



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

VIABILIDAD DE UNA ALERTA SÍSMICA  
TEMPRANA PARA LA CIUDAD DE MÉXICO  
USANDO LA RED DEL SERVICIO SISMOLÓGICO  
NACIONAL

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERA GEOFÍSICA**

P R E S E N T A:

**RUBÍ ERÉNDIRA SÁNCHEZ CEDILLO**



DIRECTOR DE TESIS:  
**DR. ARTURO IGLESIAS MENDOZA**

MÉXICO, D.F.

2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

*A Chemita, Luli y Reyna,  
la mejor familia.*

## Agradecimientos

*GRACIAS...*

A mi ser supremo, DIOS, gracias estar conmigo a cada paso, la vida, la familia y los amigos que me ha dado.

A mis papás María De Lourdes Cedillo y José María Sánchez. Han sido ejemplo de vida y esfuerzo para salir adelante ante las adversidades. Saben que son mi principal motor, gracias por apoyarme siempre en todo!

A mi hermanita Reyna, gracias por tu ayuda incondicional, siempre he confiado en ti, sabes lo mucho que te quiero y te admiro. Nuestras vidas han cambiado, a pesar de eso espero que sigamos tan unidas como siempre.

A mis ángeles en el cielo, por estar siempre presentes aunque no las pueda ver.

A mis padrinos Adán y Esperanza, por todo el apoyo y por la gran labor que como segundos padres han realizado.

A mis tíos Queta, Magos, Temo, Mari por el amor que me tienen y me han mostrado de tantas formas. Los quiero mucho!

A mis primos Javi, Vero y Beni porque compartimos una maestra inolvidable quien nos hizo HERMANOS.

A mis primos Kike, Dulce y Jorge por todas las risas y momentos compartidos.

A mis amigos de la ENP No. 6, Noemí, Oscar y en especial a Alejandra mi amiga desde la cuna. TQ

A mis compañeros de carrera por los divertidos momentos que compartimos en las clases y prácticas. Muy especialmente a mi amiga Gloria en quién encontré una estupenda aliada.

Al Dr. Arturo Iglesias quien en la realización de esta tesis confió en mí, me apoyó en todo y además es uno de los mejores profesores que he tenido. En este tiempo me has enseñado mucho.

Al Instituto de Geofísica de la UNAM por el apoyo económico que me brindó para la realización de esta tesis.

Al proyecto FOPREDEN-DDF # SPC/004/2007 "Determinación temprana de la magnitud de temblores para grandes amenazas sísmicas en la ciudad de México".

A mis amigas del equipo *Escorpionas Rojas de la Facultad de Ingeniería*, en especial a Aye y a Isa, porque a lo largo de este último año confirmaron que todo sale mucho mejor si se unen esfuerzos. Vamos nenas!

A los doctores Jorge Aguirre González, Xyoli Pérez Campos, Sara Ivonne Franco Sánchez y al M. en C. David Escobedo Zenil por el tiempo dedicado a este trabajo, gracias a ellos esta tesis es un mejor producto.

Por último y no menos importante, a la UNAM, mi alma máter.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>3</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
I.1 Antecedentes.....	5
I.1.1. Sistemas de alerta temprana en el mundo.....	5
I.1.2 El Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México (SAS).....	6
I.1.3 Antecedentes en la operación del SAS.....	8
<b>II. SITUACIÓN ACTUAL DE LA RED DEL SSN .....</b>	<b>10</b>
II.1 Historia.....	10
II.2 Red Sísmológica Nacional .....	12
II.2.1 Red de Banda Ancha .....	13
II.3 Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería .....	16
<b>III. MARCO TECTÓNICO Y PELIGRO SÍSMICO PARA LA CD DE MÉXICO .....</b>	<b>19</b>
III.1 Placas tectónicas y sismicidad histórica del centro y sur de México.....	19
III.2 Sismos históricos relevantes para la Ciudad de México .....	24
III.3 La brecha sísmica de Guerrero. ....	30
III.4 Sismo del 19 de Septiembre de 1985 .....	32
III.5 Marco Tectónico de la cuenca del Valle de México .....	34
III.6 Peligro Sísmico para la Ciudad de México .....	35
<b>IV. RELACION ENTRE ARMS Y AMAX OBSERVADA EN CU.....</b>	<b>37</b>
IV.1 Obtención de las bases de datos .....	37
IV.1.1 Formatos de los registros sísmicos.....	38
IV.1.2 Conversión de datos.....	38
IV.2 Estimación de la aceleración máxima en CU ( $A_{CU}$ ) .....	39
IV.2.1 Análisis del catálogo.....	42
IV.3 Cálculo de la aceleración estimada en CU ( $A_{red}$ ).....	45

IV.3	Fallos y falsas alertas.....	54
IV.4	Ajuste de los datos con respecto a Rs .....	57
<b>V.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN EN TIEMPO REAL.....</b>	<b>60</b>
V.1	Instalación, operación y mantenimiento de redes sismológicas con transmisión telemétrica.....	60
V.2	Sistema VSAT .....	61
V.3	Herramientas para el procesamiento de los registros sísmicos.....	63
V.3.1	Earthworm.....	63
V.4	Tiempo de ventaja ( $T_v$ ) .....	64
V.5	Acerca de la implementación en tiempo real.....	69
<b>VI.</b>	<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>71</b>
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>74</b>
	<b>APÉNDICE.....</b>	<b>80</b>

---

---

## RESUMEN

Actualmente existe un sistema de alerta sísmica para la Ciudad de México, el SAS (Sistema de Alerta Sísmica). La evaluación de este sistema ha demostrado un alto índice de fallos o alertas falsas, teniendo un porcentaje de efectividad menor al 50%.

Basado en la propuesta de Iglesias *et al.* (2007), en este trabajo se plantea una estrategia alternativa de alerta temprana de sismos que puedan afectar a la Ciudad de México. Esta estrategia se basa en la medición de aceleraciones máximas en la estación CUIG (ubicada en la Ciudad de México, en Ciudad Universitaria, CU). Las aceleraciones registradas para un evento se encuentran fuertemente ligadas a la percepción que tiene la gente acerca de la intensidad de un movimiento sísmico. Los registros que se utilizaron corresponden a temblores cuya magnitud fue  $M_w \geq 5$  y que se localizaron a menos de 600 kilómetros de distancia de CU. Los eventos analizados abarcan el periodo del 1° de enero del 2000 al 31 de mayo del 2008. Fueron procesados un total de 194 registros correspondientes a 75 eventos sísmicos.

En este trabajo se define y se realiza la comparación entre la aceleración cuadrática media en las estaciones que se localizan a no más de 250 kilómetros de distancia del epicentro ( $A_{rms}$ ), y la aceleración máxima esperada en CU ( $A_{red}$ ), pues es éste el lugar que se toma como sitio de referencia. Durante el procesamiento de los datos, con el objetivo de definir  $A_{red}$ , se calculó la aceleración máxima en CU ( $A_{CU}$ ). Se utilizó un filtro pasabanda de 0.1-2.0 Hz, ya que esta banda de frecuencias se relaciona con la amplificación de las ondas sísmicas en la zona de lago de la cuenca del Valle de México, dicha zona es donde se han presentado los daños más considerables ocasionados por los sismos.

La ecuación propuesta por Iglesias *et al.* (2007) fue utilizada para realizar la regresión con los datos de este trabajo, pero se tuvo que replantear pues los resultados obtenidos mostraban un nivel alto de dispersión. Con la finalidad de mostrar que el nuevo modelo de regresión fuera mejor al utilizado primero, se realizó una prueba de hipótesis para comprobar cuál de los dos modelos exhibe un mejor funcionamiento. Habiendo definido el dicho modelo, se estableció un umbral a partir del cual se dispararía la eventual alerta y que, además, garantiza un 80% de efectividad del sistema. El escenario ideal para la implantación de este nuevo sistema es contar con estaciones sísmicas cada 50 kilómetros, formando semicírculos cuyo centro se localice en la Ciudad de México. Aunque este precepto no se cumple, aún así, considerando el escenario actual, si un sismo ocurre en la brecha de Guerrero, el tiempo de ventaja para la ciudad de México sería de aproximadamente 60 segundos.

## I. INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años se sabe de la alta sismicidad que afecta el Valle de México. Si bien el Valle de México se encuentra a una distancia importante (~300 km) de la trinchera de subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la Norteamericana, las características particulares del subsuelo de la Ciudad de México influyen de forma notable a las repercusiones que pueda tener un temblor en esta región.

Singh *et al.* (1981) definieron cinco brechas o *gaps* sísmicos en la costa del Pacífico, y mencionaron que se esperaba se presentara la ruptura de alguno o algunos de ellos en un tiempo no muy lejano, la comprobación para su trabajo no tardó demasiado.

El 19 de Septiembre de 1985 ocurrió la ruptura del *gap* de Michoacán, este evento derivó en la que es, probablemente, la mayor tragedia vivida por los habitantes de la Ciudad de México. A las 7:19 AM (hora local) se registró un sismo de magnitud ( $M_w=8.0$ ) que provocó el colapso de un gran número de construcciones en la ciudad provocando la muerte de más de 10,000 personas, más de 30,000 heridos y pérdidas por 3000 millones de dólares. En teoría, la gran distancia entre la zona epicentral y la Ciudad de México (~400 km) hubiera sido suficiente para que las ondas sísmicas se atenuaran de tal manera que el sismo no provocara daños. Sin embargo, las condiciones del terreno de lo que alguna vez fue un lago, provocó, en sentido contrario, una amplificación de las ondas sísmicas provocando el colapso de varias construcciones.

Actualmente, se tiene identificada la brecha sísmica de Guerrero, la cual tiene un alto potencial sismogénico (Singh *et al.*, 1981). Esta brecha se localiza a poco menos de 300 kilómetros del Valle de México, en línea recta. Las consecuencias que podrían ser provocadas por su ruptura serían comparables, e incluso peor, que las vividas en 1985.

En respuesta a este riesgo latente, Espinosa Aranda *et al.* (1989) diseñaron en el sistema de alerta temprana SAS, que empezó a funcionar en 1991. Este sistema emite una alerta sísmica temprana para la Ciudad de México de aproximadamente 60 segundos. Una limitante del sistema es, sin duda, que sólo se enfoca a sismos cuyo epicentro se ubica en la costa de Guerrero; sin embargo, como se sabe, los sismos que afectan a la Ciudad de México se producen a lo largo de la costa del Pacífico mexicano. Además esta la ocurrencia de sismos profundos ubicados por debajo de la región central de México (p. ej. el sismode Oaxaca de 1999, Singh *et al.*, 2000)

Una forma de monitorear la actividad sísmica de la zona antes mencionada ha sido mediante la instalación de varias estaciones acelerográficas y sísmicas controladas por instituciones como los Institutos de Ingeniería y Geofísica de la UNAM.

El objetivo principal de este trabajo es la mitigación del riesgo sísmico por medio del planteamiento de una estrategia distinta a la actual para la creación de un sistema de alerta temprana, el cual no se centre únicamente en una región de la trinchera de subducción, sino que abarque la mayor parte de la zona de gran actividad sísmica.

Por este motivo el trabajo se ha dividido en tres secciones principalmente. La primera se planteó con el fin de proporcionar el marco general de la zona de estudio. La segunda parte consiste en la descripción de la metodología utilizada para el manejo de los datos de la Red de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional (SSN), los cálculos realizados, los resultados obtenidos y su análisis. La tercera sección presenta las bases para la futura implantación de esta propuesta alternativa de alerta temprana para la Ciudad de México así como la discusión y conclusiones.

## **I.1 Antecedentes**

Esta sección muestra las características de manera muy general de los sistemas de alerta temprana que funcionan actualmente en el mundo y así poderlos comparar con el que funciona en México (SAS). Posteriormente se describe cómo funciona el SAS y también se muestran algunos datos referentes a las alertas públicas y preventivas que el sistema ha emitido.

### **I.1.1. Sistemas de alerta temprana en el mundo**

En la actualidad existen varios países que cuentan con un sistema de alerta temprana para sismos (Early Warning Systems, EWS) en funcionamiento. Los países son: México, Rumania, Turquía, Taiwán y Japón. Hay otros países que están en la etapa de desarrollo de sus alarmas sísmicas entre los que se encuentran Estados Unidos, Italia, Grecia, Suiza e India por mencionar algunos.

La gran mayoría de los EWS tienen mucha similitud al SAS de la Ciudad de México, pero sin lugar a dudas el de Japón es el más parecido pues son los dos únicos sistemas que dan aviso al público en general, ya sea por radio o televisión. Rumania, Turquía y Taiwán se centran más en brindarle información a los grandes centros industriales, esto para que detengan operaciones peligrosas a tiempo.

La cantidad de estaciones que componen el sistema de alarma pública en Japón es de 1000 estaciones, lo que provee una red con un espaciamiento de 20 km entre estaciones a lo largo de todo el país (Allen et al.,2009).

El sistema de Taiwán es capaz de activar un reporte de sismo dando una ventaja de 20 segundos en promedio con una buena estimación de magnitud para eventos con  $M > 6.5$  y utiliza aproximadamente 100 acelerómetros instalados a través de la isla (Wu y Teng, 2002). En Rumania, el EWS proporciona de 25 a 35 segundos de ventaja para las instalaciones industriales en Bucarest

para un sismo de  $M > 6.5$  y es controlado por el Instituto Nacional de Física de la Tierra de ese país. Este sistema se compone por tres estaciones sísmicas en la región de Vrancea pues en ésta se han localizado los epicentros de los sismos más fuertes del último siglo (Böse *et al.*, 2007). En Turquía el tiempo de ventaja es el menor siendo el máximo de 8 segundos, además de que su EWS fue diseñado y es operado por la Universidad Bogazi. Consta de 10 instrumentos de movimiento fuerte instalados a lo largo de la costa oeste del mar Marmara (Erdik *et al.*, 2003).

Todos los sistemas transmiten la alerta con base en el umbral impuesto en las estaciones, y todos ellos transmiten la información en tiempo real a una estación central, para proporcionar información más precisa después de que se presenta un sismo. También utilizan el software de *Earthworm* para obtener de manera rápida la magnitud estimada<sup>1</sup>.

### **I.1.2 El Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México (SAS)**

El Sistema de Alerta Sísmica, SAS, para la Ciudad de México ha operado desde agosto de 1991, siendo su objetivo principal emitir avisos anticipados de alerta sísmica a la ciudad de México, en caso de ocurrir sismos en la región cubierta por las estaciones sensoras en Guerrero. Según Espinosa-Aranda *et al.* (1995), referido a partir de aquí como *EA95*, la diferencia de velocidades entre las ondas sísmicas y radiales dan una ventaja de 60 segundos en promedio para una alerta temprana antes de que un terremoto golpee la Ciudad de México.

El sistema consiste de cuatro partes: el Sistema de detección sísmica, un sistema de telecomunicación dual, un sistema de control central, y un sistema de alerta por radio para los usuarios.

*Sistema de detección central.* Consiste de 12 estaciones sismo sensoras distribuidas aproximadamente en intervalos de 25 kilómetros a lo largo de la Costa de Guerrero. Los sensores son acelerómetros triaxiales, cuya frecuencia de muestreo es de 50 Hz. Este sistema funciona de la siguiente manera (*EA95*):

- 1) La estación en campo detecta un evento sísmico, detecta las fases P y S de las ondas sísmicas en tiempo real y usa el promedio cuadrático de entrada como función característica para la evaluación de la magnitud. Si la función excede un umbral dado, entonces la fase P se detecta, y un segundo umbral se usa para detectar el arribo de la fase S, todo esto para sismos con  $M \geq 5$ . También se calcula la tasa de crecimiento de la energía.
- 2) Dependiendo los resultados del punto anterior se determina si se envía la información al sistema de control central. Si cualquier otra estación manda un mensaje que corresponda al mismo evento, entonces se emite la alerta temprana.

---

<sup>1</sup> <http://folkworm.ceri.memphis.edu/ew-doc/#references>

Esta última característica hace que las estaciones puedan respaldarse entre sí para que se eviten fallos.

*Sistema de telecomunicación dual.* El funcionamiento de este sistema está basado en una estación central de radio retransmisora localizada cerca de Acapulco, como se puede ver en la Figura I.1, y tres Estaciones de Radio Retransmisoras distribuidas a lo largo de la ruta a la Ciudad de México. Cada 12 horas cada una de las estaciones generan y transmiten su propio código para validar su funcionamiento (EA95).

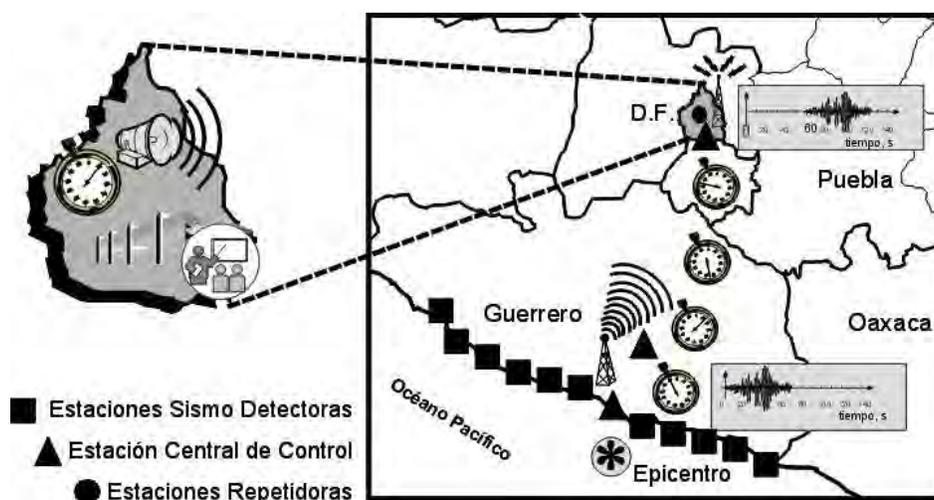


Figura I.1. Diversos sistemas que conforman el SAS

*Sistema de control central.* El sistema de control central es también un sistema dual que cuenta con respaldo. El sistema de control central se localiza en las instalaciones del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) en la Ciudad de México. Los mensajes recibidos son procesados pero la única manera en que pueden ser validados es si fueron enviados por dos o más estaciones (EA95).

Espinosa Aranda *et al.* (1989) definieron dos umbrales para generar una señal de alerta temprana,  $M_1$  ( $M \geq 6$ ) y  $M_2$  ( $6 > M \geq 5$ ), al detectar un evento de este tipo, la alerta se transmite automáticamente.

Hay dos tipos de señales que pueden ser emitidas:

- Una alerta “pública” que se emite a todo el público cuando el evento satisface el umbral  $M_1$ , que tendría efectos fuertes.
- Una alerta restringida o “preventiva” que se emite cuando el evento es  $M_2$ , que ocasionaría efectos moderados. El aviso lo reciben sólo los radioreceptores del CIRES.

*El sistema de alerta por radio.* Los receptores de radio suministrados por el CIRES están actualmente instalados en escuelas, estaciones de radio comerciales, oficinas gubernamentales, entre otras; todas estas instituciones contribuyeron al financiamiento del proyecto (EA95). Además hay 11 acelerómetros de movimientos fuertes del CIRES instalados en la Ciudad de México, que se activan con la alerta. Al activarse la alerta se lleva a cabo también una activación de los acelerógrafos de otras redes presentes en el Valle de México como la que controla el CENAPRED (Quass *et al.*, 1990).

### **I.1.3 Antecedentes en la operación del SAS**

El Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México (SAS), ha detectado más de 2089 eventos sísmicos que han generado 13 avisos de Alerta Pública y 53 avisos de Alerta Preventiva. Los eventos sísmicos han generado más de 3078 registros en sus doce estaciones acelerométricas<sup>2</sup>.

De los 13 avisos de alerta pública, únicamente 3 han cumplido con las restricciones impuestas por los creadores del sistema ( $M \geq 6$ ) lo que implica un 23% de éxitos en este tipo de alerta, de los 10 avisos restantes, 4 no debieron disparar aviso alguno y 6 debieron ser sólo preventivos (Suárez *et al.*, 2009). De los 53 avisos de alerta preventiva únicamente 18 han correspondido al rango  $5 \leq M < 6$  lo que nos indica un 34% de éxito, en este grupo también se encontraron sismos, en total 5, que debieron haber disparado una alerta pública. Ambos tipos de avisos nos dan un total de 32% de efectividad del SAS.

Iglesias *et al.* (2007) llevaron a cabo una evaluación del actual SAS encontrando fallos debido a dos defectos básicos en el sistema: (1) el sistema cubre solamente una parte de la región donde se originan los sismos que dañan a la Ciudad de México. (2) El algoritmo utilizado por el SAS para detectar sismos potencialmente dañinos a partir del análisis de registros de fuente cercana es inadecuado porque se basa en la estimación de la magnitud y cuando la cobertura del SAS se incrementa a un área mayor, entonces la magnitud no será un parámetro significativo debido a que el movimiento en el Valle de México a partir de un sismo de la misma magnitud en Michoacán o Oaxaca será diferente de uno en Guerrero (el área cubierta por el SAS) de acuerdo con la diferencia de distancias al Valle. Así, la magnitud tendrá que traducirse a movimiento esperado en el valle usando alguna relación de atenuación.

Por estas razones se sugiere una estrategia alternativa de estimación directa del movimiento en CU a partir de registros cercanos a la fuente, sin el paso intermedio de primero estimar la magnitud del evento.. El análisis se basa en datos de la onda S y es éste el que da origen a esta tesis.

---

<sup>2</sup> Datos al 20/02/10, fuente: [http://www.cires.org.mx/sas\\_historico\\_es.php](http://www.cires.org.mx/sas_historico_es.php)

Para poder plantear dicha estrategia se requiere de datos de sismos que ya acontecieron y de los que se cuente con la mayor información al respecto de su ubicación, magnitud y naturaleza. Por tal motivo, la fuente consultada fueron los datos de la Red de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional, así, en el siguiente apartado se da una breve reseña la historia y de cómo está conformada en la actualidad dicha red.

## II. SITUACIÓN ACTUAL DE LA RED DEL SSN

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) tiene como uno de sus objetivos determinar, de manera oportuna, los parámetros principales de los sismos que ocurren en el territorio nacional como lo son el epicentro y la magnitud. De igual forma, la información proporcionada por el SSN contribuye a la mejora de la capacidad de evaluación y prevención del riesgo sísmico y volcánico a nivel país. Al presente, el SSN cuenta con una red de 40 estaciones de banda ancha de primer orden que transmiten las señales a 100 muestras por segundo (mps) en tiempo real. La infraestructura actual permite contar con determinaciones de localización y magnitud de sismos relevantes después de unos cuantos minutos. En la siguiente sección se muestra un resumen de la historia del SSN.

### II.1 Historia<sup>1</sup>

La historia del Servicio Sismológico Nacional se remonta a finales del siglo XIX, cuando el ingeniero Mariano Bárcenas instaló un sismógrafo tipo “Padre Sechi” en el Observatorio Meteorológico Central. Los sismogramas proporcionados por dicho aparato, desafortunadamente, no fueron conservados. En el año de 1903, se llevó a cabo la Segunda Convención Sismológica en Estrasburgo, Francia, ésta fue la primera en que participó México. Un año después, fue fundada la Asociación Sismológica Internacional (ISA, por sus siglas en inglés). México fue uno de los 18 miembros fundadores que, entre otros asuntos, se comprometieron a mejorar la instrumentación sísmica. En ese mismo año, se puso en operación el primer sismógrafo en el país, el sismógrafo “Bosch-Omori”, que se instaló en Palacio Nacional.

El 5 de Septiembre de 1910 se creó el Servicio Sismológico Nacional mediante decreto del presidente Porfirio Díaz. Fue puesto a cargo del Instituto Geológico Nacional dependiente, en aquellos años, de la Secretaría de Minería y Fomento. El instrumento “Bosh-Omori” fue trasladado a una estación central que recién había sido inaugurada en Tacubaya. Para dicha estación también se habían adquirido cinco sismógrafos horizontales “Wiechert”, entre los cuales destaca un equipo de 1.7 toneladas (Figura II.1), así, en conjunto formaron el primer observatorio sismológico de la Ciudad de México. El plan original preveía la instalación de 60 estaciones sismológicas a lo largo y ancho de la República Mexicana.

---

<sup>1</sup> La información contenida en este apartado ha sido en su mayor parte consultada en Suárez y Jiménez (1987), Lee et al. (2002) y en la página web del SSN (<http://www.ssn.unam.mx>).



Figura II.1. Sismógrafo horizontal Wiechert de 1700 kg, 1910 (Fuente: <http://www.ssn.unam.mx/website/html/SSN/IMG/Instrumentos/est-mecanica1.jpg>)

De 1910 a 1923 se instalaron 9 estaciones sismológicas mecánicas autónomas: Tacubaya (D.F.) que como ya se dijo era la estación central, Oaxaca, Mérida, Mazatlán, Chihuahua, Veracruz, Guadalajara, Monterrey y Zacatecas (Figura II.2). De esta forma quedó integrada la Red del SSN. Las estaciones sismológicas de Monterrey y Zacatecas fueron dañadas en los combates revolucionarios.

### Primeras Estaciones Autónomas



Figura II.2. Ubicación de las primeras estaciones autónomas. (Fuente: [http://www.ssn.unam.mx/website/html/SSN/IMG/ssn\\_his\\_map.gif](http://www.ssn.unam.mx/website/html/SSN/IMG/ssn_his_map.gif))

A partir de 1929, el SSN fue transferido a la UNAM. Casi 20 años después, en 1948, el SSN fue adscrito al Instituto de Geofísica. En los años sesenta, se comenzó la instalación de sismógrafos electromagnéticos llegando a tener aproximadamente 20 instrumentos autónomos. La grabación

de las señales sísmicas se realizó en papel ahumado y fotográfico (Figura II.3). En esta época fue instalada en CU una estación triaxial de periodo corto que contó con un equipo donado por el gobierno de los Estados Unidos.

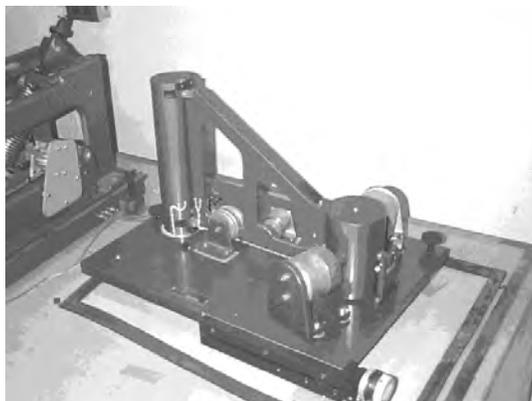


Figura II.3. Sismógrafo Electromagnético horizontal Sprengneter. (Fuente: <http://www.ssn.unam.mx/website/html/SSN/IMG/Instrumentos/Sprengneter.jpg>)

A mediados de los años setenta se inició la instalación de la Red Sísmica de Apertura Continental (RESMAC) en la UNAM, con el fin de contar con estaciones telemétricas digitales en todo el territorio nacional que enviaran a la Ciudad de México la información generada en tiempo real. En esta red, la transmisión de las señales se realizaba por medio de enlaces de microondas proporcionados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. La modernización de la Red Sismológica Nacional se inició en 1992 con la instalación de equipos de nueva tecnología, de este modo, nació la Red de Observatorios Sismológicos de Banda Ancha.

## II.2 Red Sismológica Nacional

Como ya se expuso, el Servicio Sismológico Nacional, cuenta con aproximadamente<sup>2</sup> 60 equipos para el registro de temblores, organizado en diferentes subredes:

- Red Sismológica Convencional
- Red de Banda Ancha
- Red del Valle de México

Para este trabajo de tesis, la red que compete es la Red de Banda Ancha, pues como se verá más adelante, es de la cual se obtuvieron datos.

---

<sup>2</sup> El número de estaciones puede variar ya que el SSN continuamente se extiende y/o modifica sus redes.

## II.2.1 Red de Banda Ancha

Las estaciones de la Red Sismológica de Banda Ancha se localizan, en su mayoría, a lo largo de la Faja Volcánica Trans Mexicana (FVTM) y de las costas del Océano Pacífico (Figura II.4), esta ubicación permite que dicha red registre la sismicidad de las regiones de mayor potencial sísmico en la República Mexicana. Sin embargo, algunas de las estaciones más recientemente instaladas están ubicadas en el Norte y Noroeste de México (P.ej. LNIG, CGIG, HPIG, SRIG). Todas las estaciones sismológicas reciben continuamente mantenimiento y son monitoreadas de manera regular.



Figura II.4. Distribución de las estaciones de la Red Sismológica de Banda Ancha a lo largo del territorio nacional.  
(Fuente: <http://www.ssn.unam.mx/jsp/estacionesBA.jsp>)

### *Instrumentación de las estaciones sismológicas de banda ancha*

El sismógrafo se caracteriza por su alta sensibilidad pues tiene la capacidad de ampliar la velocidad con que se mueve el terreno, ya sea a causa de un sismo cercano pequeño o uno grande lejano. Los acelerógrafos, a diferencia de los sismógrafos, tienen la característica de registrar la aceleración del suelo durante un sismo no importando que tan grande sea, por lo que los acelerogramas que se obtienen nunca se encuentran saturados.

Sismómetros de Banda Ancha. Un sismómetro es un instrumento de alta sensibilidad. El ancho de banda que es capaz de registrar depende de su propio sistema de balanceo de fuerzas. El sensor

detecta movimiento del suelo (velocidad) que se traduce a una señal eléctrica análoga que se transmite al registrador donde se amplifica y se convierte de analógica a digital para su posterior almacenamiento. La principal ventaja de los instrumentos de banda ancha es que presentan una banda grande de frecuencias en donde la señal sísmica se registra sin saturación (Millones, 2005).

Acelerómetros. Miden la aceleración del suelo. Sin embargo, los acelerógrafos no registran en continuo y generalmente se activa al ser excitado por una onda sísmica que se registra a alta velocidad en disco digital. Durante el registro de la aceleración de un sismo, paralelamente se realiza el registro del tiempo. A partir de esta información puede obtenerse mediante integración, registros en velocidad y desplazamiento en el campo próximo.

Las estaciones sismológicas de la Red de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional cuentan con los siguientes instrumentos:

- *Un SISMÓMETRO Streckeisen STS-2 (Figura II.5).- Estos sensores triaxiales permiten registrar ondas sísmicas en una amplia banda de frecuencias, con respuesta plana a la velocidad del suelo entre 0.01 a 30 Hz, y capacidad de registrar sismos en una amplia gama de magnitudes, desde sismos locales pequeños hasta sismos lejanos, sin problemas de saturación (<http://www.kinematics.com/Uploads/pdfs/sts2-1.pdf>). Sólo la estación localizada en Tepich, Q. Roo, (TEIG) tiene un sismómetro diferente, un CMG-3TD, que tiene el mismo funcionamiento básico.*
- *Un ACELERÓMETRO Kinemétrics FBA-23 (Figura II.5). El sensor es de balance de fuerzas. Estos sensores triaxiales permiten registrar las aceleraciones del suelo dentro de un amplio espectro de frecuencias sin saturación de la señal para sismos grandes locales y regionales. Estas características de los sensores, permiten estimar con gran precisión la magnitud de sismos grandes que puedan ocurrir en el territorio nacional (<http://www.kinematics.com/p-83-FBA-23DH.aspx>). El otro modelo de acelerómetro utilizado es el Kinemétrics FBA ES-T (por ejemplo en la estación YAIG-Yautepec, Mor.)*

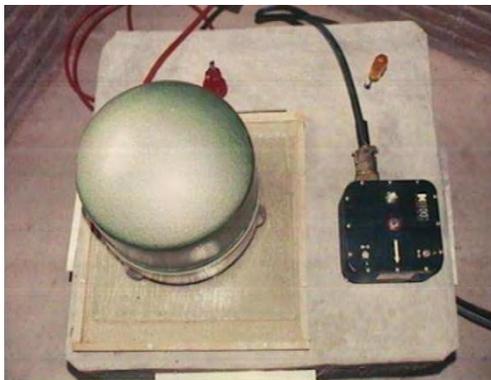


Figura II.5. SISMÓMETRO STS-2 (verde) y ACELERÓMETRO FBA-23 (negro) (Fuente: <http://www.ssn.unam.mx/>).

- Un REGISTRADOR QUANTERRA Q-330 con digitizador de 24 bits (Figura II.6). Registra el movimiento del terreno en tres canales de velocidad y tres de aceleración. Otros modelos de registrador utilizados en las estaciones son el Quanterra Q680 (por ejemplo en la estación TUIG-Tuzandepetl, Ver.) y el Q4126 (por ejemplo en la estación MOIG-Morelia, Mich.). Ambos tienen el mismo funcionamiento.



Figura II.6. Registrador Q330 (Fuente: <http://nees.ucla.edu/>).

Las señales del sismómetro son muestreadas en forma continua a 20, 1 y 0.1 mps, y, como se expuso anteriormente, se convierten a formato digital y se almacenan en el registrador Quanterra. Otro muestreo que se realiza es cuando se presenta un sismo de  $M \geq 4.5$ , entonces las señales son muestreadas a 80 mps, algunas estaciones registran a 100 mps. Actualmente los datos se transmiten a la Estación Central en tiempo real mediante un sistema VSAT.

#### *Características de las estaciones*

Al contar con equipo de alta sensibilidad en su interior, las casetas de las estaciones de banda ancha (Figura II.7) fueron ideadas y construidas con la pauta principal del aislamiento de ruido, cambios de temperatura, tormentas y cambios bruscos de voltaje. Además de los instrumentos descritos con anterioridad, las estaciones albergan también el equipo que transmite las señales registradas a la estación central ubicada en Ciudad Universitaria. Para tener la referencia de tiempo, otro elemento en el interior de la caseta, es un reloj GPS de alta precisión. Para asegurar el aislamiento de los diferentes equipos, los sensores se cubren con material aislante. La distribución de dichas estaciones se puede observar en la Figura II.2.



Figura II.7. Casetas que minimizan el ruido (Fuente: <http://www.ssn.unam.mx/>).

### II.3 Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería

El SSN no es la única institución que opera redes sísmicas en país. Es de destacar la red del Noroeste de México (RESNOM: <http://sismologia.cicese.mx/resnom/>), las redes operadas por la Comisión Federal de Electricidad y las redes operadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Estas últimas se encuentran en un proceso de expansión y serán brevemente descritas en la siguiente sección debido a que como se mostrará en los siguientes capítulos serán relevantes para el presente trabajo:

La Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería está compuesta por un conjunto de redes que se distribuyen en los estados de la República Mexicana donde se generan la mayoría de los sismos que afectan a la Cuenca del Valle de México (García, 2001). Esta red utiliza modernos y sofisticados equipos de registro que se encuentran en superficie, pozos y edificios. Los datos generados constituyen un acervo de datos sísmicos de gran volumen e importancia. Las siguientes redes descritas *grosso modo* a continuación conforman la Red Acelerográfica mencionada:

- Red Acelerográfica de Guerrero (GAA). Esta Red es operada conjuntamente por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) y la Universidad de Nevada, Reno. Es posiblemente la red acelerográfica más usada en México y la mejor equipada. Cuenta con una muy buena cobertura del *gap* sísmico de Guerrero. Como su nombre lo indica, se distribuye por todo el estado de Guerrero (Figura II.8) lo cual la localiza muy cerca de la fuente de la mayor parte de los eventos sísmicos. En la parte correspondiente al Municipio de Acapulco, el II-



- RACP-Red Acelerográfica de la Ciudad de Puebla (Figura II.9). Esta red es controlada en conjunto por el II-UNAM y la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Las estaciones se distribuyen en puntos estratégicos de la ciudad, de forma tal que pueden llevar a cabo una evaluación de los daños directos e indirectos causados por la actividad sísmica que se presenta. Históricamente en este lugar se han presentado sismos intraplaca que han causado diversos daños.
- Red Acelerográfica del Valle de México. En la cuenca del Valle de México existen diversos aparatos tanto en “campo libre” como en pozo, monitoreados en su mayoría por el CIRES (Red Acelerográfica de la Ciudad de México, RACM), CENAPRED, UAM , CICESE y el II-UNAM (Figura II.9). Las estaciones se localizan en los diversos terrenos o zonas que conforman la cuenca y por ello presentan efectos de sitio.

### **III. MARCO TECTÓNICO Y PELIGRO SÍSMICO PARA LA CD DE MÉXICO**

En este capítulo describiremos la tectónica regional de México, hablaremos de las placas que interactúan en este país, así como su relación con la actividad sísmica.

Por otro lado, hablaremos de las características geológicas de la Cd. de México y de la cuenca del Valle de México, características que hacen que esta región sea tan susceptible a la ocurrencia de terremotos relativamente lejanos.

#### **III.1 Placas tectónicas y sismicidad histórica del centro y sur de México**

La principal actividad sísmica de México, y del mundo, se concentra en los límites de placas. En México interactúan 5 placas tectónicas, las placas oceánicas de Rivera, Cocos, Caribe, Pacífico y la placa continental de Norte América. En la Figura III.1 se muestran dichas placas así como los límites que definen.

En la región del Golfo de California, el movimiento hacia el noreste de la placa del Pacífico con respecto a la placa de Norte América genera un límite divergente con una serie de fallas transcurrentes (P.ej Fallas Cerro Prieto e Imperial) que se continúa al norte hasta el sistema de fallas de San Andrés, donde el límite se torna 100% transformante.

En la zona sureste del país, la placa del Caribe y la placa de Norte América forman un límite transcurrente difuso cuya geometría y comportamiento se encuentra aún a discusión.

Si bien estas dos regiones representan parte importante de la actividad sísmica del país, y por tanto del peligro sísmico, para efectos de esta tesis son irrelevantes y no discutidas en detalle. Sin embargo, la actividad sísmica generada en la costa del Pacífico mexicano es de gran importancia para el estudio de mitigación del riesgo sísmico de la Ciudad de México, objetivo principal de este trabajo.

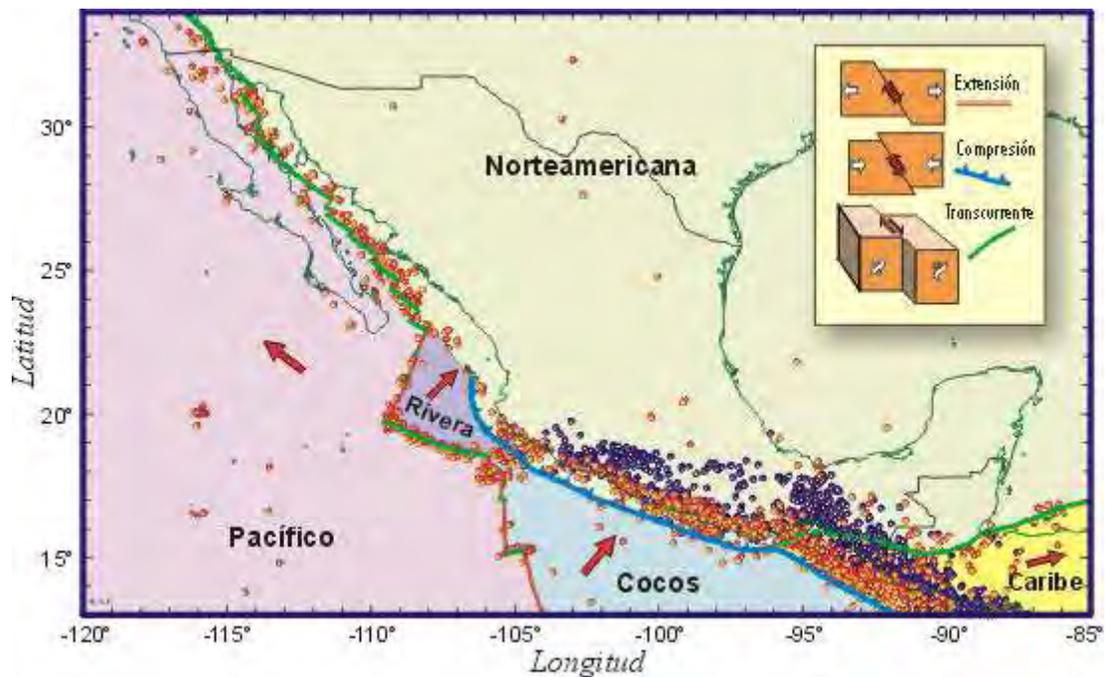


Figura III.1. Placas tectónicas y sus límites, sismicidad y tipos de fallas en México. Las flechas rojas indican el sentido de movimiento relativo de las placas, respecto a la Placa Norteamericana. Los círculos naranjas representan terremotos de profundidad menor que 35 Km, los círculos azules representan terremotos de profundidades superiores. (Figura tomada de Kostoglodov y Pacheco, 1999).

El principal rasgo tectónico del Pacífico Mexicano es la Trinchera Mesoamericana (MAT por sus siglas en inglés), el cual define un límite convergente de subducción entre las placas oceánicas de Rivera y Cocos con la placa continental de Norte América. Este proceso de subducción ha generado más de 70 sismos de magnitud  $M > 6.5$  en el siglo pasado (Kostoglodov y Pacheco, 1999)

La geometría de subducción de la placa de Cocos a lo largo de la costa de los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca varía en cuanto a la velocidad de convergencia, en Michoacán es de 4.7 cm/año mientras que hacia Oaxaca es de hasta 6.7 cm/año. (Pardo y Suárez, 1995).

Otra variación a lo largo de MAT es en cuanto al ángulo de subducción, en la zona de Michoacán el ángulo de inclinación es entre  $10 - 15^\circ$  (Pardo y Suárez, 1995), mientras que la zona de Guerrero-Oaxaca se caracteriza porque la placa subduce con un ángulo de  $15^\circ$  a lo largo de 100 kms de longitud, después de esto se vuelve horizontal extendiéndose con esta geometría unos 250 kms y después, aproximadamente cuando la placa alcanza los 50 km de profundidad, vuelve a inclinarse con un ángulo aproximado de  $50^\circ$  (Pérez et al., 2008).

Al parecer las variaciones que se presentan en los ángulos y tasa de subducción se reflejan en los mecanismos focales y la sismicidad.

A lo largo de la placa de Cocos, la zona cercana a la trinchera presenta eventos interplaca de fallamiento normal y fallamiento inverso de bajo ángulo, esto a profundidades someras de hasta los 25 km, aproximadamente. Tierra adentro comienzan a presentarse eventos intraplaca con profundidades mayores a 50 km, aunque en esta zona la actividad sísmica es baja. En sí misma, la distribución de esfuerzos no es complicada, salvo en la zona donde hay un cambio brusco de buzamiento. La sismicidad cortical en la placa Norteamericana es prácticamente nula en la zona del centro del país.

Habiendo planteado los tipos de terremotos que se presentan en las placas, a continuación se describen las características principales de los sismos interplaca e intraplaca para la zona de Guerrero-Oaxaca, pues ambos tienen relevancia para este trabajo:

a) Sismos interplaca (o de subducción)

Son sismos de fallamiento inverso con echado de bajo ángulo. Este tipo de temblores se generan por la interacción entre la placa continental y la placa subducida, es decir sólo en la zona de contacto, por lo que se localizan a profundidades someras.

En la costa del Pacífico mexicano, desde el estado de Chiapas hasta el estado de Jalisco existe una intensa actividad sísmica relacionada con la interacción entre la placa de Cocos y Rivera y la placa de Norte América. Si bien no es fácil conocer a detalle el mecanismo focal de todos los temblores reportados por el SSN, no cabe duda que la mayor parte de ellos corresponde a sismos que se pueden agrupar en la categoría de sismos interplaca.

Por otro lado, son sismos que pueden alcanzar grandes magnitudes, por ejemplo, de acuerdo al póster "Cien años de sismicidad en México" de Kostoglodov y Pacheco, 1999, (Figura III.2) de los sismos "más importantes" del siglo XX más del 60% se pueden catalogar en este grupo.

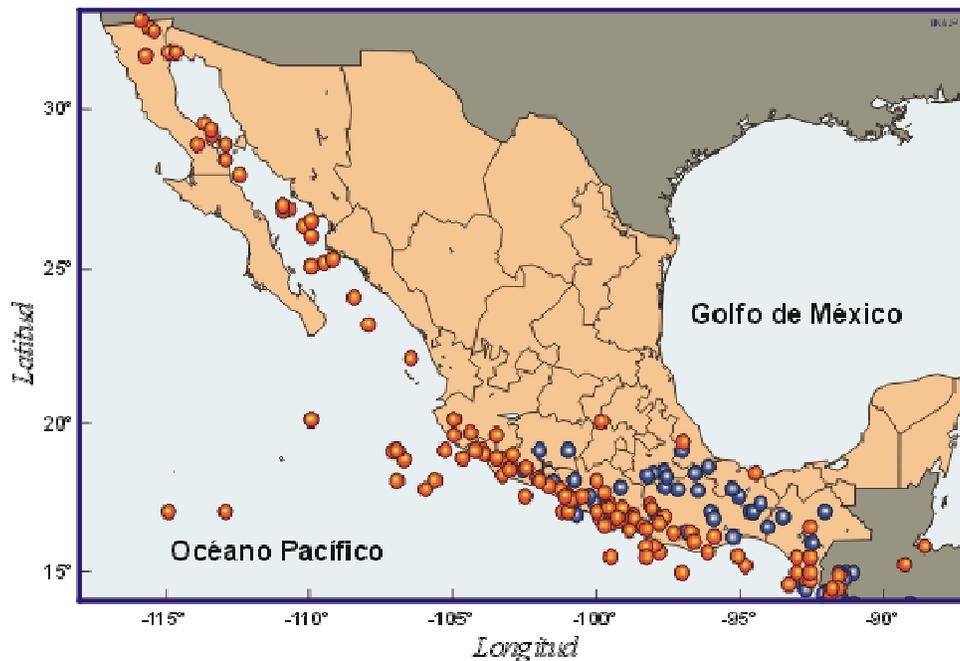


Figura III.2. Sismos moderados y grandes en México, el catalogo del siglo XX. Los círculos rojos indican eventos superficiales (profundidad menor que 35 Km). Los círculos azules representan eventos profundos (profundidad superior a 35 Km). (Figura tomada de Kostoglodov y Pacheco, 1999)

Como puede apreciarse en la Figura III.3, la longitud de ruptura, en dirección paralela a la costa, de los grandes sismos de subducción registrados el siglo pasado varía entre los 50 y los 250 kilómetros. Algunos de estos sismos pueden ser tsunamigénicos, como el sismo de 1995 de Colima-Jalisco.

Por otro lado, al ser poco profundos, las ondas superficiales generadas encuentran una guía de propagación eficiente en dirección de la convergencia de las placas lo que según algunos autores (p.ej. Furumura y Singh, 2002) incrementa el peligro sísmico ciudades localizadas en el interior del país. El ejemplos más relevante de este tipo de temblores es el del 19 de septiembre de 1985 ( $M_w=8.1$ ) con sus conocidas consecuencias.

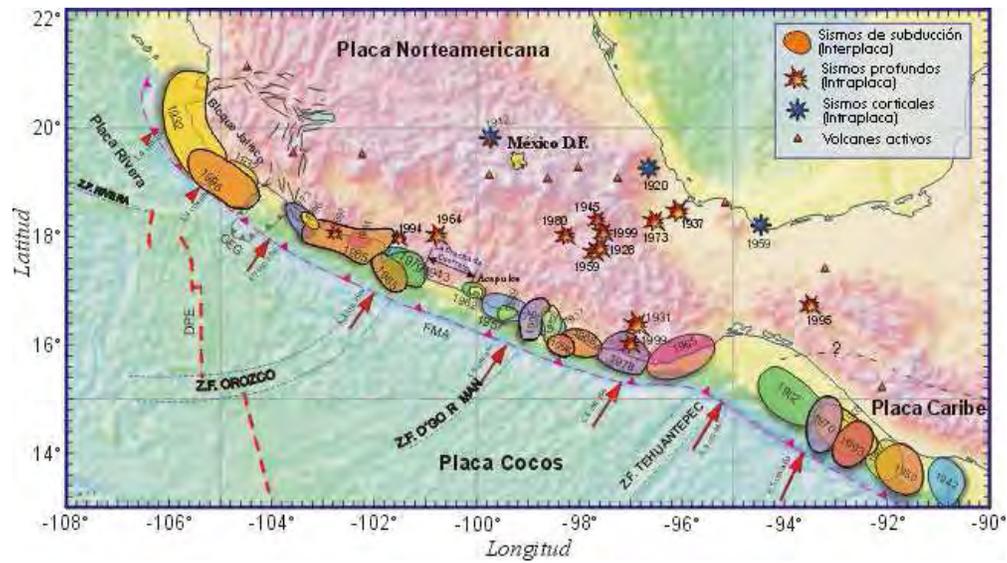


Figura III.3. Localización de los sismos más importantes en México (Figura tomada de Kostogodlov y Pacheco, 1999).

a) Sismos intraplaca

Estos sismos son menos frecuentes y como su nombre lo indica ocurren al interior de las placas. Pueden separarse en dos tipos:

i) Sismos intraplaca en la placa subducida: Son producto del fallamiento de la placa oceánica subducida, con hipocentro dentro de la misma. A su vez es posible distinguir dos tipos:

- Sismos de fallamiento normal. Este tipo de eventos se distribuye en 2 zonas: (1) Eventos localizados cerca de la costa, en donde la placa subducida se desdobra para volverse horizontal. (2) así como en el interior cerca de la zona donde la placa subducida se dobla otra vez para penetrar en el manto.

- Sismos inversos de alto ángulo. También ocurren cerca de la costa, pero debido a su mecanismo focal, están asociados a compresiones generadas en la placa. Probablemente estos sismos se localizan a menor profundidad que los de fallamiento normal debido a una zona doble de sismicidad provocada por el desdoblamiento de la placa en la parte superior. Este cambio de configuración genera esfuerzos compresivos en la parte superior y en la parte inferior esfuerzos extensivos. Las profundidades de estos sismos varían entre los 28 y 80 km.

ii) Sismos intraplaca en la placa continental. Se localizan dentro de la placa Norteamericana, sus focos son superficiales. En general esta sismicidad se ubica en la zona centro-sur de México. En su mayoría, este tipo de eventos tienen mecanismos de fallamiento lateral izquierdo con una fuerte componente normal (Singh et al., 2001a). Hasta hace poco se creía que solo ocurrían en la zona

del Eje Volcánico Mexicano (p.ej. Acambay 1912, M=7.1, Xalapa 1920, M=6.4), pero recientemente existe clara evidencia de que, al menos cerca de la costa, también ocurren sismos relevantes en la placa continental, como el sismo de Coyuca de 2001 ( $M_w = 5.9$ ) que ocurrió a unos kilómetros de la costa a una profundidad de 8 km (Pacheco et al. 2002).

### III.2 Sismos históricos relevantes para la Ciudad de México<sup>1</sup>

A lo largo de la historia se han presentado sismos que han tenido consecuencias palpables dentro del Distrito Federal. Los datos con los que se cuenta provienen desde el siglo XV, cuando la ciudad aún no estaba conformada como lo está en la actualidad. La información de los sismos más relevantes se presentan en la Tabla III.1, ordenados cronológicamente y de forma que se pueden conocer los efectos en el D.F. y algunas observaciones notables.

Tabla III.1. Sismos relevantes para la Ciudad de México y sus consecuencias

FECHA	EFFECTOS EN EL D.F.	OBSERVACIONES
1475 (9 caña)	Durante el reinado de Axayacatl hubo fortísimos temblores que arruinaron casi todas las casas y edificios del Valle de México. Montes y cerros del valle sufrieron derrumbes; también se formaron grietas en la tierra.	Parece ser un fuerte sismo dentro o muy cerca de la ciudad de México.
1496 (4 pedernal)	Temblor general; se llenó la tierra de grietas	Fuerte terremoto en la costa
1542; 15 a 17 de marzo	Temblor que dañó construcciones en México.	
1589; 11 a 26 de abril	Se cayeron paredes y algunos edificios; quedaron dañados. En Coyoacán se cayó el convento de los dominicos.	

<sup>1</sup> Modificada de Suárez y Jiménez, 1987.

Tabla III.1 (continuación)

FECHA	EFFECTOS EN EL D.F.	OBSERVACIONES
1611; Agosto	Temblor que arruinó algunos edificios. Se cayó parte del convento de San Francisco. La iglesia de Xochimilco quedó dañada.	
1653; 17 de enero	Daños en bardas de Santo Domingo; destruyó parte de la iglesia de Atzacapotzalco.	
1665; 20 de enero	Sismo en Morelos, sentido en la Ciudad de México. No produjo daños.	Causado por la explosión del Popocatepetl.
1697; 7 y 25 de febrero	Destrucción de algunos edificios en México.	Sismo en Acapulco.
1698; 3 de septiembre	Fuerte terremoto que derribó dos casas.	
1711; 15 de agosto	Largo temblor que arruinó muchos edificios y tiró muchas casas.	Causó daños también en Puebla y Tlaxcala. Tal vez se trate de un sismo profundo en el interior de la placa de Cocos.
1753; 29 de julio	Se dañaron vario templos y casas. No se reportaron daños de gravedad.	
1754; 1 de septiembre	Daños leves en algunas iglesias. Las cercas de varios templos sufrieron daños menores.	Sismo en Acapulco, que causó graves daños en el puerto. Se dañaron la muralla y el castillo. Un maremoto dejó a un navío varado en el puerto.
1768; 4 de abril	Alzate reporta que no hay edificio grande o pequeño que no muestre daños. Los puentes sobre las acequias y el Palacio fueron dañados. Se vaciaron las fuentes. Con reloj en mano, Velázquez de León observó una duración de seis minutos.	Daños en Atlixco, Jamiltepec y San Cristóbal Ecatepec.

Tabla III.1 (continuación)

FECHA	EFECTOS EN EL D.F.	OBSERVACIONES
1776; 21 de abril	Derrumbó la cárcel de la Acordada. Dañó la Casa de Moneda, la Catedral, el palacio Real, el Palacio del Arzobispo y otros edificios más. Se reporta una duración de 4 minutos.	El terremoto destruyó la fortaleza de Acapulco.
1787; 28 de marzo	Daños en el Palacio, el Cañón de la Diputación; dañó muchos edificios más. Duración entre 5 y 6 minutos.	Se reporta una secuencia de grandes sismos los días 28, 29, 30 de marzo y 3 de abril. Daños en Oaxaca y Tehuantepec. Se informa de un enorme maremoto en la Barra de Alotengo, Oaxaca y Acapulco.
1800; 8 de marzo	Dañó varias iglesias y casas de la ciudad de México. Se reportan daños en Palacio Nacional y en las arquerías de Chapultepec. Se describe una duración de 4 a 5 minutos.	Se sintió fuertemente en la zona de la Mixteca, Oaxaca, Puebla y Veracruz.
1818; 31 de mayo	Arcos rotos en los acueductos de Santa Fe y Belem. Daños en puentes, cuarteles y edificios. Daños en los conventos de la Merced, San Francisco y San Diego; en los hospicios de Terceros, la Santísima y San Hipólito; en la sacristía de la Catedral; las Iglesias de Santa Veracruz, Santa Catalina y del Campo Florido.	Ruina casi total en la ciudad de Colima. Graves daños en Guadalajara: las torres y cúpula de la catedral se vinieron abajo. Dañó además otras iglesias y edificios en Guadalajara.
1820; 4 de mayo	Arruinó algunos edificios y causó daños en los acueductos. Destruyó la iglesia del Campo Florido.	Se sintió fuertemente en Acapulco, donde también causó una marejada.
1820; 4 de mayo	Arruinó algunos edificios y causó daños en los acueductos. Destruyó la iglesia del Campo Florido.	Se sintió fuertemente en Acapulco, donde también causó una marejada.

Tabla III.1 (continuación)

FECHA	EFECTOS EN EL D.F.	OBSERVACIONES
1835; 6 de enero	Daños en paredes, puentes y acueductos de la ciudad. Dañó la Sacristía de Catedral y la capilla de Felipe de Jesús. Derribó la cúpula de la iglesia de Tlalnepantla.	
1837; 22 de noviembre	Los edificios y arquerías sufrieron mucho. Duración de aproximadamente 5 minutos.	Sismo en las costas de Michoacán?
1845; 7 de abril	Derribó la cúpula de la iglesia del Señor de Santa Teresa. Derrumbó el Hospital de San Lázaro. Daños en el Palacio Nacional, la Cámara de Senadores, la Universidad y varios edificios más. Se reporta gran destrucción en Xochimilco y daños en Tlalpan.	Fuerte sismo en la costa de Guerrero.
1858; 19 de junio	Padecieron casi todas las casas y edificios de la ciudad. Daños en Palacio, Casa de Ayuntamiento, Teatro Principal, Santo Domingo, Sagrario, San Francisco, Jesús Nazareno, etc. Se abrieron grietas en las calles y se levantaron las banquetas. Gran destrucción en Texcoco. Duración de 3 minutos aproximadamente.	Causó daños en Pátzcuaro, Morelia, Charo, Indaparapeo y otras poblaciones de Michoacán.
1864; 3 de octubre	Daños en muchas cañerías de la ciudad y en los arcos de Belén. Cuarteaduras de algunos edificios. Duró aproximadamente un minuto.	En Puebla dañó muchos edificios y templos y derrumbó varias casas, casi como la torre de la iglesia en Orizaba. Causó daños en Córdoba. Se trata probablemente de un sismo profundo, similar al de Orizaba de 1973.

Tabla III.1 (continuación)

FECHA	EFECTOS EN EL D.F.	OBSERVACIONES
1882; 19 de julio	Dañó en cañerías. Se dañaron el Portal de los Agustinos, el Palacio de la Diputación. Se cayeron bardas en diversas partes de la Ciudad. Se dañaron las torres de la iglesia de Tlalpan.	Gran destrucción en Huajuapán y en Juxtlahuaca. Se trata muy probablemente de un sismo profundo.
1907; 14 de abril	Derribó el colegio Salesiano, rompió cañerías y produjo grietas en las calles.	Sismo en la costa de Guerrero, cerca de Acapulco. Magnitud 7.9.
1909; 30 de julio	Derrumbes de casas y bardas en la ciudad. Causó daños en el Palacio Nacional.	Sismo en la Costa Grande de Guerrero. Magnitud 7.5.
1911; 7 de junio	Derrumbó el cuartel de San Cosme, el altar de la iglesia de San Pablo y tiró muros en varias partes de la ciudad. Flexionó rieles de tranvía y produjo grietas en las calles. Destruyó 119 casas en el Distrito Federal.	Sismo en la costa de Michoacán. Magnitud 7.8.
1912; 19 de noviembre	Derrumbes en muchas bardas y varias casas destruidas. Grietas en las calles y roturas de tuberías de agua y cables. Daños en los templos de S. Sebastián, La Palma y La Profesa, Palacio de Minería, Las Vizcaínas y Teatro Principal, entre otros.	Sismo en la falla de Acambay, Edo. de México. Magnitud 7.0
1928; 22 de marzo	Cuarteaduras en muchas casas y derrumbe de algunas bardas.	Sismo en la Costa de Oaxaca. Magnitud 7.7.
1928; 17 de junio	Grietas en el pavimento y daños numerosos.	Sismo en las costas de Oaxaca. Magnitud 8.0.
1928; 4 de agosto	Derrumbó el Palacio Municipal de Chalco.	Sismo en las costas de Oaxaca. Magnitud 7.4

Tabla III.1 (continuación)

FECHA	EFFECTOS EN EL D.F.	OBSERVACIONES
1928; 9 de octubre	Varios derrumbes de bardas y casas.	Sismo en la costa de Oaxaca de magnitud 7.8.
1932; 3 de junio	Numerosas grietas y casas derrumbadas. Gran cantidad de cañerías reventadas. Derrumbó varias casas y tiró muchas bardas	Sismo en las costas de Jalisco. El sismo más grande que se haya registrado este siglo en México. Magnitud 8.4.
1941; 15 de abril	Dañó la cúpula del cine Insurgentes. Cuarteó edificios y produjo grietas en las calles.	Sismo en las costas de Colima. Magnitud 7.9.
1957; 28 de julio	Destruyó varias casas y edificios en la ciudad de México. Derribó el Ángel de la Independencia. Se levantó el pavimento en varios sitios.	Sismo cerca de Acapulco. Magnitud 7.7.
1979; 14 de marzo	Daños en la colonia roma. Destruyó la Universidad Iberoamericana en la colonia Campestre Churubusco.	Sismo en Petatlán. Magnitud 7.6.
1985; 19 y 20 de septiembre	Gran destrucción en el centro de la ciudad y en las colonias Doctores, Guerrero, Tepito,;Morelos, Roma, Juárez, Merced, Tlatelolco, Etc. Destruyó casi 2 000 edificios, levantó el pavimento y rompió las redes de tuberías en varias partes de la ciudad.	Sismo en las costas de Michoacán. Derrumbó muchas casas en Ciudad Guzmán y causó daños a edificios en Ixtapa, Zihuatanejo y Lázaro Cárdenas. Magnitud 8.1.
1986; 30 de abril		Sismo en el extremo noroeste de la zona de ruptura del sismo de Michoacán de 1985. M = 7.0 (Kostoglodov y Pacheco, 1999).
1989, 25 de abril	Este sismo es relevante porque se registró en más de 60 estaciones acelerométricas en la cd. de México (Sánchez-Sesma et al., 1993).	Sismo en la Costa Chica de Guerrero. M = 6.8 (Kostoglodov y Pacheco, 1999).

Tabla III.1 (continuación)

FECHA	EFFECTOS EN EL D.F.	OBSERVACIONES
1995, 14 de septiembre	Sismo fuertemente sentido en la ciudad de México. El Sistema de Alerta Sísmica (SAS) disparó una señal de alerta pública ( <a href="http://www.cires.org.mx">www.cires.org.mx</a> ).	Sismo en la región de Copala en Guerrero. M = 7.3 (Kostoglodov y Pacheco, 1999).
1999, 15 de junio	Daños importantes en la ciudad de Puebla. Muy sentido y daños ligeros en la Ciudad de México (Singh <i>et al.</i> , 1999).	Sismo en Tehuacan, Puebla. M = 7.0.
1999, 30 de Septiembre	Muertes y daños en el estado de Oaxaca. Muy sentido y una estructura dañada en la ciudad de México.	Sismo cerca de la costa de Oaxaca. M = 7.5.
2001, 08 de octubre	Daños en la zona epicentral. Fuertemente sentido en la ciudad de México. El SAS emitió alerta pública ( <a href="http://www.cires.org.mx">www.cires.org.mx</a> ).	Coyuca de Benítez, Gro. M = 5.9

Como se puede ver en la Tabla III.1 los sismos que afectan a la ciudad de México son frecuentes y de muy diversa naturaleza y localización. En este sentido cabe la pena mencionar que, si bien es casi imposible contar con una alerta temprana para todo tipo de sismos, sería deseable contar con un tipo de sistema que alertara ante la mayoría de ellos.

Esta tesis es un esfuerzo encaminado precisamente en este último sentido.

### III.3 La brecha sísmica de Guerrero.

Se ha propuesto la existencia de regiones donde se sabe que han ocurrido temblores de gran magnitud pero que por un tiempo relativamente largo no se ha liberado energía acumulada y, por tanto, estas regiones tienen altas probabilidades de ocurrencia de temblores (p.ej. Kelleher *et al.*, 1973). Estas regiones son conocidas como brechas o *gap* sísmicos. La probabilidad de ocurrencia es estimada a través de la información que se obtiene de los temblores ocurridos en el pasado, en esa misma región y de parámetros que tienen que ver con los esfuerzos asociados al posible temblor, por ejemplo, en un límite convergente, se toma la tasa de convergencia entre las placas.



La costa de Guerrero es una zona con potencial sísmico alto. Esta zona se encuentra localizada al NW de Acapulco entre los paralelos 16.9° y 17.2°N y los meridianos 100.1° y 101.0°W, en la Costa Grande (Figura III.4). Este *gap* presenta una extensión máxima de 230 km con un ancho de falla de 80 km (Singh et al., 1981). En él no se han presentado un terremoto de  $M_w > 7.5$  desde 1911. Nishenko y Singh (1987) han estimado para esta zona un periodo de retorno de 55-70 años y una magnitud esperable de  $M_w = 7.8-8.0$  y en caso de que se rompiera en un solo evento según Suárez et al. (1990) el terremoto podría producir una magnitud de  $M_w = 8.1-8.4$ .

Debido a esto, la zona del *gap* sísmico de Guerrero se encuentra monitoreada continuamente tanto por la Red Acelerográfica de Guerrero (GAA); por las estaciones pertenecientes al sistema SAS del CIREC y las estaciones pertenecientes al SSN.

### III.4 Sismo del 19 de Septiembre de 1985

La tabla III.1 muestra la afectación que la Ciudad de México ha sufrido a lo largo de la historia desde la época prehispánica. Sin embargo no cabe duda que el sismo del 19 de septiembre de 1985 ( $M_w=8.0$ ) ha sido el más mortífero y destructivo de la historia del país. Causó 10,000 muertos (reconocidos oficialmente), ~ 30,000 heridos, 3,000 damnificados y pérdidas materiales por ~5,000 millones de dólares. Según Suárez y Jiménez (1987) la brecha de Michoacán, donde se originó este sismo, estaba acotada por las áreas de ruptura del sismo de Colima de 1973 ( $M_w=7.6$ ) y del sismo de Petatlán de 1979 ( $M_w=7.4$ ). La Figura III.3 muestra la posición de los sismos de 1973 y 1979 así como la de los sismos del 19 y 21 de septiembre de 1985.

La ubicación del sismo fue cercana al poblado de Caleta de campo, al noreste de Lázaro Cárdenas, Mich. Aquel jueves 19 de septiembre a las 7:19 hrs. la ciudad de México sentía los efectos de la ruptura del *gap* de Michoacán con una magnitud de  $M_w = 8.1$  grados..

Se creería que la distancia que separa a la Ciudad de México del epicentro del sismo (~300 km) sería suficiente para la atenuación de las ondas. Pero no fue así, los efectos de sitio característicos de la cuenca del Valle de México jugaron un papel importante. El terreno recibió las ondas cargadas de un alto nivel de energía y como consecuencia, las arcillas recibieron un intervalo de frecuencias que amplificaron.

Durante el sismo, las ondas amplificadas se transmitieron a los edificios altos los cuales una vez superado su periodo de oscilación natural, colapsaron. Durante el sismo, gran parte de la ciudad se estuvo desplazando 10-40 cm cada 1 o 2 segundos con un movimiento de vaivén<sup>2</sup>. Algunos edificios que no cayeron sufrieron fracturas y grietas debido a que sus periodos de oscilación se

---

<sup>2</sup> <http://www.ssn.unam.mx/jsp/sismo85.jsp>

prolongaron y sus elementos estructurales perdieron resistencia. Algunas de las imágenes más representativas de los daños que causó el sismo en la Ciudad de México se muestran en las Figuras III.5 y III.6.



Fig III.5. Imagen de los daños causados por el sismo.(Fuente: [http://entregeeks.files.wordpress.com/2009/09/terremoto\\_1985\\_torre\\_la.jpg](http://entregeeks.files.wordpress.com/2009/09/terremoto_1985_torre_la.jpg))



Fig. III.6. El edificio "Nuevo Leon" en Tlatelolco despues del temblor. (Fuente: [http://3.bp.blogspot.com/\\_bcLwfYRrIU8/SNUcXsv6F5I/AAAAAAAAADU/yCJAxD6syCA/s400/terremoto-1985.jpg](http://3.bp.blogspot.com/_bcLwfYRrIU8/SNUcXsv6F5I/AAAAAAAAADU/yCJAxD6syCA/s400/terremoto-1985.jpg))

La noche del 20 de septiembre volvió a temblar a las 19:38 hrs, esta vez el epicentro se localizó al sur del sismo del 19 con una magnitud  $M_w=7.3$ , en las coordenadas epicentrales  $17.4^\circ$  N y  $102^\circ$  W.

Como consecuencia se derrumbaron 20 edificios más. Este sismo fue consecuencia de que la energía acumulada al parecer no había sido liberada en su totalidad.

Este sismo ocasionó también un tsunami en la zona de Ixtapa con una altura de cuando menos 1.5 metros.

### **III.5 Marco Tectónico de la cuenca del Valle de México**

La cuenca del Valle de México se localiza al sur del Cinturón Volcánico Transversal (CVT), muy cerca de la región volcánicamente activa del Popocatepetl, está situada en una planicie lacustre en la cuenca de México. El CVT está formado por una gran variedad de rocas volcánicas que fueron emitidas por una enorme cantidad de aparatos volcánicos como lo son el Pico de Orizaba, el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, el Nevado de Toluca, el Nevado de Colima, etc. Los principales volcanes que se encuentran en esta provincia son estratovolcanes de dimensiones muy variables. Todos ellos fueron creados por emisiones alternantes de productos piroclásticos y derrames lávicos (Delgado *et al.*, 1998).

El origen del Cinturón Volcánico ha sido relacionado principalmente con la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la corteza continental de México (Pardo y Suárez, 1995). Los magmas emitidos a lo largo del Cinturón se originan por la fusión parcial, en el manto superior, de la placa que subyace, esta hipótesis se confirma estudiando la composición de los magmas la cual es calcoalcalina (Verma y Armienta, 1985).

La cuenca de México se formó debido a procesos volcánicos y tectónicos que se desarrollaron a partir del Eoceno tras haber emergido una gran parte de lo que ahora es México, el resultado de los procesos volcánicos es una capa de aproximadamente 2 km de espesor de lava, toba y brecha (Mooser, 1963). La cuenca de México permaneció abierta hasta hace 700,000 años, cuando la gran actividad volcánica formó una enorme cortina natural: la sierra de Chichinautzin, que cerró la cuenca (Mooser, 1963) y obstruyó el drenaje que iba al río Balsas. Como consecuencia, los sedimentos clásticos y piroclásticos relacionados con la actividad volcánica de la Sierra Chichinautzin y del Popocatepetl se depositaron en un ambiente lacustre (De Cserna *et al.*, 1988). Estos últimos depósitos, que son los que provocan una parte importante de la amplificación y larga duración de los sismos en la cuenca Valle de México, pueden tener un espesor de entre 10 hasta 100 metros.

### III.6 Peligro Sísmico para la Ciudad de México

Sin lugar a dudas el potencial sísmico del gap de Guerrero influye en la evaluación del peligro sísmico para el Valle de México. Su proximidad (~300 km) provocaría que las consecuencias, si se presentara su ruptura, fueran iguales o hasta peores que las del sismo de Michoacán. Además, no sólo el valle estaría en peligro, sino también las poblaciones cercanas como Acapulco la cual ha presentado un incremento importante en su número de habitantes en los últimos años.

Para los fines de la ingeniería sísmica la Ciudad de México se divide en tres zonas (Marsal y Mazari, 1959):

- Zona I, firme o de lomas (color verde en la Figura III.7): localizada en las partes más altas de la cuenca del valle, está formada por suelos de alta resistencia y poco compresibles como lo son los materiales volcánicos (coladas y tobas).
- Zona II o de transición (color amarillo en la Figura III.7): presenta características intermedias entre la Zonas I y III, compuesta por arenas aluviales, limos y arcillas.
- Zona III o de Lago (color rojo en la Figura III.7): localizada en las regiones donde antiguamente se encontraban lagos (lago de Texcoco, Lago de Xochimilco). El tipo de suelo consiste en depósitos lacustres muy blandos y compresibles con altos contenidos de agua tales como arcillas expansivas saturadas en agua y arenas, producto de la desecación de los antiguos lagos, lo que favorece la amplificación de las ondas sísmicas.

La amplificación que presenta la zona de lagos respecto a la de lomas oscila en un valor de 50 para  $f \sim 0.2-0.7$  Hz.

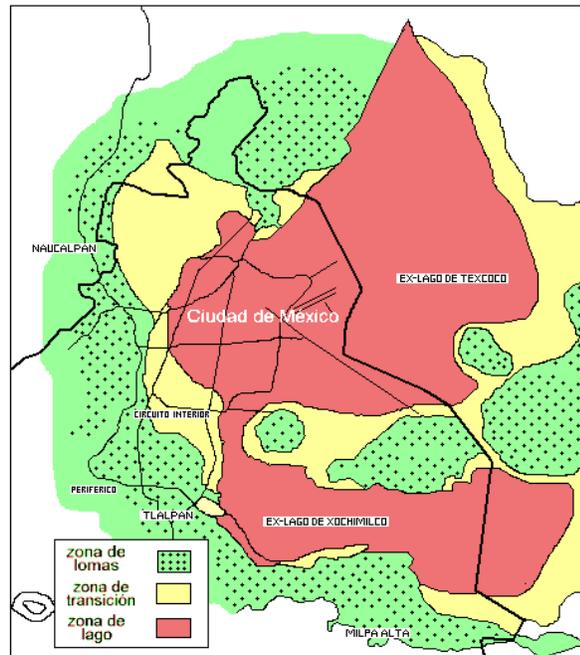


Figura III.7. Zonificación de la cuenca del Valle de México. (Fuente: [http://www.ssn.unam.mx/website/html/SSN/Sismos/region\\_fig2\\_zonas\\_DF.gif](http://www.ssn.unam.mx/website/html/SSN/Sismos/region_fig2_zonas_DF.gif))

Las amplificaciones de las ondas sísmicas en la zona de lago y en términos del espectro de amplitudes de Fourier, puede alcanzar valores de 10-50, dependiendo de la frecuencia y el sitio en estudio, con respecto a los valores que se puedan registrar en la zona de lomas, como por ejemplo en la estación CUIG (Singh *et al.*, 1990). La amplificación que se ha definido es del orden de 10 en el rango de frecuencias de 0.3-3 Hz y probablemente se deba a la presencia de una cuenca sedimentaria antigua, de materiales poco competentes que subyacen al basamento rocoso de mayor rigidez (Campillo *et al.*, 1988).

Según García D., (2006): *el tren de ondas generado por un evento interplaca sufre un notable aumento de su amplitud y duración a baja frecuencia al penetrar en el CVT por efecto de la amplificación*. También Shapiro *et al.* (2000b) consideran que cuando se modelan duraciones anormales en el Cuenca del Valle de México deberían ser consideradas tanto el prisma de acreción como la capa de agua.

En años recientes diversos autores han presentado ecuaciones que relacionan la presencia del CVT y el movimiento fuerte para la cuenca del Valle de México (e.g. Singh *et al.*, 1987; Ortega *et al.*, 2003). Cabe mencionar que estas ecuaciones, no se pueden aplicar fuera del CVT debido a que calculan el movimiento esperado en un sitio de referencia como CU.

## IV. RELACION ENTRE ARMS Y AMAX OBSERVADA EN CU

Conociendo el peligro sísmico para la Ciudad de México, el marco tectónico y las capacidades y cobertura de la Red de Banda Ancha del SSN, ahora se sabe el por qué de la necesidad de que un sistema de alerta temprana funcione para un área mayor que la actual. Como se presentó en el capítulo I, el algoritmo utilizado por el SAS para detectar sismos potencialmente dañinos a partir del análisis de registros de fuente cercana se basa en una estimación temprana de la magnitud. Si se utilizaran datos de la red del SSN, la magnitud no sería un parámetro significativo debido a que la intensidad del movimiento en la cuenca del Valle de México a partir de un sismo de la misma magnitud en Michoacán o Oaxaca será diferente de uno cuyo origen se localice en Guerrero (área cubierta por el SAS) de acuerdo con la diferencia de distancias a la ciudad de México.

Contando con este preámbulo, en este capítulo se presenta el planteamiento de una estrategia alternativa para el cálculo de la estimación directa del movimiento en CU a partir de registros cercanos a la fuente, sin estimar previamente la magnitud del evento. A continuación se describe la metodología para la obtención de datos así como el procesamiento al que fueron sujetos.

### IV.1 Obtención de las bases de datos

Para obtener las bases de datos se recurrió al Cálculo Automático del Tensor de Momentos Sísmico del Instituto de Geofísica (<http://laxdoru.igeofcu.unam.mx/cmt>) y al Global CMT Project (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>). Los sismos que se utilizaron se localizaron a menos de 600 km de CU en el periodo del 1 de enero del 2000 hasta el 30 de abril del 2008.

Para corroborar que los sismos seleccionados cumplieran con la condición de los 600 kilómetros de distancia se re-calculó la distancia entre la estación localizada en CU (CUIG) y el epicentro del sismo, esta cálculo se hizo utilizando el programa `calcula_dist`<sup>1</sup>, desarrollado en fortran y que considera la geometría esférica,. Los datos de entrada del programa son las coordenadas de latitud y longitud del evento sísmico (`ev_lat`, `ev_lon`); la salida es un listado donde la primera columna es el nombre de las estaciones de la Red de Banda Ancha del SSN y la segunda columna es la distancia al epicentro presentada en orden ascendente. De esta lista se seleccionaron las estaciones que estuvieran a no más de 250 kilómetros del epicentro (estaciones cercanas).

Para obtener la distancia hipocentral a la estación CUIG, se modificó el programa `calcula_dist` por lo que otra de las entradas de dicho programa fue la profundidad del sismo. Esa distancia la

---

<sup>1</sup> Este programa utiliza la subrutina *range* del kit de programas de Bob Herrmann, de San Luis Missouri University

denominamos  $R_{CU}$ . Lo mismo se hizo para las estaciones cercanas y a esa distancia hipocentral la llamamos  $R_S$ .

Teniendo la fecha y hora de los eventos así como los nombres de las estaciones cercanas, se buscaron los registros, si existían, en la base de datos del SSN.

#### IV.1.1 Formatos de los registros sísmicos

Los registros sísmicos se almacenan en formato Mini\_Seed. Sin embargo, estos son procesados utilizando formato SAC. A continuación se hace una breve descripción de ambos:

**SAC:** Código de Análisis Sísmico (Seismic Analysis Code). Es un programa interactivo de propósito general, diseñado para el estudio de señales de tiempo secuencial.

Cuando los datos son guardados en formato SAC, las diferentes componentes se escriben por separado y poseen un encabezado que entre otras características señala la máxima y mínima amplitud de la traza.

**Mini-SEED:** SEED es el formato estándar para el Intercambio de Datos de Terremotos (Standard for the Exchange of Earthquake Data). El formato SEED fue adoptado por la Federación de las Redes Sismográficas Digitales de Trabajo, FDSN por sus siglas en inglés, en 1987 como su estándar. Las Instituciones de Investigación Incorporada de Sismología (IRIS) también han adoptado el formato SEED y es utilizado como el formato estándar de en su base de datos.

El formato SEED ha llegado a tener éxito para archivar e intercambiar datos. Desafortunadamente, no es muy útil para propósitos de procesamiento, y casi es ilegible en una PC. El formato consiste de encabezados que controlan el volumen, abreviaturas, nombre de la estación y duración en tiempo así como los registros de los datos.

El término “Sólo Volúmenes de Datos SEED” mejor conocido como MINISEED es una versión reducida de SEED sin la información del encabezado. MINISEED es más fácil de tratar. Sin embargo, no son los datos completos porque falta la respuesta del instrumento. Afortunadamente, MINISEED ha tenido una mayor aceptación y mucho más software está disponible para MINISEED que para SEED<sup>2</sup>.

#### IV.1.2 Conversión de datos

Como ya se dijo, la base de datos del SSN se compone de registros en formato Mini-Seed. Sin embargo, el formato SAC es más versátil para análisis y proceso de los mismos. Por esta razón se

---

<sup>2</sup> ([http://www.iris.washington.edu/manuals/SEED\\_appG.htm](http://www.iris.washington.edu/manuals/SEED_appG.htm))

tuvo que realizar un macro en c-shell (Figura IV.1) para transformarlos a formato SAC por medio del comando ms2sac.

```

File Edit View Terminal Tabs Help
# /bin/csh
echo "Dar el nombre del archivo en formato mseed y generico sac"
sdrsplt $1
/bin/ls -trd * | tail -3 > tmp
set i = 1
while ($i <= 3)
set archivo = `head -n$i tmp | tail -1`
echo $archivo
ms2sac $archivo $2'.'$i'.sac'
@ i = $i + 1
end

```

Figura IV.1. Macro *cambia\_datos* en c-shell

## IV.2 Estimación de la aceleración máxima en CU ( $A_{CU}$ )

Para poder evaluar el funcionamiento de la alerta sísmica para la ciudad de México se requiere de una estación de referencia dentro de la ciudad, por consiguiente, la estación CUIG fue la mejor opción. Ésta se encuentra localizada en la zona firme o de lomas, sobre un terreno de flujos de lava.

Una vez teniendo los datos en formato SAC, sus componentes Norte- Sur (N-S), Este-Oeste (E-W) y vertical, pudieron ser visualizadas y procesadas por separado para obtener las características que a continuación se detallan.

Para la obtención de la aceleración máxima en CU ( $A_{CU}$ ), se utilizó la fórmula propuesta por Iglesias *et al.* (2007) -referido a partir de aquí como I07-:

$$A_{CU} = \left[ \max(a_N(t)^2)_{10}^{tr} + \max(a_E(t)^2)_{10}^{tr} + \max(a_Z(t)^2)_{10}^{tr} \right]^{1/2} \quad (IV.1)$$

donde max es el valor absoluto máximo,  $tr$  es la longitud del registro y  $a_N$ ,  $a_E$  y  $a_Z$  son las aceleraciones en las componentes N-S, E-W y vertical, respectivamente.

El análisis de datos se realizó con registros de velocidad derivados numéricamente para obtener aceleraciones. El estudio se llevó a cabo tanto para registros filtrados como sin filtrar. La banda de

frecuencias usada en el análisis con datos filtrados fue de 0.2-1.0 Hz debido a que es bien conocido que alrededor de estas frecuencias las ondas sísmicas sufren una amplificación importante en la cuenca del Valle de México debido a las propiedades del subsuelo (Singh *et al.*, 1988).

Para obtener de forma más rápida  $A_{CU}$  se utilizó un macro escrito en c-shell (Figura IV.2), con los registros de la estación CUIG. Una parte de éste es un macro en SAC que remueve la media, la tendencia, escala los datos a unidades de cm/s, deriva el registro, lee en el encabezado de cada una de las componentes el máximo valor absoluto de la amplitud, así mismo se aplica el filtro pasabanda antes descrito. La otra parte que compone a este macro pasa los datos obtenidos a un programa desarrollado en fortran (Figura IV.3) del cual se obtiene como resultado, en pantalla, el valor de  $A_{CU}$  (amax). Para los datos sin filtrar se utilizó el mismo macro pero se omitió el renglón donde se especifica el filtro (bp).

```

File Edit View Terminal Tabs Help
#!/bin/csh
echo 'r ' $1'.1.sac' $1'.2.sac' $1'.3.sac' > mac
echo 'rmean' >> mac
echo 'rtrend' >> mac
echo 'mul 1.67e-7' >> mac
echo 'dif' >> mac
echo 'bp n 2 p 2 co 0.2 1.0' >> mac
echo 'lh depmin depmax' >> mac
echo 'quit' >> mac
sac < mac > tmp
grep depmin tmp > tempo
grep depmax tmp > tempo1
paste tempo tempo1 > tempo2
awk '{print ($3*$3)^.5, ($6*$6)^0.5}' tempo2 > tempo3
awk '{if ($2 > $1) print $2 ; else print $1}' tempo3 > tempo4
amax < tempo4

```

Macro en SAC

Figura IV.2. Macro *amax* en c-shell que calcula el mayor valor absoluto de las componentes de los registros en CU.

```

File Edit View Terminal Tabs Help
real x(3)
do i=1,3
  read(*,*)x(i)
enddo
x1=x(1)**2
x2=x(2)**2
x3=x(3)**2
xf=sqrt(x1+x2+x3)
write(*,*)xf
end

```

Figura IV.3. Programa en fortran que lee la salida del macro anterior y calcula el valor de  $A_{cu}$

Los tiempos de arribo de las ondas P y S fueron seleccionados en los registros de velocidad de las estaciones y guardados en el encabezado manualmente. Para este fin, se utilizó el programa SAC para visualizar los registros.

En el análisis de los sismogramas de las estaciones cercanas a la fuente también utilicé las fórmulas propuestas en I07, para obtener:

$$I_i(t_0, t) = \int_{t_0}^{t+t_0} a_i^2 dt \quad i = N, E, Z \quad (IV.2)$$

y

$$A_{rms}(t_0, t_d) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left\{ \left[ \frac{I_i(t_0, t_d)}{t_d} \right]^{1/2} \right\}, \quad (IV.3)$$

en las que  $I_i$  es la intensidad de movimiento,  $a_i$  es la aceleración en la dirección  $i$ ,  $t_0 = t_s$  donde  $t_s$  es el tiempo de llegada de la onda S,  $A_{rms}$  es la aceleración media cuadrática en la estación del registro y  $t_d$  es la duración de la ventana que en este caso se usó de 10 s. Según I07, esta ventana proporciona un tiempo suficiente ( $\sim 50s$ ) de alerta para la Ciudad de México y permite tener suficiente tiempo de registro para determinar una medida representativa de  $A_{rms}$  en la estación de referencia.

Para obtener  $A_{rms}$  se utilizó un programa llamado atm\_area, desarrollado en fortran, esto con la finalidad de realizar los cálculos de manera más rápida. La salida de este programa despliega los valores de  $A_{rms}$  para los registros filtrados y sin filtrar.

En la Tabla IV.1 (Ápndice) se muestran todos los valores descritos

### IV.2.1 Análisis del catálogo

Las figuras IV.4 y IV.5 muestran la distribución de los datos disponibles en función de  $R_s$  y  $R_{CU}$ . En la figura IV.4 se puede apreciar que aproximadamente el 60% de los registros se encuentra en el rango de 100 a 200 kilómetros de distancia de las estaciones, por lo que posiblemente este es el rango que más influirá en la regresión que se presenta más adelante.

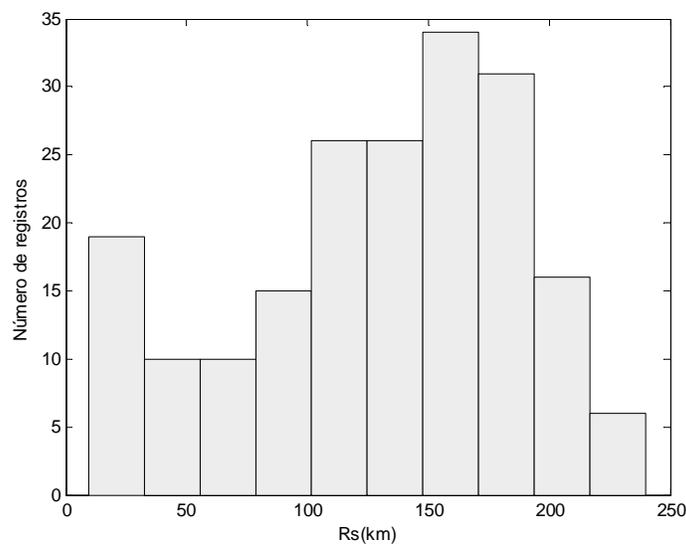


Figura IV.4 Histograma para  $R_s$

En la Figura IV.5 se ve que aproximadamente más del 50% de datos se encuentra a menos de 350 kilómetros de CU, siendo el rango de  $300 < R_{CU} < 350$  el que concentra 20% de los datos. Cabe mencionar que la distancia de la Ciudad de México a la trinchera de subducción es de  $\sim 300$  km, por lo tanto, los sismos en dicha zona pertenecen a ese 20%.

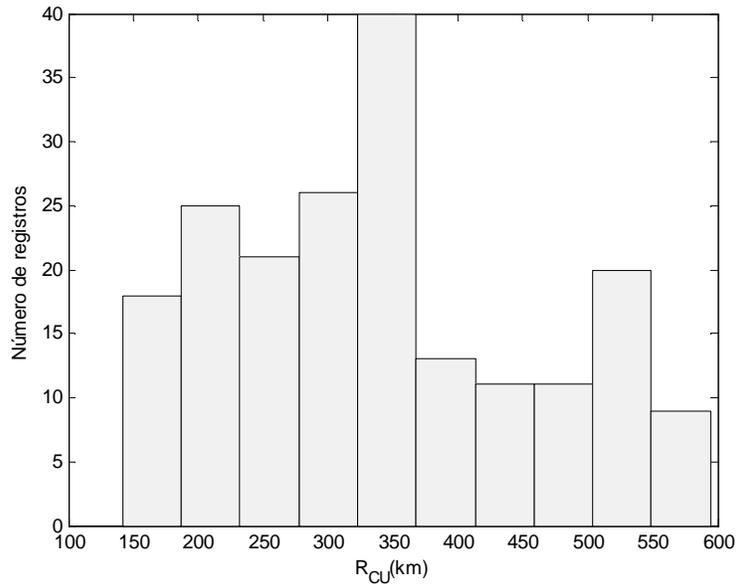


Figura IV.5. Histograma para  $R_{CU}$

En la Figura IV.6 se presenta el comparativo entre los eventos intraplaca contra los de interplaca.

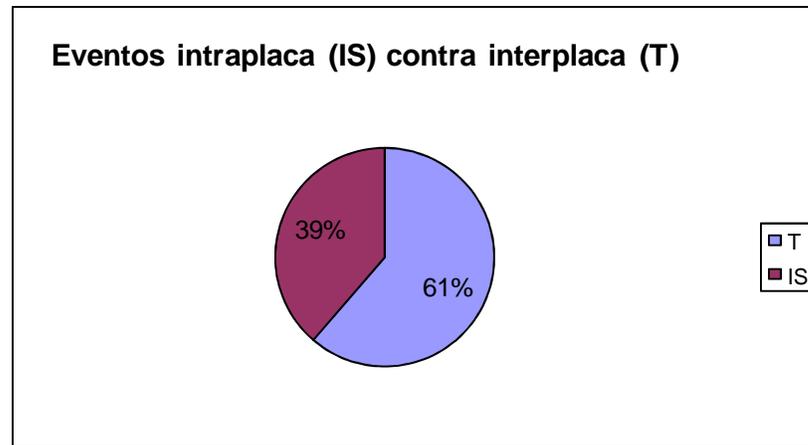


Figura IV.6. Distribución de sismos intraplaca (IS) contra sismos de interplaca (T)

En la Figura IV.6 vemos que, cómo es de esperarse, el 61% de los eventos es de naturaleza interplaca como lo son los movimientos en la trinchera de subducción. Esta zona es la que mayor cantidad de sismos genera en el país.

La Figura IV.7 presenta el histograma de los eventos dependiendo de la cantidad de estaciones de la red que los hayan registrado.

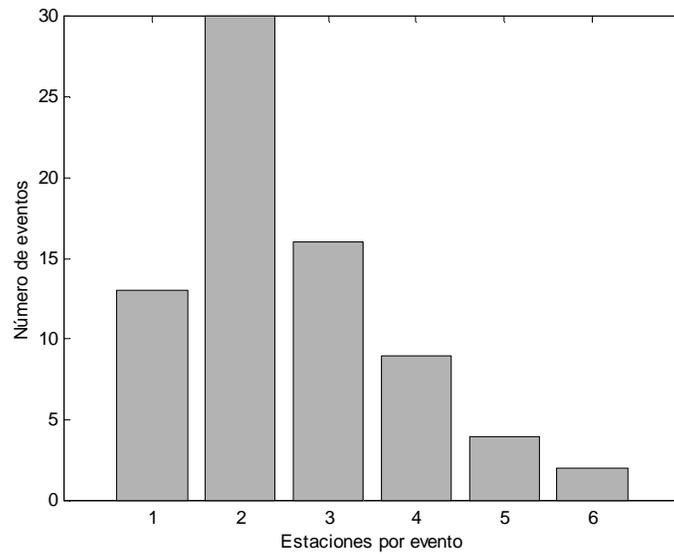


Figura IV.7. Número de estaciones usadas para el análisis en cada evento

Se puede apreciar que aproximadamente el 80% de los eventos fueron registrados por dos o más estaciones, lo que quiere decir que la detección de los eventos sísmicos tiene respaldo como el actual SAS. En las Figuras IV.8 se presenta la distribución de la magnitud respecto a la naturaleza de los sismos (interplaca o intraplaca)

En las Figuras IV.8 se presenta la distribución de la magnitud respecto a la naturaleza de los sismos (interplaca o intraplaca)

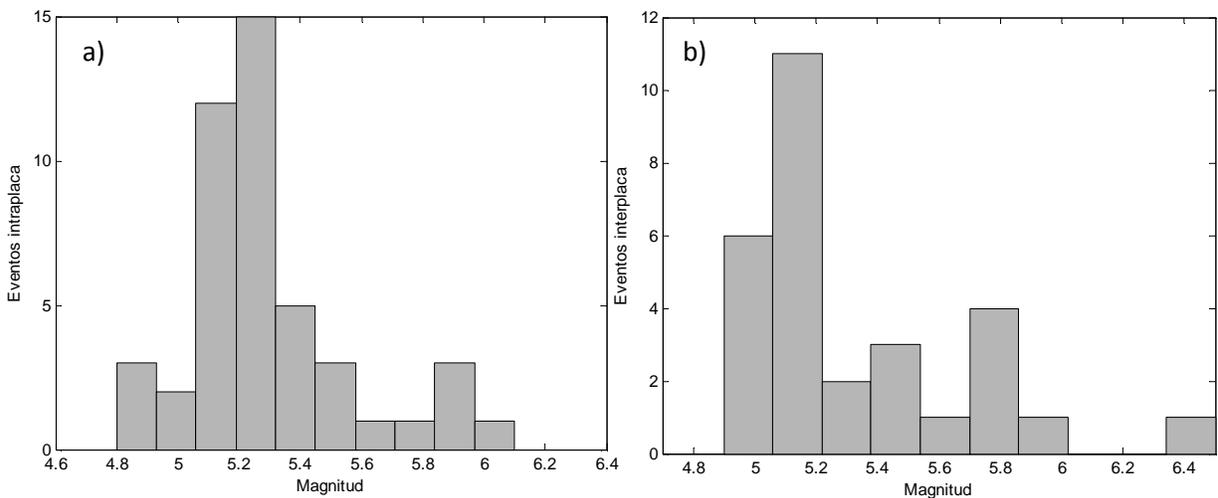


Figura IV.8. a) Distribución de la magnitud para los eventos intraplaca (IS) b) Distribución de la magnitud para los eventos interplaca (T).

Como se puede apreciar en la figura anterior, los eventos interplaca son los que exhiben un rango de mayor magnitud, aunque la magnitud de los de intraplaca no ha sido pequeña. En ambos gráficos se observa que el rango en el que se concentra más del 50% de eventos es  $5 < M < 5.4$ .

### IV.3 Cálculo de la aceleración estimada en CU ( $A_{red}$ )

Partiendo de la ecuación propuesta en I07 se tiene que:

$$A_{CU} = A_{rms}^{\beta} e^{\alpha(R_{CU}-R_S)} \left( \frac{R_S}{R_{CU}} \right)^n, \quad (IV.4)$$

El término exponencial en la ecuación (IV.4) considera la atenuación anelástica. La razón entre las distancias  $R_S$  y  $R_{CU}$  aumenta a la potencia  $n$  por la dispersión geométrica. El exponente  $\beta$  se utiliza como medio para obtener un mejor ajuste.  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $n$  son constantes que se deben obtener mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados a partir de los datos presentados en la Tabla IV.1 utilizando la siguiente función:

$$\ln A_{CU} - n \ln \left( \frac{R_S}{R_{CU}} \right) = \beta \ln A_{rms} + \alpha(R_{CU} - R_S), \quad (IV.5)$$

Los resultados propuestos por I07 sugieren que el mejor ajuste se presenta con  $n=0.5$  para los datos filtrados. El valor de 0.5 para  $n$  está asociado con la dispersión geométrica de las ondas superficiales.

Debido al planteamiento de Limpert *et al.* (2001), se consideró que  $\ln A_{CU}$  se distribuye normalmente por lo tanto se deduce que  $A_{CU}$  tiene una distribución logarítmica normal con una desviación logarítmica estándar igual a  $\sigma$  y una mediana igual a  $A_{red}$ , dada por:

$$A_{red} = A_{rms}^{\beta} e^{\alpha(R_{CU}-R_S)} \left( \frac{R_S}{R_{CU}} \right)^n. \quad (IV.6)$$

Para resolver la ecuación (IV.6) es necesario verla como un problema inverso lineal del cual se puede encontrar la solución por medio del método de mínimos cuadrados, de la siguiente manera:

Partiendo de la ecuación (IV.5):

$$\ln A_{CU} - n \ln \left( \frac{R_S}{R_{CU}} \right) = \beta \ln A_{rms} + \alpha(R_{CU} - R_S). \quad (IV.7)$$

Expresando lo anterior en términos de los parámetros  $m_1$  y  $m_2$  :

$$d_i = m_1 x_i + m_2 y_i, \quad (IV.8)$$

donde:

$$d_i = \ln A_{CU} - n \ln \left( \frac{R_S}{R_{CU}} \right),$$

$$m_1 = \beta \quad \gamma \quad m_2 = \alpha,$$

$$x_i = \ln A_{rms},$$

$$y_i = R_{CU} - R_S.$$

La ecuación (IV.8), en forma matricial ( $Gm=d$ ), se puede expresar como:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_5 \end{bmatrix}.$$

Según la inversa generalizada para mínimos cuadrados, la matriz  $m$ , que contiene a los parámetros se obtiene por medio de la expresión:

$$m = (G^T G)^{-1} * G^T d, \quad (IV.9)$$

donde los elementos de la matriz  $G$  son  $x_i$  y  $y_i$ , por lo que:

$$G^T G = \begin{bmatrix} \sum_i x_i^2 & \sum_i x_i y_i \\ \sum_i y_i x_i & \sum_i y_i^2 \end{bmatrix}, \gamma$$

$$G^T d = \begin{bmatrix} \sum_i x_i d_i \\ \sum_i y_i d_i \end{bmatrix}.$$

Y, finalmente, expresando la ecuación (IV.9) de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i x_i^2 & \sum_i x_i y_i \\ \sum_i y_i x_i & \sum_i y_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_i x_i d_i \\ \sum_i y_i d_i \end{bmatrix}.$$

Utilizando este método en I07, se reportan los valores de  $n=0.5$ ,  $\alpha=0.005$  y  $\beta=0.554$ , para los datos filtrados, con los que se obtiene la gráfica mostrada en la Figura IV.10.

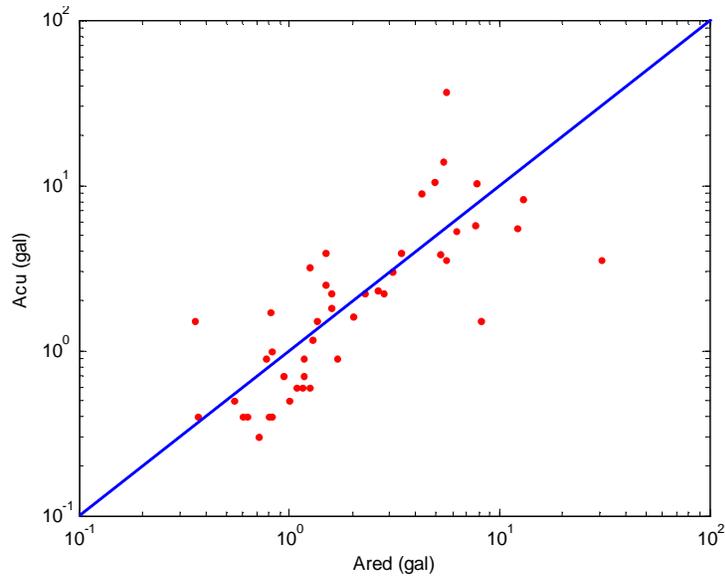


Figura IV.10. Gráfica del ajuste mostrado en I07 utilizando la expresión (IV.6).

Para obtener la  $A_{red}$  para los datos del catálogo de este trabajo, fueron utilizados los valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $n$  propuestos en I07. La gráfica resultante es mostrada en la Figura IV.11:

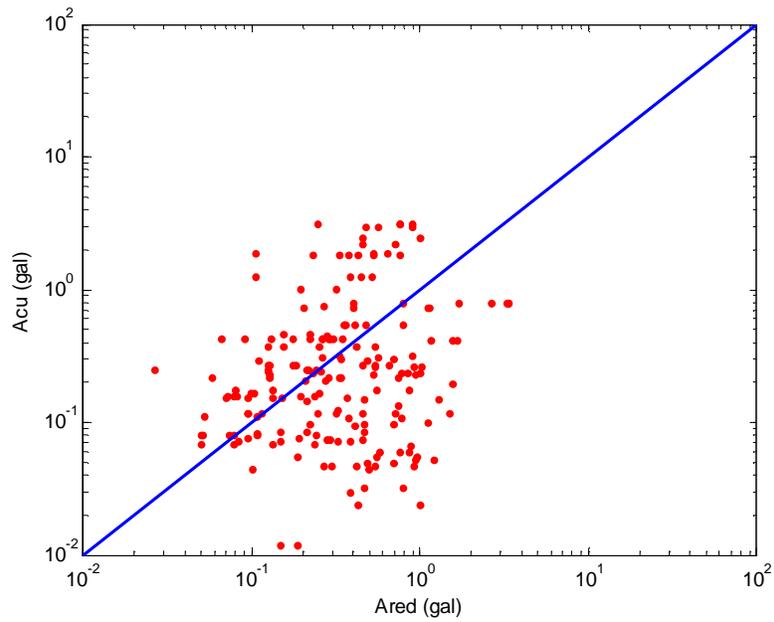


Figura IV.11. Ajuste de datos utilizando la expresión (IV.6) con los valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $n$  obtenidos por I07

Como se observa en la gráfica, empleando los parámetros anteriores los resultados no parecen buenos porque se esperaba que los datos no se ubicaran de forma tan dispersa, por este motivo se realizó la regresión para obtener los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  correspondientes a este trabajo, el resultado se muestra en la Figura IV.12:

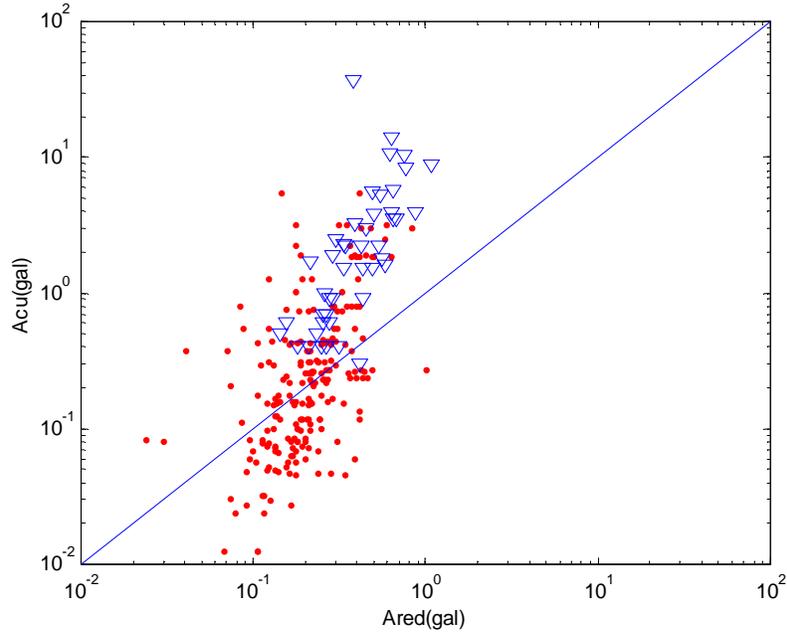


Figura IV.12. Gráfica de ajuste de los datos (puntos rojos) de este trabajo obtenidos por medio de la expresión (IV.5) con  $n = 0.5$ ,  $\alpha = 3.65 \times 10^{-5}$  y  $\beta = 0.3434$ . Con triángulos azul es se muestran los datos usados en I07 (no usados en la regresión aquí mostrada)

La gráfica IV.12 muestra un sesgo que indica que la expresión propuesta en I07 (ecuación IV.4) se puede reformular. Como se menciona en el trabajo referido, el exponente  $\beta$  fue agregado artificialmente para lograr un mejor ajuste. El factor  $A_{rms}^\beta$  podría explicar la amplificación que sufren las ondas sísmicas en la cuenca del Valle de México, inclusive en el sitio de Ciudad Universitaria. Sin embargo no parece físicamente explicable que esta amplificación sea dependiente de  $A_{rms}$ . Por lo que se propone modificar la ecuación (IV.6) de tal modo que considere un factor no dependiente de  $A_{rms}$ . La ecuación propuesta es la siguiente:

$$A_{red} = e^k A_{rms} e^{\alpha(R_{CU} - R_S)} \left( \frac{R_S}{R_{CU}} \right)^n, \quad (IV.10)$$

donde el factor  $e^k$  no depende de  $A_{rms}$ .

La ecuación anterior se puede expresar como:

$$\ln A_{CU} - \ln A_{rms} = \alpha(R_{CU} - R_S) + n \ln \left( \frac{R_S}{R_{CU}} \right) + k, \quad (IV.11)$$

renombrando variables:

$$d_i = \ln A_{CU} - \ln A_{rms},$$

$$x_i = R_{CU} - R_S, \text{ y}$$

$$y_i = \frac{R_S}{R_{CU}}.$$

Así, (IV.11) se puede re-expresar como:

$$d_i = m_1 x_i + m_2 y_i + m_3, \quad (\text{IV.12})$$

donde:

$$m_1 = \alpha, \quad m_2 = n \text{ y } m_3 = k.$$

La ecuación (IV.12) se puede expresar en forma matricial como:

$$Gm = d, \quad (\text{IV.13})$$

donde:

$$G = \begin{bmatrix} x_1 & \ln(y_1) & 1 \\ x_2 & \ln(y_2) & 1 \\ x_3 & \ln(y_3) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & \ln(y_n) & 1 \end{bmatrix}, \quad m = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \text{ y } d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_i \end{bmatrix}.$$

Aplicando la inversa lineal generalizada por mínimos cuadrados:

$$m = (G^T G)^{-1} * G^T d, \quad (\text{IV.14})$$

Para encontrar los valores de  $\alpha$ ,  $n$  y  $k$  más convenientes se utilizó un programa escrito en MATLAB para resolver la ecuación (IV.14). Los resultados conseguidos fueron  $\alpha = -0.0036$ ,  $n = 0.4178$  y  $k = 2.7713$ . La figura (IV.13) muestra la gráfica de los datos reducidos para los valores de los parámetros encontrados.

El coeficiente de correlación ( $\gamma$ ) entre los datos reducidos ( $A_{red}$ ) y  $A_{CU}$  se calculó como:

$$\gamma = \frac{\text{cov}(A_{CU} * A_{red})}{\sigma_{A_{CU}} * \sigma_{A_{red}}}, \quad (\text{IV.15})$$

donde  $\text{cov}(A_{CU} * A_{red})$  es la covarianza y  $\sigma_{A_{CU}}, \sigma_{A_{red}}$  son las desviaciones estándar de ambas variables, respectivamente.

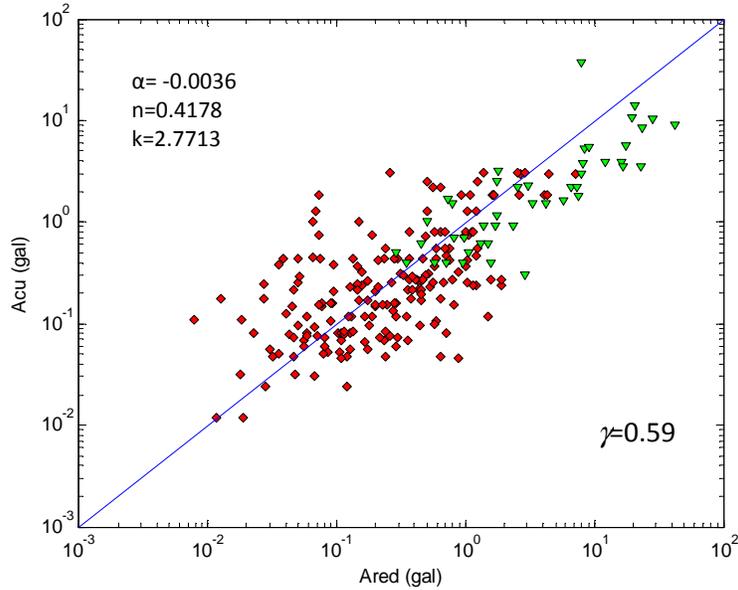


Figura IV.13. Gráfica obtenida con la expresión (IV.7) para los datos filtrados de este trabajo (puntos rojos). Con triángulos verdes se muestran los datos usados en I07 y reducidos con los parámetros mostrados (no usados en la regresión aquí mostrada)

Se llevó a cabo un análisis estadístico de prueba de hipótesis con el fin de comparar los resultados obtenidos con ambos modelos. Con este fin se planteó la siguiente expresión:

$$\ln A_{CU} = \alpha(R_{CU} - R_S) + n \ln \left( \frac{R_S}{R_{CU}} \right) + \beta \ln A_{rms} + k$$

que generaliza a los dos modelos anteriores.

Así, se plantearon la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) como:

$H_0$ : El modelo donde:  $\beta \neq 1$ ,  $k=0$  y  $n=0.5$  se ajusta mejor al conjunto de datos (Expresión IV.5)

$H_a$ : El modelo donde:  $\beta=1$ ,  $k \neq 0$  y  $n \neq 0.5$  se ajusta mejor al conjunto de datos (Expresión IV.11)

A continuación se presenta el análisis de la varianza hecho a través de las tablas ANOVA (Analysis of Variance) para cada uno de los modelos y que nos servirá para tener una idea de cómo se comportan según la regresión hecha los resultados se muestran en las tablas IV.1 y IV.2

Tabla IV.1. Tabla ANOVA para el primer modelo

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>
Regresión	2	74.9073225	37.4536613	35.8387221
Residuos	192	200.651768	1.04506129	
Total	194	275.559091		

Tabla IV.2. Tabla ANOVA para el segundo modelo

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>
Regresión	3	97.5240356	32.5080119	34.8753242
Residuos	191	178.035055	0.93212071	
Total	194	275.559091		

Las tablas IV.1 y IV.2 muestran que la suma de cuadrados para el segundo modelo es mayor, entonces este modelo podría significar una mejora sobre el primer modelo que se presenta. Cabe mencionar que los valores de F son muy similares lo que nos dice que no existe a través de la comparación de estos estadísticos una comparación definitiva que nos ayude a concluir cual de los dos modelos es mejor.

A continuación se realizaron los cálculos de los intervalos de confianza al 95% y se calcularon los valores del estadístico t para probar las hipótesis antes planteadas y así poder determinar cuál de los dos modelos es el que más se ajusta a los datos. Los resultados para la hipótesis nula se muestran en la tabla IV.3:

Tabla IV.3 Valores obtenidos para la expresión IV.5

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
$\alpha$	3.65E-05	0.0004	0.0902	-0.0007	0.0008
$\beta$	0.3434	0.0301	11.3768	0.2838	0.4029

Como se puede observar en la tabla IV.3, los errores de ambos coeficientes son pequeños, indicando su estrecho margen de error. Revisando en la tabla de la distribución t de student, para la confianza del 95% ( $p=0.05$ ), con más de 190 grados de libertad, como este caso, se tiene que  $t(0.05,192)\approx 1.97$ . Para saber si  $\beta=1$  en este modelo se tiene que:

$$t_{\beta} = \frac{\beta - 1}{\text{Error típico}} = \frac{0.3434 - 1}{0.0301} = -21.74$$

Como  $|t_{\beta}| > t$ , se rechaza la hipótesis de que  $\beta = 1$  para este modelo.

Para la hipótesis alternativa se realizaron los cálculos correspondientes y se obtuvo la tabla IV.4

Tabla IV.4 Valores obtenidos para la expresión IV.11

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Inferior 95%	Superior 95%
k	2.7713	0.1578	17.5585	2.4599	3.0826
$\alpha$	-0.0036	0.0010	-3.5324	-0.0055	-0.0015
n	0.4178	0.0973	2.4151	0.0765	0.7591

Al igual que en la tabla anterior, en la tabla IV.4 los valores del error típico o estándar muestran el estrecho margen de error para los coeficientes de este modelo. El valor de  $t(0.05,191) \approx 1.97$ . De igual forma se calcularon los valores de t para  $k=0$  y  $n=0.5$ . Los valores obtenidos son:  $t_k=17.5575$  y  $t_n=-0.8441$ . Por lo que  $|t_k| > t$  y  $|t_n| < t$ , lo que indica que se rechaza la hipótesis de que  $k=0$  pero no hay suficientes elementos para argumentar que  $n \neq 0.5$ .

Aunada a las pruebas t realizadas, se obtuvo el valor de la prueba F. Para poder decidir el rechazo o aceptación de la hipótesis nula, se denomina al modelo de la  $H_a$  "modelo completo (C)", pues  $k \neq 0$ , y al modelo de la  $H_0$  "modelo restringido (R)", así, se calcula la prueba F del siguiente modo:

$$F_R = \frac{(SCR_R - SCR_C) / (g.l._R - g.l._C)}{SCR_C / g.l._C}$$

Donde:  $SCR_C$  y  $SCR_R$  = Suma de cuadrados de los residuos del modelo completo y restringido, respectivamente, y,  $g.l._C$  y  $g.l._R$  = grados de libertad del modelo completo y restringido. De este modo se obtuvo:

$$F_R = \frac{(200.65 - 178.035) / (192 - 191)}{178.035 / 191} = 24.263$$

El valor para la  $F(g.l._R - g.l._C, g.l._C) = F(1,191)$  en las tablas de la prueba F de Fisher para una probabilidad del 0.05 es  $\approx 3.02$ .

Por lo tanto, como  $F_R > F$ , entonces se rechaza la hipótesis nula.

Como complemento a estas pruebas se plantearon pruebas de bondad de ajuste y para ello se utilizaron:

- 1) El coeficiente de correlación  $\gamma$ .
- 2) El coeficiente de determinación  $R^2 = \gamma^2$ .

Estas técnicas se seleccionaron porque una vez ajustada la recta de regresión a la nube de observaciones es importante disponer de una medida de la bondad del ajuste realizado y que permita decidir si el ajuste lineal es suficiente.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se utiliza como medida de bondad del ajuste, mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente respecto a su media que es explicada por el modelo de regresión, éste representa también la habilidad de la recta estimada para representar los datos. El coeficiente de correlación es una medida de la relación lineal que hay entre ambas variables. Los resultados se presentan en la tabla IV.5.

Tabla IV.5. Coeficientes de correlación y determinación para ambos modelos

<i>Estadísticas de la regresión</i>	<i>Regresion Fig. IV.12</i>	<i>Regresion Fig. IV.13</i>
Coeficiente de correlación múltiple	0.5204	0.5949
Coeficiente de determinación $R^2$	0.2708	0.3549
$R^2$ ajustado	0.2670	0.3515
Error típico	1.0230	0.9622
Observaciones	194	194

Como se observa en la tabla IV.5, el segundo modelo muestra una ligera mejoría (~10%) tanto en el valor de  $R^2$  como en el de  $\gamma$ , lo que una vez más comprueba que el rechazo de la hipótesis nula es la mejor opción.

### IV.3 Fallos y falsas alertas

Para realizar la prueba de falsas alertas y fallos que resultarían del procedimiento aplicado, se requiere de establecer valores de  $A_{red}$  y  $A_{CU}$  que no deban ser excedidos, pues si dichos umbrales se excedieran se caería en un fallo o falsa alerta, respectivamente.

Un fallo se presenta cuando un movimiento fuerte se presenta y la alerta no da aviso de él. Las falsas alertas están definidas como las alertas que no debieron ser emitidas pues el movimiento no tiene las características para ser considerado como fuerte.

Al umbral establecido para  $A_{red}$  lo llamamos  $A_{min}$  pues sería el mínimo valor que se requeriría para disparar la alerta. Al umbral para  $A_{cu}$ , lo llamamos  $A_L$ , que es un valor de aceleración que sirve como parteaguas entre los movimientos fuertes y pequeños.

Para fijar un valor de  $A_{min}$ , se calculó la probabilidad de fallos y falsas alertas. En la Tabla IV.4 se muestran las pruebas realizadas:

Tabla IV.4. Probabilidades de fallos y falsas alertas para diferentes valores de  $A_{min}$  y  $A_L$

$A_{min}$ (gal)	% de Fallos			% de Falsas alertas		
	$A_L=0.3$ (gal)	$A_L=1$ (gal)	$A_L=2$ (gal)	$A_L=0.3$ (gal)	$A_L=1$ (gal)	$A_L=2$ (gal)
0	0	0	0	63.4	86.6	94.3
0.1	5.1	1.5	0	41.2	60.8	67
0.8	22.7	4.6	2.1	4.6	9.8	14.9
1	24.2	5.1	2.1	3.6	7.7	12.4
5	36.1	12.9	5.1	0	0	0
8	36.6	13.4	5.7	0	0	0
10	36.6	13.4	5.7	0	0	0

Los valores establecidos en I07 fueron  $A_{min}=0.8$  (gal) y  $A_L= 2$  (gal). Los resultados con estos valores y los datos de este trabajo se muestran en la Figura IV.14.

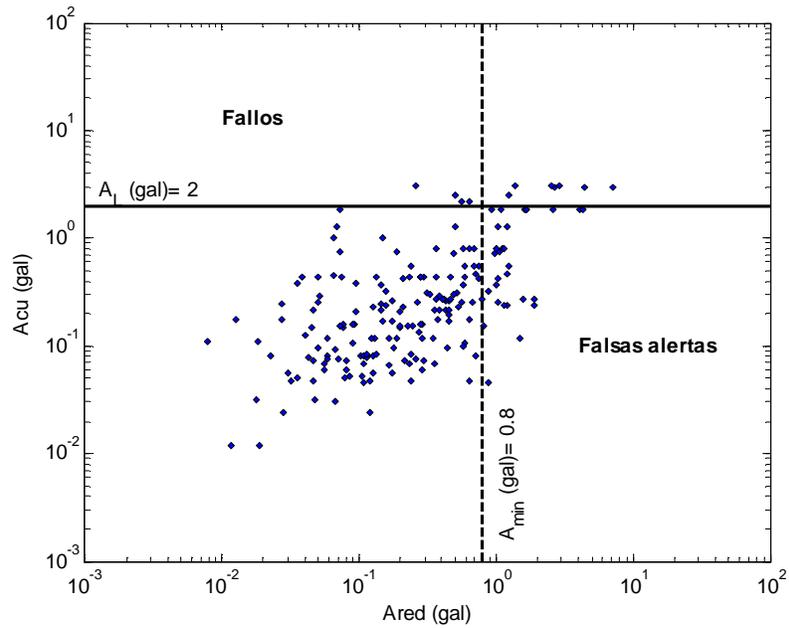


Figura IV.14. Gráfica obtenida con los datos del presente trabajo considerando los valores de  $A_{min}$  y  $A_L$  obtenidos por I07.

Con estos valores efectivamente, se obtiene un porcentaje bajo de falsas alertas y fallos, esto se puede corroborar con la Tabla IV.4. Con estos umbrales el porcentaje de efectividad del sistema sería del 83%. Los umbrales seleccionados para este trabajo son  $A_{min}=1$  (gal) y  $A_L=1$  (gal). El resultado se muestra en la Figura IV.15

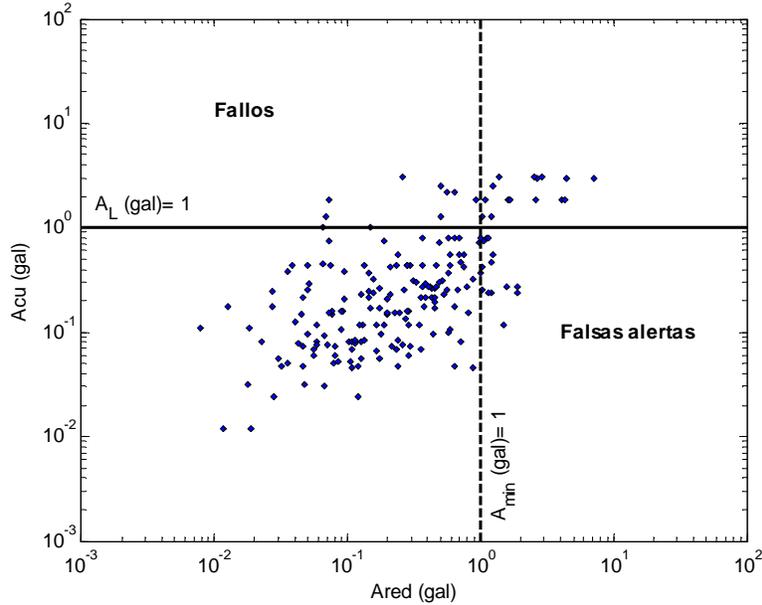


Figura IV.15. Gráfica obtenida con valores de  $A_{min}$  y  $A_L$  concernientes a ese trabajo.

En la gráfica de la Figura IV.15, se nota que si bien el número de fallos aumenta el de falsas alertas disminuye. El porcentaje de efectividad del sistema aumenta a 87.2%, por lo que dichos valores utilizados harían que el sistema fuera más efectivo

#### IV.4 Ajuste de los datos con respecto a $R_s$

Como se mencionó anteriormente  $R_s$  es la distancia hipocentral de las estaciones cercanas a la fuente. Para observar si existe una dependencia clara de la expresión (IV.7), con respecto de esta distancia, se graficaron los residuales del ajuste con respecto a la distancia  $R_s$ . La gráfica obtenida se muestra en la Figura IV.16. Realizar esta gráfica va a ayudar también a ver si la supuesta relación lineal entre las variables no es correcta y se necesita realizar alguna transformación.

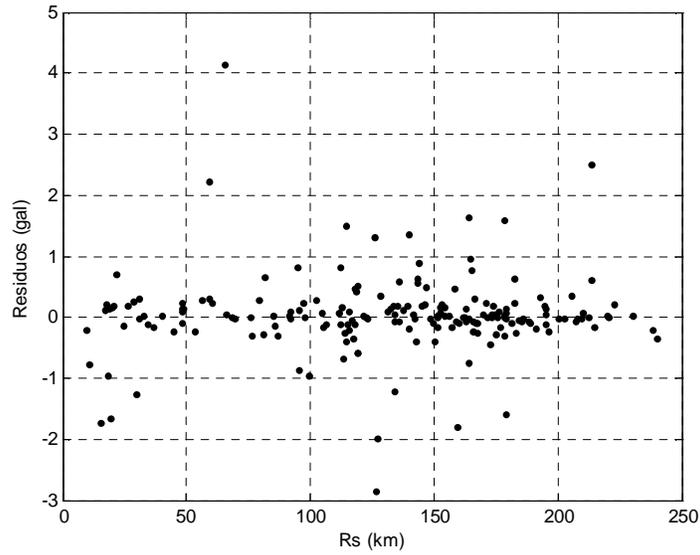
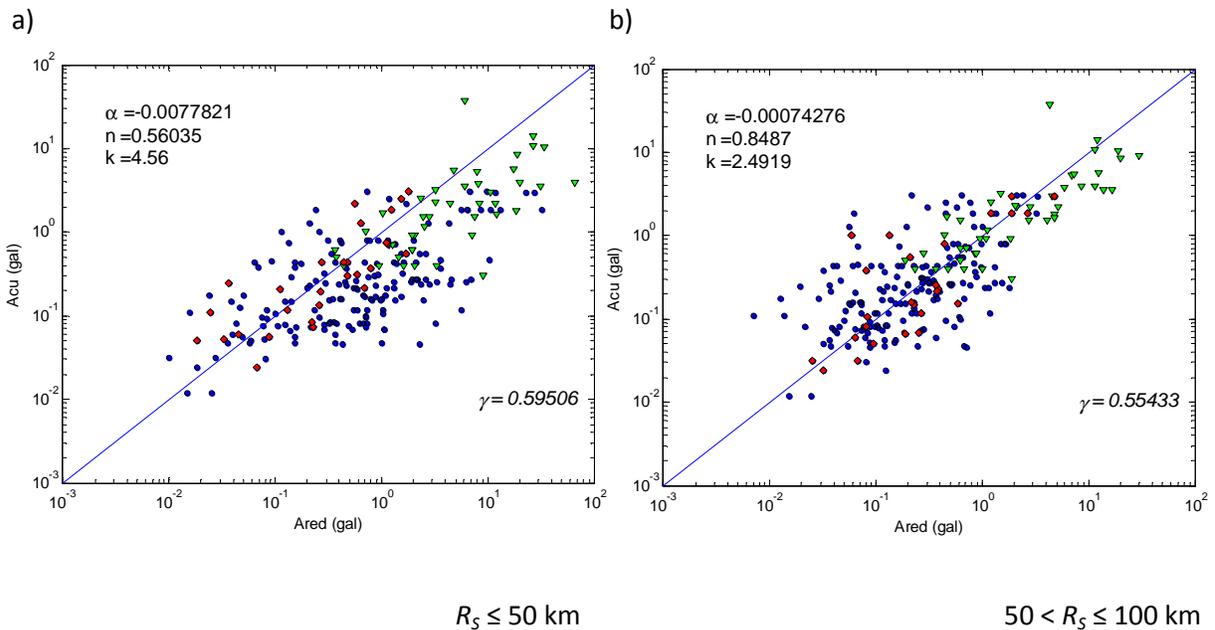


Figura IV.16. Residuales con respecto a  $R_s$

Como se puede ver en la Figura IV.16, los residuos se distribuyen a ambos lados del eje x en forma aleatoria con una variabilidad dentro del límite de -2 a 2 gales. En esta misma figura se puede observar que la mayor cantidad de datos se encuentra en el rango de  $100 < R_s < 200$  km como ya lo habíamos establecido anteriormente. Para comprobar que tanto influye la distancia  $R_s$  en el ajuste planteado en este trabajo se realizaron diferentes ajustes para rangos distintos de  $R_s$ . Los rangos de 50 km corresponderían a la ubicación de las estaciones en un escenario ideal, como ya se comentó con anterioridad. Las gráficas obtenidas se presentan en las Figuras IV.17.



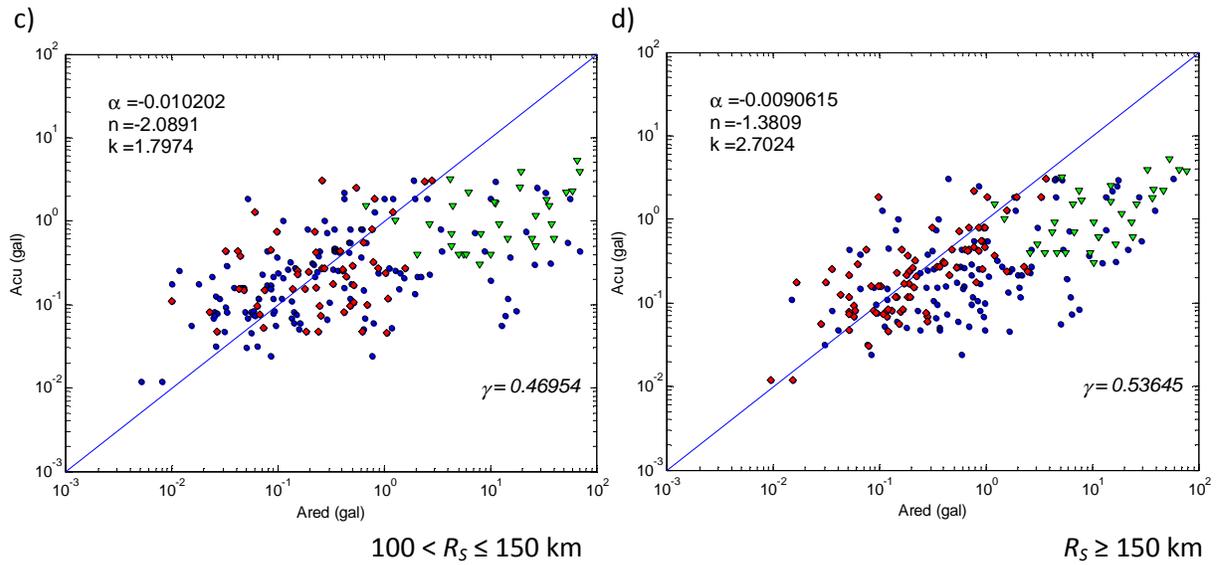


Figura IV.17.  $A_{red}$  vs.  $A_{CU}$  con diferentes valores de parámetros para regresiones de subconjuntos de datos a)  $R_s \geq 50$  km, b)  $50 < R_s \leq 100$  km, c)  $100 < R_s \leq 150$  km y d)  $R_s > 150$  km. Los puntos rojos son los datos correspondientes al rango presentado, los azules representan el resto de los datos y los verdes son los datos utilizados por I07

Al realizar los diferentes ajustes en los rangos mencionados se observa que el mayor coeficiente de correlación y por consiguiente el mejor ajuste se encuentra en el rango  $0 < R_s \leq 50$  km, como se puede observar en la figura IV.17a. Sin embargo, el mejor coeficiente de correlación obtenido es igual al obtenido sin haber separado los datos por rangos lo que nos dice que los resultados de la regresión para este catálogo si dependen de  $R_s$ .

## V. IMPLEMENTACIÓN EN TIEMPO REAL

Habiendo expuesto el procesamiento de datos que debe realizarse para plantear un nuevo sistema de alerta temprana, en este capítulo se presentan las consideraciones que hay que seguir para la futura implementación de dicho sistema.

### V.1 Instalación, operación y mantenimiento de redes sismológicas con transmisión telemétrica.

Como se mencionó en el punto II.2 los equipos de medición de las estaciones se encuentran alojados en casetas especialmente construidas para protegerlos de la intemperie y minimizar los efectos del ruido y la temperatura. La adquisición y procesamiento de los datos sísmicos se realiza mediante computadoras personales. Las estaciones cuentan, además, con un reloj GPS que permite obtener referencias de tiempo con una precisión muy alta.

Los datos de las redes del SSN se transmiten en tiempo real a través de un sistema VSAT. En la estación central, ubicada en Ciudad Universitaria, se almacena, procesa y analiza la información de las diferentes redes. El esquema de transmisión de datos se muestra en a Figura V.1.

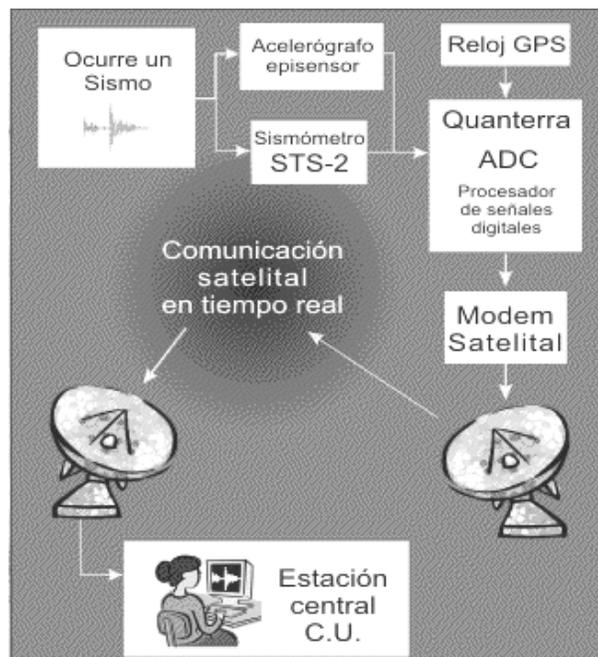


Figura V.1. Esquema de transmisión de datos (Fuente: <http://www.ssn.unam.mx>)

Por otro lado, el Instituto de Ingeniería opera una extensa red de acelerógrafos distribuidos en los estados de Michoacán, Guerrero, Colima y Oaxaca. La mayoría de estos equipos se encuentran instalados en campo libre y funcionan de manera autónoma. Esta red ha crecido paulatinamente y tiene sus orígenes en lo que se conoce como “la Red Acelerográfica de Guerrero” (Quass et al., 1989). Recientemente algunas de las estaciones de esta red han sido comunicadas vía ADSL (prodigy infinitum) y estos datos están siendo compartidos con el SSN. La figura V.2 muestra la localización de algunas de las estaciones del SSN y del Instituto de ingeniería en el área de interés.

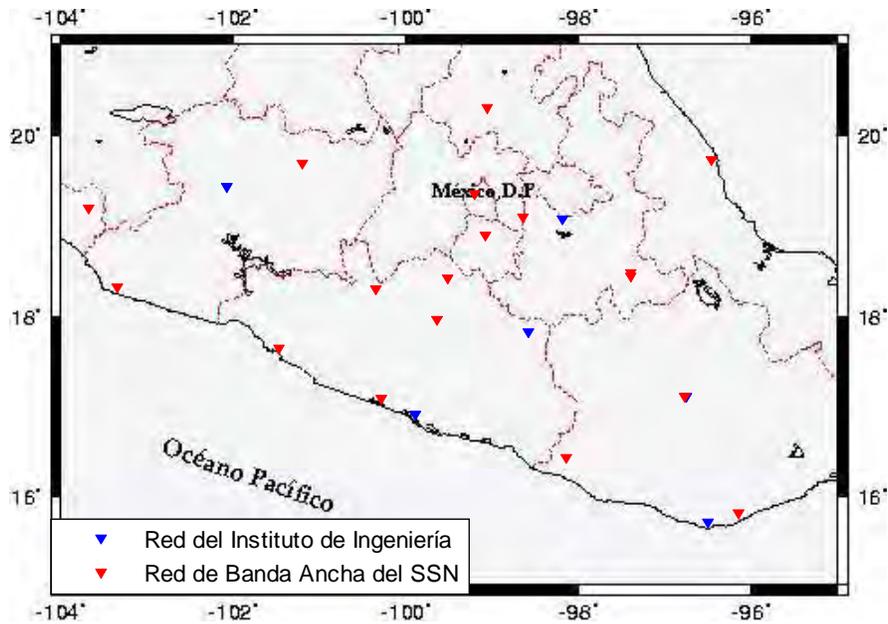


Figura V.2. Localización de algunas estaciones de la Red de Banda Ancha del SSN y de la Red monitoreada por el Instituto de Ingeniería

En el siguiente apartado se describirá el funcionamiento de una red VSAT.

## V.2 Sistema VSAT

VSAT (Very Small Aperture Terminals) significa, terminal de muy pequeña apertura. Son redes privadas de comunicación de datos vía satélite para intercambio de información, están diseñadas a la medida de las necesidades de las compañías que las usan. La red puede tener baja o gran densidad (1000 - 2500 estaciones VSAT) y está controlada por una estación central llamada HUB que organiza el flujo de información entre terminales, y optimiza el acceso al satélite. Los dispositivos de comunicación suelen ser potentes en transmisión y tienen buena sensibilidad en recepción.

La configuración típica para una red VSAT es un arreglo en estrella en la cual los enlaces necesitan de una estación terrena retransmisora. Se habla de redes estrella bidireccionales cuando las aplicaciones requieren que se comuniquen los VSAT's con el HUB y viceversa (Maral, G., 1995).

Los elementos que componen una red VSAT son:

- Estación HUB. El HUB es una estación más dentro de la red pero con la particularidad de que es más grande (la antena típicamente es 4 a 10 metros) y maneja más potencia de emisión. Habitualmente el HUB está situado en la sede central de la empresa que usa la red o en su centro de cálculo. El diagrama de una estación hub se muestra en la Figura V.3

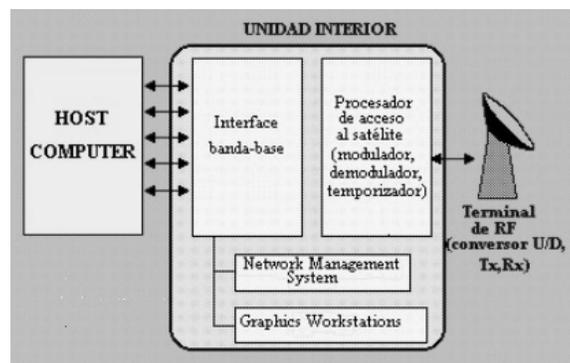


Figura V.3. Diagrama de bloques de una estación hub (Fuente: <http://www.teltelematica.freesevers.com/VSAT.htm>)

El HUB está compuesto por: la unidad de radiofrecuencia (RF) que se encarga de transmitir y recibir las señales; la unidad interna que puede estar conectada a la computadora que se encarga de administrar la red corporativa; y el Network Management System (NMS) que desde el HUB monitoriza toda la red de VSAT's, éste un computador o estación de trabajo que realiza diversas tareas como: configurar la red, control de las terminales, confección de informes, tareas administrativas, entre otras.

- Segmento Espacial. Formado por el satélite geoestacionario cuya función consiste en amplificar y cambiar las frecuencias de recepción, unos recursos electromagnéticos de ancho de banda y potencia, los cuales están limitados obviamente por razones técnicas y legales. Es el único canal por donde se realiza la comunicación. Debe ser contratado a empresas o consorcios proveedores de capacidad espacial
- Estaciones terrenas de redes. Están compuestas por 2 elementos: unidad exterior que es la interfaz entre satélite y el VSAT compuesta por la antena, sistemas electrónicos, duplexor, amplificador de potencia, etc. y la unidad interior que es la interfaz entre el VSAT y el terminal de usuario o LAN (Maral, G., 1995).

Una vez instalado el equipo, la antena se debe apuntar hacia el satélite. El azimut se define desde el norte geográfico por lo que hay que considerar la declinación magnética.

En el caso del SSN, el HUB se encuentra en CU. Las estaciones terrenas de VSAT se encuentran en cada estación de banda ancha. Los datos de las estaciones remotas se suben al satélite y luego se bajan en una estación que está en Iztapalapa (en una empresa llamada "Integra") y luego se mandan a CU por internet.

### **V.3 Herramientas para el procesamiento de los registros sísmicos.**

El SSN tiene la misión fundamental de ofrecer información confiable y rápida de la sismicidad que ocurre y/o afecta al país. Rutinariamente procesa los datos sísmicos adquiridos para determinar localización y magnitud de sismos con magnitud  $M \geq 3.0$ . Adicionalmente, el SSN mantiene una base de datos digitales y de registros en papel. En la actualidad, el corazón del procesamiento y almacenamiento de los datos es el *software* de uso libre llamado *Earthworm* (EW). Las funciones primarias de EW son funcionar como servidor de datos en tiempo real (o casi-real), realizar la detección de sismos y calcular el hipocentro y la magnitud con rapidez y fiabilidad.

#### **V.3.1 *Earthworm***

El *software Earthworm* tiene dos objetivos principales: (1) Proporcionar un sistema adecuado de respuesta rápida para aplicaciones de monitoreo; (2) Operar como vehículo para integrar los resultados de varias instalaciones sísmicas dentro de un *software* disponible al que se pueda acceder de manera fácil. Ambos objetivos implican que el sistema sea sólido y fiable, aunque el segundo al ser una compilación de información de diversas fuentes tendrá distintos niveles de solidez y fiabilidad, lo que requiere de una buena organización para ofrecer estándares altos de servicio así como la corrección rápida de errores.

El sistema *Earthworm* está conformado por un conjunto de módulos de procesamiento para la integración de la red regional de datos sísmicos. Los módulos individuales tienen funciones específicas como: adquisición de datos digitales, digitalización de datos analógicos, identificación de la fase de arribo, medidas de amplitud y duración, asociación de eventos, determinación del hipocentro, generación de un catálogo de eventos, entre otros. El procesamiento es completamente automático, y se origina a partir de la recolección e integración de los datos sísmicos digitales y analógicos, genera catálogos de terremotos y una alarma casi en tiempo real, sin intervención humana. No obstante, cualquiera de los eventos procesados automáticamente puede ser reexaminados por analistas si se desea.

La arquitectura del sistema está diseñada para generar 'mensajes' y transmitirlos. Cada función sísmica está dentro de un módulo del *software*, cada uno de éstos es un programa principal

independiente. Los módulos pueden usar esas rutinas para generar 'mensajes', y transmitirlos en un medio común por ejemplo, la red local. Los módulos también pueden 'sintonizar' mensajes en estos medios y tomar en cuenta mensajes de interés para ellos por ejemplo, los datos de la traza<sup>1</sup>.

Hay dos maneras de transmisión. La primera utiliza las redes de área local y es usada para la comunicación entre módulos en diferentes computadoras. La segunda está basada en un mecanismo de comunicación interproceso, y permite la comunicación entre módulos que están en una misma computadora.

El funcionamiento del sistema se monitorea de manera continua y puede mandar mensajes de error. Si un módulo deja de funcionar o detecta un error, el sistema emite una notificación. Además, existe un ordenador capaz de generar alarmas.

Hay beneficios del software Earthworm que se deben resaltar como el hecho de que se pueden usar varios sistemas operativos ( p.ej. SUN, Solaris, DOS y OS/2), lo que permite que *Earthworm* esté basado en la plataforma más adecuada y rentable para cada instalación, además se pueden intercambiar varios tipos de datos con otras redes casi en tiempo real.

Con el paso del tiempo la Central Earthworm ha evolucionado, mantiene el software Earthworm, acepta contribuciones, desarrolla códigos, produce documentación y versiones de EW. Este grupo es responsable de asegurar la calidad y la corrección de errores. Hay actualmente tres categorías de software dentro de Earthworm: básico, de contribuciones y encapsulado o restringido.

## V.4 Tiempo de ventaja ( $T_v$ )

Definimos al tiempo de ventaja ( $T_v$ ) como la diferencia en tiempo entra la emisión de una eventual alerta en una estación cercana que haya detectado el sismo, y el tiempo de arribo de las ondas de mayor amplitud a la estación de referencia en la ciudad (CUIG). Para hacer una estimación del tiempo se usaron registros de las estaciones cercanas así como los registros observados en CU para los datos del catálogo analizado en la sección previa. La estimación del tiempo de ventaja nos mostrará las bondades que nos ofrecería un sistema de alerta temprana cuyo algoritmo se base en el cálculo de la aceleración esperada, objetivo de este trabajo.

Hay una consideración que debe destacarse, al tiempo de llegada de las ondas S en las estaciones cercanas a la fuente se le suman 10 segundos que es la ventana que ya se mencionó en IV.2 y, en los registros de CU, se toma el tiempo en que se presenta el movimiento fuerte.

---

<sup>1</sup> <http://www.iris.iris.edu/newsletter/FallNewsletter/earthworm.html>

Por ejemplo:

Para el sismo del 10 de Diciembre del 2004 cuyo registro inicia a las 10:31:28 a.m. en la estación de Pinotepa Nacional, Oaxaca (PNIG) y a las 10:32:29 en CU (CUIG), el tiempo de ventaja sería el mostrado en la Figura V.4:

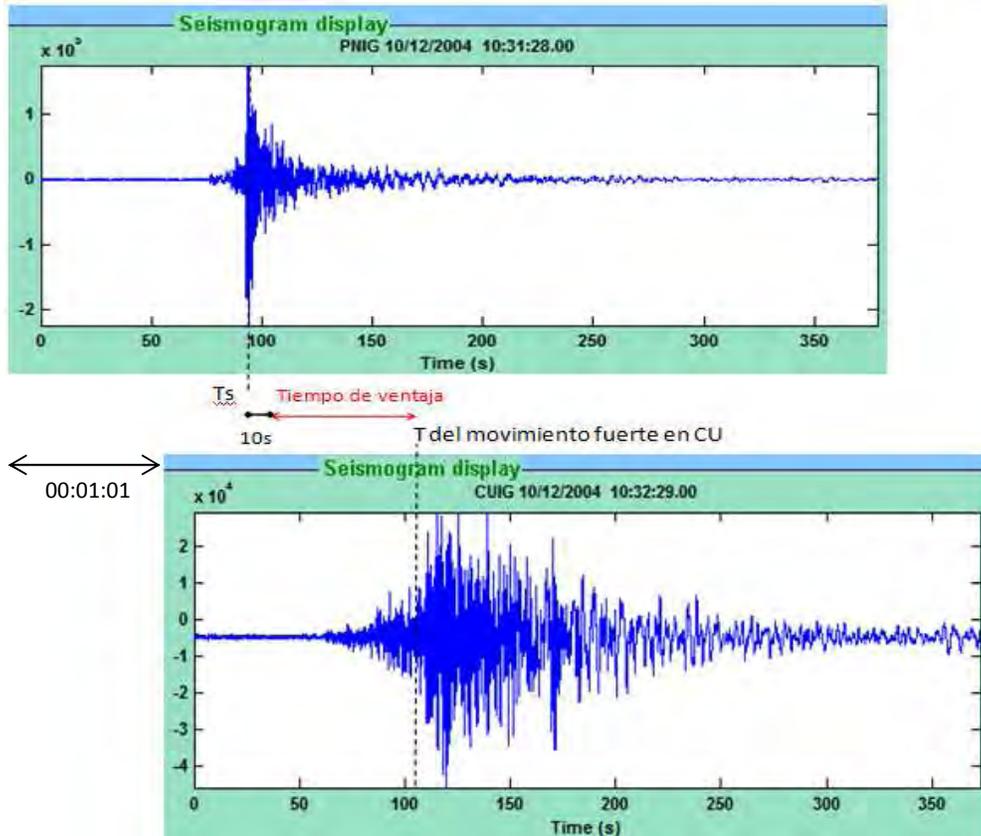


Figura V.4. Forma de obtener el tiempo de ventaja para los datos del catálogo de este trabajo

Como se puede observar en la Figura V.4, los registros de las estaciones PNIG y CUIG están desfasados por 1:01 minutos pues es la diferencia de tiempo en que comenzaron los registros en dichas estaciones. Ambos tiempos, tanto el de la llegada de la onda S a la estación como el del movimiento fuerte en CU, fueron elegidos manualmente. Con el criterio mencionado, se obtuvieron los tiempos de ventaja de todas las estaciones presentadas en la Tabla IV.1 y se graficaron con respecto a  $R_S$  y a  $R_{CU}$  por separado. Las gráficas obtenidas se presentan en las Figuras V.5 y V.6 respectivamente. En la Tabla IV.1 se muestran algunos nombres de las estaciones en letras cursivas, esto se debe a que los tiempos de ventaja resultantes en dichas estaciones fueron negativos, lo que significa que el  $T_V$  no existe.

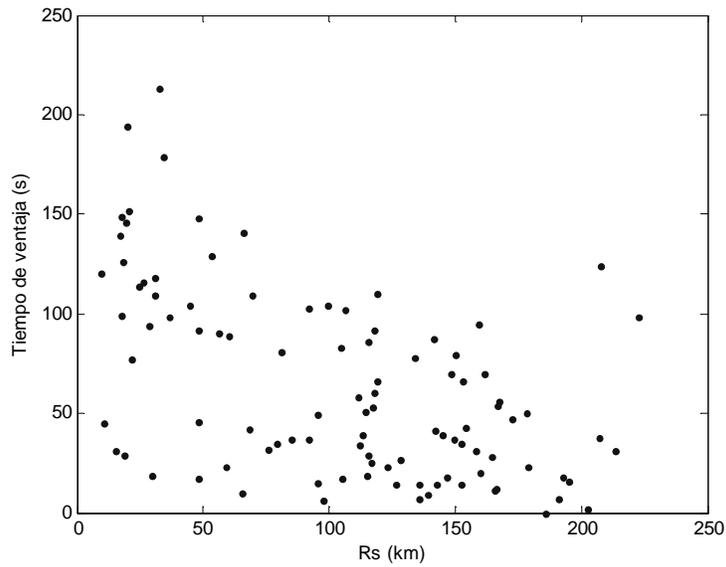


Figura V.5. Tiempo de ventaja en función de  $R_s$

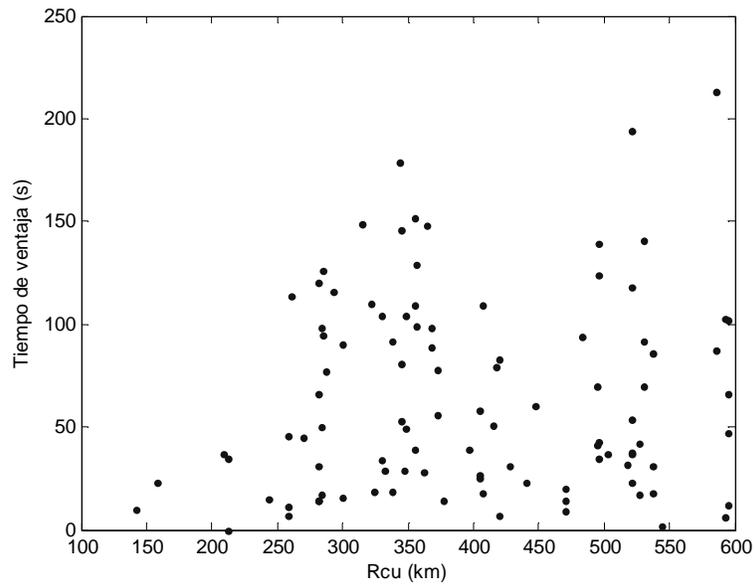


Figura V.6. Tiempo de ventaja en función de  $R_{cu}$

A pesar de la gran dispersión que muestran los datos, para la Figura V.5 los tiempos de ventaja más grandes se obtienen a menor  $R_s$ , esto tiene sentido pues las estaciones más cercanas a la fuente son las que harán el registro más tempranamente aunque en distancias de menos de 50 km también hay tiempos de ventaja cortos, del orden de 20 segundos.

En la Figura V.6, la dispersión es aún más notable, sin embargo, todavía se observa una tendencia donde los tiempos de ventaja mayores se obtienen mientras  $R_{cu}$  es más grande aunque como se puede observar a distancias entre 250-350 km los tiempos de ventaja obtenidos también son bastante buenos, van del orden de 20 segundos hasta más de dos minutos.

La Figura V.7 muestra el resultado de los tiempos “mínimos” de ventaja ( $T_v$ ) para la ciudad de México, suponiendo un arreglo de estaciones que garantizara, que al menos, una estación se encuentra a una distancia  $R_s \leq 50\text{km}$ . Para el cálculo mostrado, se usó una velocidad de propagación de ondas S de  $\beta=3.5\text{ km/s}$  (razonable promedio para las capas superficiales en el centro de México). En este cálculo está considerado un tiempo de análisis  $T_d = 10\text{s}$ :

$$T_v = \frac{R_{cu} - R_s}{\beta} - T_d \quad (\text{V.1})$$

Cabe mencionar, que en este cálculo no se ha tomado en cuenta la profundidad del hipocentro lo que podría implicar tiempos de ventaja ( $T_v$ ) menores, especialmente para sismos profundos.

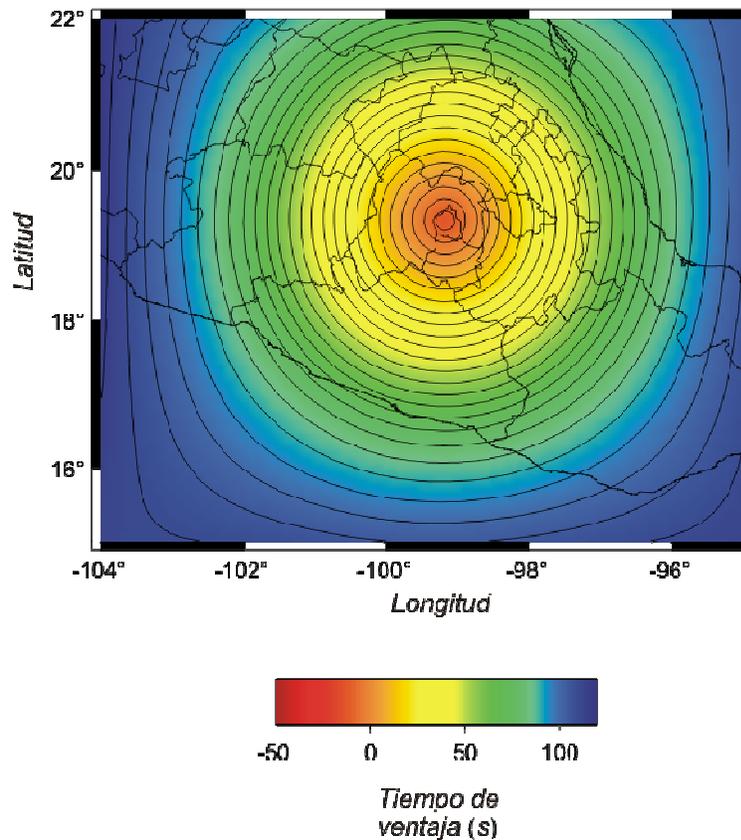


Figura V.7. Tiempos de ventaja teóricos calculados según la ecuación V.1

Como se observa en la Figura V.7, si existiera una ubicación teórica de estaciones a cada 50 kilómetros el tiempo de ventaja para los sismos intraplaca que se presentan en la trinchera de subducción sería del orden de los 50 hasta casi 100 segundos.

La Figura V.8 muestra las estaciones actuales del SSN y el tiempo de ventaja que proporcionarían para una alerta sísmica.

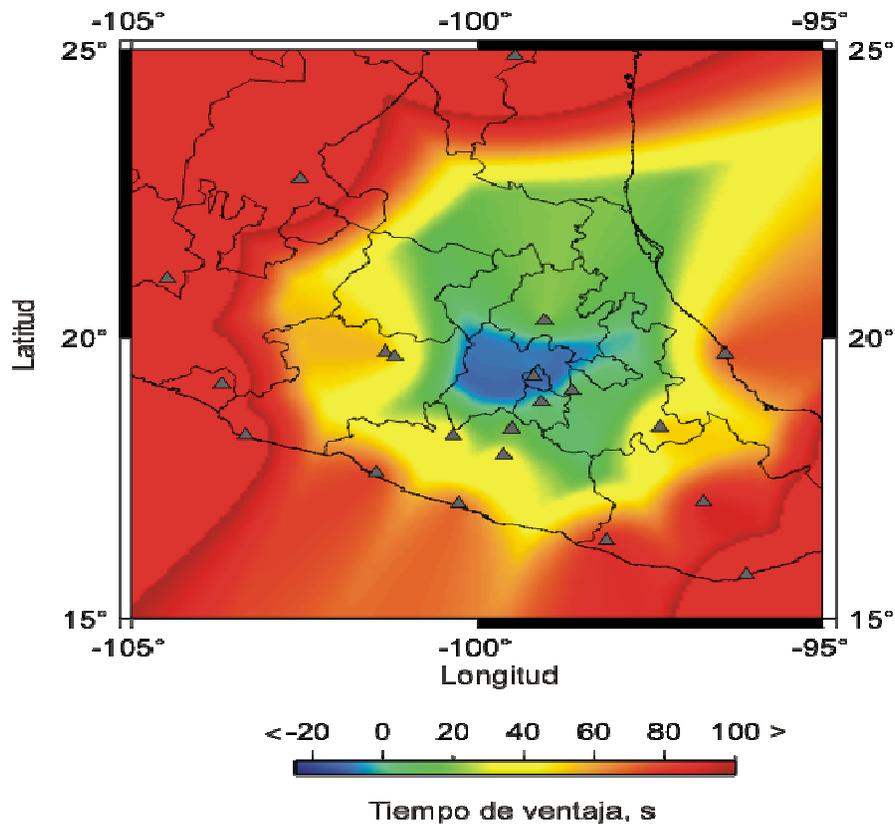


Figura V.8. Tiempos de ventaja "reales" calculados según las estaciones que funcionan actualmente

En la Figura V.8 se puede observar que el tiempo de ventaja aumenta con la presencia de las estaciones. Se ve que se crea una especie de halo alrededor de las estaciones lo que representa el área cubierta por la estación, inclusive, el área verde en el centro-sur del país, donde no hay presencia de estaciones, proporcionaría un tiempo de ventaja menor a 20 segundos, tiempo que es muy corto para realizar algún tipo de acto preventivo aunque hay que mencionar que en ésta área son pocos o casi ninguno los eventos sísmicos que tienen origen ahí.

La Figura V.9 muestra los tiempos de ventaja una vez que se hayan puesto a funcionar las otras estaciones que el SSN ya tiene previsto y también considerando que las estaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM aportarían datos.

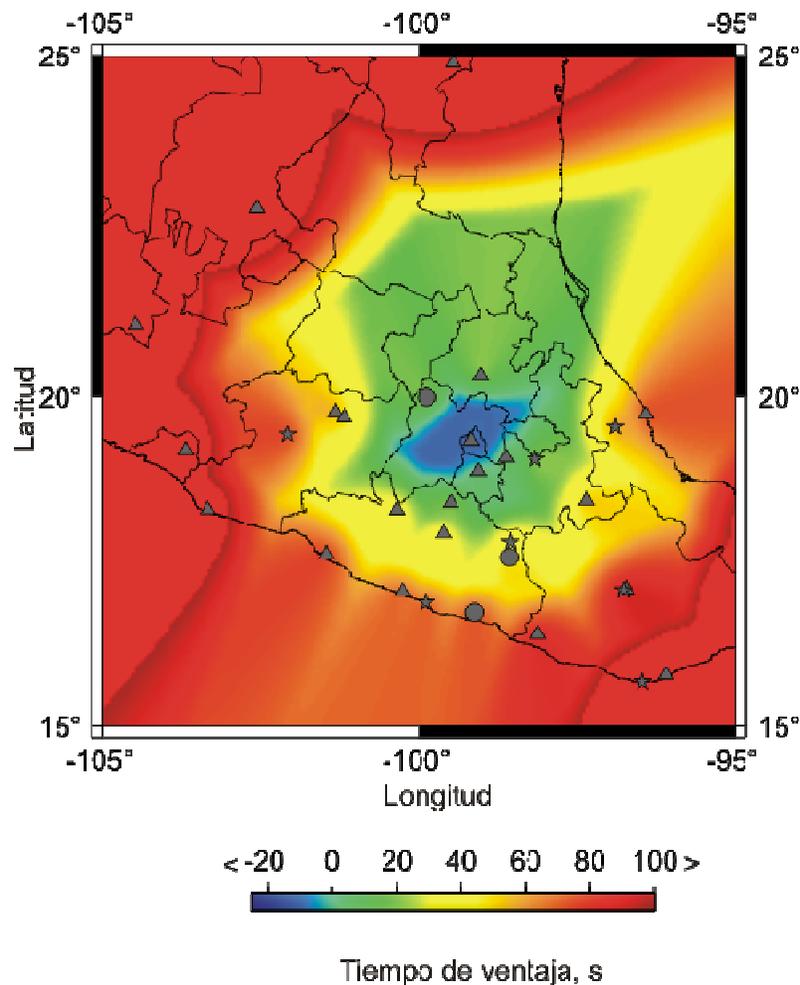


Figura V.9. Tiempos de ventaja “futuros” calculados según las estaciones que funcionan actualmente. Los triángulos representan a las estaciones actuales del SSN, los círculos a las futuras estaciones del SSN y las estrellas a las estaciones del II-UNAM).

Comparando las Figuras V.8 y V.9, se puede apreciar que verdaderamente la presencia de una mayor cantidad de estaciones en el área de la zona de subducción, permite que los tiempos de ventaja aumenten. En la Figura V.9 el área azul y el área verde se reducen en comparación con la extensión de las mismas en la Figura V.8. Esto traduciría en beneficios para la implantación de un sistema de alerta temprana utilizando las estaciones del SSN.

## V.5 Acerca de la implementación en tiempo real

La implementación en tiempo real de la metodología propuesta por I07 y que se utiliza en este trabajo, se realizaría por medio de la creación de un nuevo módulo del software Earthworm. Como se mencionaba con anterioridad, EW son funciona como servidor de datos en tiempo real (o casi-

real), realiza la detección de sismos, calcula el hipocentro y la magnitud. La creación del nuevo módulo implicaría que se ocuparan dichas funciones.

El nuevo módulo tendría que filtrar los datos con un filtro pasa banda (0.2-1 Hz) y obtener de manera rápida la  $A_{rms}$  de las estaciones cercanas a la fuente así como la  $A_{red}$  que es la aceleración pico esperada en CU. El resultado de ejecutar dicho proceso debe ser publicado en 10 segundos después de la llegada de la onda S a la estación cercana, esto con el fin de que el tiempo de ventaja fuera el máximo posible.

Un sistema de Alerta Sísmica Temprana que utilice la red de Banda Ancha del SSN tendría la ventaja de que no sólo tomaría en cuenta los sismos interplaca sino también los intraplaca como el del 22 de mayo del 2009, que se presentó en Puebla y que se pudo sentir fuertemente en la cuenca del Valle de México, porque dichas estaciones, como ya se mostró, se extienden no sólo a lo largo de la trinchera de subducción sino que tienen presencia en toda la zona de interacción entre las placas

## VI.DISCUSIÓN

Las figuras IV.4, IV.5 y IV.6 muestran que el catálogo usado a lo largo de este trabajo es considerablemente heterogéneo:

El número total de registros analizados fue de 194. Más del 80% de los eventos fueron registrados en 2 o más estaciones, lo que garantizaría que el nuevo sistema tuviera el respaldo o redundancia con la que cuenta el SAS. Como era de esperarse, el 61% de los eventos sísmicos se debió a la sismicidad interplaca (sismos de cabalgamiento, T), pues se sabe que la mayoría de los terremotos se ocasionan en la costa del Pacífico, aun así el 39% que representan los sismos intraplaca (IS) es un porcentaje bastante importante que actualmente no se considera para ninguna alerta.

La Figura IV.11 muestra un muy deficiente ajuste entre  $A_{rms}$  y  $A_{red}$  resultado de reducir los datos del catálogo aquí usado con los parámetros propuestos en I07. Es probable que los valores de los parámetros propuestos ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $n$ ) sean fuertemente dependientes del catálogo con el que se lleva a cabo la regresión. Sin embargo, la figura IV.12 muestra que la expresión propuesta en I07 probablemente tiene un problema de parametrización que podría provenir del resultado de suponer que la amplificación de las ondas en CU es dependiente de  $A_{rms}^{\beta}$ . Resultado de una reparametrización del problema la Figura IV.13 muestra un ajuste considerablemente mejor.

Una vez teniendo la nueva expresión se esperaba que las regresiones provocaran coeficientes de correlación más altos para subconjuntos del catálogo con distancias de  $R_s$  pequeñas. Contrario a esto, los datos que presentaron un mejor comportamiento fueron los que se encontraron en el rango de  $50 < R_s \leq 100$  km (figura IV.17b), incluso mostrando una buena correlación para los datos utilizados en I07 (nunca incluidos en las regresiones), y además el coeficiente de correlación fue casi igual al obtenido sin considerar los rangos de  $R_s$ . La figura IV.17 muestra que los valores de  $\alpha$  y  $n$  varían mucho con la selección del catálogo, mientras que  $k$  se muestra un poco más estable pues siempre resulta positiva ( $1.7 < k < 4.5$ ). Esto indica que claramente existe un acomplamiento entre los parámetros  $\alpha$  y  $n$ , lo cual es razonable dado que en la expresión (IV.7) ambos parámetros están multiplicados por combinaciones de  $R_s$  y  $R_{CU}$ .

Las figuras V.5 y V.6, a pesar de la gran dispersión, muestran una dependencia inversa esperada entre el tiempo de ventaja y  $R_s$  y una dependencia casi directa entre  $T_v$  y  $R_{CU}$ . La dispersión de los datos en ambas gráficas puede provenir de que también existe un acomplamiento entre  $R_s$  y  $R_{CU}$ . Por otro lado, de los tiempos teóricos calculados con la expresión V.1 y mostrados en la figura V.7 se puede deducir que:

1.- Usando el esquema propuesto, los sismos corticales ocurridos en el eje volcánico (P.ej Sismo de Acambay, 1912,  $M_s=7.0$ ) tendrían un tiempo de ventaja cercano a cero o negativo.

2.- Los sismos intraplaca de profundidad intermedia de la zona límite del estado de Guerrero con los estados de México, Puebla y Morelos (P ej. Sismos de Tehuacan, 1999  $M_w=6.9$ ; Sismo de Copalillo 2001;  $M_w=5.9$ ) tendrían un tiempo de ventaja corto ( $< 20-30$  s), porque además de que la distancia  $R_{CU}$  no es muy grande, la profundidad de estos sismos es importante ( $h\sim 45$ km).

3.- Los sismos costeros de la zona de Guerrero, así como los sismos ocurridos en la cuenca del río Balsas presentarían un tiempo de ventaja de  $\sim 1$  minuto (comparable con el tiempo proporcionado por el SAS).

4.- Los sismos costeros más lejanos (P.ej. Sismos de Michoacán 1985,  $M_w=8.0$  y  $M_w=7.5$ ) tendrían un tiempo de ventaja de  $\sim 1.5$  minutos.

La definición de los umbrales  $A_{\min}$  y  $A_L$ , cómo los de las Figuras IV.14 y IV.15, más convenientes, debe ser sometido a debate porque son los límites que determinan si se emite la alerta o no, es decir, se define hasta qué punto puede afectar un sismo a la ciudad de México.

---

---

## VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos llevan a concluir que:

- 1) La metodología utilizada para el diseño de una nueva alerta ampliaría la cobertura en un área mayor a la de la actual SAS, no obstante, continua dependiendo de la densidad de estaciones. Si el número de estaciones en la zona de mayor peligro sísmico para la ciudad de México aumentara, mejoraría el rendimiento del sistema proporcionando resultados más precisos. Esto a su vez implica inversión, tanto humana como de capital.
- 2) La cantidad de datos con los que se trabajó superó por 30 eventos sísmicos al análisis realizado por I07 por lo que el re-planteamiento de las fórmulas fue necesario y de utilidad, aún así el ajuste de los datos no se aproxima a un factor de correlación tan cercano a 1 como se esperaba.
- 3) Una vez establecido el procedimiento en el que se basaría la alerta se puede decir que ésta se dispararía en 10 segundos, o menos, después del arribo de la onda S a la estación en que fue detectado el evento sísmico.
- 4) Ningún sistema de alerta temprana es 100% fiable, aunque lo que se busca no es tanto esa fiabilidad total sino un rendimiento satisfactorio que provoque que los usuarios de la alerta confíen más en ella, esto a su vez traería la inversión necesaria para que se lleven a cabo más estudios al respecto y así ir perfeccionando la metodología utilizada.
- 5) Se requiere programar un módulo para el *software Earthworm*, que realice los cálculos necesarios en tiempo casi-real, para así poder comprobar el funcionamiento de esta nueva propuesta de alerta temprana.

## REFERENCIAS

Allen, R. M., Gasparini, P., Kamigaichi, O. y Böse, M. (2009) The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview. *Seism. Res. Lett.* **80**, 682-693.

Böse, M., C. Ionescu, and F. Wenzel, 2007. Earthquake early warning for Bucharest, Romania: Novel and revised scaling relations, *Geophys. Res. Lett.* **34**, L07302, Campillo, M. et al., 1988. The Mexico Earthquake of September 19, 1985. The incident wavefield in Mexico City during the Great Michoacán earthquake and its interaction with the deep basin, *Earthquake Spectra* **4**, 591-608

CENAPRED, 2005. Sismos. Serie Fascículos, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Cuarta Edición, México D. F.

Cruz-Atienza, V.M., 2000. Inversión Global con Algoritmos Genéticos y Cristalización Simulada, aplicada a funciones de receptor: modelos estructurales de velocidades para la corteza en la República Mexicana. *Tesis de Licenciatura inédita, Facultad de Ingeniería, UNAM*, México. 167, 168.

De Cserna, Z. et al., 1988. Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México. Inst. de Geología, UNAM, México, Boletín 104, 71 p.

Delgado, H., Molinero, R., Cervantes, P., Nieto-Obregón, J., Lozano, R., Macías, H., Mendoza, C. y Silva, G., 1998. Geology of Xitle Volcano in southern Mexico City- a 2000 year-old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* **15**, 115-131

Dost, B., Zednik, J., Havskov, J., Willemann, R. y Bormann P., 2001. Data Archival, Exchange and Seismic Data Formats, International Seismological Centre.

Erdik, M., Fahjan, Y., Ozel, O., Alcik, H., Mert, A. y Gul, M., 2003. Istanbul Earthquake rapid response and the Early Warning System, *Bull. Of Earthquake Engineering* **1**, 157-163.

Espinosa-Aranda J.M. et al., 1989a. Sistema de Control para el Disparo de una Alarma Sísmica. *Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Civil*. México.

---

Espinosa-Aranda J.M. et al., 1989b. Evaluación de un Algoritmo para Detectar Sismos de Subducción. *Memorias de los VIII y VII Congresos Nacionales de Ingeniería Sísmica e Ingeniería Estructural*. Guerrero, México.

Espinosa-Aranda, J. M., A. Jimenez, G. Ibarrola, F. Alcantar, A. Aguilar, M. Inostroza, and S. Maldonado, 1995. Mexico City Seismic Alert System, *Seism. Res. Lett.* **66**, 42–52.

Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Tomo LIII*, 84-92.

Franco, S.I., Cárdenas-Monroy,C., Quezada-Reyes, A., Valdés-González, C., Jiménez-Cruz, C., Rodríguez-Abreu, L.E. y Ortiz-Castro, J., 2007. Reporte preliminar del sismo del 13 de abril de 2007,Guerrero, México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Tomo LIX*, 71-81.

Furumura T y S.K. Singh, 2002. Regional Wave Propagation from Mexican Subduction Zone Earthquakes: The Attenuation Functions For Interplate and Inslab events, *Bull. Seism. Soc. Am.* **92**, 2110-2125.

García, D., 2001, Atenuación Sísmica. Aplicación a Terremotos Intraplaca en México Central, Trabajo de Investigación de Tercer Ciclo, Universidad Complutense de Madrid. 149 pp.

García-Jiménez, D., 2006. Estimación de parámetros del movimiento fuerte del suelo para terremotos intraplaca e intraslab en México Central. *Tesis para obtener el grado de doctor*, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, España.

Iglesias, A, S. K. Singh, M. Ordaz, M. A. Santoyo, y J. Pacheco, 2007. The Seismic Alert System for Mexico City: An Evaluation of Its Performance and a Strategy for Its Improvement, *Bull. Seism. Soc. Am.* **97**, 1718-1729.

Kelleher, J., L. Sykes y J. Oliver, 1973. Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean, *J. Geophys. Res.* **78**, 2547-2585.

Kostoglodov, V. y Pacheco, J. F., 1999. Cien Años de Sismicidad en México. Catálogo de Sismos Moderados y Grandes Ocurridos en México durante el Siglo XX, Instituto de Geofísica, UNAM.

Lee, William, H., Kanamori, Hiroo et. al, 2002. International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, International Assoc. Seismol. & Phys. Earth's Interior.

Limpert, E., Stahel, W. A., and Abbt, M. 2001. Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues. *BioScience* **51**, pp. 341-352.

Maral, G., "VSAT Networks", Wiley Series in Comms.& Distributed Systems, John Wiley & Sons, 1995.

Marsal, R.J. y Mazari, M. 1959. El subsuelo de la ciudad de México. *Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

Millones, J.L., 2005. Localización de un sismo utilizando una estación de tres componentes, *Monografía para obtener el grado de Licenciado en Física*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

Mooser, F., 1963. Historia tectónica de la Cuenca de México, *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* **15**, 239-45.

Nishenko and S.K. Singh, 1987. Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone: 1986 -2006, *Bull. Seism. Soc. Am.* **77**, 2095-2114.

Ortega, R., Herrmann, R. B., y Quintanar, L., 2003. Earthquake Ground-Motion Scaling in Central Mexico Between 0.7 and 7 Hz, *Bull. Seism. Soc. Am.* **93**(1), 397.41

Pardo, M., and G. Suárez, 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications, *J. Geophys. Res.* **100**, 12,357– 12,373.

Pacheco, J. F., A. Iglesias, Y S. K. Singh, 2002. The 8 October Coyuca, Guerrero, Mexico earthquake ( $M_w$  5.9): A normal fault in the expected compressional environment, *Seism. Res. Lett.* **73**(2), 263.

Pérez-Campos, X., Kim, Y., Husker, A., Davis, **Paul** M., Clayton, R., Iglesias, A., Pacheco, J., Singh, S. K., Manea, V. C., Gurnis, M., 2008. Horizontal subduction and truncation of Cocos Plate beneath central Mexico, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L18303

Sánchez-Sesma, F J, J Ramos y M Campillo, 1993. An indirect boundary element method applied to simulate the seismic response of alluvial valleys for incident P, S and Rayleigh waves, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **22**, 279-295.

Singh, S.K., Astiz L. y Hastov, J., 1981. Seismic Gaps And Recurrence Periods of Large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone: A reexamination, *Bull. Seism. Soc. Am.* **71**, No.3, 827-843

- 
- Singh, S. K., Mena, E., Castro, R., y Carmona, C. , 1987. Empirical Prediction of Ground Motion in Mexico City from Coastal Earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* **87**(5), 1862-1867.
- Singh, S. K., J. Lermo, T. Domínguez, M. Ordaz, J. M. Espinosa, E. Mena, y R. Quaas, 1988a. A study of relative amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site (CU), *Earthquake Spectra* **4**, 653-674.
- Singh, S. K., Mena, E., Anderson, J. G., Quaas, R., y Lermo, J., 1990. Source Spectra and RMS Acceleration of Mexican Subduction Zone Earthquakes, *Pure Appl. Geophys.* **133**(3), 447-474.
- Singh, S.K. y Ordaz, M., 1994. Sismicidad y Movimientos Fuertes en México: Una Visión Actual, *CENAPRED*.
- Singh, S.K., M. Ordaz, L. Alcántara, N. Shapiro, V. Kostoglodov, J.F. Pacheco, S. Alcocer, C. Gutiérrez, R. Quaas, T. Mikumo, and E. Ovando, 2000. The Oaxaca earthquake of 30 September 1999 ( $M_w=7.5$ ): a normal-faulting event in the subducted plate, *Seism. Soc. Am.* **71**, 67-78.
- Singh, S.K., M. Ordaz, J.F. Pacheco, R. Quaas, L. Alcántara, S. Alcocer, C. Gutierrez, R. Meli y E. Ovando, 1999. A preliminary report on the Tehuacán Mexico earthquake of June 15, 1999 ( $M_w=7.0$ ), *Seism. Res. Lett.* **70**, 489-504.
- Shapiro, N. M., Singh, S. K., y Pacheco, J. F. ,1998. A Fast and Simple Diagnostic Method for Identifying Tsunamigenic Earthquakes, *Geophys. Res. Lett.* **25**(20), 3911-3914.
- Shapiro, N. M., Olsen, K. B., y Singh, S. K. , 2000b. Wave-Guide Effects in Subduction Zones: Evidence from Three-Dimensional Modelling, *Geophys. Res. Lett.* **27**(3), 433-436.
- Suárez, G.R. y Jiménez Z., 1987. Sismo en la Ciudad de México y el Terremoto del 19 de septiembre de 1985, *Cuadernos de Geofísica*, UNAM.
- Suárez, G., Monfret, T., Wittlinger, G., y David, C., 1990. Geometry of Subduction and Depth of the Seismogenic Zone in the Guerrero Gap, Mexico, *Nature* **345**(6273), 336-338.
- Suárez, G., Novelo, D. y Mansilla E., 2009. Performance Evaluation of the Seismic Alert System (SAS ) in Mexico City: A Seismological and a Social Perspective, *Seism. Res. Lett.* **80**, 707-716.

Verma, S.P., y Armienta, M.A., 1985.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , alkali and alkaline earth element geochemistry of Chichinautzin Sierra, México, in Verma, S.P.,ed, Mexican Volcanic Belt, parte 2. *Geofisica Internacional (Mexico)* **24**, 665-678

Wu, Y. M., Teng, T. L. A virtual sub-network approach to earthquake early warning, 2002. *Bull. Seism. Soc. Am.* **92**, 2008-2018.

Wu, Y.-M., and H. Kanamori, 2008a. Development of an earthquake early warning system using real-time strong motion signals. *Sensors* **8**, 1–9.

Zepeda, O. y Sánchez, T., 2001. Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana, *CENAPRED*, 225p.

Sitios WEB consultados:

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2007AGUFM.S13C1436C>

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2007AGUFM.S21D..04A>

[http://etzakutarakua.colmich.edu.mx/proyectos/curutaran/publicaciones/Vazquez\\_III-02.pdf](http://etzakutarakua.colmich.edu.mx/proyectos/curutaran/publicaciones/Vazquez_III-02.pdf)

<http://folkworm.ceri.memphis.edu/ew-doc/#overview>

<http://laxdoru.igeofcu.unam.mx/~cmt/nouveau/pagemag.php>

<http://www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstSismica/>

<http://www.ceprode.org.sv/staticpages/pdf/spa/doc185/doc185-contenido.pdf>

[http://www.cires.org.mx/sismologia\\_es.php](http://www.cires.org.mx/sismologia_es.php)

<http://www.elarms.org/front/eewGlobal.php>

<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

<http://www.iingen.unam.mx/C16/Sismologia%20e%20Instrumentacion%20S/default.aspx>

<http://www.infp.ro/news.php>

[http://www.iris.washington.edu/manuals/SEED\\_appG.htm](http://www.iris.washington.edu/manuals/SEED_appG.htm)

<http://www.kinematics.com/Uploads/pdfs/sts2-1.pdf>

[http://www.mp3-mp4-ipod.cn/world/2006-08/01/content\\_654404.htm](http://www.mp3-mp4-ipod.cn/world/2006-08/01/content_654404.htm)

<http://www.proteccionciviloaxaca.net/Default1.asp?src=Noticia2.html>

<http://www.teltelematica.freesevers.com/VSAT.htm>

[http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec6\\_8.html](http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec6_8.html)

[http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract\\_4/vsat\\_hpg.htm](http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract_4/vsat_hpg.htm)

## APÉNDICE

Tabla IV.1 Datos utilizados en este trabajo

Fecha	Latitud	Longitud	H (km)	M	Acu (gal)	Acu (gal) filtrada	Estación	Rs	Rcu	Arms (gal)	Arms (gal) filtrada	Ti po*
2000/04/11 18:35	18.19	-102.51	51.9	5.2	0.24	0.08	COIG	167.08	474.24	0.00	0.00	IS
2000/04/11 18:35	18.19	-102.51	51.9	5.2	0.24	0.08	ZIIG	133.97	307.79	0.11	0.01	IS
2000/07/21 06:13	18.25	-95.69	56	5.8	17.72	2.95	PLIG	65.50	109.74	3.49	0.80	IS
2000/07/21 06:13	18.25	-95.69	56	5.8	17.72	2.95	PPIG	114.32	64.77	1.30	0.34	IS
2000/07/21 06:13	18.25	-95.69	56	5.8	17.72	2.95	YAIG	86.45	53.13	3.75	0.25	IS
2001/03/05 10:17	17.133	-100.056	31.5	5.2	1.07	0.43	CAIG	24.43	278.14	0.81	0.12	IS
2001/03/05 10:17	17.133	-100.056	31.5	5.2	1.07	0.43	PLIG	151.29	109.74	0.19	0.05	IS
2001/03/05 10:17	17.133	-100.056	31.5	5.2	1.07	0.43	ZIIG	158.54	307.79	0.34	0.04	IS
2001/05/08 05:15	18.81	-104.191	15.5	5.3	0.25	0.15	CJIG	117.63	615.49	0.11	0.02	T
2001/05/08 05:15	18.81	-104.191	15.5	5.3	0.25	0.15	COIG	65.81	474.24	0.64	0.15	T
2001/06/16 03:46	17.75	-102.35	49.4	5.2	0.55	0.15	ZIIG	135.40	307.79	0.14	0.02	T
2001/09/04 03:26	16.43	-98.05	33.7	5.2	0.48	0.21	OXIG	200.30	359.75	0.20	0.03	T
2001/09/04 03:26	16.43	-98.05	33.7	5.2	0.48	0.21	PNIG	34.03	344.13	0.63	0.05	T
2001/10/08 03:39	16.935	-100.141	3.5	5.8	4.51	1.88	CAIG	18.43	278.14	4.71	0.47	T
2001/10/08 03:39	16.935	-100.141	3.5	5.8	4.51	1.88	PLIG	175.05	109.74	0.61	0.18	T
2001/10/08 03:39	16.935	-100.141	3.5	5.8	4.51	1.88	ZIIG	159.17	307.79	0.12	0.01	T
2001/10/29 05:23	17.49	-99.44	15	5	1.19	0.47	PLIG	170.88	109.74	0.25	0.05	IS
2001/10/29 05:23	17.49	-99.44	15	5	1.19	0.47	PPIG	283.03	64.77	0.12	0.05	IS
2001/11/10 17:09	16.17	-98.26	15	5.4	1.29	0.73	OXIG	196.34	359.75	0.42	0.07	T
2001/11/10 17:09	16.17	-98.26	15	5.4	1.29	0.73	PNIG	48.24	344.13	2.17	0.44	T
2001/12/19 10:26	17.57	-93.87	177.1	5.2	0.06	0.03	CMIG	91.91	517.17	0.15	0.01	IS

Fecha	Latitud	Longitud	H (km)	M	Acu (gal)	Acu (gal) filtrada	Estación	Rs	Rcu	Arms (gal)	Arms (gal) filtrada	Ti po*
2001/12/19 10:26	17.57	-93.87	177.1	5.2	0.06	0.03	TUIG	97.44	521.18	0.08	0.04	IS
2002/01/30 08:42	18.22	-95.94	116.6	5.9	0.51	0.24	CMIG	164.28	517.17	1.61	0.21	IS
2002/01/30 08:42	18.22	-95.94	116.6	5.9	0.51	0.24	LVIG	181.22	292.71	0.33	0.03	IS
2002/01/30 08:42	18.22	-95.94	116.6	5.9	0.51	0.24	OXIG	143.90	359.75	3.62	0.23	IS
2002/01/30 08:42	18.22	-95.94	116.6	5.9	0.51	0.24	TUIG	164.13	521.18	1.94	0.34	IS
2002/04/18 05:02	16.75	-101.06	6	6.1	1.35	1.01	CAIG	95.28	278.14	0.08	0.04	T
2002/04/18 05:02	16.75	-101.06	6	6.1	1.35	1.01	ZIIG	99.47	307.79	0.04	0.02	T
2002/04/18 11:00	16.76	-100.9	20	5.1	0.18	0.11	CAIG	114.71	278.14	0.01	0.00	T
2002/04/18 11:00	16.76	-100.9	20	5.1	0.18	0.11	ZIIG	48.24	307.79	0.03	0.01	T
2002/04/18 17:57	16.632	-101.922	20	5.5	0.53	0.43	CAIG	150.00	278.14	0.03	0.01	T
2002/06/11 02:32	17.61	-94.52	143.7	5.3	0.07	0.02	CMIG	47.99	517.17	1.31	0.11	IS
2002/06/11 02:32	17.61	-94.52	143.7	5.3	0.07	0.02	TUIG	68.20	521.18	0.22	0.02	IS
2002/06/19 21:50	16.74	-97.95	24.2	5.3	0.61	0.31	OXIG	171.35	359.75	0.21	0.04	T
2002/06/19 21:50	16.74	-97.95	24.2	5.3	0.61	0.31	PNIG	17.72	344.13	3.62	0.31	T
2002/08/05 01:25	16.06	-95.65	15	5.4	0.20	0.12	CMIG	207.11	517.17	0.09	0.02	T
2002/08/05 01:25	16.06	-95.65	15	5.4	0.20	0.12	HUIG	19.62	512.01	21.56	0.42	T
2002/08/05 01:25	16.06	-95.65	15	5.4	0.20	0.12	OXIG	178.95	359.75	0.77	0.06	T
2002/08/27 17:08	16.38	-96.89	46.9	5	0.25	0.11	OXIG	146.38	359.75	1.51	0.15	IS
2002/08/27 17:08	16.38	-96.89	46.9	5	0.25	0.11	PNIG	69.15	344.13	0.50	0.04	IS
2002/08/30 21:11	16.62	-100.78	34	5.1	0.54	0.38	CAIG	80.78	278.14	0.15	0.03	T
2002/08/30 21:11	16.62	-100.78	34	5.1	0.54	0.38	ZIIG	117.03	307.79	0.06	0.01	T
2002/09/25 18:14	16.85	-100.13	10	5.2	0.89	0.37	CAIG	26.47	278.14	2.24	0.25	T
2002/09/25 18:14	16.85	-100.13	10	5.2	0.89	0.37	PLIG	182.22	109.74	0.17	0.11	T
2002/09/25 18:14	16.85	-100.13	10	5.2	0.89	0.37	ZIIG	165.44	307.79	0.11	0.02	T

Apéndice

Fecha	Latitud	Longitud	H (km)	M	Acu (gal)	Acu (gal) filtrada	Estación	Rs	Rcu	Arms (gal)	Arms (gal) filtrada	Ti po*
2002/09/27 07:04	17.16	-100.59	36	5.1	1.56	0.43	CAIG	36.53	278.14	1.03	0.10	T
2002/09/27 07:04	17.16	-100.59	36	5.1	1.56	0.43	PLIG	178.38	109.74	0.14	0.01	T
2002/09/27 07:04	17.16	-100.59	36	5.1	1.56	0.43	ZIIG	105.13	307.79	0.92	0.05	T
2002/10/11 14:41	15.49	-95.99	15	5.5	0.15	0.09	OXIG	202.72	359.75	0.05	0.02	T
2002/11/05 14:05	16.34	-97.99	15	5.2	0.08	0.05	CJIG	32.31	615.49	1.18	0.13	T
2002/11/05 14:05	16.34	-97.99	15	5.2	0.08	0.05	COIG	141.31	474.24	0.42	0.06	T
2002/11/08 23:20	16.34	-97.99	17.3	5.2	0.54	0.31	OXIG	178.09	359.75	0.41	0.05	T
2002/11/08 23:20	16.34	-97.99	17.3	5.2	0.54	0.31	PNIG	20.28	344.13	4.97	0.34	T
2002/12/10 03:09	17.17	-101.66	66.7	5.4	1.25	0.74	CAIG	112.95	278.14	0.27	0.02	IS
2002/12/10 03:09	17.17	-101.66	66.7	5.4	1.25	0.74	ZIIG	30.60	307.79	11.07	0.58	IS
2003/01/10 02:08	16.88	-99.85	44.7	5.2	1.17	0.43	CAIG	9.55	278.14	3.34	0.16	T
2003/01/10 02:08	16.88	-99.85	44.7	5.2	1.17	0.43	PLIG	179.06	109.74	0.15	0.06	T
2003/01/10 02:08	16.88	-99.85	44.7	5.2	1.17	0.43	PNIG	240.18	344.13	0.04	0.01	T
2003/01/10 02:08	16.88	-99.85	44.7	5.2	1.17	0.43	ZIIG	142.51	307.79	0.15	0.01	T
2003/03/27 07:44	18.28	-101.8	30.9	5.2	0.83	0.23	MOIG	195.21	214.36	0.13	0.01	IS
2003/03/27 07:44	18.28	-101.8	30.9	5.2	0.83	0.23	ZIIG	55.89	307.79	2.25	0.16	IS
2003/05/16 09:09	18.32	-100.89	84.3	5	0.34	0.07	CAIG	173.26	278.14	0.10	0.01	IS
2003/05/16 09:09	18.32	-100.89	84.3	5	0.34	0.07	MOIG	154.12	214.36	0.08	0.02	IS
2003/05/16 09:09	18.32	-100.89	84.3	5	0.34	0.07	PLIG	185.70	109.74	0.05	0.00	IS
2003/05/16 09:09	18.32	-100.89	84.3	5	0.34	0.07	ZIIG	79.04	307.79	0.92	0.05	IS
2003/07/21 23:53	18.67	-101.08	62.4	5.1	0.50	0.17	CAIG	175.31	278.14	0.09	0.01	IS
2003/07/21 23:53	18.67	-101.08	62.4	5.1	0.50	0.17	PLIG	163.76	109.74	0.09	0.01	IS
2003/07/21 23:53	18.67	-101.08	62.4	5.1	0.50	0.17	ZIIG	102.16	307.79	0.75	0.06	IS
2003/11/19 13:50	17.91	-99.03	69.3	5.2	1.55	0.25	CAIG	118.50	278.14	0.47	0.06	IS

<i>Fecha</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>H (km)</i>	<i>M</i>	<i>Acu (gal)</i>	<i>Acu (gal) filtrada</i>	<i>Estación</i>	<i>Rs</i>	<i>Rcu</i>	<i>Arms (gal)</i>	<i>Arms (gal) filtrada</i>	<i>Ti po*</i>
2003/11/19 13:50	17.91	-99.03	69.3	5.2	1.55	0.25	PLIG	59.29	109.74	0.59	0.07	IS
2003/11/19 13:50	17.91	-99.03	69.3	5.2	1.55	0.25	PPIG	165.24	64.77	0.42	0.06	IS
2003/11/19 13:50	17.91	-99.03	69.3	5.2	1.55	0.25	TPIG	238.37	216.17	0.04	0.00	IS
2003/11/19 13:50	17.91	-99.03	69.3	5.2	1.55	0.25	YAIG	122.23	53.13	0.54	0.02	IS
2004/01/01 23:31	17.345	-101.424	5.5	5.9	3.41	2.50	CAIG	127.17	278.14	0.30	0.09	T
2004/01/01 23:31	17.345	-101.424	5.5	5.9	3.41	2.50	ZIIG	29.40	307.79	2.96	0.61	T
2004/01/01 23:58	17.303	-101.358	13.7	5.4	1.59	0.76	CAIG	119.23	278.14	0.16	0.04	T
2004/01/13 19:50	16.45	-96.83	32.5	5.1	0.28	0.10	HUIG	116.49	512.01	0.45	0.01	T
2004/01/13 19:50	16.45	-96.83	32.5	5.1	0.28	0.10	OXIG	128.33	359.75	1.02	0.12	T
2004/01/13 19:50	16.45	-96.83	32.5	5.1	0.28	0.10	PNIG	111.29	344.13	0.41	0.06	T
2004/01/13 21:29	16.26	-96.94	30.3	5.4	0.73	0.45	HUIG	114.34	512.01	0.59	0.02	T
2004/01/17 21:13	17.9	-95.49	106.4	5.2	0.09	0.05	CMIG	104.34	517.17	0.53	0.04	IS
2004/01/17 21:13	17.9	-95.49	106.4	5.2	0.09	0.05	OXIG	133.09	359.75	1.34	0.07	IS
2004/01/17 21:13	17.9	-95.49	106.4	5.2	0.09	0.05	TUIG	135.84	521.18	0.89	0.18	IS
2004/02/06 19:11	18.36	-102.8	35.2	5.1	0.42	0.17	COIG	144.95	474.24	0.90	0.09	T
2004/02/06 19:11	18.36	-102.8	35.2	5.1	0.42	0.17	ZIIG	157.05	307.79	0.04	0.00	T
2004/03/13 14:02	18	-103.67	20.5	5.1	0.06	0.03	COIG	154.26	474.24	0.22	0.02	T
2004/04/20 17:44	17.5	-94.63	146.2	5.4	0.10	0.05	CMIG	30.57	517.17	0.90	0.04	IS
2004/04/20 17:44	17.5	-94.63	146.2	5.4	0.10	0.05	TUIG	85.09	521.18	0.62	0.05	IS
2004/05/21 04:10	18.06	-103.01	27.9	5.2	0.26	0.18	COIG	158.36	474.24	0.55	0.16	T
2004/05/21 04:10	18.06	-103.01	27.9	5.2	0.26	0.18	ZIIG	176.32	307.79	0.02	0.01	T
2004/06/14 22:54	16.46	-97.92	18	5.9	2.86	2.21	OXIG	178.73	359.75	0.71	0.09	T
2004/06/14 22:54	16.46	-97.92	18	5.9	2.86	2.21	PNIG	19.47	344.13	5.93	0.37	T
2004/08/07 11:49	17.25	-95.3	104.7	5.8	0.51	0.26	HUIG	159.96	512.01	2.89	0.05	IS

Apéndice

<i>Fecha</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>H (km)</i>	<i>M</i>	<i>Acu (gal)</i>	<i>Acu (gal) filtrada</i>	<i>Estación</i>	<i>Rs</i>	<i>Rcu</i>	<i>Arms (gal)</i>	<i>Arms (gal) filtrada</i>	<i>Ti po*</i>
2004/08/07 11:49	17.25	-95.3	104.7	5.8	0.51	0.26	OXIG	138.87	359.75	3.52	0.16	IS
2004/08/07 11:49	17.25	-95.3	104.7	5.8	0.51	0.26	TUIG	152.36	521.18	0.79	0.13	IS
2004/08/18 09:03	16.4	-95.14	77.6	5.8	0.67	0.42	HUIG	115.56	512.01	3.50	0.11	IS
2004/08/18 09:03	16.4	-95.14	77.6	5.8	0.67	0.42	OXIG	192.76	359.75	2.64	0.25	IS
2004/08/18 09:03	16.4	-95.14	77.6	5.8	0.67	0.42	TUIG	213.28	521.18	0.82	0.30	IS
2004/11/15 02:38	16.15	-98.36	12	5.3	0.94	0.55	PNIG	76.37	344.13	0.37	0.08	T
2004/11/15 02:51	16.13	-98.29	21.5	5.1	0.35	0.22	OXIG	222.55	359.75	0.27	0.06	T
2004/11/15 02:51	16.13	-98.29	21.5	5.1	0.35	0.22	PNIG	60.38	344.13	0.68	0.18	T
2004/12/10 10:32	15.42	-96.94	12	5.1	0.28	0.05	HUIG	142.07	512.01	0.58	0.01	T
2004/12/10 10:32	15.42	-96.94	12	5.1	0.28	0.05	PNIG	161.78	344.13	0.13	0.02	T
2005/08/14 02:52	16.3	-98.07	12	5.4	2.01	0.79	OXIG	214.31	359.75	0.27	0.08	T
2005/08/14 02:52	16.3	-98.07	12	5.4	2.01	0.79	PNIG	53.21	344.13	0.99	0.23	T
2005/09/24 01:14	18.2	-96.85	61	5	0.22	0.05	LVIG	195.00	292.71	0.15	0.01	IS
2005/09/24 01:14	18.2	-96.85	61	5	0.22	0.05	OXIG	112.00	359.75	3.49	0.14	IS
2005/12/14 21:22	18.7	-100.93	59	4.9	0.37	0.08	CAIG	178.11	278.14	0.05	0.01	IS
2005/12/14 21:22	18.7	-100.93	59	4.9	0.37	0.08	MEIG	174.00	162.56	0.12	0.01	IS
2005/12/14 21:22	18.7	-100.93	59	4.9	0.37	0.08	MOIG	143.19	214.36	0.20	0.06	IS
2005/12/14 21:22	18.7	-100.93	59	4.9	0.37	0.08	PLIG	178.57	109.74	0.04	0.00	IS
2005/12/14 21:22	18.7	-100.93	59	4.9	0.37	0.08	YAIG	230.16	53.13	0.05	0.01	IS
2005/12/14 21:22	18.7	-100.93	59	4.9	0.37	0.08	ZIIG	91.34	307.79	0.15	0.01	IS
2006/02/20 10:54	18.3	-100.54	55.7	5.2	1.94	0.27	CAIG	132.21	278.14	0.28	0.04	IS
2006/02/20 10:54	18.3	-100.54	55.7	5.2	1.94	0.27	MOIG	176.21	214.36	0.17	0.02	IS
2006/02/20 10:54	18.3	-100.54	55.7	5.2	1.94	0.27	PLIG	135.08	109.74	0.34	0.04	IS
2006/02/20 10:54	18.3	-100.54	55.7	5.2	1.94	0.27	YAIG	194.91	53.13	0.29	0.02	IS

Fecha	Latitud	Longitud	H (km)	M	Acu (gal)	Acu (gal) filtrada	Estación	Rs	Rcu	Arms (gal)	Arms (gal) filtrada	Ti po*
2006/07/07 17:43	16.08	-95.97	29.3	5	0.11	0.06	CMIG	207.75	517.17	0.03	0.01	T
2006/07/07 17:43	16.08	-95.97	29.3	5	0.11	0.06	HUIG	17.14	512.01	11.86	0.25	T
2006/07/07 17:43	16.08	-95.97	29.3	5	0.11	0.06	OXIG	152.47	359.75	0.55	0.04	T
2006/07/31 18:25	18.62	-104.08	24.1	5.3	0.17	0.12	CJIG	166.79	615.49	0.10	0.01	T
2006/08/11 14:38	18.45	-101.3	55	5.2	0.46	0.16	CAIG	188.83	278.14	0.06	0.01	IS
2006/08/11 14:38	18.45	-101.3	55	5.2	0.46	0.16	MEIG	185.09	162.56	0.16	0.01	IS
2006/08/11 14:38	18.45	-101.3	55	5.2	0.46	0.16	MOIG	137.12	214.36	0.13	0.03	IS
2006/08/11 14:38	18.45	-101.3	55	5.2	0.46	0.16	PLIG	188.25	109.74	0.06	0.01	IS
2006/08/11 14:38	18.45	-101.3	55	5.2	0.46	0.16	ZIIG	95.07	307.79	0.89	0.04	IS
2006/08/13 15:14	18.23	-103.62	13	5.2	0.47	0.20	MMIG	28.49	453.65	15.52	0.47	T
2006/08/19 05:41	16.26	-97.27	26.6	5.6	0.77	0.32	HUIG	151.25	512.01	0.54	0.04	T
2006/08/19 05:41	16.26	-97.27	26.6	5.6	0.77	0.32	OXIG	143.21	359.75	1.86	0.21	T
2006/10/19 08:52	15.74	-95.63	23.4	4.8	0.02	0.01	CMIG	212.16	517.17	0.02	0.00	T
2006/10/19 08:52	15.74	-95.63	23.4	4.8	0.02	0.01	OXIG	220.09	359.75	0.07	0.01	T
2006/11/08 17:18	16.27	-96.43	37.9	5.1	0.28	0.10	OXIG	117.58	359.75	2.05	0.20	IS
2006/11/10 06:33	15.92	-97.06	12.6	4.8	0.14	0.08	HUIG	150.98	512.01	0.06	0.02	T
2006/11/10 06:33	15.92	-97.06	12.6	4.8	0.14	0.08	OXIG	194.48	359.75	0.23	0.06	T
2006/11/10 06:33	15.92	-97.06	12.6	4.8	0.14	0.08	PNIG	122.86	344.13	0.11	0.02	T
2006/11/18 13:07	16.3	-98.78	12	4.9	0.15	0.08	CAIG	184.08	278.14	0.02	0.01	T
2006/11/18 13:07	16.3	-98.78	12	4.9	0.15	0.08	PNIG	156.06	344.13	0.06	0.02	T
2006/11/19 06:59	18.65	-104.17	21.2	5.5	0.27	0.23	CJIG	148.18	615.49	0.33	0.09	T
2007/03/30 19:00	16.23	-98.76	12	5.3	0.41	0.29	CAIG	183.16	278.14	0.02	0.01	T
2007/03/30 19:00	16.23	-98.76	12	5.3	0.41	0.29	PNIG	115.33	344.13	0.23	0.09	T
2007/04/13 05:42	17.09	-100.44	41	5.9	5.48	3.11	CAIG	15.18	278.14	7.97	0.76	T

Apéndice

Fecha	Latitud	Longitud	H (km)	M	Acu (gal)	Acu (gal) filtrada	Estación	Rs	Rcu	Arms (gal)	Arms (gal) filtrada	Ti po*
2007/04/13 05:42	17.09	-100.44	41	5.9	5.48	3.11	MEIG	119.20	162.56	2.21	0.41	T
2007/04/13 05:42	17.09	-100.44	41	5.9	5.48	3.11	PLIG	167.48	109.74	0.80	0.34	T
2007/04/13 05:42	17.09	-100.44	41	5.9	5.48	3.11	ZIIG	126.66	307.79	0.38	0.04	T
2007/04/13 08:43	17.14	-100.3	36	5.3	2.34	1.27	CAIG	10.56	278.14	3.03	0.31	T
2007/04/13 08:43	17.14	-100.3	36	5.3	2.34	1.27	MEIG	113.65	162.56	0.91	0.16	T
2007/04/13 08:43	17.14	-100.3	36	5.3	2.34	1.27	PLIG	162.87	109.74	0.28	0.14	T
2007/04/13 08:43	17.14	-100.3	36	5.3	2.34	1.27	ZIIG	133.92	307.79	0.12	0.01	T
2007/04/13 14:42	18.08	-102.85	24	5	0.27	0.13	MMIG	48.94	453.65	1.35	0.15	T
2007/04/19 10:02	17.21	-101.37	24	5.1	0.75	0.25	CAIG	111.77	278.14	0.11	0.03	T
2007/04/19 10:02	17.21	-101.37	24	5.1	0.75	0.25	ZIIG	44.60	307.79	0.16	0.01	T
2007/04/28 13:56	17.04	-99.64	29.9	5.1	0.60	0.22	CAIG	48.26	278.14	0.73	0.10	T
2007/04/28 13:56	17.04	-99.64	29.9	5.1	0.60	0.22	MEIG	112.67	162.56	1.43	0.06	T
2007/04/28 13:56	17.04	-99.64	29.9	5.1	0.60	0.22	PLIG	165.56	109.74	0.12	0.02	T
2007/04/28 13:56	17.04	-99.64	29.9	5.1	0.60	0.22	PNIG	191.05	344.13	0.04	0.00	T
2007/05/04 10:21	17.5	-96.68	59.5	5	0.17	0.07	CMIG	209.37	517.17	0.07	0.01	IS
2007/05/04 10:21	17.5	-96.68	59.5	5	0.17	0.07	OXIG	18.54	359.75	3.32	0.14	IS
2007/05/04 10:21	17.5	-96.68	59.5	5	0.17	0.07	PNIG	162.36	344.13	0.07	0.01	IS
2007/05/04 10:21	17.5	-96.68	59.5	5	0.17	0.07	TPIG	146.17	216.17	0.25	0.05	IS
2007/05/31 10:11	18.94	-103.94	22.2	5.1	0.12	0.07	MMIG	91.96	453.65	1.23	0.09	T
2007/07/28 13:45	18.15	-100.73	53.5	5.1	0.73	0.15	CAIG	131.30	278.14	0.21	0.02	IS
2007/07/28 13:45	18.15	-100.73	53.5	5.1	0.73	0.15	MEIG	134.06	162.56	0.34	0.02	IS
2007/07/28 13:45	18.15	-100.73	53.5	5.1	0.73	0.15	PLIG	149.40	109.74	0.13	0.01	IS
2007/07/28 13:45	18.15	-100.73	53.5	5.1	0.73	0.15	YAIG	209.83	53.13	0.13	0.01	IS
2007/07/28 13:45	18.15	-100.73	53.5	5.1	0.73	0.15	ZIIG	81.29	307.79	1.33	0.12	IS

Fecha	Latitud	Longitud	H (km)	M	Acu (gal)	Acu (gal) filtrada	Estación	Rs	Rcu	Arms (gal)	Arms (gal) filtrada	Ti po*
2007/08/26 17:18	16.47	-97.65	28.2	5.1	0.18	0.09	HUIG	219.53	512.01	0.07	0.01	T
2007/08/26 17:18	16.47	-97.65	28.2	5.1	0.18	0.09	OXIG	172.96	359.75	0.21	0.02	T
2007/08/26 17:18	16.47	-97.65	28.2	5.1	0.18	0.09	PNIG	17.72	344.13	1.82	0.17	T
2007/09/15 10:30	17.59	-94.62	144.4	5.4	0.13	0.06	CMIG	39.95	517.17	0.74	0.08	IS
2007/09/15 10:30	17.59	-94.62	144.4	5.4	0.13	0.06	TGIG	182.06	700.07	0.62	0.09	IS
2007/09/15 10:30	17.59	-94.62	144.4	5.4	0.13	0.06	TUIG	75.69	521.18	0.31	0.04	IS
2007/11/06 06:35	16.91	-100.14	7	5.2	2.24	0.55	CAIG	21.46	278.14	6.04	0.60	T
2007/11/06 06:35	16.91	-100.14	7	5.2	2.24	0.55	MEIG	121.53	162.56	1.81	0.10	T
2007/11/06 06:35	16.91	-100.14	7	5.2	2.24	0.55	PLIG	173.72	109.74	0.45	0.09	T
2007/11/06 06:35	16.91	-100.14	7	5.2	2.24	0.55	ZIIG	162.61	307.79	0.40	0.09	T
2007/11/26 21:56	18.65	-101.7	53	5.7	0.67	0.27	MMIG	178.10	453.65	0.93	0.20	IS
2007/11/26 21:56	18.65	-101.7	53	5.7	0.67	0.27	MOIG	125.85	214.36	0.50	0.24	IS
2007/11/26 21:56	18.65	-101.7	53	5.7	0.67	0.27	ZIIG	118.75	307.79	0.58	0.12	IS
2008/02/12 12:50	16.35	-94.51	87.1	6.5	1.35	0.80	CMIG	106.07	517.17	2.65	0.50	IS
2008/02/12 12:50	16.35	-94.51	87.1	6.5	1.35	0.80	HUIG	172.49	512.01	6.88	0.17	IS
2008/02/12 12:50	16.35	-94.51	87.1	6.5	1.35	0.80	PCIG	152.66	749.06	3.09	0.54	IS
2008/02/12 12:50	16.35	-94.51	87.1	6.5	1.35	0.80	TGIG	166.20	700.07	2.50	0.55	IS
2008/02/12 12:50	16.35	-94.51	87.1	6.5	1.35	0.80	TUIG	205.26	521.18	1.21	0.45	IS
2008/04/28 00:06	18.05	-100.01	52	5.8	4.41	1.82	CAIG	85.64	278.14	1.53	0.19	IS
2008/04/28 00:06	18.05	-100.01	52	5.8	4.41	1.82	MEIG	58.86	162.56	6.01	0.58	IS
2008/04/28 00:06	18.05	-100.01	52	5.8	4.41	1.82	PLIG	94.79	109.74	1.20	0.27	IS
2008/04/28 00:06	18.05	-100.01	52	5.8	4.41	1.82	PPIG	213.63	64.77	0.45	0.21	IS
2008/04/28 00:06	18.05	-100.01	52	5.8	4.41	1.82	YAIG	164.15	53.13	0.64	0.07	IS
2008/04/28 00:06	18.05	-100.01	52	5.8	4.41	1.82	ZIIG	139.82	307.79	0.42	0.12	IS

<i>Fecha</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>H (km)</i>	<i>M</i>	<i>Acu (gal)</i>	<i>Acu (gal) filtrada</i>	<i>Estación</i>	<i>Rs</i>	<i>Rcu</i>	<i>Arms (gal)</i>	<i>Arms (gal) filtrada</i>	<i>Ti po*</i>
2008/04/29 10:56	18.47	-101.19	60	5.3	0.60	0.12	CAIG	178.24	278.14	0.07	0.01	IS
2008/04/29 10:56	18.47	-101.19	60	5.3	0.60	0.12	MEIG	169.73	162.56	0.23	0.01	IS
2008/04/29 10:56	18.47	-101.19	60	5.3	0.60	0.12	MOIG	139.51	214.36	0.32	0.16	IS
2008/04/29 10:56	18.47	-101.19	60	5.3	0.60	0.12	PLIG	172.90	109.74	0.11	0.01	IS
2008/04/29 10:56	18.47	-101.19	60	5.3	0.60	0.12	ZIIG	96.81	307.79	0.45	0.05	IS

Tabla IV.1. \*Tipo. IS, evento intraplaca. T, evento interplaca.