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM)
- Red Sismológica de Banda Ancha del Golfo de California (RESBAN)
- Red Acelerométrica del Noroeste de México (RANM)
- Red Sísmica de Baja California Sur (RESBCS)
- Red Acelerométrica Urbana de Mexicali (RAUM)

Una de las actividades más importantes y con más impacto social que el CICESE realiza, es el monitoreo continuo de la actividad sísmica que ocurre en esta región, con el propósito de documentar, analizar e interpretar la distribución de los sismos, para divulgar el conocimiento y contribuir con la sociedad en la prevención del riesgo sísmico y mitigación de sus efectos en la población, *Figura 3.20*. La Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), por ejemplo, mantiene un monitoreo continuo de la sismicidad en la porción norte de Baja California. La RESNOM tiene la capacidad de detectar sismos de magnitud 2.5 en adelante con una alta confiabilidad y cubre principalmente la parte norte del Estado de Baja California, que es la región más poblada del estado y donde se concentra la mayor parte de las fallas sísmicas activas de la región. La Red Sísmica de Banda Ancha (RESBAN) monitorea la actividad sísmica regional que ocurre en el Golfo de California. La Red Acelerométrica del Noroeste de México (RANM), monitorea las aceleraciones producidas por la actividad sísmica de magnitud relevante ($M > 4$). La red sísmica de Baja California Sur (RESBCS), monitorea principalmente la actividad sísmica que ocurre en la región de La Paz en B.C.S. y la Red Acelerométrica urbana de la ciudad de Mexicali (RAUM), monitorea la actividad sísmica que ocurre en el Valle de Mexicali para conocer su efecto en la zona urbana, de acuerdo a la geología del sitio, la urbanización y la densidad de población de la ciudad, el CICESE cuenta con un total de 72 estaciones de tipo variado, *Tabla 3.7*.

Tabla 3.7 Estaciones de la Red Sismológica y Acelerográfica del CICESE

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación	Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	CHX-RESNOM	EL CHINERO	37	RAC-RANM	RANCHO AGUA CALIENTE
2	ECX-RESNOM	ESTEBAN CANTÚ	38	K58-RANM	KILÓMETRO 58
3	ICX-RESNOM	ISLA DE CEDROS	39	RSL-RANM	RANCHO SAN LUIS
4	PBX-RESNOM	PUNTA BANDA	40	SIV-RANM	SANTA ISABEL VIEJO
5	RMX-RESNOM	RUMOROSA	41	HDI-RANM	HÉROES DE INDEPENDENCIA
6	SLX-RESNOM	SAN LUIS RÍO COLORADO	42	VTR-RANM	VALLE DE LA TRINIDAD
7	YUX-RESNOM	YURIMURI	43	IZA-RANM	IGNACIO ZARAGOZA
8	ZAX-RESNOM	ZACATÓN	44	RII-RANM	RIITO
9	CBX-RESNOM	CERRO BOLA	45	EHJ-RANM	HERIBERTO JARA
10	CCX-RESNOM	CICESE	46	TAM-RANM	TAMAULIPAS
11	CPX-RESNOM	CERRO PRIETO	47	CHI-RANM	CHIHUAHUA
12	RMX-RESNOM	RUMOROSA	48	DEL-RANM	DELTA
13	SPX-RESNOM	SAN PEDRO MÁRTIR	49	SAL-RANM	SALTILLO

14	UABX-RESNOM	UABC MEXICALI	50	MDO-RANM	MICHOACÁN DE OCAMPO
15	PIX-RESNOM	PINACATE	51	GEO-RANM	GEOTÉRMICA
16	TJX-RESNOM	TIJUANA	52	VIC-RANM	VICTORIA
17	TKX-RESNOM	TECATE	53	CIB-RESBCS	CIBNOR
18	VTX-RESNOM	VALLE DE LA TRINIDAD	54	COY-RESBCS	EL COYOTE
19	SQX-RESNOM	SAN QUINTÍN	55	IPA-RESBCS	ISLA PARTIDA
20	SJX-RESNOM	SIERRA DE JUÁREZ	56	SAEV-RESBCS	SAN EVARISTO
21	SLGB-RESBAN	SAN LUIS GONZAGA	57	SLBS-RESBCS	SIERRA DE LA LAGUNA
22	BAHB-RESBAN	BAHÍA DE LOS ÁNGELES	58	DEPC-RAUM	PROTECCIÓN CIVIL
23	SFQB-RESBAN	SAN FRANCISQUITO,	59	EHJA-RAUM	HERIBERTO JARA
24	NE74-RESBAN	GUERRERO NEGRO	60	CEA0-RAUM	PLANTA DE BOMBEO 0
25	NE77-RESBAN	LORETO	61	DIFE-RAUM	CENTRO DE DESARROLLO PARA LA FAMILIA
26	NE79-RESBAN	SAN JOSÉ DEL VIEJO	62	ICBC-RAUM	INSTITUTO DE CULTURA DE BAJA CALIFORNIA
27	PPXB-RESBAN	PUERTO PEÑASCO	63	HDFA-RAUM	HOSPITAL DE LA FAMILIA
28	NE80-RESBAN	CABORCA (EJIDO PRIMAVERA)	64	POT1-RAUM	POTABILIZADORA 1
29	RESBAN	PUERTO LIBERTAD	65	BDSO-RAUM	BRIGADA DEL SOL
30	NE81-RESBAN	NOVILLO	66	ZCO6-RAUM	ZONA COMERCIAL 6
31	GUYB-RESBAN	GUAYMAS	67	ZCO1-RAUM	ZONA COMERCIAL 1
32	NE82-RESBAN	NAVOJOA (EJIDO SINGAPUR)	68	FRM1-RAUM	RUMOROSA FIARUM
33	TOPB-RESBAN	TOPOLOBAMPO,	69	POTX-RAUM	POTABILIZADORA XOCHIMILCO
34	PPB-RANM	PUNTA BANDA	70	POT2-RAUM	POTABILIZADORA 2
35	CIC-RANM	CICESE	71	PMOR-RAUM	PLANTA MORELOS
36	TRH-RANM	RANCHO 3 HERMANOS	72	FRM2-RAUM	FIARUM

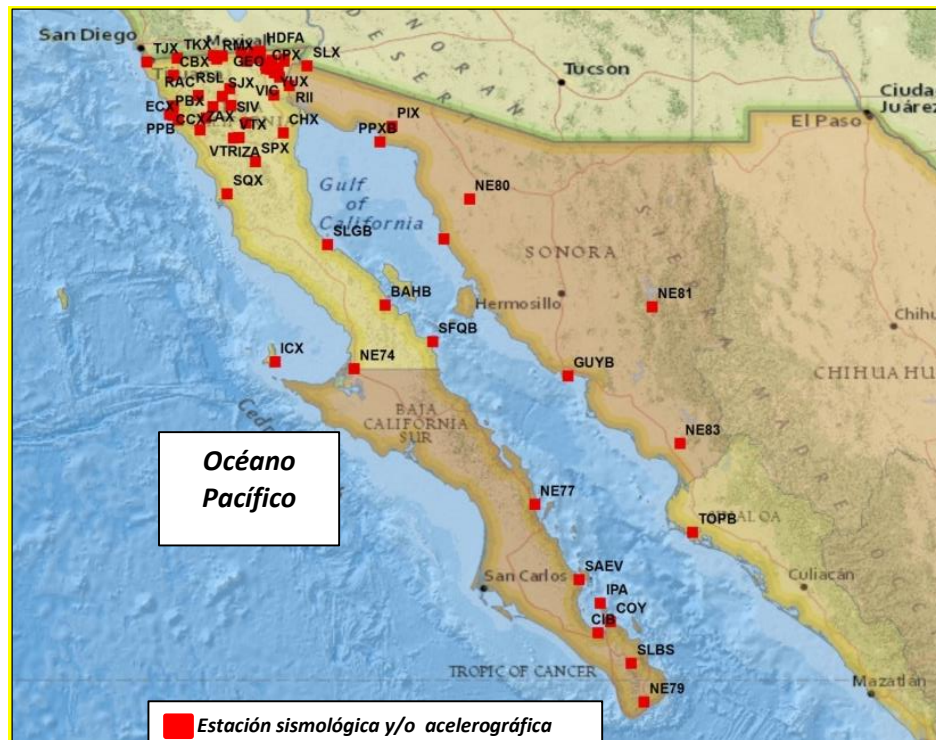


Figura 3.20 Ubicación de las estaciones de la Red Sismológica y Acelerográfica del CISESE

Red Acelerográfica del Centro Nacional de Prevención de Desastres

La Red de Observación Sísmica del CENAPRED se encuentra en operación desde 1990 y cuenta con 26 estaciones acelerográficas *Tabla 3.8*, que está actualmente dividida por tres principales redes: La Red de Atenuación, que tiene el objetivo de conocer el comportamiento del suelo en cinco puntos de medición, que forman una recta desde las costas de Acapulco hasta la Ciudad de México, la intención de este arreglo es determinar el grado de atenuación o amplificación de las ondas sísmicas. La red de la Ciudad de México, que está compuesta por diez estaciones y se complementa con la Red de Atenuación, para conocer el efecto de las ondas sísmicas en los distintos tipos de suelo de la Ciudad de México. Y la última red está enfocada a conocer la sismicidad de los volcanes activos, esta red está instalada en los volcanes Popocatepetl, Pico de Orizaba, Nevado de Toluca y Jocotitlan, *Figura 3.8*.

Tabla 3.8 Red Acelerográfica del Centro Nacional de Prevención de Desastres

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación	Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	CNP	CENAPRED	14	EST	ESTANZUELA
2	ACAJ	ACAPULCO	15	CHA	CHAPULTEPEC
3	CHIL	CHILPANCINGO	16	IMP	INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
4	MEZC	MEZCALA	17	TEZ	TEZIUTLAN
5	IGUA	IGUALA	18	PPP	CANARIO
6	CUER	CUERNAVACA	19	PPX	CHIQUIXTLE
7	COY	COYOACÁN	20	PPC	COLIBRÍ
8	TLA	TLACOTAL	21	PPT	TETEXCALOC
9	ZAR	ZARAGOZA	22	POH	HALCÓN
10	UNK	UNIDAD KENNEDY	23	POC	CHIPE
11	RMA	ROMA A	24	POM	CASA MANUEL
12	RMB	ROMA B	25	NVT	NEVADO DE TOLUCA
13	RMC	ROMA C			

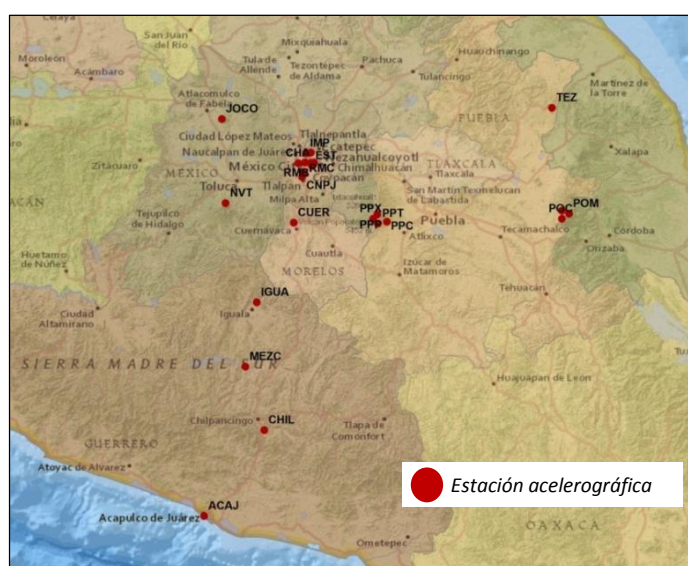


Figura 3.21 Ubicación de las estaciones de la Red Acelerográfica del CENAPRED

Red de la Comisión Federal de Electricidad CFE

Se encuentra en operación desde el 2007, *Figura 3.22*, el objetivo de la red es conocer las aceleraciones a las que están sometidas las infraestructuras ante la ocurrencia de un evento sísmico y obtener de manera oportuna una evaluación de daños, la red cuenta con 28 estaciones como lo muestra la *Tabla 3.9* y opera con sensores de aceleración.

Tabla 3.9 Red Acelerográfica de Comisión Federal de Electricidad

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación	Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	HUAPA-GEIC-CT	SUBESTACIÓN HUAJUAPAN DE LEÓN	15	CAC6-GEIC-SSE	CAJÓN MARGEN DERECHA
2	HUATC-GEIC-CT	SUBESTACIÓN HUATULCO	16	INPT-GEIC-SSE	INFIERNILLO POTABILIZADORA
3	OAXD-GEIC-CT	OAXACA DISTRIBUCIÓN	17	MALD-GEIC-SSE	MALPASO MARGEN DERECHA
4	OMETP-GEIC-CT	OMETEPEC OFICINAS	18	VILI-GEIC-SSE	VILLITA MARGEN IZQUIERDA
5	PESCO-GEIC-CT	SUBESTACIÓN PUERTO ESCONDIDO	19	PEND-GEIC-SSE	PEÑITAS MARGEN DERECHA
6	SMARC-GEIC-CT	SAN MARCOS OFICINAS	20	TEMD-GEIC-SSE	TEMASCAL MARGEN DERECHA
7	PUDI-GEIC-CT	SUBESTACIÓN PUEBLA II	21	DBBO-GEIC-SSE	DOS BOCAS BODEGAS
8	PPENS-GEIC-CT	SUBESTACIÓN PUERTO PEÑASCO	22	CVCL-GEIC-SSE	CECILIO DEL VALLE CAMPO LIBRE
9	SFELB-GEIC-CT	SAN FELIPE OFICINAS	23	NOVI-GEIC-SSE	NOVILLO MARGEN IZQUIERDA
10	TAPCH-GEIC-CT	TAPACHULA OFICINAS	24	PTSU-GEIC-SSE	PETACALCO SUBESTACIÓN
11	AGMI-GEIC-SSE	AGUAMILPA MARGEN IZQUIERDA	25	RSMI-GEIC-SSE	SAN RAFAEL MARGEN IZQUIERDA
12	ANGE-GEIC-SSE	ANGOSTURA SUBESTACIÓN	26	SRMI-GEIC-SSE	SANTA ROSA MARGEN IZQUIERDA
13	CHII-GEIC-SSE	CHICOASEN MARGEN IZQUIERDA	27	ZIMI-GEIC-SSE	ZIMAPAN MARGEN IZQUIERDA
14	CARI-GEIC-SSE	CARACOL MARGEN IZQUIERDA	28	SOLI-GEIC-SSE	SOLEDAD MARGEN IZQUIERDA



Figura 3.22 Red Acelerográfica de Comisión Federal de Electricidad

Red de pequeña apertura de la Colonia Roma

El objetivo de la red de pequeña apertura es obtener registros de calidad para mejorar la comprensión de las ondas que se propaga en el Valle de México durante los grandes sismos, la red está conformada por 9 estaciones acelerográficas ubicadas en la Colonia Roma de la Ciudad de México. *Tabla 3.10*, se encuentran operando desde mayo del 2001, los aparatos seleccionados para la red son actualmente obsoletos, únicamente cuatro estaciones de la red continúan en operación, la red de la Colonia Roma se diseñó como instrumento científico para investigar en detalle el campo de ondas que se propaga en la misma ciudad. A pesar de contar con herramientas estadísticas para la predicción del movimiento no se cuenta aún con un modelo aceptado que permita entender los mecanismos físicos que gobiernan la respuesta sísmica del Valle.

Tabla 3.10 Estaciones acelerográficas de la Red de Pequeña Apertura de la Colonia Roma

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	PMOS	PLAZA MORELIA
2	PROM	PLAZA ROMITA
3	PRJS	PLAZA RIO DE JANEIRO
4	CLON	CLINICA LONDRES
5	JPSK	CENTRO JARDÍN PUSHKÍN
6	PLCA	PLAZA LUIS CABRERA
7	CAOE	CAMELLÓN ÁLVARO OBREGÓN Y FRONTERA
8	CAOO	CAMELLÓN ÁLVARO OBREGÓN Y ORIZABA
9	CAOT	CAMELLÓN ÁLVARO OBREGÓN Y TONALÁ

Estaciones Acelerográficas del Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana (IIUV)

Tiene la finalidad de realizar estudios de microzonificación sísmica, por lo que la localización de sus estaciones es de carácter temporal y se cambian periódicamente de posición cuando se obtiene la información requerida del sitio de interés, las estaciones no tienen instalaciones propias de obra civil por su carácter de temporalidad, pero se mantienen funcionando de manera confiable, la primera estación de registro sísmico en el estado de Veracruz, que formaba parte de las incipientes acciones organizadas en México para el registro y estudio de los sismos en la época del Porfiriato a principios del siglo pasado. La estación constaba de un sismógrafo Wiechert, la estación es retirada en 1997 y posteriormente en esta base se colocó un acelerógrafo Etna, identificando este sitio como la estación Centro Histórico. Actualmente son 23 estaciones las que están operando *Figura 3.23*.

Tabla 3.11 Estaciones acelerográficas operadas actualmente por el IIUV

Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación	Número de Identificación	Clave única de estación	Nombre de la estación
1	DUVE	CALLE 7	13	FWVE	RUÍZ CORTINES
2	CDVE	COSTA DORADA	14	ALVE	ANTÓN LIZARDO
3	LVVE	LAS VEGAS	15	PLVE	PLAYA LINDA
4	FLVE	FRACCIONAMIENTO FLORESTA	16	CUVE	SÁNCHEZ TAGLE
5	TEVE	DÍAZ MIRÓN	17	IIVE	INSTITUTO DE INGENIERÍA
6	NOVE	20 DE NOVIEMBRE	18	POVE	LA POSTA
7	FIVE	FACULTAD DE INGENIERÍA	19	HUCO	HUAZUNTLAN

8	UCVE	UNIVERSIDAD CRISTÓBAL COLÓN	20	TECO	EL TESORO
9	TBVE	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO	21	ABCO	ABASOLO
10	ENVE	ESCUELA NAVAL MILITAR	22	BUCO	BUGANBILIAS
11	CHVE	CENTRO HISTÓRICO	23	FICO	FACULTAD DE INGENIERÍA-COATZACOALCOS
12	COVE	EL COYOL			

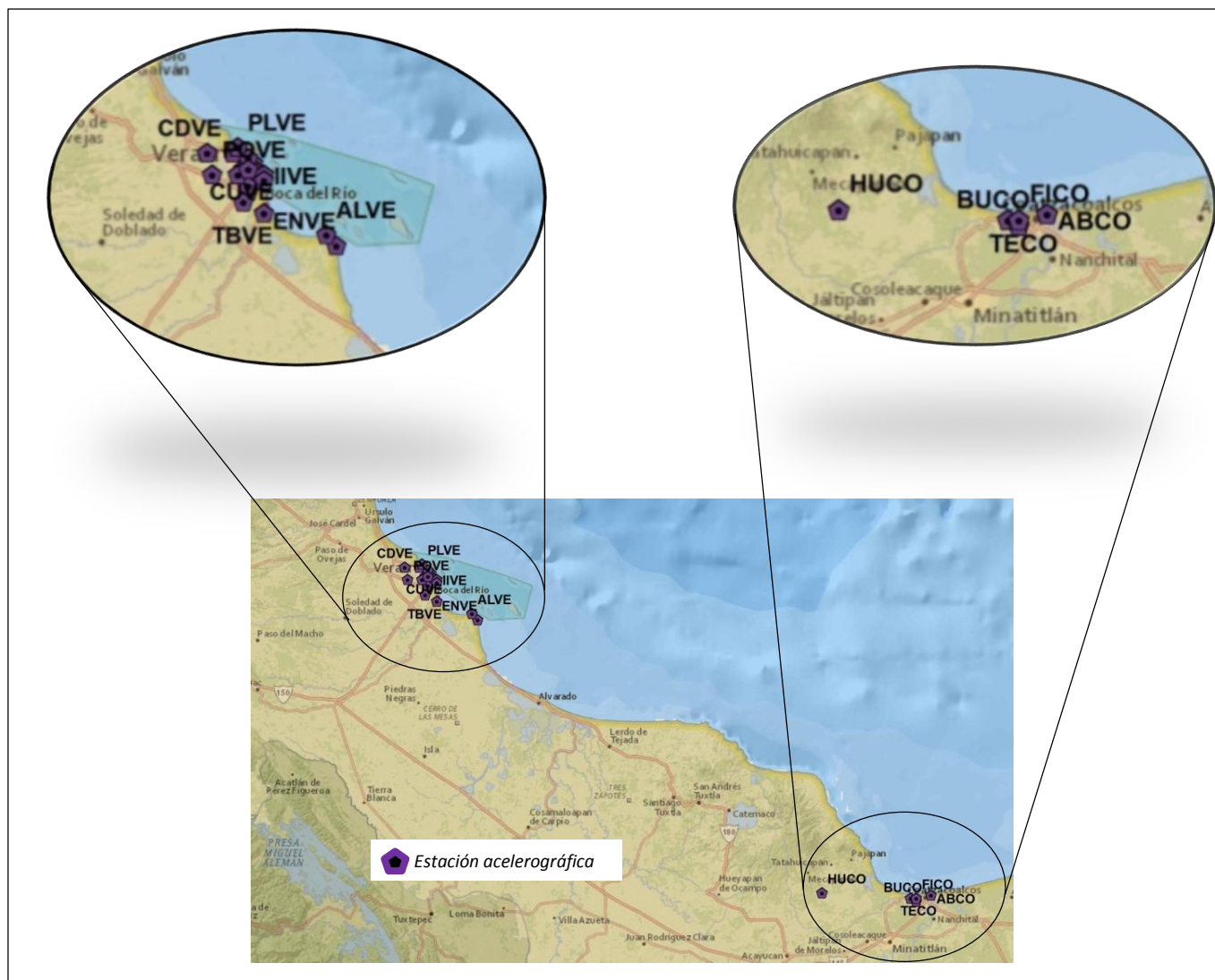


Figura 3.23 Ubicación de las estaciones de la Red de Registro Sísmico del IIUV

Estaciones de la Red Acelerográfica de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco UAM

Ha instalado desde 1992 equipo acelerográfico en instalaciones de los campus Azcapotzalco, Iztapalapa y Xochimilco, así como en otras Instituciones del interior de la República como Chilpancingo, Puebla, Toluca, Morelia, Chiapas y Ometepepec *Figura 3.24*. Desde 1994 se integró la red de acelerógrafos a la que se le denominó Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS), esta red ha crecido en el último año debido al interés de nuevas Instituciones en adherirse a la RIIS. Actualmente en la RIIS se está en proceso de la actualización de equipos debido a que los acelerógrafos que originalmente fueron instalados hace 20 años han llegado al fin de su vida útil.

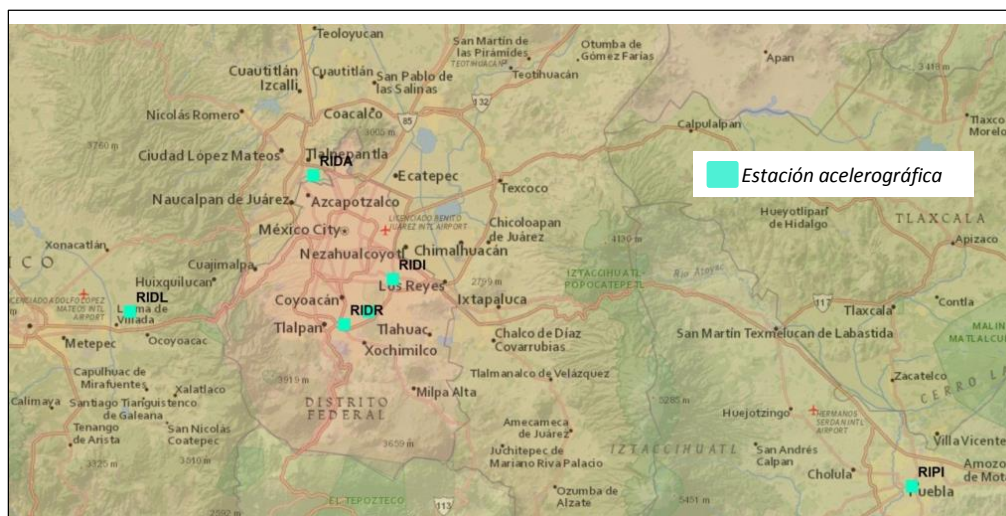


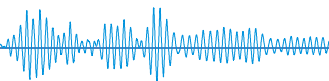
Figura 3.24 Ubicación de las estaciones de la Red Acelerográfica de la Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco

Red Acelerográfica del Estado de Querétaro

El objetivo es obtener registros sísmicos locales en las poblaciones más importantes del estado para sustentar y racionalizar el diseño sísmico de la infraestructura en particular las edificaciones, la red cuenta actualmente con 3 estaciones acelerográficas en Cd. Universitaria, San Juan del Río y Peñamiller, a últimas fechas en cooperación con el Centro de Geociencias de la UNAM Campus Juriquilla, se acordó entre ambos grupos instalar dos instrumentos sismógrafos de banda ancha como complemento para monitorear la sismicidad regional.

Red Acelerográfica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)

Esta red registra y procesa los eventos sísmicos que tengan influencia en el Estado de Michoacán con fines de investigación en las áreas de: Evaluación del peligro sísmico, estudios de efectos locales, elaboración de normas de diseño sísmico, Prevención de daños y Cuantificación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras, cuenta actualmente con 3 estaciones acelerográficas que son, Universidad Vasco de Quiroga, Escuela Luz Alou y Cd. Universitaria.



Red Acelerográfica de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP)

El objetivo principal de la red es contar con una base de datos de los eventos sísmicos que generan intensidades importantes y que pueden provocar daños en las construcciones, esta base de datos es parte fundamental para el desarrollo de proyectos de investigación encaminados al análisis de la vulnerabilidad de las construcciones, así como la actualización y mejora de las Normas para Diseño Sísmico de las construcciones en la ciudad de Puebla. Actualmente forma parte de la RIIS, desde sus orígenes la RIIS se ha fijado como objetivo principal el registrar y analizar los movimientos telúricos en diferentes áreas urbanas donde se encuentran instaladas las estaciones. Los eventos sísmicos registrados y analizados sirven para desarrollar proyectos de investigación encaminados a la mejora y actualización de las normas locales para diseño de las construcciones. A la fecha la UPAEP opera dos estaciones de registro, estas registraron el evento sísmico del 20 de marzo de 2012, ya que los equipos se instalaron en junio de 1993 y han trabajado ininterrumpidamente, por lo que su vida útil está por terminar.

Red Sísmica Permanente del Estado de Tlaxcala

La red sísmica permanente del Estado de Tlaxcala, cuenta con 6 estaciones acelerográficas, las cuales llevan por nombre PC TLAXCALA, APIZACO, ATOTONILCO, EL CARMEN, SAN PABLO DEL MONTE Y MALINCHE.

Estaciones de la Universidad Autónoma de Aguascalientes

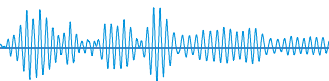
La red de registro sísmico de la Universidad Autónoma de Aguascalientes es de tipo local y su objetivo es el monitoreo de la actividad sísmica de la ciudad de Aguascalientes generada por el fenómeno de subducción, además, de registrar el nivel de aceleraciones en esta ciudad por la sismicidad ocurrida en toda la República Mexicana, cuenta con dos estaciones acelerográficas en la Universidad Autónoma de Aguascalientes y en Ojo Caliente.

Red Acelerográfica de la Universidad Autónoma de Guerrero

Cuenta en la actualidad con 2 estaciones, cuyo objetivo es formar parte de la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS) para registrar eventos sísmicos que permitan realizar estudios de Ingeniería Sísmica, las estaciones son Ana Freud (CAGR) y CU (CCGR).

Red Acelerográfica de la Universidad Autónoma de Chiapas

Cuenta con dos equipos de registro sísmico que son parte de la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS), éstos se encuentran instalados en la Facultad de Ingeniería, la cual es integrante del Grupo Interuniversitario de Ingeniería Sísmica (GIIS).



3.3 La Red Sísmica Mexicana

En el año 2000, la SEGOB y la UNAM celebraron un convenio de colaboración en materia de Protección Civil con el objeto de establecer las bases para organizar y desarrollar actividades de investigación científica y tecnológica destinadas a la prevención y protección de la población, la mitigación de riesgos frente a fenómenos naturales y antropogénicos, e impulsar y llevar a cabo los proyectos, estudios e inversiones necesarias para ampliar y modernizar la cobertura de los sistemas de alerta temprana y prevención de los distintos fenómenos naturales. Como medida prioritaria se estableció reforzar la instrumentación sísmica con que cuenta el país, lo que dio lugar al proyecto denominado Red Sísmica Mexicana (RSM).

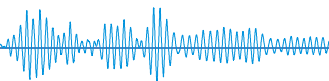
En Mayo del 2005 se pone en marcha la primera etapa de la “Red Sísmica Mexicana” que corresponde a la localización de sitios para la instalación de las estaciones. Para ello se realizó la selección de nueve sitios para la instalación, por parte del Servicio Sismológico Nacional SSN, de estaciones sismológicas de Banda Ancha y por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM II-UNAM de treinta y cinco sitios para la instalación de estaciones acelerográficas. En el 2010 se concluyeron los trabajos de implementación de la primera etapa y a pesar de los avances alcanzados, se identificó la necesidad de ampliar y mejorar los objetivos, alcances y metas planteadas, así como incorporar a otras instituciones directamente vinculadas con el fenómeno sísmico.

Por otra parte aún existen diversas zonas en el país con un potencial importante para generar sismos de gran magnitud y otras que sin tenerlo, pueden ser seriamente afectadas; sin embargo la actual infraestructura para el monitoreo de los sismos es insuficiente. Adicionalmente existen redes locales sin una coordinación nacional adecuada y sin redundancia en los sistemas de transmisión de información que operan. Por lo anterior, se reconoce la necesidad de dirigir los esfuerzos hacia una segunda fase del proyecto “RSM”. Dicha fase establece la integración en una sola red nacional a las diversas instancias involucradas en el registro y monitoreo sísmico, así como la alerta de temblores. La modernización y la ampliación de la infraestructura de dichas instancias, la estandarización de los productos y el intercambio de información en tiempo real, permitirá proveer, a las autoridades competentes, de información suficiente y oportuna para una eficaz gestión del riesgo sísmico. Para esta segunda fase se estableció como primer objetivo la coordinación de acciones para la Construcción de la Plataforma de funcionamiento de la Red Sísmica Mexicana, que incluye:

- a) La elaboración de un diagnóstico y un planteamiento para reforzar, modernizar e integrar, en su caso, la estructura sísmica del país.
- b) El planteamiento y fortalecimiento del Puesto central del Servicio Sismológico Nacional y el de la red acelerográfica de la UNAM, incluyéndose la definición de un estándar nacional de las estaciones sísmicas y acelerográficas.

3.3.1. Planteamiento general de un observatorio sísmico estándar

Una estación Sismológica y una estación Acelerográfica las definiremos como un Observatorio Sísmico Estándar, sus características y requisitos mínimos que debe cubrir un Observatorio Sísmico Estándar para que pueda ser integrado a la Red Sísmica Mexicana son:



- Selección del sitio: Puede ser sobre roca o suelo firme; que cuente con seguridad, que tenga acceso al suministro de energía eléctrica y a servicios de comunicación como teléfono e internet. Las dimensiones mínimas del terreno deben ser de 12.0 m de frente hacia la calle por 8.0 m de fondo.
- Infraestructura del observatorio sísmico estándar: Deberá estar integrado por una caseta cuyas dimensiones son de 480 cm de largo x 360 cm de ancho x 260 cm de altura, con muros dobles de 30 cm de espesor, una pila de concreto, una repisa, tubos de ventilación, una puerta metálica, una puerta de madera, sistema de tierra, ductos de interconexión, mufas, pretil de azotea y herraje para montura de celdas solares y antena parabólica.
- Equipo de registro y transmisión. El equipo de registro y transmisión con que debe contar el observatorio sísmico es: en el caso de una estación sismológica un sismómetro triaxial, un acelerómetro triaxial, un receptor GPS diferencial, una antena GPS diferencial, digitalizadores, la antena GPS de los digitalizadores, equipo de comunicación para transmisión de datos en tiempo real, detector de tormentas y accesorios para la interconexión. En el caso de una estación acelerográfica un acelerómetro triaxial, digitalizador, la antena GPS del digitalizador, equipo de comunicación para transmisión de datos en tiempo real y accesorios para la interconexión.
- Sistema de comunicación: El sistema de comunicación seleccionado debe garantizar el envío de las señales generadas por los digitalizadores hasta el Puesto Central de Registro. El envío se puede hacer por medio de un enlace satelital de datos, de módems de espectro disperso, de internet a través de una institución sede, de internet a través de enlace telefónico o por cualquier otro medio que incluya el protocolo estándar TCP/IP o UDP/IP.
- Plataforma para el procesamiento e intercambio de información: La plataforma adoptada para el procesamiento e intercambio de datos entre las instituciones que formen parte de la Red Sísmica Mexicana es el sistema Earthworm, ya que además de resolver el problema de la integración de los datos de digitalizadores de diferentes marcas, Earthworm también incorpora dentro de su diseño módulos especializados que permiten el intercambio de datos entre centros de monitoreo (ref. 67).

Descripción de la infraestructura de un observatorio sísmico estándar

Es muy importante seleccionar adecuadamente el lugar en donde se va a instalar un observatorio sísmico estándar, ya que esto determinará la calidad de la información que se desea obtener, el lugar debe cumplir con ciertas características geológicas y morfológicas dependiendo del objetivo del observatorio. Si el objetivo es determinar parámetros epicentrales de un sismo, como magnitud, localización, profundidad es recomendable que el sitio en donde se instalará el observatorio sísmico cumpla con las siguientes características.

Basamento de roca firme y no fracturada, bajo nivel de ruido, que se encuentre preferentemente en un lugar alejado de poblaciones, se debe garantizar la seguridad del equipo para lo cual se recomienda que las estaciones se instalen en terrenos administrados por instancias gubernamentales, contar con servicio de energía eléctrica y de ser posible con servicio de teléfono e internet, facilidad de acceso a las instalaciones para la construcción, instrumentación y mantenimiento del observatorio.

Este debe contar con una cerca perimetral con el propósito de brindar seguridad a las instalaciones y al equipo en general, a menos que existan restricciones justificables para su construcción. El observatorio deberá quedar independiente de la cerca perimetral para facilitar los trabajos de mantenimiento al propio observatorio y a su alrededor *Figura 3.25*. Será necesario que se cuente con un murete para el medidor de energía eléctrica y telefónica, el murete deberá cumplir los requisitos que exige la Comisión Federal de Electricidad para la instalación del servicio eléctrico.

Una de las partes más importantes del observatorio sísmico estándar es la caseta cuya finalidad es resguardar los componentes que integran el observatorio, las dimensiones mínimas de la caseta deben ser 3.6 m de ancho, 4.8 m de largo y 2.6 m de alto. Dentro del observatorio debe existir una división con un muro de tabique para dejar dos cuartos independientes, el primero para el resguardo de los instrumentos: digitalizador, UPS, controlador de carga, etc.; y el segundo para los sensores: sismómetro y acelerómetro. El sistema de suministro de energía en las estaciones sismológicas podrá ser implementado utilizando celdas solares o corriente alterna comercial; y en el caso de estaciones acelerográficas se utilizará un sistema híbrido a base de celdas solares y corriente alterna comercial. Así mismo para la instalación de la antena parabólica satelital anclada a la losa de la azotea por medio de taquetes expansivos y tornillos.

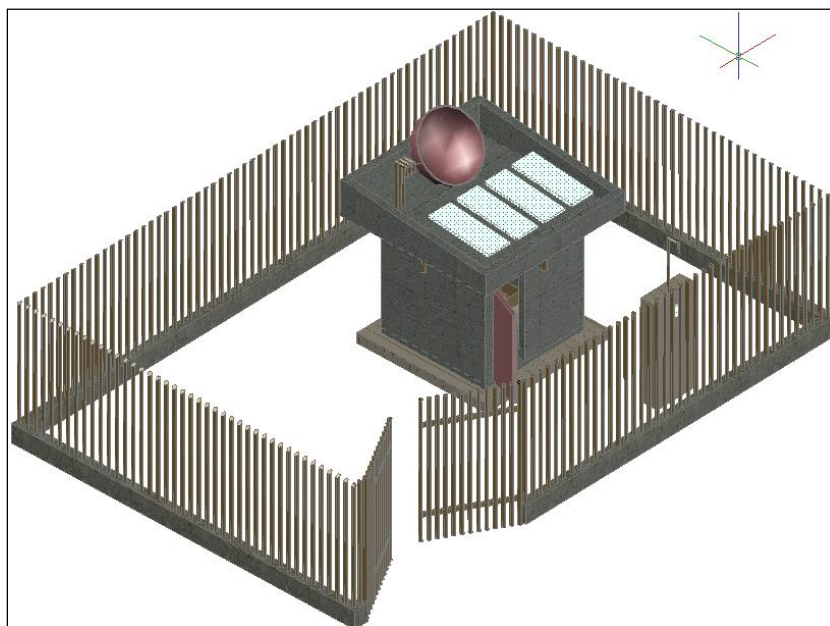
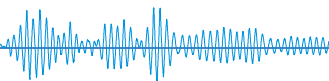


Figura 3.25 Isométrico de la cerca del observatorio sísmico estándar (ref. 68)



Especificaciones y requisitos del equipo de un observatorio sísmico estándar

La infraestructura del observatorio sísmico contempla que pueden tener equipo sismológico, acelerográfico y/o de medición de desplazamientos por medio de GPS.

Observatorio sísmico con equipo sismológico

- El registrador deberá cumplir con 3 canales de registro como mínimo, resolución del convertidor análogo digital de 24 bits reales, velocidad de muestreo variable entre 10 y 200 mps o superior, que cuente con salida digital en tiempo real por medio de un puerto y convertidor a Ethernet o salida directa Ethernet, reloj interno de tiempo real sincronizado por, temperatura de operación entre -20° a 50° C o superior. Deberá contar con capacidad de transmisión de datos en tiempo real y con un módulo de adquisición que permita la recepción de los mismos en el sistema Earthworm de procesamiento de datos sísmicos.
- Los sensores deberán cumplir con un sismómetro triaxial de banda ancha con sensibilidad de 1200 V/m/s o superior, respuesta en frecuencia plana de 0.008333 Hz (120 s) a 30 Hz ó superior y una temperatura de operación entre -20° a 50° C o superior.

Observatorio sísmico con equipo acelerográfico

- El registrador deberá cumplir con 3 canales de registro como mínimo, resolución del convertidor análogo digital de 24 bits, velocidad de muestreo variable de 100 o más muestras por segundo, que cuente con salida digital en tiempo real por medio de un puerto y convertidor a Ethernet o salida directa Ethernet, reloj interno de tiempo real sincronizado por GPS, temperatura de operación entre -20° a 60° C. Deberá contar con capacidad de transmisión de datos en tiempo real y con un módulo de adquisición que permita la recepción de los mismos en el sistema Earthworm de procesamiento de datos sísmicos.
- Los sensores deberán cumplir con un acelerómetro triaxial con sensores montados ortogonalmente con rango de los sensores entre 0.5 y 4 G², respuesta en frecuencia plana de 0.01 a 50 Hz ó superior, linealidad menor al 1% de la escala completa, rango dinámico mayor a 92 dB desde 0.01 Hz a 50 Hz, temperatura de operación entre -20° a 60° C.

Diagramas básicos de instalación para un observatorio sísmico estándar

En la *Figura 3.26* se muestran los dispositivos que deben instalarse y sus características básicas con que debe contar el equipo instalado y los cables de conexión. Se muestran los elementos que constituirán un observatorio sísmico, la trayectoria de los ductos para la instalación eléctrica, un esquema de la conexión a tierra, instalación de los sismómetros y acelerómetros al digitalizador, el regulador de voltaje, comunicación satelital y equipo detector de tormentas, rectificador de voltaje. En el caso de estaciones acelerográficas donde se utilizará un sistema de alimentación híbrido a base de celdas solares y corriente alterna comercial, también se muestra el Sistema de adquisición de datos GPS.

² G= 981 cm/s²

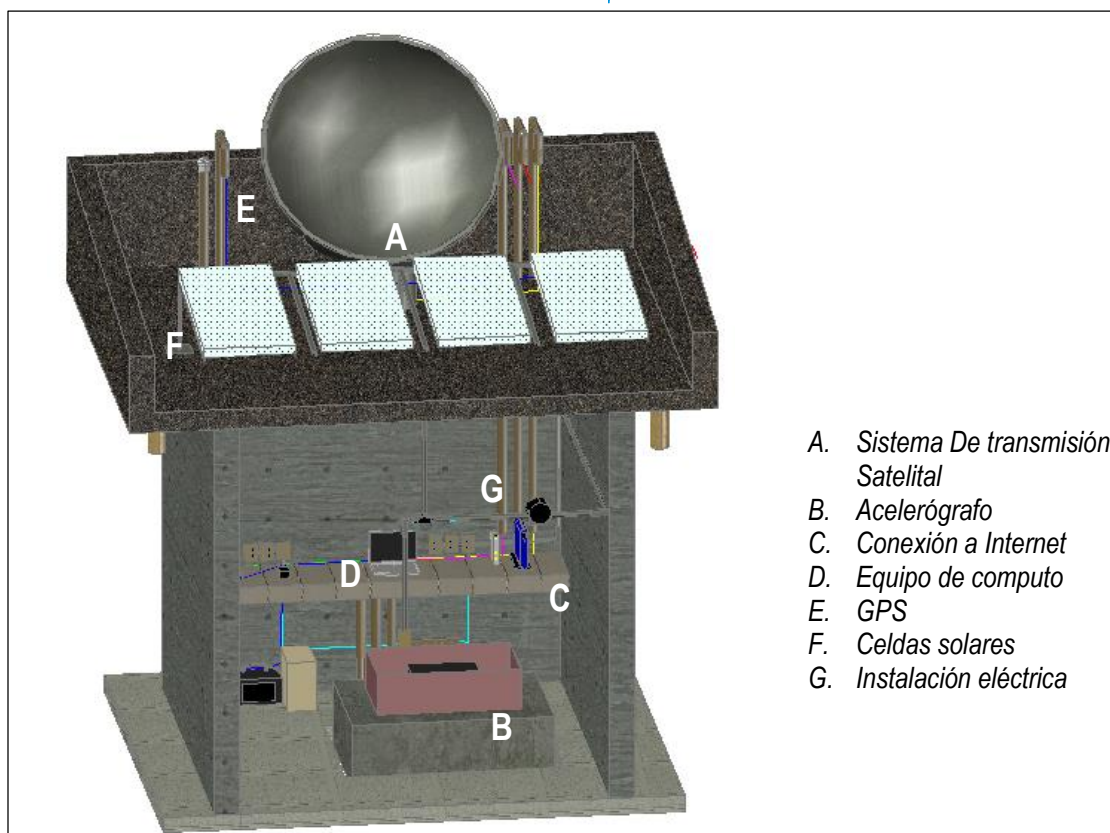


Figura 3.26 Vista general de la instalación y del equipo en un observatorio sísmico (ref. 69)

Requisitos de los sistemas de comunicación para transmisión en tiempo real

Con el objeto de cumplir con las especificaciones que requiere la Red Sísmica Mexicana de transmitir las señales de velocidad y aceleración de todas las estaciones en tiempo real a un Puesto Central de Registro, se requiere que todas las estaciones cuenten con un sistema de comunicación que pueda enviar de manera continua las señales registradas. Para la transmisión de datos en tiempo real desde un observatorio sísmico pueden emplearse alguno de los siguientes medios de comunicación, con sus respectivas variantes:

- Enlace satelital de datos
- Enlace por medio de módems de espectro disperso
- Acceso a Internet a través de una institución sede
- Acceso a Internet a través de un enlace telefónico o de cable

3.3.2. Análisis y evaluación de las estaciones sísmicas y/o acelerográficas del país

De acuerdo a la información proporcionada por las instituciones del país que cuentan con infraestructura para el registro sísmico y que aceptaron integrarse al proyecto RSM, se realizó una evaluación de la condición presente de cada una de las estaciones sísmicas. Para ello se definieron

conceptos y se estableció un valor numérico que califica a la estación. Los conceptos se describen en la siguiente *Tabla 3.12*.

Tabla 3.12 Definición de características y valor asignado para evaluar cada una de las estaciones (ref. 70)

CONCEPTO	CLAVE	CARACTERÍSTICA
Tipo de Red	SISM	Sismológica
	ACEL	Acelerográfica
	VOLC	Volcánica
	TEMP	Temporal
Características del sistema de comunicación	1	Si cuenta con sistema de comunicación para transmisión de datos en tiempo real
	0	No cuenta con sistema de comunicación para transmisión de datos en tiempo real
Evaluación de su desempeño	2	Excelente (entre 97% y 100% de disponibilidad de datos en un año)
	1	Bueno (entre 80% y 96% de disponibilidad de datos en un año)
	0	Malo (menos del 80% de disponibilidad de datos en un año)
Necesidades de modernización, y/o reforzamiento	0	Tiene necesidades de actualización
	1	No tiene necesidades de actualización
Características de definición de estación estándar	1	Cumple con las características de la definición de la estación estándar
	0	No cumple con las características de la definición de la estación estándar
Factibilidad de integrarse a Earthworm	1	Es factible de integrarse a Earthworm
	0	No es factible de integrarse a Earthworm
Viabilidad técnica	≥ 4	La estación puede integrarse a la RSM
	< 4	Analizar condiciones de la estación para poder integrarse a la RSM

Una vez hecha la evaluación, si la suma por renglón de cada estación es mayor o igual a 4 indicará que la estación tiene factibilidad de poder integrarse a la RSM, en caso de que resulte menor a 4 se tendría que evaluar bajo qué condiciones puede integrarse.

Evaluación Global de todas las Instituciones del país

En la *tabla 3.13* se resumen la evaluación de todas las redes sísmicas y acelerográficas del país, resaltando el número de estaciones que pueden ser viables para poder integrarse a la Red Sísmica Mexicana. El número total de estaciones sísmicas y/o acelerográficas de las 26 redes sísmicas y/o acelerográficas del país que aceptaron incorporarse a la RSM ascienden a 602 estaciones, de las cuales 130 cumplen con la viabilidad técnica de poder incorporarse a la Red Sísmica Mexicana *Figura 3.27*. Es importante mencionar que de las 602 estaciones en total, 52 de ellas, pertenecen al SSN y cumplen con las características de ser estación sismológica y acelerográfica a la vez. Así

mismo 162 estaciones son sismológicas, 348 acelerográficas, 19 volcánicas y 23 temporales. También se puede observar que 157 estaciones no tienen necesidad de actualización y/o reforzamiento, 56 cumplen con la definición del estándar y 180 tienen la factibilidad de integrarse al sistema *Earthworm*.

Tabla 3.13 Evaluación global del número de estaciones sísmicas y acelerográficas del país (ref. 71)

NÚMERO DE ESTACIONES													
RED	NÚMERO TOTAL DE ESTACIONES	TIPO DE RED				TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL	EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO			NO TIENEN NECESIDAD DE ACTUALIZACIÓN Y/O REFORZAMIENTO	CUMPLEN CON LA DEFINICIÓN DE ESTACIÓN ESTÁNDAR	TIENEN LA FACTIBILIDAD DE INTEGRARSE AL SISTEMA EARTHWORM	CUMPLEN CON LA VIABILIDAD TÉCNICA
		SISMOLÓGICAS	ACELEROGRÁFICAS	VOLCÁNICAS	TEMPORALES		EXCELENTE	BUENO	MALO				
UNAM-SSN-IG	(96) 44	(52) 40	(52) 0	4		96	37	45	16	80	47	95	81
UNAM-IIGEN-RA	106		106			29	25	81				29	25
UNAM-IINGEN-CR	9		9					9					
UAGRO	2		2					2					
UDG	13	13				13		13					
CCT-UV	8	8							8				
UNACH	2		2					2					
II-UV	23				23			23					
AZC-UAM	6		6					4	2				
UAQ	3		3					3					
UMICH	3		3						3				
UCOLIMA	22	22				8		22				8	
SISVOC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UANL	2	2				2	2			2	2	2	2
IEPC-TLAX	6	6						6					
UNICACH	10	4		6		10	4	6		4	4	10	4
CCS	3	3				1	2	1		1	1	1	1
JURIQUILLA	20	20				1	2	18		1	1	1	1
RIIS	11		11					11					
UPAEP	2		2					2					
CENAPRED	26		17	9		21	6	20				21	6
CFE	28		28			12	13	14	1			12	2
UADY	1	1				1	1			1	1	1	1
UES	3	3						3		3			
CICESE	72	38	34			51	9	63		32			7
UAA	2		2				2			2			
CIRES	123		123			123	49	74		31			
TOTAL	602	162	348	19	23		152	422	30	157	56	180	130

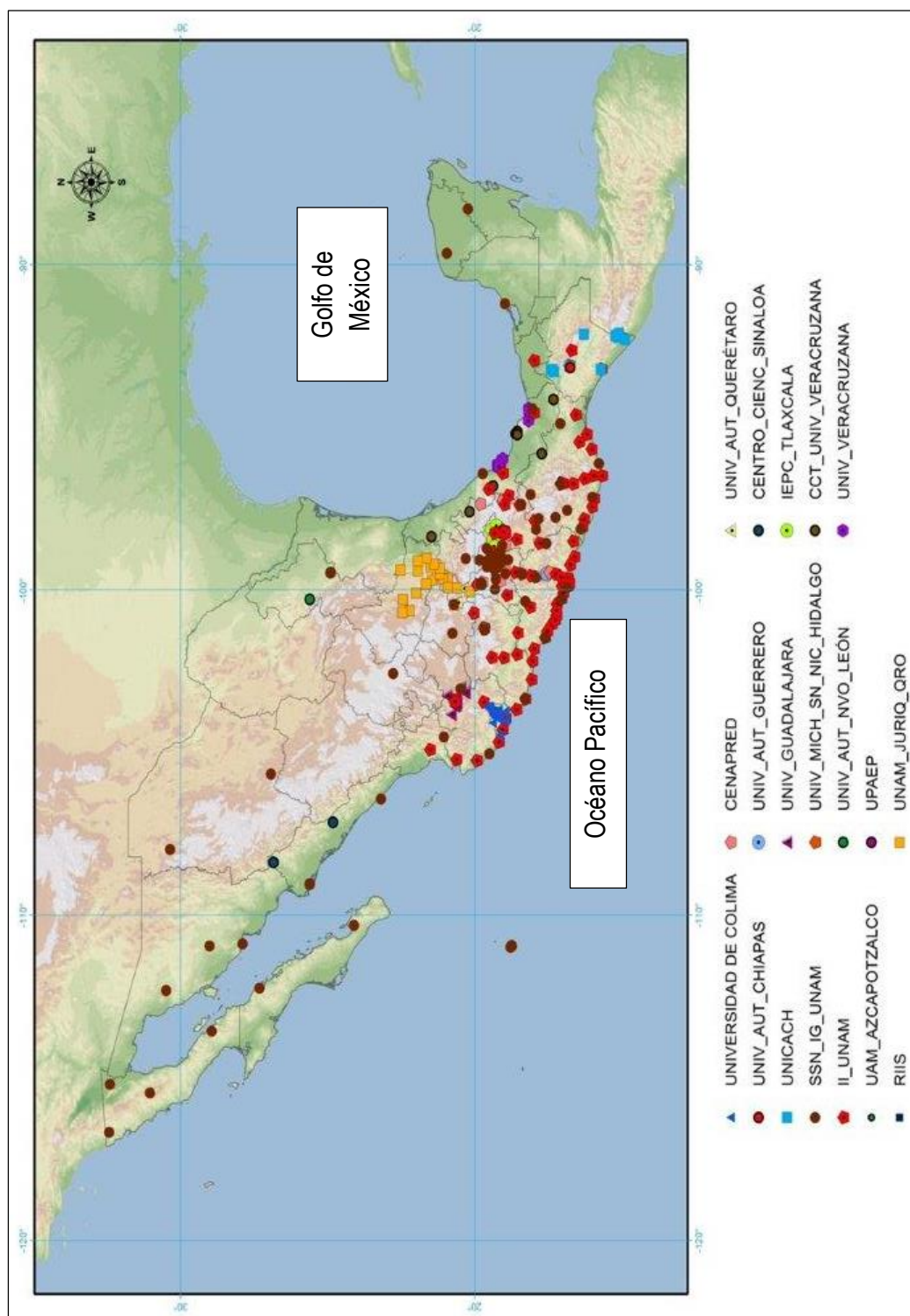
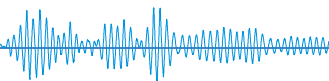


Figura 3.27 Estaciones con factibilidad técnica para integrarse a la Red Sísmica Mexicana (ref. 72)



3.3.3. Integración de Estaciones Sismológicas y Acelerográficas a La Red Sísmica Mexicana

El objetivo primordial es definir las necesidades del país para ampliar la infraestructura sísmica actual e integrar las redes sísmicas. Con base en los resultados del diagnóstico de la situación actual de las redes sísmicas y acelerográficas, se hace un planteamiento para ampliar, reforzar e integrar las redes sísmicas del país. Este planteamiento contiene el número de estaciones requeridas, características y distribución para contar con una cobertura nacional, un esquema de comunicaciones para la transmisión y recepción de los datos de las estaciones con los puestos centrales de registro.

Para considerar una cobertura nacional, es necesario que los estados de: Aguascalientes, Coahuila, Durango, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas y Tlaxcala, cuenten con una estación sismológica de acuerdo a la definición de OSE. Por otra parte, los estados de la costa Pacífico como Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, están sujetos a una mayor sismicidad y por tanto a un mayor peligro sísmico. En estos estados es importante tener más estaciones sismológicas, para constituir una subred. Los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas, ya cuentan con al menos 4 estaciones en cada uno de ellos.

El total de estaciones con las que cuenta el país es 602, de las cuales el 60% transmite los datos medidos en tiempo real, aproximadamente el 70% son acelerográficas, y poco más de la mitad tienen un desempeño bueno. En general, menos del 10% de las estaciones cumplen con la definición de estación estándar u Observatorio Sísmico Estándar (OSE). Sólo del orden del 20% cumplen con la viabilidad técnica de poder incorporarse a la RSM; el resto de las estaciones no cumplen con la viabilidad técnica para poder integrarse a la RSM por alguna de las siguientes causas: 1) no cuentan con sistemas de comunicación para transmisión de datos en tiempo real, 2) la evaluación de su desempeño no fue buena, 3) tienen necesidades de actualización y reforzamiento del equipo e infraestructura, y 4) no cuentan con la factibilidad de integrarse al sistema Earthworm. Es importante mencionar que de las 602 estaciones, 52 pertenecen al SSN y cumplen con las características del OSE. Sólo 130 estaciones cumplen con viabilidad técnica de integración, sin embargo, se hace notar que aun incluyéndose a la Red, existirían zonas del país donde la cobertura no sería satisfactoria. Muchas de las estaciones que no calificaron para integrarse a RSM, tienen ubicaciones estratégicas para la observación y registro de sismos, por lo que para su inclusión requerirían de la infraestructura necesaria para convertirlas a OSE.

El proyecto RSM, considera la integración de una Red Nacional con una base de 244 OSE para la determinación de los parámetros fundamentales de los sismos (profundidad, epicentro y magnitud) con magnitudes (M) mayores a 3.7, en todas las regiones del país, y garantizar en tiempo y forma que los mapas de parámetros de movimiento del terreno o intensidades se generen. Con base en los resultados del diagnóstico de la situación actual de las redes sísmicas y acelerográficas, así como del estándar definido, y el requerimiento expreso de tener cobertura nacional, se consideraron los siguientes lineamientos para la integración de la Red Sísmica Mexicana:

- Se integran como Observatorios Sísmicos Estándar (OSE) todas las estaciones con viabilidad técnica.
- Se integran estaciones ya existentes cercanas a poblaciones con más de 50,000 habitantes de todas las redes del país que por su ubicación geográfica pueden aportar datos valiosos para la generación de los mapas de intensidad en tiempo real.
- Se incluyen estaciones nuevas que por su ubicación geográfica respecto de las anteriores, pueden aportar datos valiosos para la generación de los mapas de intensidad en tiempo real, aun cuando no se ubiquen dentro de poblaciones con más de 50,000 habitantes.
- Se incluyen estaciones cercanas a las capitales y las tres ciudades más pobladas (además de la capital) de cada estado.
- Se instalará preferentemente una estación en ciudades, municipios o delegaciones del país, donde la población sea mayor a un millón de habitantes.
- Se instalarán OSEs en las ciudades fronterizas más importantes del norte y sur de nuestro país.
- Se instalarán OSEs en las 5 islas y 5 volcanes más importantes del país.

De las 244 estaciones de registro sísmico a lo largo del país, 59 ya cumplen con la definición de OSE, las 185 restantes deberán ser modernizadas total o parcialmente para poder ser integradas a la RSM. Es evidente que existen zonas donde la cobertura puede mejorarse ampliando los criterios de selección que consideran lugares estratégicos, exposición de la población e infraestructura al peligro sísmico, la *figura 3.28* muestra el conjunto de estaciones seleccionadas, en términos generales la cobertura es más densa en las regiones noroeste, centro y sur, lo cual es congruente con la sismicidad histórica en nuestro país.

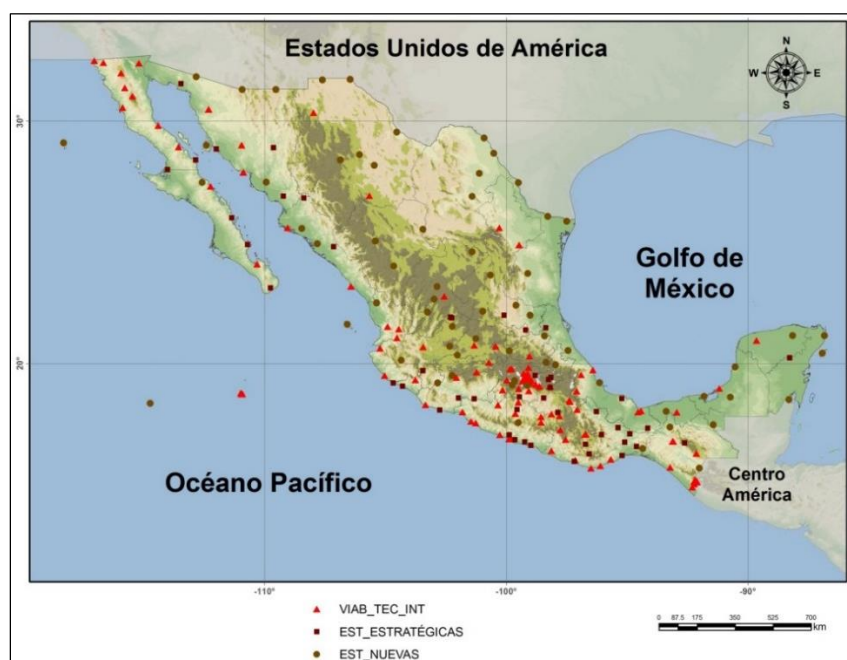
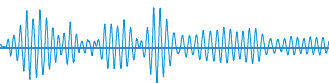


Figura 3.28 Total de estaciones propuestas sin el área de influencia (ref. 73)



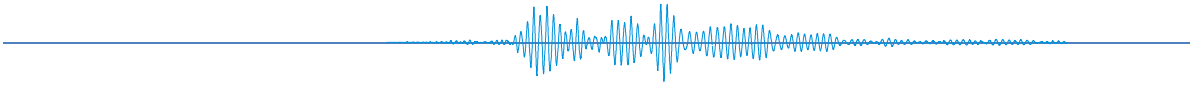
Se han establecido 4 grupos para las 224 estaciones:

A: Integrado por 59 estaciones que prácticamente cumplen con las características del OSE, sin embargo dada la obsolescencia del equipamiento se requiere su modernización y el reforzamiento, incluyendo los sensores (tanto de velocidad como de aceleración), registrador, GPS estático diferencial, sistema de alimentación, transmisión y recepción de la señal satelital desde el OSE a los PCRs.

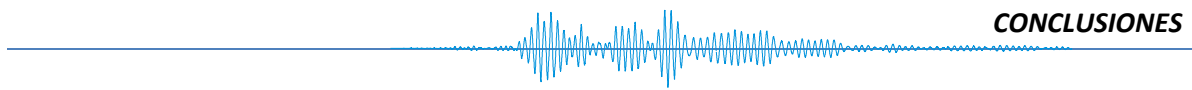
B: Se requiere la construcción de 71 OSEs en sitios donde ya ha existido una estación sismológica y/o acelerográfica, y que por el diagnóstico realizado resultaron con viabilidad técnica para poder integrarse a RSM.

C: Incluye 48 estaciones, que por su ubicación geográfica resultaron estratégicas para lograr una mejor cobertura en el territorio nacional.

D: Considera las 66 estaciones nuevas propuestas para lograr una mejor cobertura a nivel nacional. Al ser OSEs nuevos y para lograr su integración a la RSM habrá que considerar las siguientes actividades; Selección del sitio, tramitación de permisos, obtención del documento que ampare la compra o donación del sitio seleccionado, construcción del OSE, instalación del sistema de alimentación, instalación del equipamiento y periféricos, instalación del GPS para medición estática, instalación del sistema de transmisión y recepción de datos en forma satelital desde el OSE a los PCRs.



CONCLUSIONES



Para dar cumplimiento al objetivo se hace un diagnóstico de las redes Sísmicas y Acelerográficas del país donde se dió a conocer la infraestructura actual para el registro y monitoreo de sismos, se identificaron las necesidades de ampliación, modernización, reforzamiento e integración en tiempo real de las redes sísmicas y acelerográficas del país a la Red Sísmica Mexicana.

Las Instituciones del país que operan sistemas de registro sísmico proporcionaron información de sus estaciones y/o redes sísmica para la realización de un catálogo de estaciones sísmicas y acelerográficas operadas por los mismos, los catálogos incluyen las coordenadas geográficas, ubicación, nombre y clave de la estación, año de instalación, marca y modelo de los sensores y registradores, características de los sistemas de comunicación, fotografías, estado de operación y evaluación de su desempeño, necesidades de actualización y/o reforzamiento.

Se generó un inventario actualizado de la infraestructura de estaciones existentes a nivel país, lo que permitirá tener un panorama de la infraestructura actual para el registro y monitoreo de sismos para identificar las necesidades de ampliación, modernización, reforzamiento e integración en tiempo real de las redes acelerográficas del país; una vez hecho el análisis y evaluación, se realizó el diagnóstico; mismo que permitió elaborar el planteamiento de las necesidades del país para ampliar la infraestructura sísmica actual e integrar las redes sísmicas y/o acelerográficas a la Red Sísmica Mexicana.

Al integrar la información de las redes sísmicas y acelerográficas del país que mostraron interés en participar en la Red Sísmica Mexicana, se llegó a un total de 604 estaciones, sólo el 20% cumplen con la viabilidad técnica de poder incorporarse a la Red Sísmica Mexicana; el resto no lo hacen debido a: no cuentan con sistemas de comunicación para transmisión de datos en tiempo real, la evaluación de su desempeño no fue buena, tienen necesidades de actualización y reforzamiento de su infraestructura física y/o de computo, no cumplen con la definición de la estación estándar.

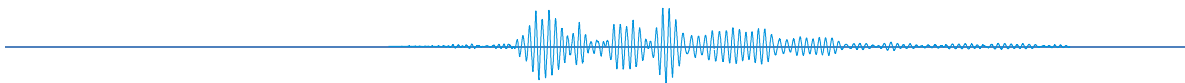
Aún cuando los resultados obtenidos en el diagnóstico, incluyen 130 estaciones con viabilidad técnica de poder incorporarse a la Red Sísmica Mexicana, se aprecia que todavía existen zonas del país donde hace falta cobertura. Algunas de las estaciones que no calificaron para integrarse a Red Sísmica Mexicana tienen ubicaciones estratégicas para la observación y registro de sismos, por lo que para su inclusión requerirán de la infraestructura necesaria para convertirlas a la estación estándar y por consiguiente se deberá actualizar y reforzar su equipo de registro, o su sistema de alimentación y transmisión de datos.

Como estrategia para tener una mayor cobertura en todo el país se ubicaron 66 nuevos sitios para la instalación de nuevas estaciones con las características y requisitos descritos para un observatorio sísmico estándar. Es importante destacar que la selección adecuada de los sitios garantizará la calidad de las señales registradas y enviadas al Puesto Central de Registro, el cumplimiento de los requerimientos de infraestructura así como las instalaciones adicionales consideradas permitirán asegurar los bienes materiales, además de garantizar el envío continuo de las señales registradas en tiempo real.

El procesamiento e intercambio de información entre los centros de registro que se integren a la Red Sísmica Mexicana deberá cumplir con la plataforma establecida, con el propósito de garantizar la comunicación entre estos.

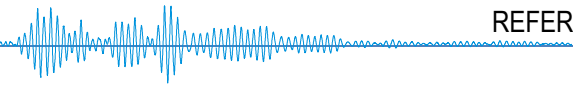
Se hace un planteamiento de 244 estaciones con las que se logrará tener una cobertura a nivel nacional. Lo que permitirá mejorar la determinación de los parámetros epicentrales (localización, profundidad y magnitud) para sismos con magnitud mayor a 3.7. De igual forma los mapas de intensidad sísmica en tiempo real se generarán con mayor certidumbre.

Finalmente, es importante señalar que México tiene un alto potencial sísmico para generar sismos de gran intensidad, mismos que pueden poner en grave riesgo a la población e infraestructura nacional, por lo que los esfuerzos actuales para mejorar la observación sísmica en el país son una tarea prioritaria. Es fundamental destacar que la medición del fenómeno sísmico es una actividad indispensable que permitirá recolectar información para la realización de estudios que tiendan a mitigar sus efectos.

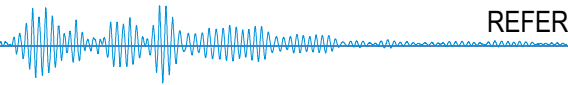


REFERENCIAS

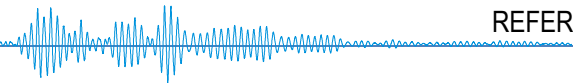




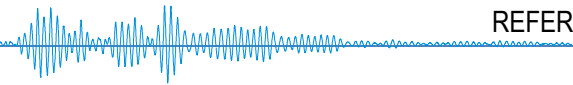
1. Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED, (2011), *Fascículo: Sismos*, Secretaria de Gobernación, México D.F.
2. *Ídem*.
3. Nava A, (1998), *Terremotos*, Fondo de Cultura Económica, México.
4. Espíndola J, (1990), *Las catástrofes Geológicas*, Instituto de Geofísica UNAM.
5. Fundación ICA, (1988), *Experiencias derivadas de los sismos de Septiembre de 1985*, Noriega Editores, México.
6. Bolt B, (1978), *Earthquakes*, University of California Berkeley, W. H. Freeman and Company, New York.
7. *Ídem*.
8. Solís E, (1990), *Descripción Geográfica del Océano Pacífico*, Liga Marítima de Chile.
9. Bolt B, (1978), *Op. Cit.*
10. Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED, (2011), *Op. cit.*
11. Fundación ICA, (1988), *Op. Cit.*
12. Bolt B, (1978), *Op. Cit.*
13. *Ídem*.
14. Nava A, (1998), *Op. cit.*
15. Bolt B, (1978), *Op. Cit.*
16. *Ídem*
17. Salinas G, (2010), *Fundamentos de Sismología*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
18. *Ídem*.
19. Fundación ICA, (1988), *Op. Cit.*
20. Nava A, (1998), *Op. cit.*
21. Fundación ICA, (1988), *Op. Cit.*
22. Hanks T, Kanamori H, (1979), *Moment magnitude scale*, Journal of Geophysical Research.
23. Choy G, Boatwright J, (1995), *Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress*, Journal of Geophysical Research.
24. Nava A, (1998), *Op. cit.*
25. Servicio Sismológico Nacional, Temas de Sismología, (1997), *Regiones Sísmicas en México*, Instituto de Geofísica UNAM, http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/region_sismica_mx.jsp.
26. Kostoglodov V, Pacheco J, (1999), *Cien años de sismicidad en México*, Instituto de Geofísica UNAM.
27. *Ídem*.
28. Alcántara L, (2012), *Sistemas de Monitoreo Sísmico*, Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, México.
29. Kostoglodov V, Pacheco J, (1999), *Op. Cit.*



30. Servicio Sismológico Nacional, (2014), *Sismicidad ocurrida en el territorio nacional en el periodo 01 Enero 2013 al 31 Diciembre 2013*, Instituto de Geofísica UNAM, México.
31. Okal E, Borrero J, (2011), *The tsunami earthquake of 22 June 1932 in Manzanillo, Mexico: seismological study and tsunami simulations*, Geophysical Journal International.
32. Quintana J. Aguirre J. Rodríguez J. (2011), *Depósito de avalancha de escombros del volcán Temascalcingo en el graben de Acambay, Estado de México*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, México.
33. Servicio Sismológico Nacional, (1990), *Historia del desarrollo sismológico en México, Sismos en la Ciudad de México y el terremoto del 19 de Septiembre de 1985*, Instituto de Geofísica UNAM, <http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/reportes.jsp>.
34. Servicio Sismológico Nacional, (2012), *Reporte de sismos de 1990 al 2012*, Temas de Sismología, Instituto de Geofísica UNAM, <http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/sismologia.jsp>.
35. Espíndola J, (1994), *Terremotos y Ondas Sísmicas, Sismógrafos y sismogramas*, Instituto Geofísica, UNAM.
36. Espíndola J, Jiménez Z, (1995), *La sismología y los sismos de Michoacán de Septiembre de 1985*, México.
37. *Ídem*.
38. Alcántara L, (2012), *Infraestructura fundamental para la integración de la Red Sísmica Mexicana y la red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM*, Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, México.
39. *Ídem*.
40. Alcántara L, (2013), *Tesis doctoral Análisis de movimientos sísmicos en las ciudades de Oaxaca y Puebla con Redes Neuronales*, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería UNAM.
41. Fundación ICA, (1988), *Op. Cit.*
42. Kinemetrics Inc, Altus K2, *High Dynamic Range Accelerograph, Operations manual*.
43. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, (2012), *Entrega de un diagnóstico de toda la infraestructura sísmica del país que permita hacer un planteamiento de las necesidades de ampliación, modernización, reforzamiento e integración y concentración de información en tiempo real*, Diagnóstico de las redes sísmicas y acelerográficas del país, Informe elaborado para la Secretaría de Gobernación bajo el convenio específico de colaboración para la construcción de la Plataforma de funcionamiento de la Red Sísmica Mexicana "RSM" segunda fase, celebrado entre las Secretaría de Gobernación y la UNAM, II-UNAM, México.
44. Alcántara L, (2012), *Op. Cit.*



45. Alcántara L, Alcocer S, Almora D, Torres M, Sandoval H, Macías M, Vázquez R, Ayala M, Velasco J, Castro G, (2007), *Instalación y puesta en marcha de 35 estaciones acelerográficas con equipo sísmico especializado de la Red Sísmica Mexicana*, Informe elaborado para la Secretaría de Gobernación convenio SEGOB-UNAM 20305-820-20-VI-07, Instituto de Ingeniería UNAM.
46. *Ídem.*
47. Ayala M, Alcántara L, Almora D, Aguilar L, Molina I, Torres M, Vázquez R, Sandoval H, Macías M, (2005), *Implementación de la Red Acelerográfica del Centro Cultural Universitario Tlatelolco México*, Instituto de Ingeniería.
48. *Ídem.*
49. *Ibidem.*
50. Alcántara L, Almora D, Macías M, Castro G, Velasco J, Torres M, Vázquez R, Ayala M, Pérez C, Sandoval H, Vázquez E, Ruíz A, (2005), *La Red de Registros de sismos fuertes en el Instituto de Ingeniería de la UNAM pasado presente y futuro*, Instituto de Ingeniería UNAM.
51. Tena A, (1997), *El macrosismo de Manzanillo del 9 de Octubre de 1995*, Universidad de Colima, México.
52. Servicio Sismológico Nacional (2000), Red de estaciones Sismológicas, *Historia de la instrumentación sismológica en México*, Instituto de Geofísica UNAM, <http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/sismologia.jsp>.
53. *Ídem.*
54. Alcántara L, Almora D, Macías M, Castro G, Velasco J, Torres M, Vázquez R, Ayala M, Pérez C, Sandoval H, Vázquez E, Ruíz A, (2005), *Op. Cit.*
55. Alcántara L, Quaas R, Pérez Citlalli, Javier C, Flores A, Mena E, Espinosa J, López B, Cuellar A, Camarillo L, Gonzales F, Guevara E, Ramírez M, Vidal A, Ramos S, Macías M, (2001), *La Base Mexicana de Sismos Fuertes. Un sistema de CD-ROM para la obtención de acelerogramas de 1960 a 1999*, 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, AIBIS, España.
56. Alcántara L, Almora D, Macías M, Castro G, Velasco J, Torres M, Vázquez R, Ayala M, Pérez C, Sandoval H, Vázquez E, Ruíz A, (2005), *Op. cit.*
57. Medina F, Delgado L, Suárez G, (1995), *La Sismología en México; 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985*, Instituto de Geofísica UNAM.
58. Alcántara L, Almora D, Macías M, Castro G, Velasco J, Torres M, Vázquez R, Ayala M, Pérez C, Sandoval H, Vázquez E, Ruíz A, (2005), *Op. cit.*
59. *Ídem.*
60. Centro de Instrumentación y Registro Sísmico CIRES, (2010), *Red Acelerográfica de la Ciudad de México, Distribución y funcionamiento de las redes*, http://www.cires.mx/racm_es.php.
61. Quaas R, Medina S, Alcántara L, Javier C, Espinosa J, Mena E, Otero J, Contreras O, Munguía L, (1995), *Catálogo de Acelerogramas 1960-1993*, Base Nacional de datos de Sismos fuertes, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.



62. Alcántara L, Quaas R, Pérez C, Ayala M, Macías M, Sandoval H, Javier C, Mena E, Andrade E, González F, Rodríguez E, Vidal A, Munguía L, Luna M, Espinoza J, Cuellar A, Camarillo L, Ramos S, Sánchez M, Guevara E, Flores J, López B, Ruiz R, Pacheco J, Ramirez M, Aguilar J, Juarez J, Vera R, Gama A, Cruz R, Hurtado F, Del Campo R, Vera F, *Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF)*, CD vol. 2, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.
63. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, (2012), *Entrega de un diagnóstico de toda la infraestructura sísmica del país que permita hacer un planteamiento de las necesidades de ampliación, modernización, reforzamiento e integración y concentración de información en tiempo real, Diagnóstico de las redes sísmicas y acelerográficas del país*, Informe elaborado para la Secretaría de Gobernación bajo el convenio específico de colaboración para la construcción de la Plataforma de funcionamiento de la Red Sísmica Mexicana “RSM” segunda fase, celebrado entre las Secretaría de Gobernación y la UNAM, II-UNAM, México.
64. *Ídem*.
65. *Ibidem*.
66. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, (2011), *Definición de un estándar nacional de las estaciones sísmicas y acelerográficas para su integración a la red sísmica mexicana*, Informe elaborado para la Secretaría de Gobernación bajo el convenio específico de colaboración para la construcción de la Plataforma de funcionamiento de la Red Sísmica Mexicana “RSM” segunda fase, celebrado entre las Secretaría de Gobernación y la UNAM, Instituto de Ingeniería II-UNAM, México.
67. *Ídem*.
68. *Ibidem*.
69. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, (2012), *Op. Cit.*
70. *Ídem*.
71. *Ibidem*.
72. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, (2013), *Planteamiento para la integración de la Red Sísmica Mexicana segunda fase*, Informe elaborado para la Secretaría de Gobernación bajo el convenio específico de colaboración para la construcción de la Plataforma de funcionamiento de la Red Sísmica Mexicana “RSM” segunda fase, celebrado entre la Secretaría de Gobernación y la Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería II-UNAM, México.