

Unión Geofísica Mexicana, A.C.

Unión Geofísica Mexicana, A.C.

# geos



Volumen 24  
No. 1  
Octubre de 2004

geos, Vol. 24, No. 1, Octubre, 2004, 98 pp.

# GEOS

<http://www.ugm.org.mx/geos.html>

**BOLETÍN INFORMATIVO  
DE LA  
UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C.**

**GEOS** se publica tres veces al año patrocinada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y editada conjuntamente por la UGM y el CICESE.

**UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C.**  
**Mesa Directiva 2004-2005**

**Dr. Julián Adem Chain**  
Presidente Honorario

**Dr. Luca Ferrari Pedraglio**  
Presidente

**Dr. Luis Alberto Delgado Argote**  
Vicepresidente

**Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi**  
Secretario General

**Dr. Roberto Molina Garza**  
Tesorero

**Dr. Vladimir Kostoglodov**  
Secretario de Investigación

**Dr. José Manuel Romo Jones**  
Secretario de Difusión

**Dr. Fernando García García**  
Secretario de Educación

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote  
[ldelgado@cicese.mx](mailto:ldelgado@cicese.mx)  
CICESE

José Manuel Romo Jones  
[jromo@cicese.mx](mailto:jromo@cicese.mx)  
UGM

Comité Editorial

Harald Böhnelt, Instituto de Geofísica, UNAM  
Noel Carbajal Pérez, IPICyT  
Oscar Campos, Instituto de Geofísica, UNAM  
Gerardo Carrasco, Instituto de Geología, UNAM  
Ana Luisa Carreño, Instituto de Geología, UNAM  
Carlos Flores Luna, División de Ciencias de la Tierra, CICESE  
José Luis Frías Salazar, INEGI  
Juan García Abdeslem, División de Ciencias de la Tierra, CICESE  
René Garduño, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM  
Manuel Grajales N., Instituto Mexicano del Petróleo  
Margarita López Martínez, División de Ciencias de la Tierra, CICESE  
Alejandro Hinojosa Corona, División de Ciencias de la Tierra, CICESE  
Miguel Lavín Peregrina, División de Oceanología, CICESE  
Luis Munguía Orozco, División de Ciencias de la Tierra, CICESE  
Jorge Ledesma Vázquez, Facultad de Ciencias Marinas, UABC  
Guillermo Pérez, PEMEX  
Domitilo Pereyra, Universidad Veracruzana  
Francisco José Sánchez Sesma, UNAM  
Miguel Téllez, UABC  
Gustavo Tolson, Instituto de Geología, UNAM  
Carlos Suárez Plascencia, Universidad de Guadalajara  
Héctor Pérez de Tejada, Instituto de Geofísica, UNAM

Apoyo Técnico Editorial  
Victor Manuel Frías Camacho  
María Cristina Álvarez Astorga  
Alejandro F. Nava Pichardo

**GEOS**, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, contiene artículos de investigación originales así como artículos de divulgación y notas cortas, sobre aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM. Las instrucciones para los autores se encuentran al final de cada revista y en <http://www.ugm.org.mx/geos.html>

correspondencia a:  
Editorial GEOS

División de Ciencias de la Tierra, CICESE  
Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada  
Ensenada, B.C., México  
Tel.: (646) 175-0500, Ext. 26060

Título: **GEOS**

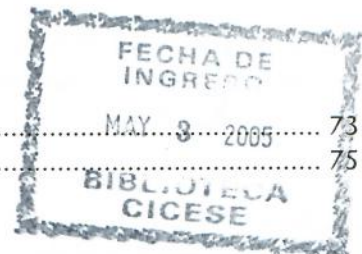
Periodicidad: cuatrimestral

ISSN: 0186-1891

Editado en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada, Ensenada, 22860, B.C., México.

## ÍNDICE

EDITORIAL .....	1
 <b>ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN</b>	
SISMOTECTÓNICA DEL NORTE Y OESTE DEL BLOQUE DE JALISCO USANDO DATOS SÍSMICOS REGIONALES .....	2
<i>Marta Rutz-López y Francisco Javier Núñez-Cornú</i>	
 RASGOS ESTRUCTURALES Y PETROGRÁFICOS DE PLUTONES LOCALIZADOS ENTRE SAN QUINTÍN Y LA SIERRA SAN PEDRO MÁRTIR, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO .....	14
<i>Luis A. Delgado-Argote, Tomás A. Peña-Alonso, Elisa Ramírez, Harald Böhnel, Roberto Molina-Garza y Amabel Ortega-Rivera</i>	
 <b>ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN</b>	
EL CONOCIMIENTO DE LA TIERRA A TRAVÉS DEL IMPACTO TECNOLÓGICO EN LA SISMOLOGÍA .....	30
<i>Juan Martín Gómez-González, Harald Böhnel, Luis A. Delgado-Argote, Arturo Gómez-Tuena, Marco Guzmán-Speziale, Román Pérez-Enriquez y Birgit Steinich</i>	
 SELECCIÓN DE EVENTOS DENTRO DE UN POLÍGONO Y EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA CON MATLAB .....	40
<i>José Frez C.</i>	
 <b>REPORTES</b>	
ECUACIONES QUE ESTIMAN LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO DE LA LLUVIA .....	46
<i>Domitilo-Pereyra Díaz, José Antonio A. Pérez-Sesma y Leonorilda Gómez-Romero</i>	
 HURACANES EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, Y SUS IMPLICACIONES EN LA SEDIMENTACIÓN EN EL GOLFO DE CALIFORNIA .....	57
<i>Genaro Martínez-Gutiérrez y Larry Mayer</i>	
 BOLETÍN DE LA RED SÍSMICA DEL NOROESTE DE MÉXICO (PERIODO ENERO A JUNIO DE 2004) .....	65
<i>GRUPO RESNOM</i>	
 <b>NOTAS</b>	
LA INFLUENCIA DE LOS CICLONES TROPICALES EN LA LLUVIA DEL NOROESTE DE BAJA CALIFORNIA Y SUROESTE DE CALIFORNIA .....	69
<i>Edgar G. Pavía</i>	
 <b>NOTICIAS DE LA UGM</b>	
INFORME DEL TESORERO .....	73
DIRECTORIO DE MIEMBROS DE LA UGM 2004 .....	75
 <b>COMUNICACIONES</b>	
POLÍTICA EDITORIAL .....	96



354

## EDITORIAL

### GEOS EN EL PANORAMA ECONÓMICO DEL 2005

En el último número de GEOS mencionamos nuestra esperanza de que las políticas de ahorro que la federación ha impuesto a la ciencia y a la tecnología no se apliquen a las instituciones de investigación y docencia donde se concentran los esfuerzos editoriales académicos.

En las últimas semanas hemos observado varios movimientos entre la comunidad académica, entre la población política y entre los directivos de las instituciones de educación superior (IES), donde también se desarrolla la investigación. La inquietud se debe a la publicación de la reforma de ley que obliga a los gobiernos federal y estatales a otorgar juntos uno por ciento del PIB al desarrollo científico y tecnológico y, a la posterior propuesta de presupuesto para el sector recortado en 800 millones de pesos por parte del mismo ejecutivo. El proyecto presupuestal es recesivo en su conjunto pues significa una disminución de 0.50 a 0.48 por ciento del PIB a las instituciones de educación superior (mil 200 millones de pesos) y de 0.38 a 0.35 en el caso de la ciencia y la tecnología.

Tales reducciones complican de manera importante, tanto las proyecciones del ejecutivo federal en la materia, como las metas trazadas por las instituciones y por sus académicos. La afectación de los programas a corto plazo también deberá reflejarse en la calidad de los estudiantes que ingresen a los programas de posgrado y de sus egresados.

La propuesta de presupuesto no sólo afecta a los jóvenes estudiantes sino que toca también a los académicos de las IES que buscan superarse a través de los programas como SUPERA y PROMEP que tienden a desaparecer. Hasta hace poco las IES buscaban incrementar la calidad de su profesorado a través de esos programas de superación académica pero ahora, de acuerdo con la ANUIES, las instituciones tratan de mantener un incremento de 5 por ciento para los gastos de operación, 2 mil millones de pesos para el programa de reformas estructurales y terminar de abatir los pasivos contingentes por pensiones y jubilaciones, así como una cantidad similar para la puesta en marcha de un modelo de asignación del subsidio.

Ante esta perspectiva, desde principios del verano hemos estado escuchando diferentes propuestas por parte de órganos colegiados, rectores y diputados, entre otros, para evitar el colapso de la actividad académica superior y de la investigación. Entre otras, existe la propuesta de destinar una parte de los excedentes derivados por las alzas al precio internacional del petróleo a la Ciencia y la Tecnología ya que, según las cifras que se discuten en la Comisión de Presupuesto y Cuenta Pública de la Cámara de Diputados, cada dólar adicional al precio del petróleo es equivalente a 10 mil millones de pesos.

Si es real el discurso oficial en el sentido de que la inversión en educación superior y en ciencia y tecnología es prioritaria para promover los cambios estructurales que el país necesita para ser competitivo en la escala mundial, ahora es tiempo de diseñar un programa de rescate académico como los que se aplicaron a los bancos y a las carreteras.

A pesar de la perspectiva económica, estamos seguros que las instituciones y sus académicos seguirán apoyando los esfuerzos editoriales que estamos desarrollando y que la calidad de nuestros trabajos garantizará la vida de nuestras revistas.



# SISMOTECTÓNICA DEL NORTE Y OESTE DEL BLOQUE DE JALISCO USANDO DATOS SÍSMICOS REGIONALES

Marta Rutz-López y Francisco Javier Núñez-Cornú  
Centro de Sismología y Volcanología de Occidente, Universidad de Guadalajara  
Puerto Vallarta, Jalisco, México

## RESUMEN

En los años 1996, 1997 y 1998 se realizaron estudios de microsismicidad en el norte y oeste del Bloque de Jalisco, motivados por la escasez de trabajos y datos de sismicidad disponibles para esta área, a pesar del conocimiento de la ocurrencia de grandes sismos en este territorio. Los datos obtenidos muestran la gran actividad sísmica que tiene la zona. Además, con base en la distribución hipocentral y el estudio de las formas de onda se elaboró una clasificación preliminar de cuatro zonas sismogénicas. No existen aún datos suficientes para inferir la morfología de la placa de Rivera. También se incluye un estudio comparativo con las localizaciones de la Red del Servicio Sismológico Nacional para mostrar la gran importancia que tiene el disponer de una red sísmica regional para un conocimiento detallado de la sismotectónica de esta zona.

**Palabras clave:** Zonas sismogénicas, sismotectónica, Bloque de Jalisco.

## ABSTRACT

From 1996 to 1998 studies of microseismicity were carried out in the northern and western parts of the Jalisco block, motivated by the shortage of studies and seismicity data available for this area, in spite of the occurrence of great earthquakes in this region. The recorded data show the high seismic activity in the zone. A preliminary classification of four seismogenic zones and the seismic regional geometry is proposed based on the hypocentral distribution and the study of waveforms. To date, there are not enough data to infer the morphology of the Rivera plate. Also presented is a comparative study, using information from the Servicio Sismológico Nacional (National Seismological Service) to show the importance of a permanent regional seismic network in understanding the seismotectonic framework of the zone.

**Key words:** Seismogenic zones, seismotectonics, Jalisco Block.

## MARCO TECTÓNICO REGIONAL

Para un conocimiento general de la situación tectónica del Bloque de Jalisco se presenta en la figura 1 una descripción del marco tectónico regional con relación a los límites de las placas oceánicas y el continente Norteamericano.

Al sur de la zona de fracturas de Tamayo se encuentra la Placa de Rivera. Esta se genera en uno de los segmentos de la dorsal del Pacífico Oriental y subduce, a partir de la trinchera Mesoamericana, bajo la estructura conocida como el Bloque de Jalisco y que incluye territorios de los estados de Jalisco, Colima, Nayarit y parte de Michoacán. En su borde suroeste la placa de Rivera está separada de la Placa del Pacífico por la zona de fractura de Rivera. En la parte oriental de esta zona de fractura se encuentra el límite entre las placas de Rivera y Cocos. La definición de este límite entre ambas placas oceánicas es aún incierta; no se conoce con seguridad la zona de contacto ni el movimiento relativo entre ambas placas.

El Bloque de Jalisco está delimitado por la Trinchera Mesoamericana hacia occidente, la zona del graben de Colima en la parte meridional y la zona del graben de Tepic-Zacoalco en la parte oriental, mientras que el borde septentrional no ha sido delimitado con precisión. En la región donde se unen el graben de Colima y el de Tepic-Zacoalco con el graben de Chapala, de orientación aproximada E-O, existe un punto triple localizado a unos 50 km al SSO de Guadalajara. El graben de Colima continúa aparentemente, en la zona marina, en las estructuras del graben de Manzanillo y El Gordo. En este graben ocurre el alineamiento volcánico Volcán de Fuego-Nevado de Colima-Cántaro. El graben de Tepic-Zacoalco, cuyo rumbo aproximado es NO y en la cual se encuentran la caldera de la Primavera y los volcanes Tequila, Ceboruco, y Sangangüey, coincide, a su vez, con el extremo occidental del eje Neovolcánico Mexicano. De los volcanes mencionados se consideran activos el Volcán de Fuego (Colima), el Ceboruco y el Sangangüey.

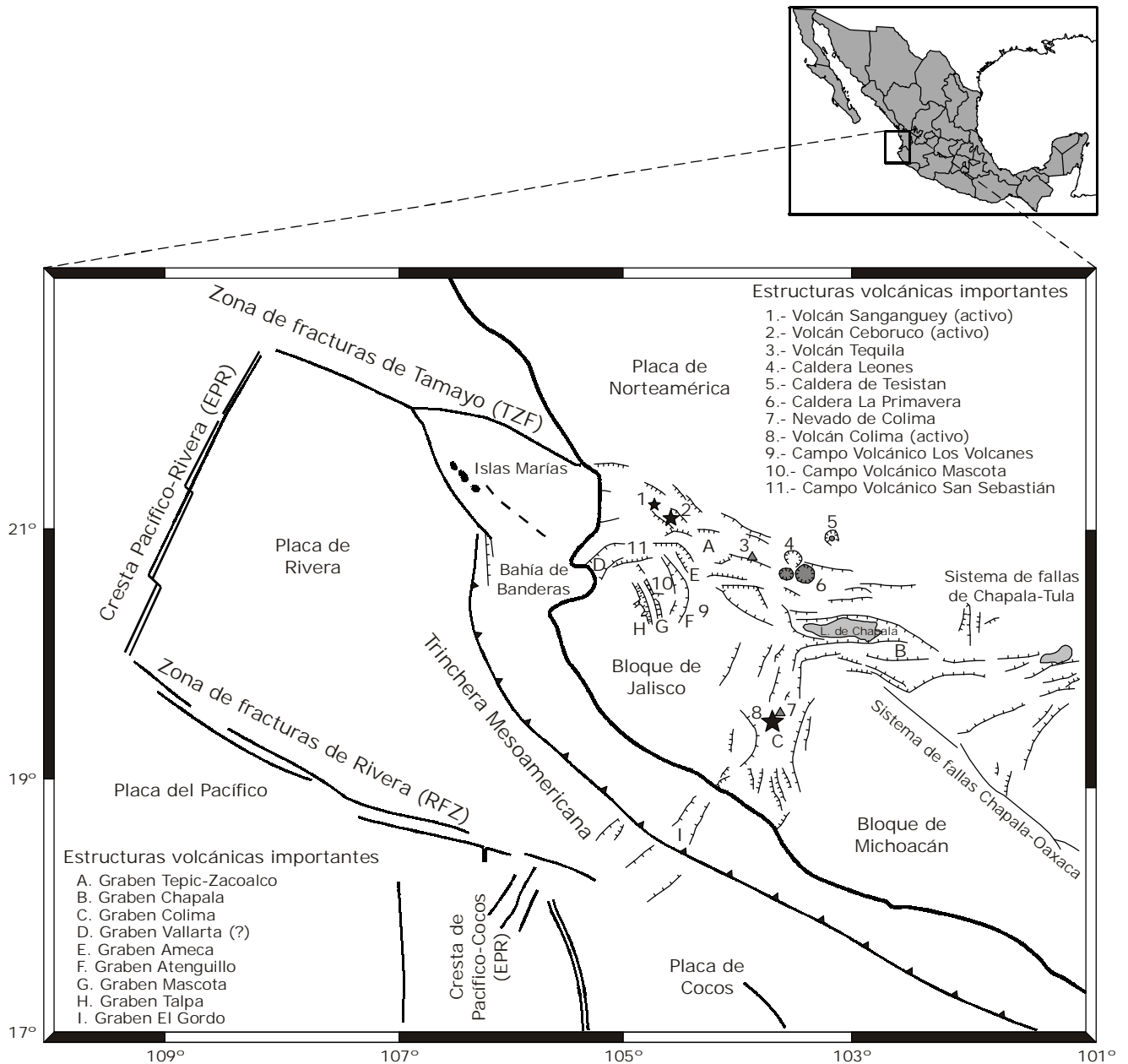


Figura 1. Marco tectónico de la región de estudio.

## INTRODUCCIÓN

Hasta el año 1996 había en toda la costa de Jalisco sólo una estación sismológica del Servicio Sismológico Nacional localizada en Chamela. Por tanto, es claro que el seguimiento sísmico ha sido escaso en el pasado a lo largo de la costa de Jalisco y sur de Nayarit, a pesar de que hay documentación de sismos históricos y de los primeros sismos registrados instrumentalmente a principios del siglo XX con epicentros en esta zona (Singh et al, 1981; Eissler y McNally, 1984). Motivados por el conocimiento de este potencial sísmico en la zona, se inició el proyecto Peligro Sísmico en el Bloque de Jalisco (Nava et al., 1994). Sin embargo, fue después del terremoto de Octubre de 1995, ocurrido en la costa del sur de Jalisco con Ms de 8.1, cuando se reactivó la instalación de una red

sismológica portátil, en la costa y norte del bloque de Jalisco. Fue una investigación conjunta entre el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y la Universidad de Guadalajara, con financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT). En este trabajo se presentan los primeros resultados de carácter sismotectónico obtenidos con los datos de este estudio.

Se utilizaron cinco estaciones sismológicas Lennartz Mars-88 Le 3D y dos MQ Sprengneter que conformaron la red portátil y de la cual se obtuvieron los datos base del presente estudio de sismicidad. Las estaciones estuvieron operando desde 1996 hasta 1998. Los registros no fueron continuos en todas las estaciones, debido a la dificultad en darles mantenimiento y a la insuficiencia de presupuesto. Por ello, los datos recogidos son los correspondientes a

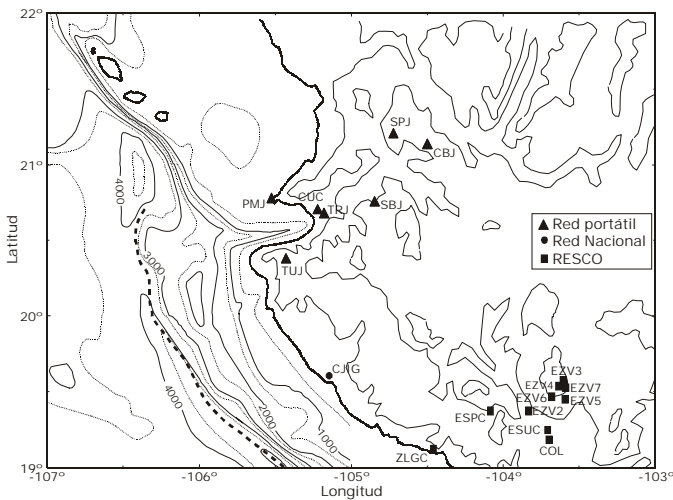


Figura 2. Ubicación de las estaciones sismológicas. La línea discontinua es la trinchera Mesoamericana. PMJ: Punta Mita; CUC: Centro Universitario de la Costa; TRJ: Las Trompetas; TUJ: El Tuito; SBJ: San Sebastián; SPJ: San Pedro Lagunillas; CBJ: Ceboruco.

cerca de cuatro meses de registro continuo. Estos datos sísmicos se completaron con datos de la red sísmica telemétrica analógica de Colima (RESCO), de periodo corto, y para algunos casos, la estación de Chamela del Servicio Sismológico Nacional (SSN), de banda ancha. La posición de las estaciones sismológicas se muestra en la figura 2.

## PROCESADO DE DATOS

Se creó una base de datos con todos los eventos registrados en las estaciones sismológicas de la red portátil. Después se realizó una primera selección de estos, excluyendo aquellos que estuviesen fuera de la región de estudio. El siguiente paso a seguir fue completar la base de datos con los de RESCO, cuyo registro continuo se revisó, extrayendo todos los eventos de nuestra base detectados por aquella red. El Servicio Sismológico Nacional nos proporcionó los registros de algunos temblores de un enjambre detectado en la estación de Chamela que se produjo a principios de marzo de 1998 en una zona comprendida entre Amatlán de Cañas y Ameca.

Todos los eventos registrados en tres o más estaciones fueron localizados mediante el programa Hypocenter 3.2 (B. Lienert, 1994). Los hipocentros con error de tiempo (rms) > 0.5 s y error vertical y horizontal > 10 km fueron eliminados de nuestro análisis. Se aplicó un modelo de velocidades que se obtuvo de un análisis de las ondas refractadas en diferentes estaciones sismológicas de la red portátil para tener el control de profundidad (Núñez-Cornú *et al.*, 1998). El modelo se muestra en la Tabla 1. La relación de magnitud local que mejor se ajustó a los datos fue la de Lay & Wallace (1995):

$$M_L = \log A - 2.48 + \log D$$

Tabla 1. Modelo de velocidades para la zona noroeste del Bloque de Jalisco

Profundidad (km)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0	5.7	3.2
3.6	6.4	3.6
19.0	6.9	3.9
28.0	7.6	4.3
35.0	8.0	4.5
50.0	8.1	4.6
70.0	8.3	4.7

donde D es la distancia hipocentral en km y A es la amplitud máxima en mm. Fueron 197 temblores los que se pudieron localizar dentro del margen de error establecido.

El estudio sísmico de los datos obtenidos se basó en el análisis de la distribución espacial, obteniéndose diferentes zonas sismogénicas que se caracterizan por tener registros con formas de onda particulares en cada una de ellas.

En la estación TUJ (Tuito, Jalisco) se registraron frecuentemente enjambres de temblores a un radio menor de 60 km pero de tan baja magnitud que sólo fueron detectados por esta estación. Sin embargo, al disponer de un sensor triaxial, se pudo estimar el azimut y la distancia epicentral de los eventos (Lay & Wallace, 1995), para luego calcular las coordenadas de sus epicentros. De esta forma se localizaron un total de 340 eventos, pero como son datos sujetos a un margen de error grande, no se consideraron en el análisis y sólo se incluyen en este artículo con la intención de mostrar el nivel alto de sismicidad que tiene esa zona.

## RESULTADOS

En la figura 3 se muestran todos los eventos localizados con tres o más estaciones. En el mapa epicentral (figura 3a) se observa: a) un cese de sismicidad brusco al norte del paralelo 21, b) una franja con muy baja actividad sísmica entre las latitudes 19.7° y 20.3°, y c) no se registran terremotos al occidente de la trinchera Mesoamericana. Por estar fuera de los objetivos de este trabajo, no se analizaron los eventos localizados en la zona del Graben de Colima.

Para analizar la distribución sísmica en función de la profundidad de los eventos mostramos las secciones N-S y E-O, donde se proyectan los sismos de la región de estudio. La sección norte-sur está representada en la figura 3b, en donde se puede apreciar la franja con escasa sismicidad entre las latitudes 20.1° y 20.3° y la ausencia de epicentros al norte del paralelo 21°. Los hipocentros se localizan desde la superficie hasta profundidades de 40 km. La figura 3c representa una sección este-oeste de la región en la que se observan eventos entre los 15 y 40 km de profundidad, y desde la trinchera unos 70 km hacia la costa, que difícilmente se puede relacionar con la sismicidad debida al contacto entre la placa oceánica y la continental.

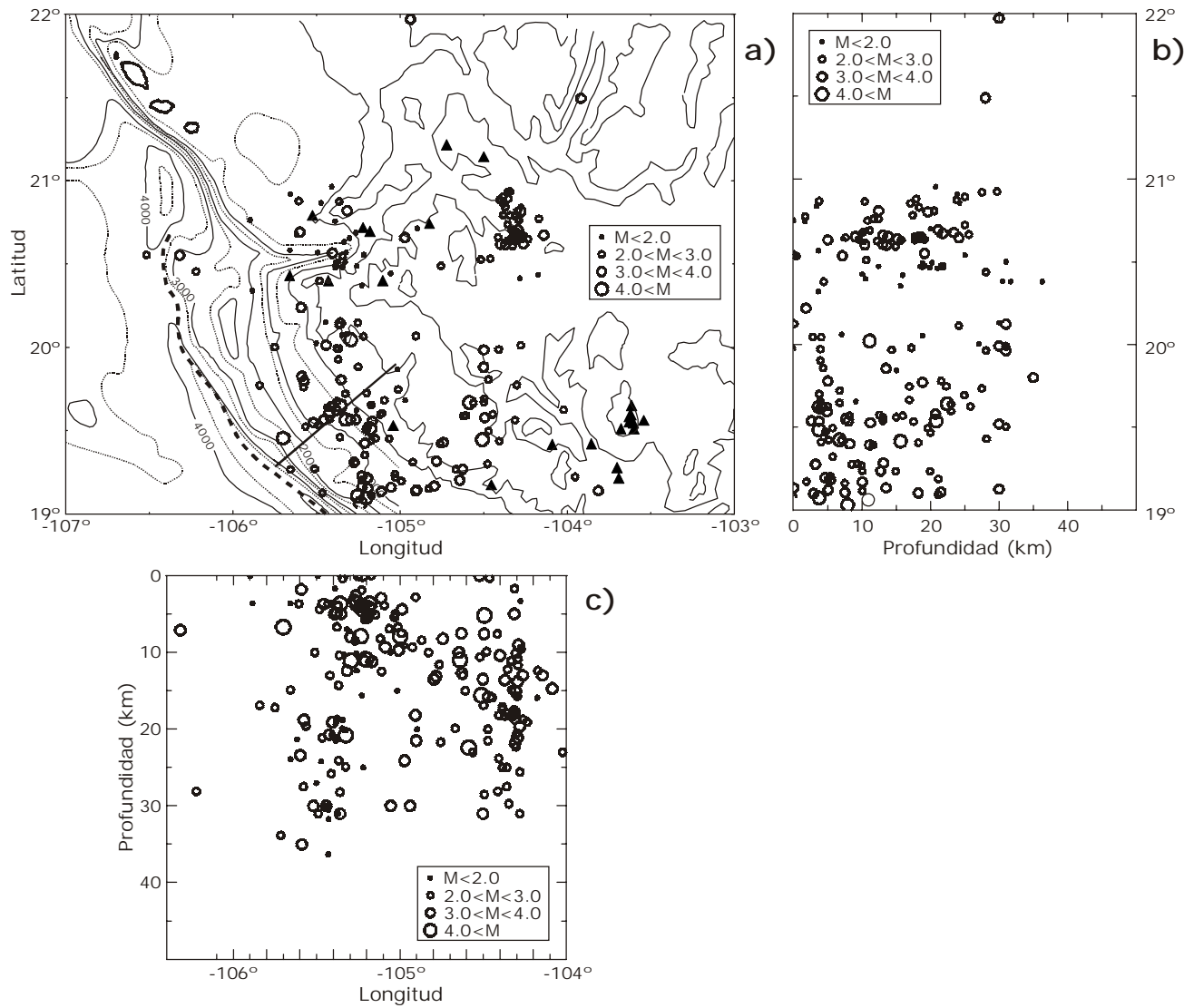


Figura 3. a) Mapa epicentral de los sismos registrados en tres o más estaciones. Las estaciones se representan por triángulos. La línea punteada A-A' es perpendicular a la costa y mide 100 km, se utiliza para calcular los ángulos de la figura 11. b) Sección norte-sur del mapa epicentral. c) Sección este-oeste del mapa epicentral.

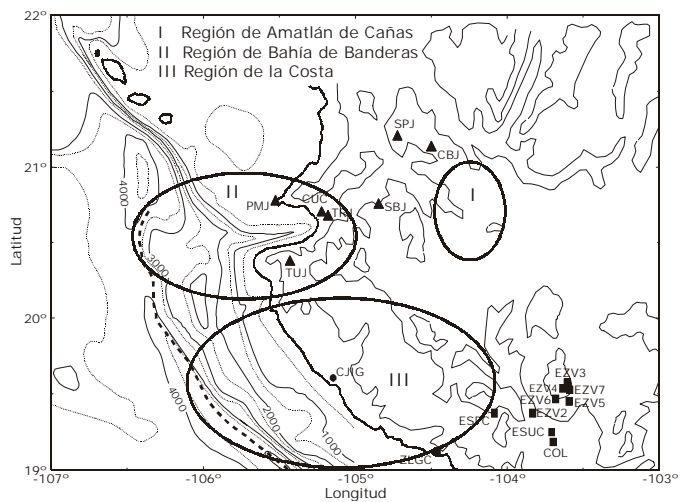


Figura 4. Las tres regiones sismogénicas consideradas en este estudio. Elipses punteadas: zonas sismogénicas propuestas por Núñez-Cornú *et al.* (2002) para el área de Bahía de Banderas.

Del análisis de la distribución epicentral, los temblores se han clasificado por grupos, asignados a las tres regiones sismogénicas que aparecen en la figura 4. Para una clasificación dentro de las regiones se utilizó un análisis de las diferentes formas de onda de los sismogramas.

### REGIÓN DE AMATLÁN DE CAÑAS

Esta región se encuentra entre Amatlán de Cañas y Ameca, lindando en su extremo norte con el graben de Tepic-Zacoalco (región I). La sismicidad es continental y los eventos no sobrepasan los 35 km de profundidad, con lo cual la sismicidad se distribuye en todo el grosor de la corteza continental. Durante el periodo de funcionamiento de las estaciones sismológicas se pudieron localizar 49 eventos, con valores de magnitud comprendidos entre 2.9 y 5.3  $M_L$ . De este total, 24 temblores se produjeron en el enjambre de Marzo de 1998 durante un periodo de 6 días.



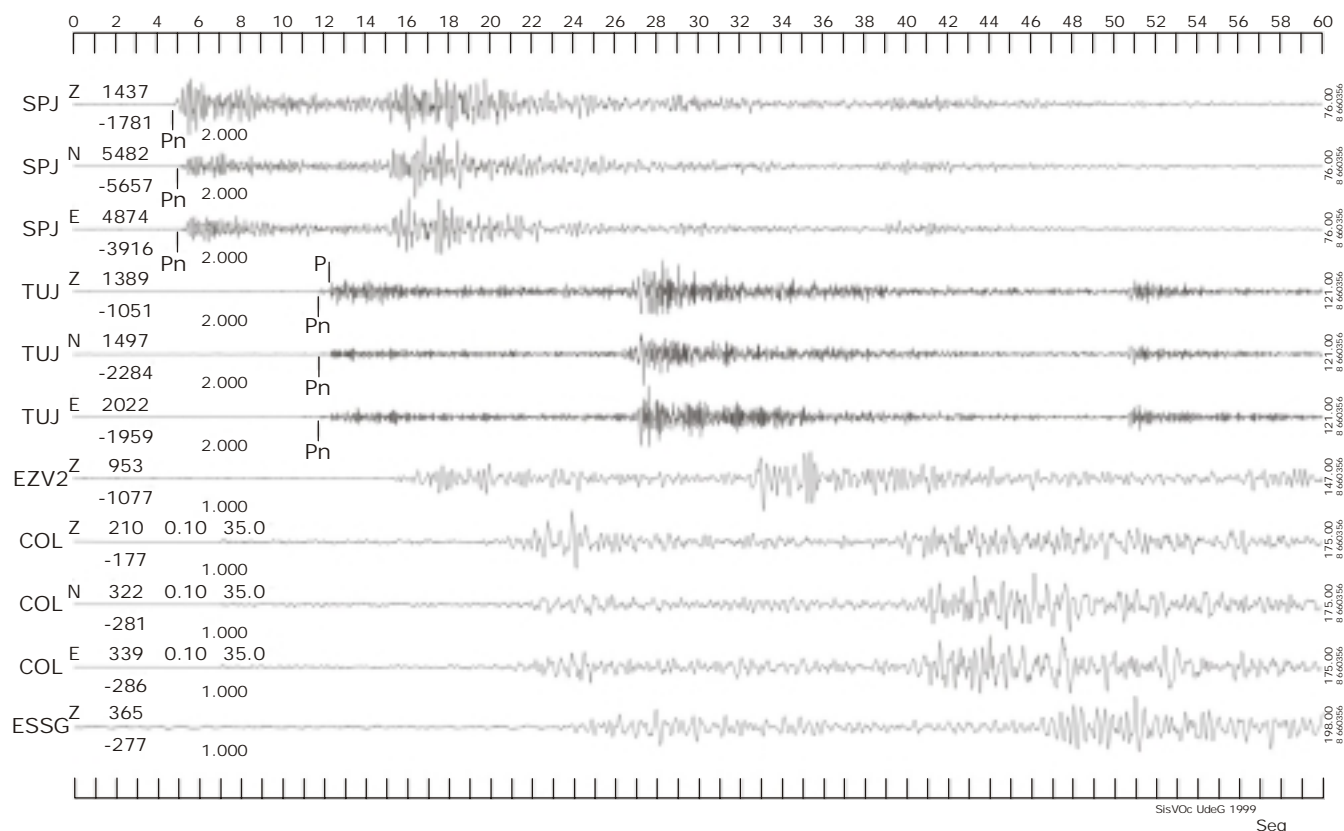


Figura 5. Terremoto ocurrido en el enjambre de Marzo de 1998 en la región I; de Amatlan de Cañas. Fue registrado por la red portátil y por las estaciones de la red de Colima (RESCO).

En la figura 5 se muestran los sismogramas de uno de los eventos ocurridos en el enjambre de Marzo de 1998 y que se localizó a 121 km de TUJ y a 76 km de SPJ (San Pedro Lagunillas). En SPJ existe una fase inicial que no parece ser la onda P directa, más bien una Pn, la cual se observa claramente en los registros de TUJ. La aparición de ondas refractadas a distancias pequeñas del hipocentro indica una fuerte discontinuidad o la posible existencia de una discontinuidad de Conrad.

### REGIÓN DE BAHÍA DE BANDERAS

Esta región comprende la parte terrestre del interior y costas de Bahía de Banderas y el área marina que alcanza hasta la trinchera Mesoamericana en dirección hacia occidente (figura 4). En esta región ya se habían definido previamente tres zonas sísmicas: la del norte(N), centro(C) y sur(S) de la Bahía (Nuñez-Cornú *et al.*, 2002). Se localizaron 40 terremotos con magnitud comprendida entre 1.2 y 4.9  $M_L$ , con cuyos datos se realizó el análisis que se presenta a continuación:

#### ZONA NORTE DE LA BAHÍA

Lo más característico de los eventos localizados en esta zona es que en las señales que llegan a la estación TUJ se observa una gran dispersión de las señales sísmicas. De hecho, pocos temblores localizados al norte de la bahía fueron registrados por esta estación y, sin embargo, la señal llega con claridad a SPJ y SBJ (San Sebastián del Oeste), que se encuentran al oriente y PMJ (Punta de

Mita) que se sitúa en el norte de Bahía de Banderas (figura 2). Casi todos los temblores ocurren a profundidades someras. Este hecho apoya la hipótesis que sugiere la existencia de una estructura tectónica importante que atraviesa la bahía en dirección E-O (Dañobeitia *et al.*, 1997). Esta posible estructura provoca gran dispersión en las señales sísmicas que la atraviesan, resultado de una región no homogénea y/o muy fracturada. En la figura 6 se muestran los sismogramas de un evento registrado en TUJ y PMJ. En PMJ el temblor se registra mostrando una onda P directa muy impulsiva y una onda S clara, mientras que en TUJ, la señal cruza la Bahía llega muy dispersa y con menor amplitud.

#### CENTRO DE LA BAHÍA

Es en esta zona donde se producen los eventos más profundos, que podrían correlacionarse con la estructura tectónica comentada en el párrafo anterior, una posible zona de falla que marca el límite norte del Bloque de Jalisco, y que aquí llamaremos Borde de Banderas. En esta zona se encuentra el cañón submarino que atraviesa la Bahía de este a oeste, que ya se ha propuesto como prolongación marina del Graben del Río Ameca en otros trabajos (Fisher, 1961; Johnson & Harrison, 1990). Apoyando esta hipótesis, Álvarez (2001) realizó una campaña de ecosondeos en la parte del cañón submarino de la bahía, encontrando una alta reflectancia, posiblemente debido a la presencia de basamento de composición granítica, con abundancia de picos y cañones que llegan hasta los 1400 m de profundidad. La falta de sedimentos en las zonas profundas sugiere que la zona es activa.

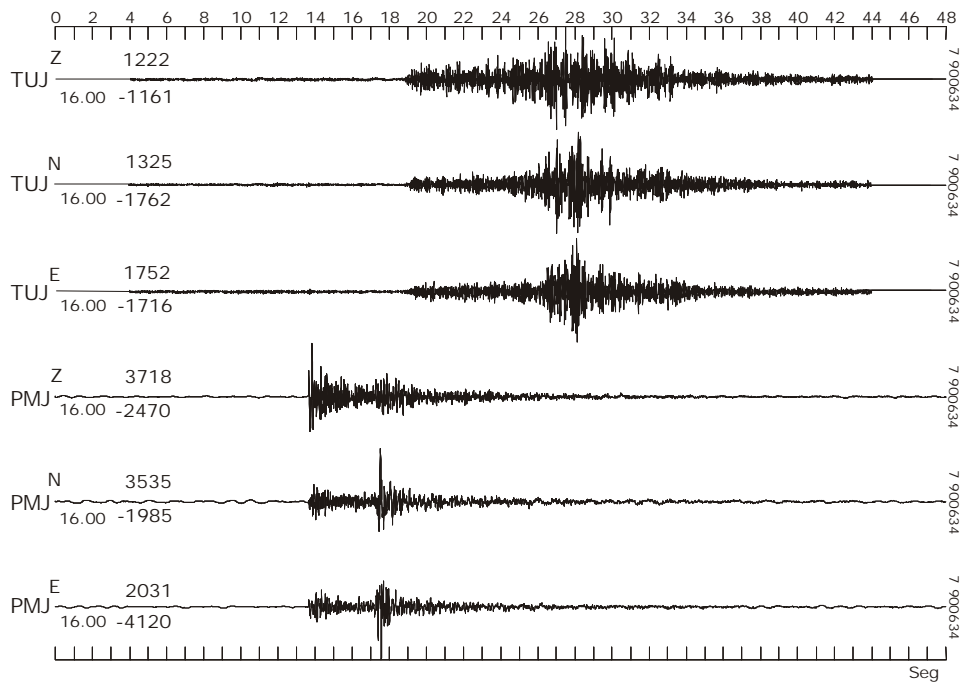


Figura 6. Terremoto registrado en la zona norte de Bahía de Banderas. Las tres primeras trazas son las tres componentes del registro de TUJ (sur de la bahía). Las tres últimas trazas son las registradas por PMJ (norte de la bahía).

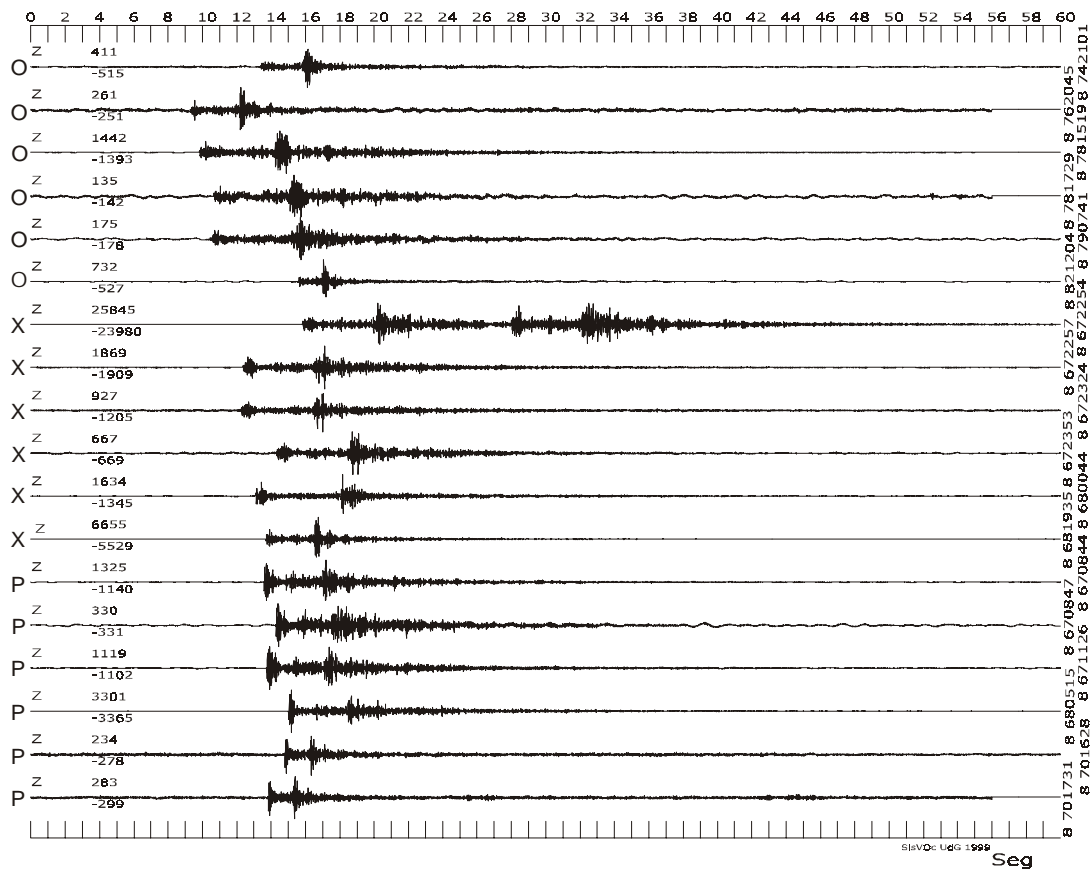


Figura 7. Enjambres que se producen en la zona sur de la bahía registrados por la estación sismológica de TUJ. Las trazas están ordenadas según las tres familias clasificadas, hay seis ejemplos para cada una y solo se muestra la componente vertical de cada evento.

## SUR DE LA BAHÍA

Esta zona está definida por los eventos que ocurren en la parte suroriental de la bahía. Estos incluyen los sismos del área de Puerto Vallarta, el Tuito y la costa sur de la bahía. Todos son superficiales y se pueden correlacionar con rasgos morfoestructurales, lo que implica que hay estructuras locales continentales activas y, por lo tanto, potencialmente peligrosas. Son este tipo de temblores los que se producen continuamente en los enjambres registrados en la estación TUJ. En la figura 7 se presentan tres tipos de estos enjambres que se encuentran localizados en un radio de 60 km de la estación. Gran parte de ellos no se pueden localizar debido a que no se registran en ninguna otra estación por su baja magnitud y falta de estaciones sismológicas cercanas. En el periodo en que la estación PMJ estuvo funcionando no registró ningún temblor ocurrido en esta zona, debido a la atenuación de la señal sísmica al cruzar la bahía y el nivel de ruido propio del emplazamiento de la estación en Punta de Mita.

Sobre un modelo digital del terreno (figura 8) se representan las localizaciones de los eventos ocurridos tanto en Bahía de Banderas como en Amatlán de Cañas. En la región de la Bahía se incluyen los eventos registrados sólo en la estación TUJ. No se registró sismicidad al norte del paralelo 21 ni en la región de Amatlán de Cañas ni en la región de la Bahía, aunque se registraron escasos temblores entre estas dos regiones. Esta frontera sísmica apoya la hipótesis del Borde de Banderas, mientras que los eventos de la región de Amatlán colindan con el graben de Tepic-Zacoalco, por lo que proponemos que la actividad sísmica de estas zonas está relacionada con la misma estructura tectónica formando el límite norte del bloque de Jalisco.

## REGIÓN COSTERA

Como se muestra en la figura 3c, hay eventos costeros a profundidades someras y cerca de la trinchera difíciles de asociar con el contacto entre la placa de Rivera y el bloque de Jalisco. En el trabajo realizado a consecuencia del terremoto de 1995 en las costas de Jalisco y Colima por Pacheco *et al.* (1997), se plantea la razón de la existencia de réplicas a menos de 50 km de la trinchera Mesoamericana y a una profundidad difícil de asociar a la zona de Wadati-Benioff. Estos autores proponen que estas réplicas, tan cercanas a la trinchera, se producen debido a una carencia de sedimentos con alta presión de poro a profundidades superficiales, menores de 35 km (Byrne *et al.*, 1988). Este tipo de actividad sísmica para la zona de subducción de la placa de Cocos ha sido identificada también por Singh *et al.* (2000). En este último caso, asocian esa actividad a la litosfera oceánica de la placa de Cocos. Estos son los terremotos someros de falla normal, de gran magnitud ( $M_w > 7.0$ ) que ocurren con cierta frecuencia (cuatro de los siete últimos grandes temblores en la placa de Cocos). Este hecho podría implicar que este tipo de temblores puedan presentarse también asociados a la subducción de la placa de Rivera bajo el Bloque de Jalisco.

Con la idea de caracterizar la actividad sísmica de esta región, analizamos las formas de ondas de todos estos temblores costeros, considerando particularmente la relación  $A_p/A_s$ , fases refractadas y posibles fases convertidas. Con estas consideraciones se pudo obtener una primera clasificación: Los temblores originados en la litosfera continental, eventos continentales, y aquellos con origen en la litosfera oceánica, eventos oceánicos. Así se propone la hipótesis que la actividad sísmica cercana a la trinchera se origina en la placa oceánica.

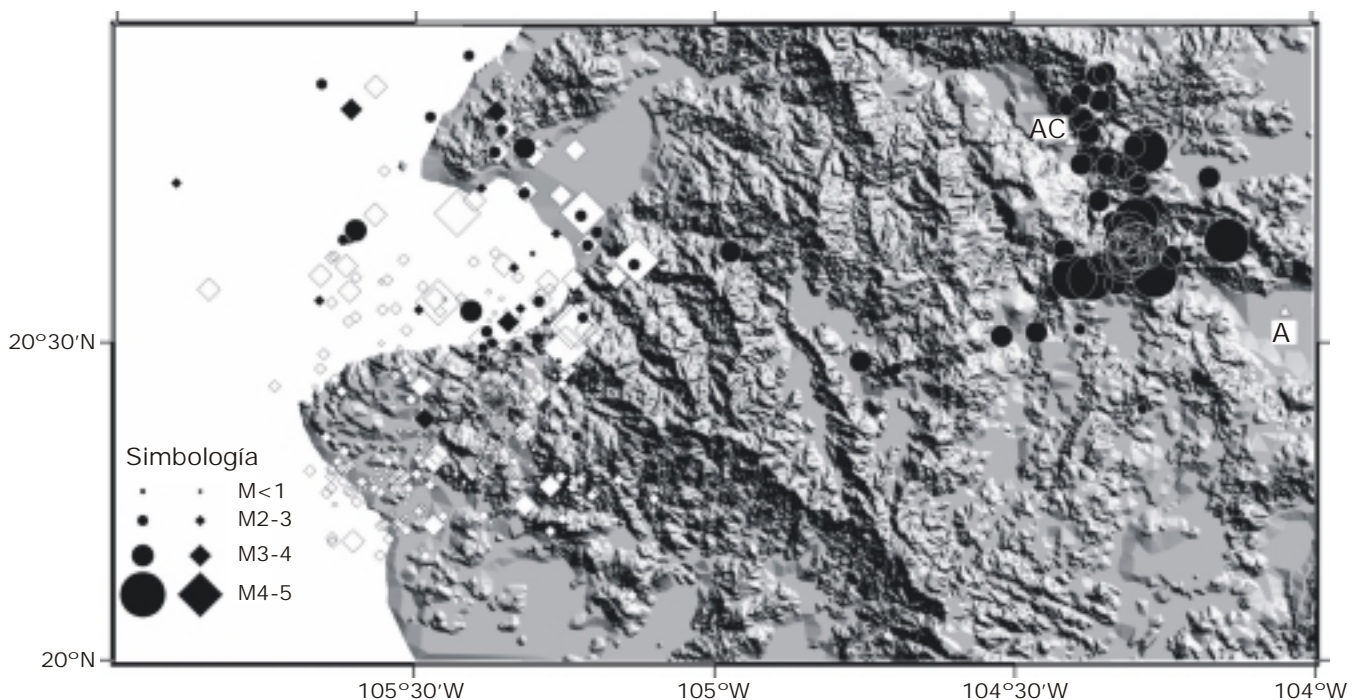


Figura 8. Temblores de la región de Amatlán de Cañas y Bahía de Banderas. Los círculos son eventos localizados con tres o más estaciones y los rombos con una o dos estaciones. AC: Amatlan de Cañas; A: Ameca.

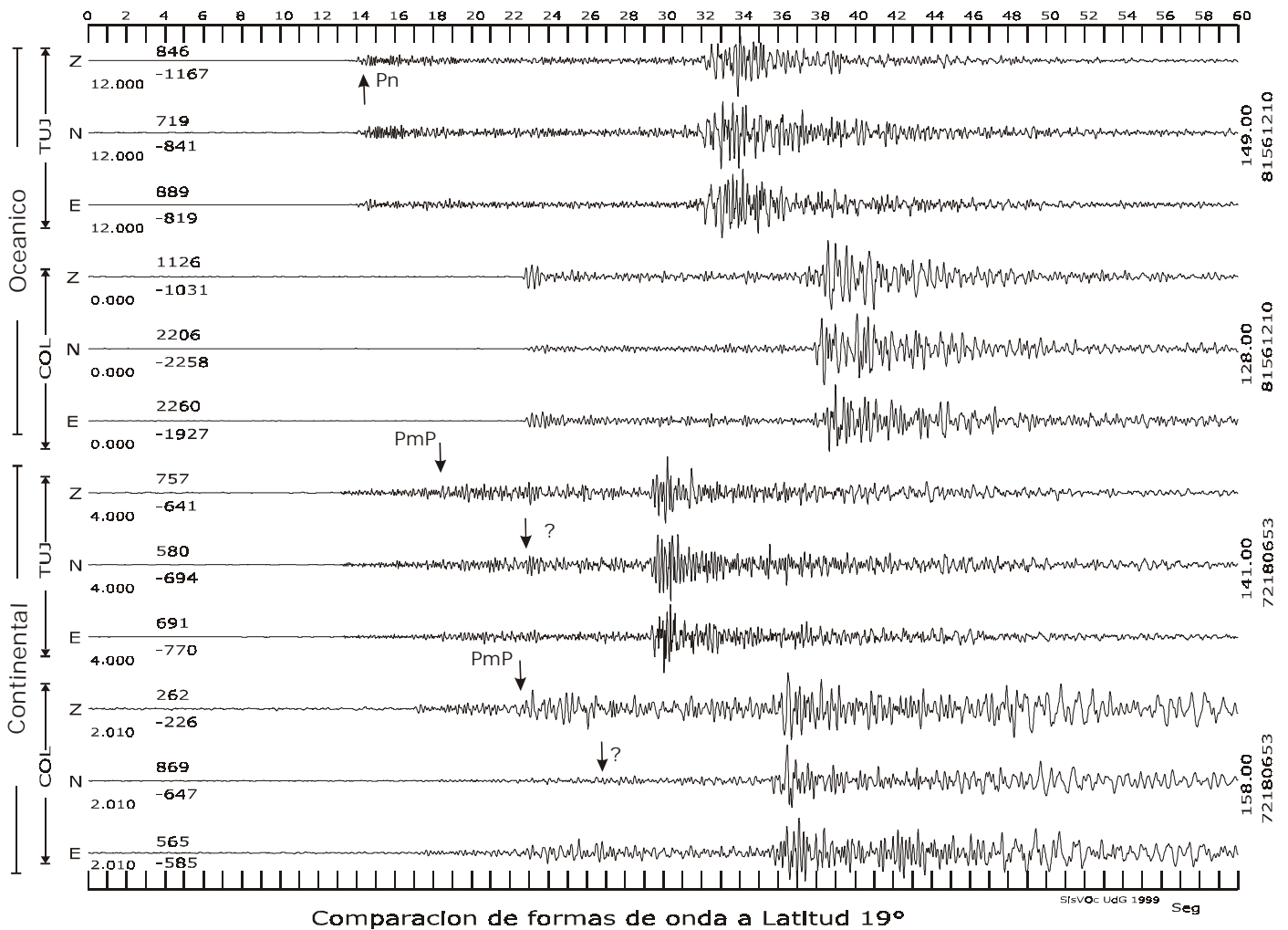


Figura 9. Comparación de formas de onda de eventos continentales y oceánicos.

En la figura 9 se muestra un ejemplo de las diferencias significativas en las formas de onda encontradas en el análisis descrito:

- La fase inicial de las ondas directas P y S es de baja frecuencia para las trazas oceánicas; se caracterizan por presentar ondas P energéticas y en muchos casos ondas Pn claras.
- El primer arribo de las ondas P y S en el caso de los eventos continentales es de mayor frecuencia y de baja amplitud. Sus trazas presentan posibles ondas reflejadas convertidas y no se observan ondas refractadas (Núñez-Cornú *et al.*, 2002).

A partir de la caracterización anterior se identificaron 26 terremotos de tipo oceánico distribuidos desde la trinchera hasta la costa, con profundidades que varían entre los 7 y 30 km y magnitud comprendida entre 2.6 y 5.5  $M_L$ . Los eventos continentales localizados son 82, cuyos hipocentros se encuentran desde la trinchera hasta a unos 180 km tierra adentro, con profundidades hasta los 31 km, y magnitud entre 2.7 y 5.8  $M_L$  (ver figura 3).

Para resaltar la distribución de los hipocentros mostramos dos figuras proyectadas en tres dimensiones con perspectivas diferentes. Desde el punto de vista mostrado en la figura 10a, los temblo-

res relacionados con la litosfera continental (círculos) se encuentran en una franja estrecha entre la trinchera y la costa. Con esta orientación estos eventos se ajustan para formar un alineamiento, que puede relacionarse con el plano que define la actividad sísmica debido al contacto entre placas (zona de Wadati-Benioff). Separados de estos eventos continentales y al oeste de la proyección de la trinchera en la superficie, se encuentran los temblores asociados a la litosfera oceánica (cruces). Si formamos una línea uniendo las Islas Marias con el límite de actividad sísmica continental costera y el Volcán de Fuego (Colima), todos los eventos costeros quedan al oeste y solamente la actividad de la región de Amatlán de Cañas (cuadrados) se localiza al este de esta línea. Esta vista podría indicar la dirección de una subducción oblicua a lo largo de la línea discontinua, lo que implica la posibilidad de un movimiento relativo de la placa de Rivera con respecto al bloque de Jalisco en dirección sureste. En la figura 10b la vista es desde el suroeste y nos muestra las mismas características mencionadas, como son los límites de sismicidad y el agrupamiento a los lados de la trinchera de los temblores de origen continental y oceánico.



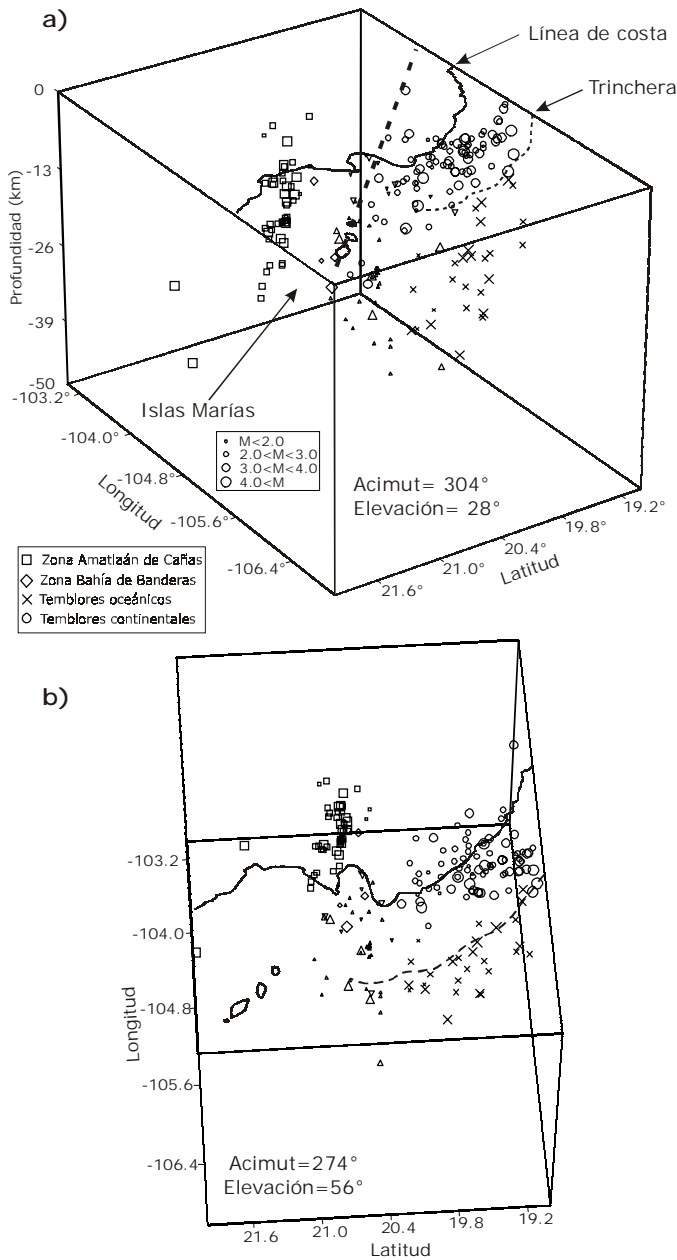


Figura 10 a y b. Perspectiva de la distribución sísmica en tres dimensiones de los hipocentros separados en los cuatro tipos de sismos correspondientes a las zonas sismogénicas propuestos.

Finalmente, en la figura 11 representamos una estimación del ángulo de subducción de la placa de Rivera bajo el bloque de Jalisco. Considerando los eventos continentales se obtiene un ángulo de subducción de 12°, que coincide con la zona de contacto entre las placas convergentes. Se muestra también la línea de los 21° ya que a mayor ángulo solo se encuentran eventos oceánicos. Estos valores son similares a los obtenidos en los estudios de reflexión y refracción sísmica en el proyecto CORTES96, que se realizó en 1996 (Dañobeitia *et al.*, 1997) y a los ángulos estimados con datos de la red de RESCO para la costa de Colima y sur de Jalisco (Núñez-Cornú & Sánchez-Mora, 1999).

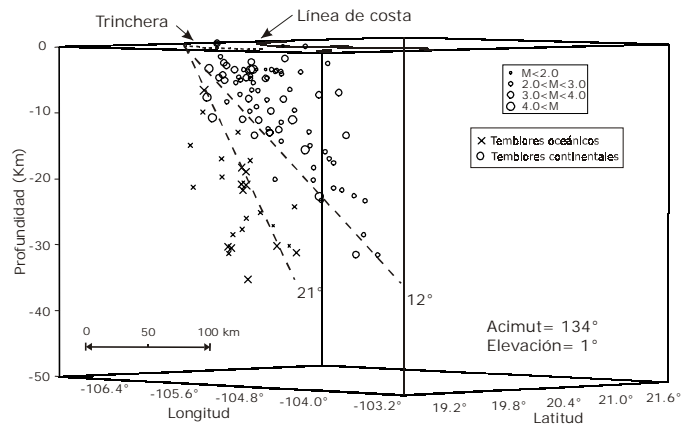


Figura 11. Eventos costeros proyectados en un perfil perpendicular a la trinchera, tanto de la litosfera oceánica como continental. Aparecen las líneas de buzamiento para ángulos de 12° y 21° calculadas a partir de la línea A-Á (100km) y la profundidad.

Tabla 2. Promedios en la comparación de los datos reportados por el SSN y este trabajo.

Zona	Nº eventos	Diferencia epi. (km)	Diferencia magnitud	Diferencia prof. (km)*
CC	7	34	1.06	4
OC	4	27	0.80	6
BAB	2	65	0.65	27
ACA	7	15	0.28	40

CC: relacionada con los eventos de la litosfera continental, BAB: Bahía de Banderas, ACA: Amatlán de Cañas, OC: relacionada con los eventos de la litosfera oceánica.

\* El promedio en la diferencia de profundidad está calculada haciendo la media de los valores absolutos de las diferencias de profundidad de cada uno de los eventos.

### COMPARACIÓN CON LOS DATOS SÍSMICOS DEL SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL

Muchos de los temblores registrados y localizados en esta zona de estudio también fueron registrados y localizados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN). Para evaluar la concordancia entre los datos de las dos fuentes, se realizó un estudio comparativo de hipocentros en base al nivel de detección. De los 197 eventos localizados en este trabajo, 43 son reportados también por el SSN. Teniendo en cuenta que el SSN solo reporta eventos con magnitud igual o superior a M 3.7 que es equivalente a  $M_L$  4.25 calculado en este trabajo, hay muchos eventos locales que quedan por debajo de esta magnitud. Ahora, si suponemos que todo evento con magnitud igual o superior a este límite ha podido ser notificado por el SSN, llegamos a los siguientes resultados comparativos:

- El SSN reporta el 55% de los eventos ocurridos en esta región.
- Las diferencias en las localizaciones hipocentrales varían según cada una de las zonas propuestas. Los promedios de estas variaciones se muestran en la tabla 2. Esto puede deberse a la existencia de una zonificación sísmica donde hay que tener en cuenta el efecto de fuente y el medio de propagación para cada zona en particular.

Tabla 3. Resultado de las localizaciones y las diferencias realizadas en este estudio y en el Servicio Sismológico Nacional de la zona de Amatlán de Cañas (ACA).

Datos de este trabajo (Estación SPJ)											Datos del SSN					Diferencias				
Fecha	hora	Dist. (km)	Lat	Long	Prof (km)	M <sub>L</sub>	rms	erh	erz	N° Lec	Hora	lat	Long	Prof (km)	M	Dist. (km)	Az	M <sub>L</sub> -M	Prof (km)	
1	980304	13:40:46	13.36	20.60	-104.40	10	4.23	0.35	8.3	2.9	32	13:40:48	20.69	-104.31	16	3.9	13.36	45	0.33	6
2	980305	20:04:17	7.41	20.60	-104.37	14	4.93	0.29	7.1	2.2	40	20:04:19	20.67	-104.37	6	4.9	7.41	1	0.03	-7
3	980305	22:12:42	9.84	20.66	-104.14	13	4.46	0.51	4.4	3.7	34	22:12:45	20.70	-104.33	87	4.3	9.84	283	0.16	74
4	980306	10:48:41	13.70	20.69	-104.30	21	4.27	0.30	6.6	3.6	41	10:48:43	20.57	-104.28	68	4.1	13.70	173	0.17	47
5	980306	15:25:45	19.94	20.65	-104.29	9	4.49	0.34	2.8	2.6	37	15:25:45	20.82	-104.36	16	4.2	19.94	338	0.29	7
6	980307	16:58:47	11.62	20.67	-104.31	22	4.38	0.21	1.2	1.6	40	16:58:48	20.76	-104.37	59	3.9	11.62	327	0.48	37
7	981028	23:39:59	21.50	20.59	-104.73	31	5.37	0.09	9.2	10	10	23:40:02	21.76	-104.84	130	4.9	21.50	329	0.47	99

La diferencia en la profundidad viene dada por la resta de los datos de este trabajo menos los datos del SSN, con lo cual, la diferencia negativa corresponde a eventos del SSN más someros que en este trabajo y la positiva, los eventos son más profundos en los resultados del SSN.

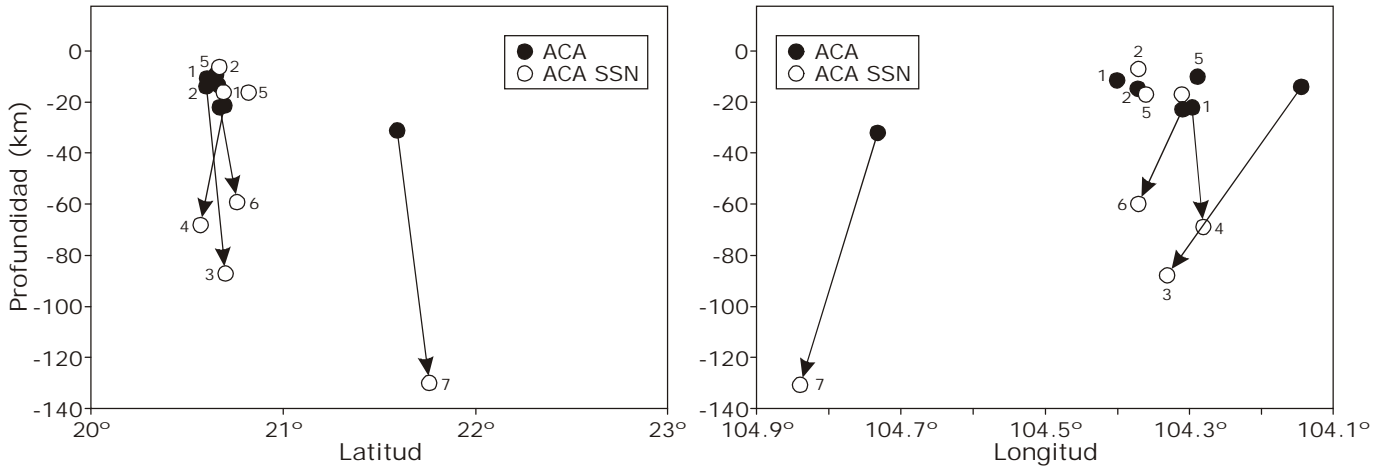


Figura 12. Localizaciones de eventos de Amatlan de Cañas-Ameca. Relación de la latitud (izquierda) y la longitud (derecha) con la profundidad. Las flechas unen los eventos localizados por el SSN (blancos) con los analizados en este trabajo (negros).

En el caso particular de la zona de Amatlán de Cañas las diferencias en la localización de los hipocentros son grandes. Las profundidades asignadas por el SSN han sido tomadas por diferentes autores para definir la zona de Benioff, mientras que, según nuestros datos, los eventos ocurren en la placa continental. En la Tabla 3 se muestran los datos de los hipocentros

que conforman los catálogos tanto del SSN como los del presente estudio para la zona de Amatlán de Cañas. En la última columna se señalan las diferencias en profundidad de ambas localizaciones. Para verlo con más claridad, en la figura 12 se grafican las localizaciones en latitud y longitud con respecto a la profundidad.

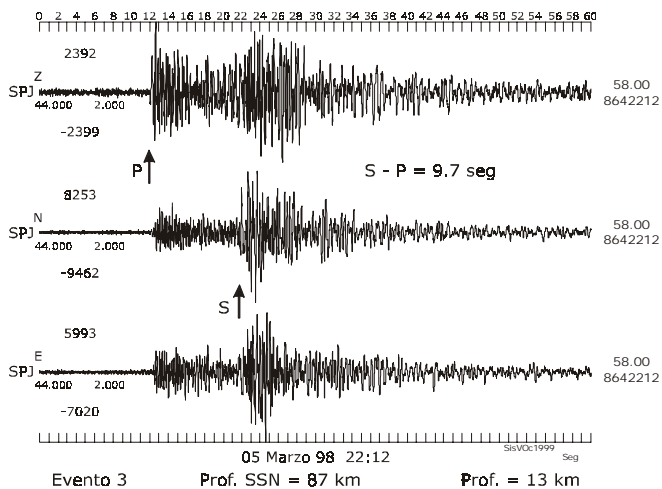


Figura 13. Temblor registrado en la estación de San Pedro (SPJ) ocurrido en el enjambre de Marzo de 1998. Se señalan las llegadas de las fases P y S y el tiempo transcurrido entre ellas.

Las figuras 13 y 14 muestran los sismogramas de los eventos 3 y 4 descritos en la Tabla 3, registrados por la estación de San Pedro (SPJ). Los sismogramas de la figura 13 corresponden al temblor que ocurrió a las 22:12 del 3 de Marzo de 1998, con una S-P de 9.7 s. En la figura 14 se presenta el evento 4, ocurrido el 6 de Marzo a las 10:48 del mismo año. Tiene una S-P de 9.8 s. Para que estos eventos ocurriesen a las profundidades reportadas por el Servicio Sismológico Nacional, el hipocentro tendría que estar debajo de la estación SPJ. Sin embargo, tanto sus localizaciones como las de este estudio ubican la fuente del temblor a una distancia epicentral media de 71 km (figura 15) de la estación SPJ.

Esta claro que las diferencias de localización no se deben únicamente a la distribución de las estaciones, existen efectos de fuente y propiedades de estructura cortical en esta zona que hay que tener en cuenta y estudiar con más detalle.

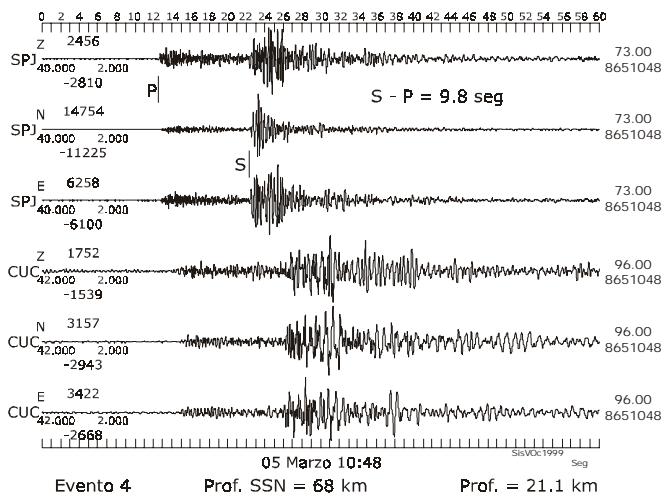


Figura 14. Temblor ocurrido en el enjambre de Marzo de 1998. La señal se registro en las estaciones de SPJ y CUC de la red portátil. Se especifican las llegadas de las fases P y S en los registros de SPJ y la diferencia en sus tiempos de llegada.

## CONCLUSIONES

La existencia de actividad sísmica a todo lo largo de la Trincheras Mesomericana estaba clara, pero no se conocía el alto nivel sísmico de la Bahía de Banderas. Es cierto que la magnitud de estos eventos es pequeña, pero el presente estudio demuestra que hay estructuras tectónicas locales activas que hasta ahora eran desconocidas.

El límite que marca un cese casi total de la sísmica al norte de Bahía de Banderas, que además coincide con el borde norte de la zona sísmica de Amatlán de Cañas, indica un posible borde o límite del bloque de Jalisco, el Borde de Banderas. Esta hipótesis es consistente con propuestas expuestas en estudios anteriores (Johnson & Harrison, 1990; Dañoibeitia *et al.*, 1997; Álvarez, 2001; Núñez-Cornú *et al.*, 2002). En esta región ocurren temblores con profundidades menores a los 35 km, por tanto originados en la corteza continental.

La distribución de los hipocentros sugiere también la posibilidad de una subducción oblicua, donde la placa de Rivera subduce en una dirección que marca la línea que une las Islas Marias con Bahía de Banderas y que se prolonga hasta el Volcán de Fuego (Colima). Esto significaría que el sentido del movimiento de la placa oceánica es hacia el sureste, siendo además el límite de la sísmica de esta placa en subducción justo la línea arriba mencionada.

Los eventos costeros, al sur de la latitud 19.7°N, están localizados dentro de la zona de ruptura del terremoto de magnitud 8.0 Mw de Octubre de 1995 (Courboux *et al.*, 1997), pudiendo relacionarse con movimientos de reacomplamiento de placas. Que al norte de esta franja la actividad sísmica sea menor confirma el alto potencial sísmico de la costa norte de Jalisco.

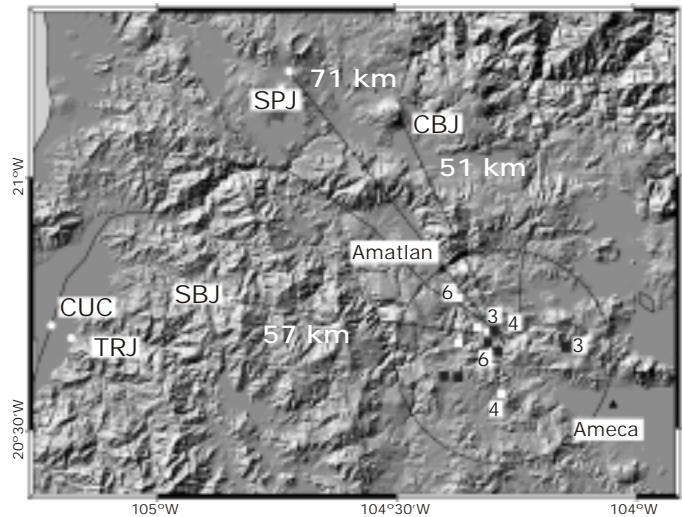


Figura 15. Localizaciones de los eventos registrados tanto por el SSN (cuadrados blancos) como por la campaña de microsismicidad (cuadrados negros) que vienen especificados en la Tabla 3. Las estaciones sismológicas regionales se muestran con círculos blancos. Se señala con flechas la distancia promedio entre la actividad sísmica y las estaciones sismológicas.

En este estudio hemos encontrado eventos próximos a la trincheras Mesoamericana que son difíciles de relacionar con la zona de Wadati-Benioff de la convergencia de las placas entre Rivera y bloque de Jalisco. Esta sísmica se debe a una actividad sísmica de la litosfera oceánica de la placa de Rivera, actividad que ya ha sido documentada para la litosfera oceánica de la placa de Cocos (Singh *et al.*, 2000).

La diferencia entre las localizaciones del Servicio Sismológico Nacional y las presentadas en este estudio difieren considerablemente en la zona de Amatlán de Cañas, concretamente en la profundidad hipocentral de los eventos profundos con un promedio de 40 km de diferencia. Este dato es trascendental, ya que el origen del temblor cambia de ser cortical en nuestro caso a relacionarlo con la zona de Benioff de la placa en subducción en los reportes del SSN. Con este estudio comparativo se pretende demostrar la importancia de crear redes sísmicas regionales, aumentando así la cobertura sísmica y el control en las localizaciones, mejorando el conocimiento del lugar de estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a la concesión de los proyectos LICOJAL con CONACyT (4144PT) y SIMORELOS (19990306004) México y los datos sísmicos de RESCO proporcionados por M. C. Gabriel Reyes-Dávila, se pudo llevar a cabo este estudio de microsismicidad. Nuestro especial reconocimiento a los Doctores Luis Munguía y Luis Delgado por sus valiosos comentarios y atinadas sugerencias.

## REFERENCIAS

- Álvarez, R., 2001. Bahía de Banderas: Posible límite tectónico del Bloque de Jalisco, *GEOS*, Vol. 21, N. 3, 212.
- Byrne, D., Davies, D., and Sykes, L., 1988. Loci and maximum size of thrust earthquakes and the mechanics of the shallow region of subduction thrust, *Tectonics*, 7, 833-857.
- Courboulex, F., Singh, S.K., Pacheco, J.F. and Ammon, C.J. 1997. The 1995 Colima-Jalisco, Mexico, earthquake (Mw 8): A study of the rupture process, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1019-1022.
- Dañobeitia, J.J., Cordoba, D., Delgado-Argote, L.A., Michaud, F., Bartolomé, R., Farran, M., Carbonell, M., Nuñez-Cornú, F. and CORTES-P96 Working Group, 1997. Expedition Gathers New Data on Crust Beneath Mexican West Coast, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 78, 565-572.
- Eissler, H.K. and McNally K.C., 1984. Seismicity and tectonics of the Rivera Plate and implications for the 1932 Jalisco, Mexico, earthquake, *J. Geophys. Res.* 89(B6): 4520-4530.
- Fisher Robert, L., 1961. Middle America Trench: topography and structure, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 72, 703-720.
- Johnson, C.A. and Harrison, C.G.A., 1990. Neotectonics in Central Mexico, *Phys. Earth Plan. Int.*, 64, 187-210.
- Lay, T. & Wallace, T.C., 1995. *Modern global seismology*, Ed. Academic Press.
- Lienart B., 1994. Hypocenter 3.2, Hawaii Institute of Geophysics and Planetology.
- Nava F., J. Nuñez-Cornú, R. García, R. Toscano, M. Farfán, B. Márquez, C. Suárez, L. Valdivia, P. Méndez, G. Saavedra, L. Santiago y M. Alatorre, 1994. Primer Informe de Investigación: Peligro Sísmico en el Bloque de Jalisco. CONACyT [1887-C9212].
- Nuñez-Cornú, F., G. Reyes-Dávila, C. Suárez-Plascencia, F.A. Nava, M. Rutz, A. Ramírez y A. Reyes, 1998. Eventos sísmicos en el Bloque de Jalisco. *GEOS* 1998, S-12, 286.
- Nuñez-Cornú F. and Sánchez-Mora, C., 1999. Stress field estimations for Colima Volcano, Mexico, based on seismic data, *Bull. Volcanol.*, 60, 568-580.
- Nuñez-Cornú F., M. Rutz, F. A. Nava, G. Reyes-Dávila and C. Suárez-Plascencia, 2002. Characteristics of Seismicity in the Coast and North of Jalisco Block, Mexico. *Phys. Earth. Int.* 132, 2002, 141-155.
- Pacheco J., Singh, S.K., Domínguez, J., Hurtado, A., Quintanar, L., Jiménez, Z., Yamamoto, J., Gutiérrez, C., Santoyo, M., Guzmán, M., Kostoglodov, V., Reyes, G. and Ramírez, C., 1997. The October 9, 1995 Colima-Jalisco, earthquake (Mw 8): An aftershock study and a comparison of this earthquake with those of 1932, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2223-2226.
- Singh, S.K., L. Asitz and J. Havskov, 1981. Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: A reexamination, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 3, 827-843.
- Singh, S.K., Kostoglodov, V. and Pacheco, J.F., 2000. Interslab earthquakes in the subducting oceanic plates below Mexico, *GEOS*, 20, 347.

Recepción del manuscrito: 19 de mayo, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 13 septiembre, 2004

Aceptación del manuscrito: 25 de septiembre, 2004



## RASGOS ESTRUCTURALES Y PETROGRÁFICOS DE PLUTONES LOCALIZADOS ENTRE SAN QUINTÍN Y LA SIERRA SAN PEDRO MÁRTIR, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Luis A. Delgado-Argote<sup>1</sup>, Tomás A. Peña-Alonso<sup>1,2</sup>, Elisa Ramírez<sup>1</sup>, Harald Böhnel<sup>3</sup>, Roberto Molina-Garza<sup>3</sup> y Amabel Ortega-Rivera<sup>3</sup>

<sup>1</sup> División de Ciencias de la Tierra, CICESE

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

<sup>3</sup> Centro de Geociencias, UNAM

### RESUMEN

De la interpretación de una imagen satelital de un área de 5,000 km<sup>2</sup> ubicada entre el sur de la sierra San Pedro Mártir y el este de San Quintín se infieren relaciones complejas entre plutones cuyo emplazamiento, a diferencia de los cuerpos zonados típicos, parece regirse por un control estructural regional. Los lineamientos rectilíneos pueden asociarse a sistemas regionales de fracturas y fallas, mientras que los curvilíneos pueden reflejar los contactos y el fracturamiento interno de los plutones. Los cuerpos curvilíneos más pequeños pueden estar relacionados con estructuras subvolcánicas del último periodo del arco Alisitos del Cretácico.

Regionalmente, la zona analizada se dividió en occidental y oriental a partir de un Lineamiento Principal orientado N30°W que en esta zona es subparalelo a la frontera magnetita-ilmenita. La región occidental, donde se encuentra la sección El Socorro, se caracteriza por el dominio de rasgos estructurales entre 0.5 y 10 km de longitud orientados N10°E, N25°W y N40°E que pueden asociarse al desarrollo de complejos plutónico-volcánicos.

Se interpretaron los complejos plutónicos El Quiote (EQ), El Socorro A (SOC<sub>A</sub>), El Socorro B (SOC<sub>B</sub>), Agua Escondida (AGE) y El Salto (SA) y una alineación de plutones (E2) a lo largo de la sección. La clasificación petrográfica de 28 muestras representativas indica una variación de diorita a granito (*sensu lato*) con predominio de cuarzomonzonita-cuarzomonzodiorita, sin zonamiento aparente. Las intrusiones son múltiples y los emplazamientos sucesivos desarrollan complejos plutónicos donde el proceso de mezcla de magmas es común.

El fracturamiento vertical en los plutones muestra un paralelismo notable con las orientaciones de los lineamientos, mientras que del análisis de las fracturas horizontales se interpreta basculamiento de EQ, AGE y SA hacia el occidente. El análisis geobarométrico de una muestra de SA indica una profundidad de enfriamiento equivalente a 2 kbar, dentro de la zona de deformación frágil.

Se interpretó de las relaciones de campo que EQ y SOC<sub>A</sub> están separados por los plutones E2; SOC<sub>A</sub> y SOC<sub>B</sub> forman un complejo plutónico donde SOC<sub>B</sub> es más antiguo y AGE intrude su borde oriental; SA es una estructura compleja de plutones que aparentemente no afecta a AGE. Se infiere que SOC<sub>A</sub>, SOC<sub>B</sub> y E2 pudieron emplazarse simultáneamente y que E2 basculó hacia el W a EQ<sub>D</sub>. Al continuar la acreción magmática los cuerpos fueron levantados y se aceleró la exhumación. AGE y SA fueron basculados hacia el occidente posiblemente por factores de acreción tectónica o por el emplazamiento de los plutones orientales del sur de la sierra San Pedro Mártir.

**Palabras clave:** Complejo plutónico, fracturamiento, deformación, petrografía, basculamiento.

### ABSTRACT

From a satellite image of a 5,000 km<sup>2</sup> area located between San Quintín and Sierra San Pedro Mártir, complex internal relationships are inferred between plutonic bodies, whose mode of emplacement seems to be controlled by regional linear structures, in contrast with the typical concentric plutons north of this area.

Rectilinear lineaments can be associated to regional fault systems, while the curvilinear features may be due to internal fractures and contacts of the plutonic bodies. The smallest curvilinear features can be related to subvolcanic structures of a late period of the Cretaceous Alisitos arc.

Regionally, the study area was divided into an Eastern and a Western part based on a N30°W regional Main Lineament, subparallel to the magnetite-ilmenite border zone. The El Socorro section is located in the western zone which is characterized by 0.5 to 10 km long rectilinear lineaments oriented toward N10°E, N25°W and N40°E, to which can be related some plutonic-volcanic complexes.

The El Quiote (EQ), El Socorro A (SOC<sub>A</sub>), El Socorro B (SOC<sub>B</sub>), Agua Escondida (AGE) and El Salto (SA) plutonic complexes, and one alignment of small plutons were interpreted along the section. The petrographic classification of 28 representative samples indicates a variation from diorite to granite (*sensu lato*), with quartz-monzonite and quartz-monzodiorite being the most abundant, without apparent zoning. Most intrusions are multiple, and their successive emplacement developed plutonic complexes where magma mingling is common.

Vertical fractures in the plutons show a remarkable parallelism with respect to the lineaments. It is interpreted from horizontal fractures that EQ, AGE and SA are tilted westward. The geobarometric analysis of a sample from SA indicates a cooling depth equivalent to 2 kbar, in the brittle deformation zone.

It is interpreted, from field relationships, that E2 separates EQ from SOC<sub>A</sub>; SOC<sub>A</sub> and SOC<sub>B</sub> form a plutonic complex, the dioritic SOC<sub>B</sub> being the oldest with AGE intruding its eastern border; SA is a complex plutonic structure that apparently do not intrude AGE. It is inferred that SOC<sub>A</sub>, SOC<sub>B</sub> and E2 were emplaced simultaneously, but E2 tilted EQ<sub>D</sub> westward. It is also interpreted that plutons exhumation was accelerated during magmatic accretion, and that AGE and SA were tilted, probably by tectonic accretion or by the emplacement of the eastern plutons located south of the sierra San Pedro Mártir.

**Keywords:** Plutonic complex, joints, deformation, petrography, tilting.

## INTRODUCCIÓN

El Batolito de las Sierras Peninsulares o Complejo Batolítico Peninsular (CBP) expone afloramientos continuos de rocas intrusivas desde el sur de Los Angeles, California hasta el paralelo 28°N, en donde se ven interrumpidos por una cubierta extensa de rocas volcánicas terciarias. El CBP ha sido dividido con criterios petrológicos (Gastil, 1983) y geoquímicos (Silver *et al.*, 1979); el que se adopta en este trabajo, se refiere al predominio de magnetita o ilmenita como mineral accesorio (Gastil *et al.*, 1986).

El registro de la actividad magmática en la margen occidental de Norteamérica sugiere que existió un arco continuo que se caracterizó por una fase volcánico-intrusiva que migró de W a E del Jurásico-Cretácico al Paleoceno (Ortega-Rivera, 2003). La reconstrucción de la margen californiana pre-terciaria permite suponer la continuidad inicial del complejo de los batolitos cordilleranos del occidente de Estados Unidos con los de Baja California y Sonora (Silver, 1982; Ross, 1984; Silver y Mattison, 1986; Silver y Chapell, 1988; Nicholson *et al.*, 1994).

Los estudios efectuados en los granitoides de la península de Baja California y Sonora indican variaciones petrológicas que, en general, se manifiestan como cinturones composicionales que de occidente a oriente, pueden incluir desde rocas de composición gabrónica a granítica en Baja California, y que en Sonora pueden llegar a ser alcalinas (Gastil, 1983). En general, los batolitos tienden a estar zonados casi concéntricamente; los núcleos en los cuerpos del occidente (zona de magnetita) son máficos, mientras que en los orientales (zona de ilmenita) son félsicos (Gastil *et al.*, 1975). Trabajos de detalle en plutones con núcleos gabrónicos y dioríticos (Delgado-Argote *et al.*, 1995) muestran que las rocas más máficas son las más antiguas y las de la periferia, principalmente monzoníticas, levantaron y arrancaron mecánicamente de raíz a los plutones de primera generación durante su emplazamiento. Algunos de los plutones más característicos o mejor conocidos se muestran en la Figura 1. En estos complejos, los plutones se consideran cámaras magmáticas

fósiles de volcanes extintos del arco Alisitos (Cretácico). Los complejos plutónicos del área de estudio pertenecen al grupo del occidente, cuyo núcleo tiende a ser máfico, aunque el zonamiento no es siempre evidente.

Los mapas geológicos del INEGI y el mapa de reconocimiento geológico de Gastil *et al.* (1975) se usaron como base para la cartografía regional de este trabajo (Figura 2.a). El área de análisis con imágenes de satélite y la sección El Socorro (definida por la línea de muestreo en puntos) se muestra en el mapa litológico de la Figura 2.a. La línea de muestreo atraviesa por lo menos dos cuerpos composicionalmente distintos en donde Gastil *et al.* (1975) identificaron rocas que varían de gabro a granodiorita en plutones posiblemente zonados.

Recientemente, los trabajos más importantes relacionados con los complejos plutónicos cretácicos de Baja California se han enfocado al estudio de la paleoposición y edad (Böhnell y Delgado-Argote, 2000; Böhnell *et al.*, 2002; Ortega-Rivera, 2003), así como de la geocronología y estructura (Delgado-Argote *et al.*, 1995; Johnson *et al.*, 1999a y b). De los anteriores, sólo el trabajo de Böhnell *et al.* (2002) incluye un análisis regional basado en la interpretación de imágenes de satélite.

Se ha documentado que algunos plutones zonados fueron emplazados diapíricamente, observándose fenómenos de inflamamiento (*ballooning*; Chávez-Cabello, 1998), mientras que otras estructuras plutónicas son el resultado de diapiros producidos por intrusiones múltiples (Delgado-Argote *et al.*, 1995). Otros cuerpos con fracturamiento circular que incluyen diques anulares, cuyas dimensiones son menores, se interpreta que son resultado del emplazamiento de intrusivos asociados con actividad volcánica (Johnson *et al.*, 1999a). En el área de estudio se desconoce el estilo de emplazamiento y las variaciones mineralógicas y litológicas de los cuerpos plutónicos por lo que, a partir del análisis petrográfico de muestras selectas, se analizaron las variaciones mineralógicas regionales en sentido WSW-ENE de la sección El Socorro. Cronológicamente, según los crontornos (líneas que representan una edad resultante de

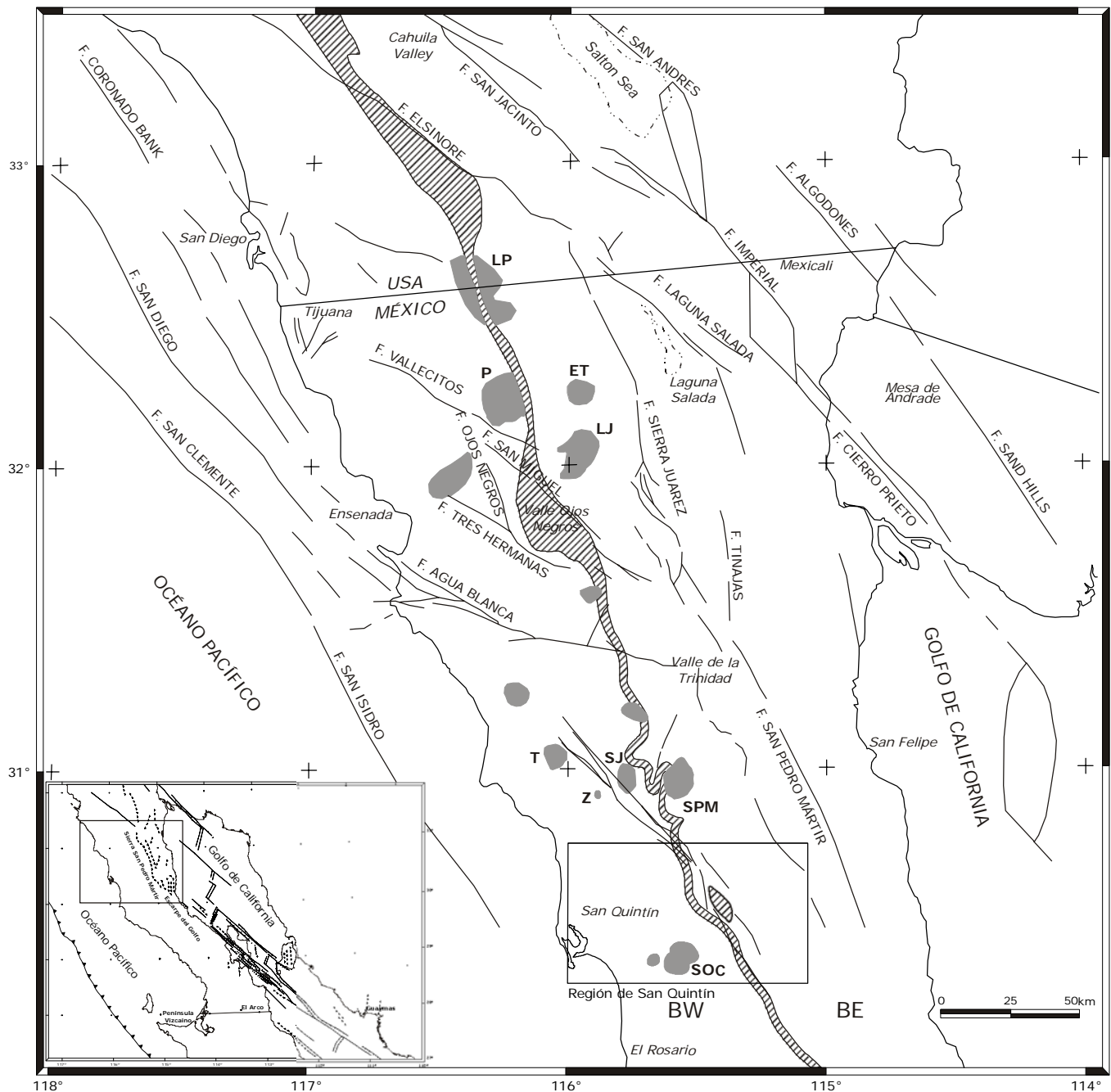


Figura 1. Mapa de localización de la región de San Quintín y de los rasgos geológicos mayores de Baja California (modificado de Böhnel et al., 2002). Las zonas sombreadas son los principales plutones identificados de imágenes satelitales (Romero-Espejel y Delgado-Argote, 1997). El área con líneas en diagonal es la frontera magnetita-ilmenita (Gastil et al., 1990) y el lineamiento semiparalelo a ésta, entre las latitudes de los plutones San Telmo y El Socorro es el Lineamiento Principal (Delgado-Argote et al., 2003). BW y BE corresponden al Batolito Occidental y Batolito Oriental de acuerdo a su posición con respecto a la frontera magnetita-ilmenita. El significado de las abreviaturas de los plutones es: ET = El Topo; LP = La Posta; P = Pinal; LJ = Laguna Juárez; T = San Telmo; SJ = San José; Z = La Zarza; SPM = San Pedro Mártir; SOC = Socorro.

la interpolación de valores geocronológicos de un tipo de mineral utilizando el mismo método) definidos por Ortega-Rivera (2003) indicados en la Figura 3, la zona de estudio se localiza entre los valores de 120 y 110 Ma (edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en hornblenda y biotita).

En este trabajo, a través de la visión sinóptica del terreno con una imagen de satélite, se interpretaron: 1) los lineamientos estructurales rectilíneos con significado o alcance regional y 2) los

curvilineamientos producidos muy probablemente por el emplazamiento de los plutones (Figuras 1 y 3). A través de la cartografía litológica y del fracturamiento, así como de la interpretación de la imagen, se propone una relación temporal entre los grupos de plutones que afloran a lo largo de la sección.

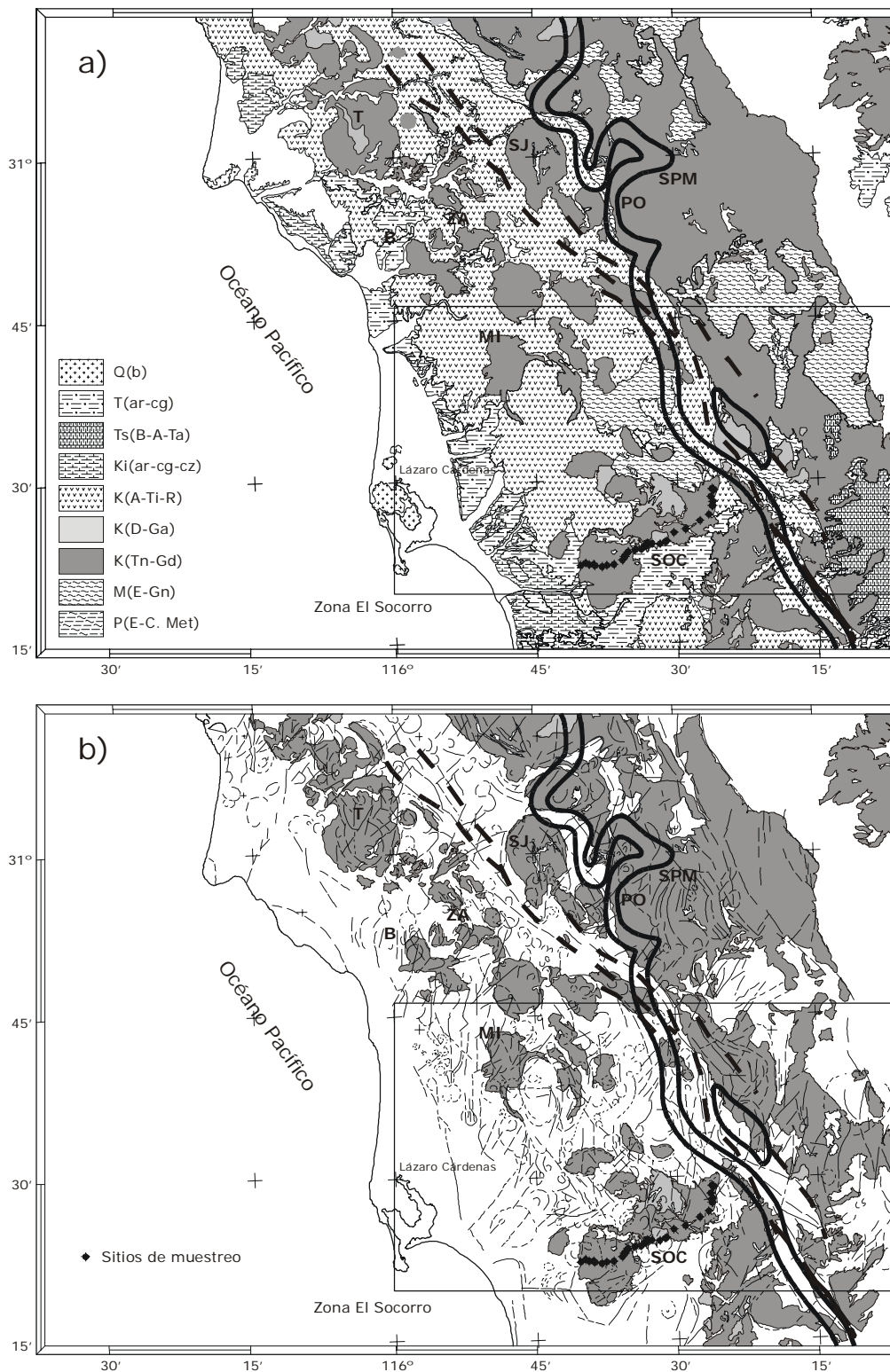


Figura 2. Mapa litológico (a) y de lineamientos interpretados en imagen de satélite (b) entre las latitudes 30° y 31° 30' (modificado de Delgado-Argote et al., 2003). Se indica la ubicación de la frontera magnetita-ilmenita en doble línea continua, el Lineamiento Principal en doble línea discontinua, los principales plutones identificados en esta zona, la región de San Quintín y la sección El Socorro. Los plutones son: B = Aguaje del Burro; MI = El Milagro; PO = El Potrero; SJ = San José; SOC = El Socorro; SPM = San Pedro Mártir; T = San Telmo; Z = La Zarza. La litología es: Paleozoico: P(E-C. Met.) = complejo metamórfico de esquistos. Mesozoico: M(E-Gn) = esquistos y gneiss. Cretácico: K(Tn-Gd) = tonalita-granodiorita; K(D-Ga) = diorita-gabro; K(A-Ti-R) = rocas andesíticas, tobas indiferenciadas y rocas riolíticas del Grupo Alisitos; Ki(ar-cg-cz) = areniscas, conglomerados y calizas del Grupo Alisitos. Terciario: T(B-A-Ta) = basalto-andesita y toba ácida; T(ar-cg) = areniscas y conglomerados. Cuaternario: Q(b) = basalto. Las zonas sin nomenclatura corresponden a depósitos principalmente aluviales del Cuaternario. En la Figura (b) se indica en sombreado la distribución de las rocas plutónicas.



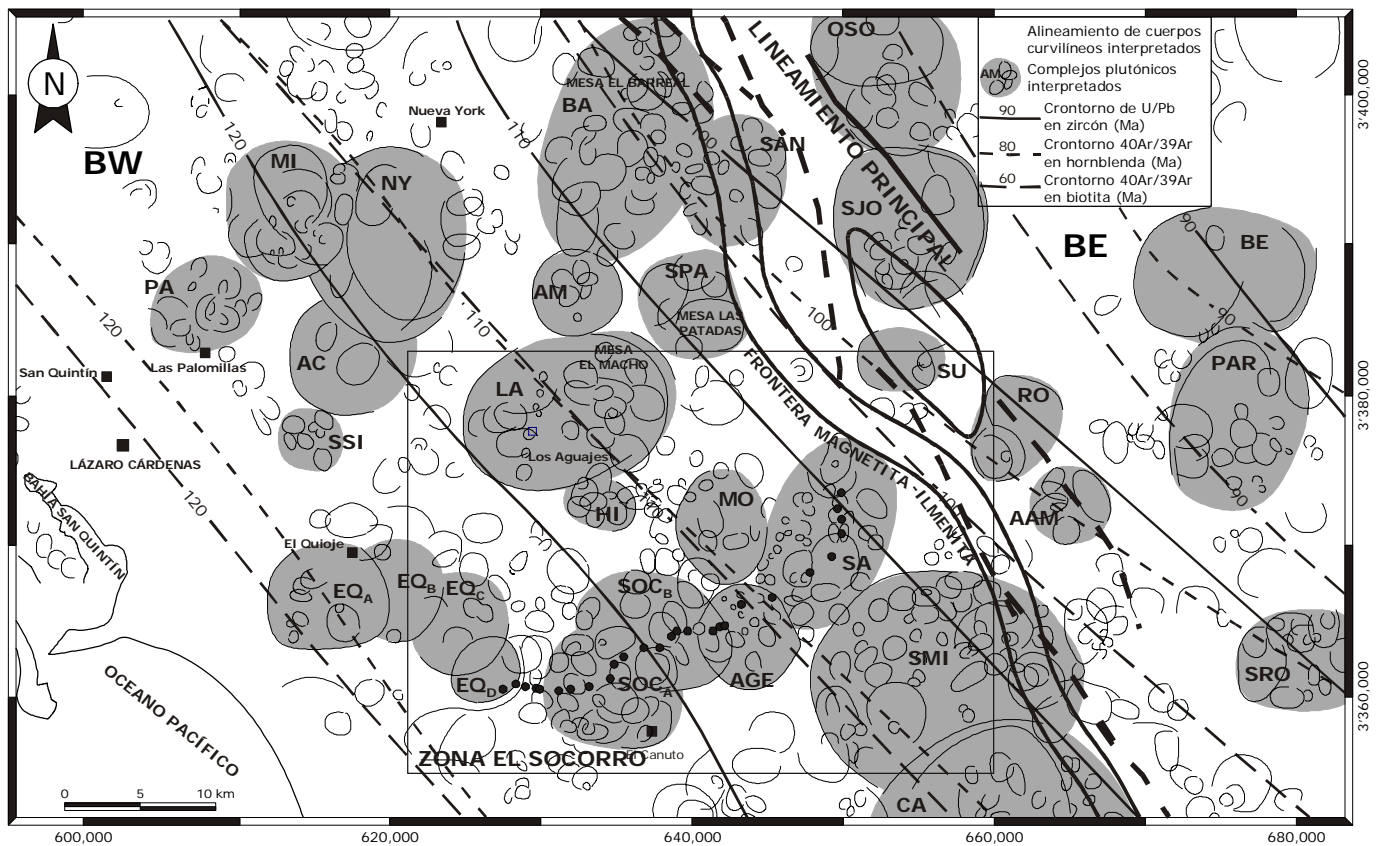


Figura 3. Mapa de plutones y alineamientos de curvilíneos interpretados de la región de San Quintín. Se indica la zona de frontera magnetita-ilmenita y un segmento del Lineamiento Principal de la Fig. 2. Los contornos tomados de (Ortega-Rivera, 2003) en la región se indican en el recuadro superior (ver texto). El recuadro ubicado en el interior de la figura es la región de El Socorro, mostrando con puntos sólidos los sitios de muestreo de la sección El Socorro. Las abreviaturas de las zonas y plutones significan: BE = Batolito Oriental; BW = Batolito Occidental; MI = El Milagro; PA = Las Palomillas; SSI = San Simón; NY = Nueva York; AC = Agua Chiquita; BA = El Barreal; SAN = San Antonio; AM = Agua del Monte; SPA = San Pablo; HI = Las Hilachas; LA = Los Aguajes; EQ<sub>A</sub> = El Quiote A; EQ<sub>B</sub> = El Quiote B; EQ<sub>C</sub> = El Quiote C; EQ<sub>D</sub> = El Quiote D; SOC<sub>A</sub> = El Socorro A; SOC<sub>B</sub> = El Socorro B; AGE = Agua Escondida; SA = El Salto; MO = El Morro; SMI = San Miguel; CA = El Carrizo. BE = Batolito Oriental; SRO = Santa Rosa; AAM = Agua Amarga; RO = El Rosarito; PAR = El Parral; BE = El Berrendo; SU = La Suerte; SJO = San José; OSO = Campo del Oso. La base cartográfica y la toponimia fueron tomadas de la Carta Geológica Lázaro Cárdenas del INEGI (H11-5-6; 1:250,000).

## CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES REGIONALES

En esta sección se analizan los rasgos estructurales de los complejos de plutones del área cercana a la sección El Socorro, desde la perspectiva regional. Consideramos complejo plutónico a aquella asociación de plutones que guarda una geometría con tendencia circular, distinguiéndose de los plutones alineados que, en general, son más pequeños. De esta forma, un complejo puede contener o estar afectado por alineamientos de plutones; las asociaciones en complejos o alineamientos no implican necesariamente que los cuerpos intrusivos estén genéticamente relacionados.

### RASGOS ESTRUCTURALES REGIONALES

De la interpretación estructural de la imagen satelital entre la costa Pacífico y el Escarpe del Golfo (10,000 km<sup>2</sup>), se interpretaron cuerpos plutónicos a partir de lineamientos curvilíneos (Figura 2.b). Se observa que muchos plutones son cuerpos individuales y comúnmente forman complejos plutónicos constituidos por cuerpos de as-

pecto anidado. Se puede observar en las Figuras 2.a y b que los rasgos curvilíneos son característicos de las unidades del arco magmático del Grupo Alisitos del Cretácico y más antiguas, mientras que en las unidades sedimentarias terciarias sólo se reconocen lineamientos rectilíneos, pues los rasgos relacionados con la actividad magmática del arco están cubiertos por las rocas más jóvenes. Esta diferencia en la geometría de los lineamientos nos permite inferir que todos los rasgos curvilíneos tienen correlación con actividad magmática.

Regionalmente, uno de los rasgos más importantes y tectónicamente significativos es el conjunto de lineamientos rectilíneos (que en adelante llamaremos lineamientos) de hasta 25 km de longitud de la parte central del área que, a la latitud de San Pedro Mártir se orienta 340°, mientras que a la latitud de San Quintín se orienta en promedio hacia 320° (Figura 2.b). A estos conjuntos los llamaremos aquí el Lineamiento Principal que, salvo en el occidente de la Sierra San Pedro Mártir, coincide con el Cabalgamiento Principal Mártir (*Main Mártir Thrust*) interpretado por Johnson *et al.* (1999b) como un contacto tectónico entre las unidades cretácicas del Grupo Alisitos y las metamórficas paleozoicas. En esa región, el cabalga-

miento se ubica al oriente del plutón San José, mientras que el Lineamiento Principal se localiza al occidente del mismo y coincide con la zona de contacto entre los dominios sedimentarios y volcánico-volcanoclásticos del Grupo Alisitos. Un rasgo notable del Lineamiento Principal es que no afecta a las rocas plutónicas; sólo atraviesa a las rocas del Grupo Alisitos y parece definir los bordes de algunos plutones, como es el caso del oriente del plutón Potrero y sur del plutón San Pedro Mártir (Figura 2.a y b); otros rasgos estructurales paralelos al Lineamiento Principal tampoco cortan a los plutones. Otra característica importante del Lineamiento Principal es su paralelismo con respecto a la frontera magnetita-ilmenita, sobre todo hacia el sur de la Sierra San Pedro Mártir, lo que le imprime un valor tectónico adicional en esta zona.

Los plutones del oriente de la frontera magnetita-ilmenita son más grandes e intruden a rocas metamórficas, principalmente del Paleozoico, mientras que los intrusivos occidentales están más directamente asociados con las secuencias de rocas volcánicas del Grupo Alisitos. En la zona oriental los lineamientos estructurales y el Escarpe del Golfo tienden a ser paralelos.

## LINEAMIENTOS RECTILÍNEOS

Los lineamientos estructurales individuales o discretos interpretados de la imagen satelital a escala 1:250,000 (Figura 4) varían en longitud de 500 m a aproximadamente 10 km. Para facilitar el análisis de los lineamientos, se dividió la región en zona occidental y oriental a partir del Lineamiento Principal.

En la zona occidental del área El Socorro se observa una concentración máxima orientada aproximadamente N10°E (Figura 4), que contrasta con la tendencia regional hacia el N10°W reportada por Delgado-Argote *et al.* (2003) desde el sur de la Falla Agua Blanca hasta la región de San Quintín (Figura 1); otras concentraciones importantes se encuentran aproximadamente en N25°W y N40°E (Figura 4), similares a las regionales reportadas por los mismos autores. Por su continuidad, destacan dos lineamientos orientados aproximadamente N40°W (Nueva York y Agua del Monte), casi paralelos al Lineamiento Principal y otros dos N70°E (Santo Domingo y El Socorro; Figura 4); el mayor (Nueva York) tiene una longitud cercana a 40 km y los restantes tienen cerca de 25 km. Hacia el oriente, la concentración máxima está en N10°E. Otras concentraciones importantes en la zona occidental se orientan N20°W y N45°E. Los lineamientos orientados hacia el NW en esta región posiblemente

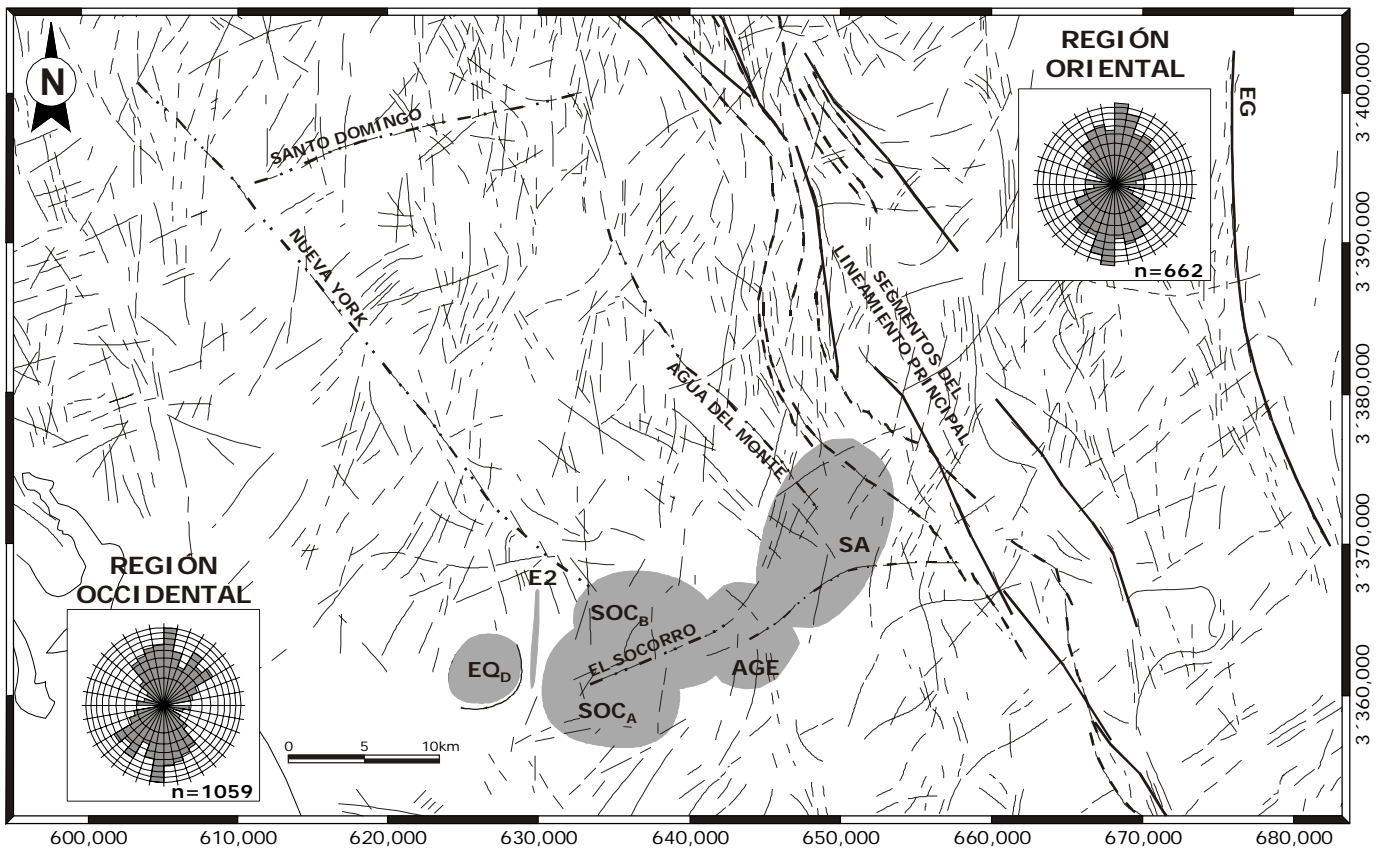


Figura 4. Lineamientos rectilíneos con sus respectivos diagramas de rosa de la región occidental y oriental con respecto al Lineamiento Principal. Además se muestran lineamientos mayores (Santo Domingo, El Socorro, Nueva York y Agua del Monte) interpretados de la imagen satelital de la región de San Quintín. Se incluyen de oeste a este las estructuras plutónicas identificadas en la sección El Socorro (las abreviaturas son como en la figura 3), el Lineamiento Principal (Delgado-Argote et al., 2003) y el Escarpe del Golfo (EG). Para la elaboración de las rosas de orientación de los lineamientos rectilíneos se efectuó un conteo en una retícula de 10 x 10 km para ponderar la longitud de los lineamientos.

te se relacionen con la formación del Escarpe del Golfo (EG; Figura 4), debida a la deformación extensional que dio origen a la provincia *Basin and Range*.

### LINEAMIENTOS CURVILÍNEOS

Se infiere que estas estructuras corresponden a plutones individuales o conjuntos anidados cuyas formas varían de redondeadas a elípticas. También es común encontrar cuerpos curvilíneos alineados (alineaciones) cuya alineación, al igual que los lineamientos estructurales, posiblemente está asociada a estructuras regionales a lo largo de las cuales se emplazaron cuerpos discretos de magma o bien, al movimiento horizontal del magma durante la evolución de complejos volcánico-plutónicos (Marsh, 2000), como los documentados en la costa del Golfo de California (Delgado-Argote y García-Abdeslem, 1999) y otros lugares del mundo (Shaw, 1980). En las siguientes secciones sólo se hará referencia a los lineamientos curvilíneos no alineados.

Se observa en la Figura 3 que los plutones individuales al occidente de la frontera magnetita-ilmenita tienen diámetros que oscilan entre 350 m y poco menos de 7 km, mientras que aquellos que se encuentran en el oriente varían de 600 m a poco menos de 10 km. La superficie de los complejos plutónicos varía de 15 a 140 km<sup>2</sup> en la región occidental y de 20 a 80 km<sup>2</sup> en la región oriental. No se identificaron cuerpos curvilíneos bien definidos dentro de la unidad metasedimentaria del Cretácico, correspondiente a la parte oriental del Grupo Alisitos.

## DESCRIPCIÓN DE LOS COMPLEJOS PLUTÓNICOS

A lo largo de la sección El Socorro aflora una serie de plutones [K(Tn-Gd) y K(D-Ga)] que intrude al Grupo Alisitos [K(A-Ti-R) y K(ar-cg-cz)]; ambos grupos de rocas pueden estar parcialmente cubiertos por conglomerados continentales del Paleoceno [T(ar-cg)], según se muestra en la Figura 2.a. El muestreo de los cuerpos plutónicos termina a 3 km de la frontera magnetita-ilmenita y a 6 km del Lineamiento Principal, los que se separaron de acuerdo con la figuras 3 y 5. A lo largo de la sección se colectaron 28 muestras con las que se realizó un análisis petrográfico detallado (Peña Alonso, 2003) y cuya clasificación modal, de acuerdo con el diagrama QAPF (Streckeisen, 1973), se presenta en la Figura 6. En los mismos sitios de muestreo de roca se midieron fracturas primarias, que se analizan en la segunda parte de esta sección.

### PLUTÓN EL QUIOTE D (EQ<sub>D</sub>)

El Quiote D (EQ<sub>D</sub>) es un plutón simple de 16 km<sup>2</sup> cuyo borde NW está aparentemente cortado por El Quiote C (EQ<sub>C</sub>); es el miembro del extremo SE de una serie de cuatro plutones que aparentemente forman un complejo que se alinea en forma de arco, burdamente orientado E-W (Figura 4). Los tres puntos de muestreo sólo permiten conocer la composición de la periferia del plutón que, según se observa en la Figura 6, muestra una composición que varía de monzonita a cuarzo monzodiorita. Las asociaciones de minerales máficos son: 1. hornblenda (Hbl)-hiperstena (Hy), 2. hornblenda-biotita (Bi) y 3. biotita para las muestras 1 a 3, respectivamente; la oligoclasa es la plagioclasa dominante. La magnetita, identificada por su susceptibilidad magnética alta, es el mineral opaco más abundante y se presenta en cristales entre 0.2 a 0.8 mm de diámetro. Es constante la presencia de hematita y rutilo.

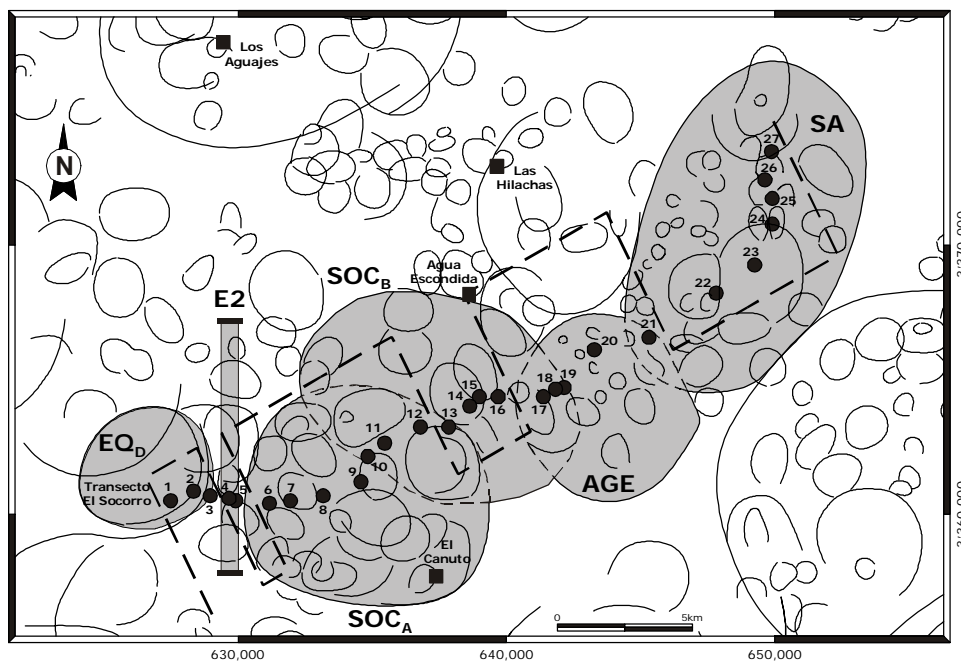


Figura 5. Plutones interpretados en la sección El Socorro. La línea discontinua indica el agrupamiento de los sitios de muestreo para determinar el estilo de fracturamiento de El Quiote D (EQ<sub>D</sub>), E2, El Socorro A (SOC<sub>A</sub>), El Socorro B (SOC<sub>B</sub>), Agua Escondida (AGE) y El Salto (SA). Los números de los puntos sólidos son las muestras que aparecen en el diagrama de la Fig. 6 y los números entre paréntesis corresponden a los plutones indicados en la Fig. 9.



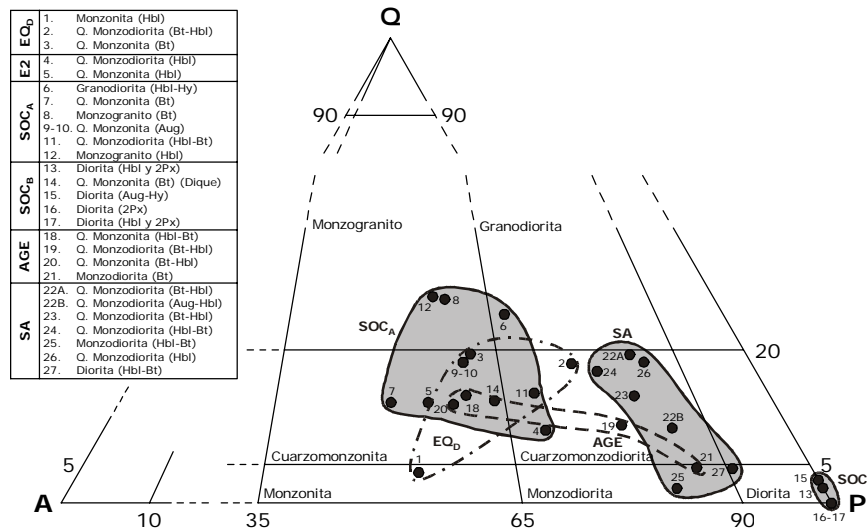


Figura 6. Clasificación modal de 28 muestras del mismo número de sitios a lo largo de la sección El Socorro utilizando el diagrama QAPF (Streckeisen, 1973). Las esquinas del triángulo son: P = plagioclasa, A = feldespato alcalino, Q = cuarzo. Las áreas encierran a las muestras correspondientes a cada cuerpo plutónico y las áreas sombreadas envuelven a las muestras correspondientes a los complejos plutónicos donde hay más de tres sitios de muestreo. Abreviatura de los minerales: Aug = Augita; Hy = Hiperstena; Hbl = Hornblenda; Bt = Biotita. El cálculo de la moda se basó en el conteo de puntos (605) de cinco áreas representativas de la lámina delgada (121 puntos por área).

### ALINEACIÓN E2

E2 es un alineamiento de cinco cuerpos curvilíneos elípticos. Los plutones están yuxtapuestos a lo largo de seis km y el alineamiento está orientado N5°E (Figuras 3, 4 y 5). E2 se localiza entre los complejos de plutones EQ<sub>D</sub> y SOC<sub>A</sub>. La sección W-E corta al conjunto en su extremo sur, de donde se tomaron las muestras 4 y 5, clasificadas como cuarzomonzodiorita y cuarzomonzonita, respectivamente y que por su afinidad con las rocas de SOC<sub>A</sub>, se agruparon con éstas. Las dos muestras analizadas tienen un contenido de óxidos y paragénesis minerales (Hy, Hbl y Bi) similares y su textura es porfídica granular. La proporción de Hbl es mayor en la muestra 4 (9.3%) que en la 5 (0.7%); el ortopiroxeno se encuentra casi en la misma proporción (0.7 a 0.5%); la biotita se mantiene constante. En ambas muestras la mayoría de los minerales opacos (magnetita y hematita) tienen un tamaño constante cercano a los 0.3 mm.

### COMPLEJO PLUTÓNICO EL SOCORRO

Está ubicado al oriente de E2. Para fines de descripción, se dividió en los complejos discretos SOC<sub>A</sub> y SOC<sub>B</sub> (Figuras 3 y 5). Se colectaron 12 muestras, de las que siete son de SOC<sub>A</sub> y las cinco restantes son de SOC<sub>B</sub>. Ambos complejos discretos forman dos conjuntos petrográficamente distintos: SOC<sub>A</sub> varía de monzogranito a cuarzomonzodiorita, predominando la cuarzomonzonita, mientras que cuatro muestras de SOC<sub>B</sub> grafican en el campo de la diorita (Figura 6), indicando zonamiento composicional del complejo. Aunque no puede hacerse una separación clara de los dos complejos a partir de la imagen de satélite, las relaciones de contacto (mezcla de magmas), como se verá adelante, sí indican dos episodios de emplazamiento.

### EL SOCORRO A (SOC<sub>A</sub>)

Este complejo plutónico aflora en un área de aproximadamente 55 km<sup>2</sup>, está formado por 31 cuerpos circulares que varían de 0.5 a 2.7 km de diámetro. Los extremos E y N están parcialmente cubiertos por la unidad de areniscas y conglomerados terciarios (Figura 2.a). La mayoría de las muestras grafican en los campos de la cuarzomonzonita y el monzogranito (Figura 6). Con excepción de los bordes del plutón, en el resto de las muestras domina la textura



Figura 7. Zona de mezcla de magmas (*mingling*) en la zona de contacto entre los plutones El Socorro A (SOC<sub>A</sub>) y El Socorro B (SOC<sub>B</sub>). La porción oscura corresponde a rocas de composición diorítica (SOC<sub>B</sub>), mientras que la roca clara penetrante es de composición monzogranítica (SOC<sub>A</sub>).

xenomórfica de grano medio, mientras que en los bordes la textura es xenomórfica subhedral de grano medio a fino, por lo que se interpreta que en esas zonas las variaciones en las temperaturas de enfriamiento (D<sub>0</sub>T) fueron considerables. En la parte central del plutón (muestras 8, 9 y 10) el contenido de ortopiroxeno es bajo (Opx < 1%), mientras que el de rutilo puede alcanzar hasta el 1.5% (muestra 9);

la Hbl aumenta hacia los bordes y en el occidente la asociación es Hbl>Opx, mientras que en el oriente es Hbl>>clinopiroxeno (Cpx). El porcentaje y tamaño de la magnetita (0.1-0.2 mm) aumenta gradualmente de oeste a este y la hematita se encuentra prácticamente en todo el complejo plutónico. En la parte oriental la cloritización es notable y además se distingue epidota de alteración (hasta 9.0%), que indica saussuritización incipiente.

En los bordes, los afloramientos se caracterizan por tener estructuras de mezcla mecánica de magmas (mingling) entre cuarzomonzonita y granodiorita en el occidente y entre diorita y monzogranito en el oriente (Figura 7); en ambos casos el primer tipo de roca es la más antigua.

### EL SOCORRO B (SOC<sub>B</sub>)

Este es un complejo plutónico de aproximadamente 50 km<sup>2</sup> que anida a 12 cuerpos intrusivos cuyos diámetros varían de 0.6 a 2 km. Le sobreyace el Grupo Alisitos en su borde NW y, al igual que SOC<sub>A</sub>, está cubierto parcialmente por conglomerados indiferenciados del Terciario T(ar-cg) en su porción S-SE. Este plutón está formado principalmente por diorita que, en la parte occidental, está intrudida por el complejo SOC<sub>A</sub>, por lo que se interpreta que es más antiguo. En el punto 14 aflora un dique cuarzomonzonítico de 20 m de espesor al que se asocia la alteración hidrotermal de la roca encajonante diorítica, caracterizada por la presencia de actinolita. Otra evidencia que atestigua la antigüedad de las rocas máficas es la incorporación de fragmentos de la diorita de SOC<sub>B</sub> en una matriz de la cuarzomonzonita de SOC<sub>A</sub> en la zona de mezcla de magmas que se muestra en la Figura 7.

La mineralogía característica en el occidente es plagioclasa (oligoclasa-andesina) y los minerales máficos [Hbl, Cpx (augita) e Hy], que se encuentran aproximadamente en la misma proporción. Puede tener biotita y rutilo y es común la presencia de vetillas en enrejado de actinolita. La porción oriental de SOC<sub>B</sub> (muestras 16 y 17) se diferencia mineralógicamente de la occidental por la presencia de andesina-labradorita, así como de la ausencia de Bi y rutilo. El tamaño de los cristales de magnetita varía de 0.05 a 0.15 mm en el oeste y de 0.1 a 0.6 mm en el este. La hematita es omnipresente en el complejo plutónico.

### AGUA ESCONDIDA (AGE)

Este es un complejo plutónico de 38 km<sup>2</sup> cuya definición geométrica es pobre e incluye varias alineaciones de plutones pequeños, cuyas dimensiones son equivalentes a las de troncos. Se encuentra entre dos complejos distintos, tanto por sus características estructurales, como composicionales. AGE anida 14 cuerpos intrusivos cuyo diámetro varía de 0.3 a 2.3 km. La mitad sur está cubierta por la unidad de areniscas y conglomerados del Terciario y en la mitad norte le sobreyace el Grupo Alisitos (Figura 2). De acuerdo con la interpretación de complejo circular, el borde occidental de AGE y el borde oriental de SOC<sub>B</sub> se intersectan; tres muestras se localizan en la zona de sobreposición y la asignación de las muestras a uno u otro plutón es simplemente por afinidad composicional (Figuras 5 y 6). De este complejo son las muestras 18 a 21, las que varían de cuarzomonzonita a monzodiorita (Figura

6). En la Figura 5 se observa que la muestra 17 podría pertenecer a AGE, sin embargo, debido a su composición diorítica es más probable que esté asociada a SOC<sub>B</sub>. En todo el complejo plutónico la plagioclasa dominante es oligoclasa-andesina, excepto en el borde occidental, donde también cristalizó labradorita. La Hbl y la Bi, que en conjunto pueden alcanzar el 23% del volumen total, son los principales minerales máficos. La Bi aumenta gradualmente conforme disminuye la Hbl en dirección W-E. La magnetita es el único óxido presente. El grado de alteración hidrotermal se incrementa progresivamente conforme se ubican más cerca del complejo plutónico El Salto (SA).

### EL SALTO (SA)

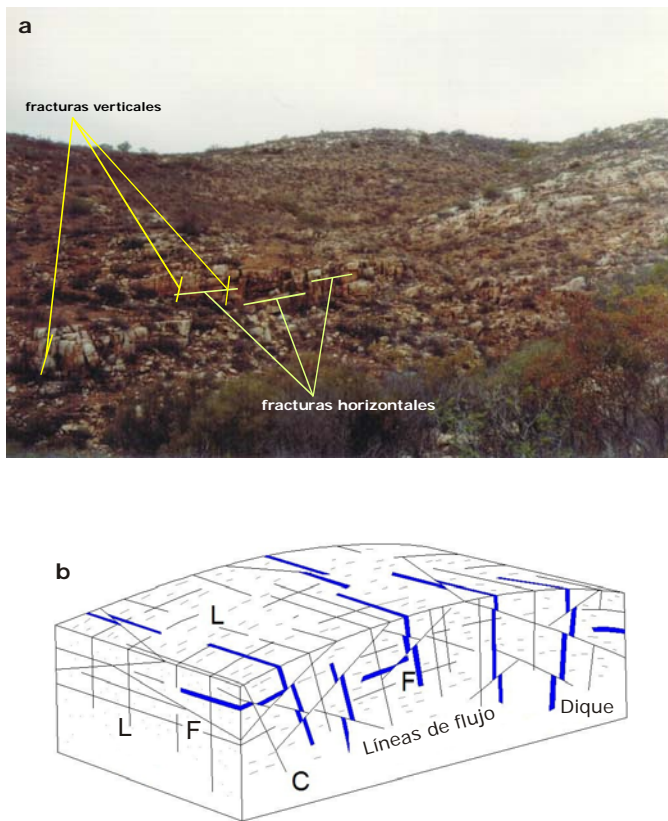
El oriente de este complejo se pone en contacto con la frontera magnetita-ilmenita y se ubica a 3 km del Lineamiento Principal (Figuras 3 y 4). Es un complejo plutónico elíptico de aproximadamente 84 km<sup>2</sup> formado por más de 30 cuerpos intrusivos que varían de 0.3 a 3.7 km de diámetro. Una de las características más importantes del complejo es estar formado por intrusivos alineados que, para fines de descripción, se cree forman un solo cuerpo por tener una composición similar. Cinco de las siete muestras son de cuarzomonzodiorita y las restantes son monzodiorita y diorita (Figura 6); todas contienen Bi y Hbl como principales constituyentes máficos y se observa que en la mitad sur de SA la proporción de la Bi es mayor. También la augita se encuentra en todas las muestras en cantidades que varían entre 1.3 y 0.3%. En los puntos 26 y 27, los más cercanos a la frontera magnetita-ilmenita, se observa mezcla de magmas; la presencia de xenolitos de diorita en todo el complejo plutónico es común. En general, la susceptibilidad magnética es alta y el contenido de magnetita es casi constante. La hematita aparece en asociación con la magnetita, principalmente en la Bi; no se observó rutilo.

## FRACTURAMIENTO DE LOS COMPLEJOS PLUTÓNICOS

A lo largo de la sección W-E de la sección El Socorro se midieron sistemáticamente las fracturas en 26 de los 27 sitios de muestreo. En ninguno de los sitios se observaron evidencias de fallamiento; aquellas fracturas que muestran estrías están relacionadas con el emplazamiento mismo de los plutones y, los desplazamientos observados en rasgos como los de foliación, enclaves u otros, son de algunos centímetros.

De acuerdo con la clasificación de fracturas primarias en plutones de Balk (1937; en Price y Cosgrove, 1991), en la sección se observan longitudinales y cruzadas (verticales) o "acostadas" (horizontales) según se muestran en la Figura 8 a y b. Dentro del grupo de las verticales, se midieron las longitudinales que, de acuerdo con lo observado y con los autores anteriores, son subverticales, comúnmente no alojan diques y, a diferencia de las cruzadas, rara vez se observa cizallamiento en ellas. Se ha propuesto (Price y Cosgrove, 1991) que las fracturas longitudinales se relacionan con la anisotropía básica de los esfuerzos, por lo que reflejan el modo de emplazamiento del intrusivo. En el mismo sentido, los autores anteriores sugieren





**Figura 8. a) Fracturas penetrativas y persistentes, horizontales y verticales, de las rocas graníticas aflorantes en el borde occidental de El Socorro A. b) Clasificación y distribución de fracturas en batolitos de acuerdo con Closs (1922; Modificado de Price y Cosgrove, 1991). Los tipos de fractura son: C = cruzada, L = longitudinal, F = horizontal. En el texto se hace referencia a C y L como verticales.**

que las fracturas horizontales son un reflejo de las variaciones en la presión magmática y resultarían de la inyección de magma bajo un mecanismo de hidrofracturamiento. Las fracturas horizontales, en particular, pueden ser secundarias y, en ese sentido, ser fracturas de exfoliación formadas por extensión. Si este fuera el caso, entonces el efecto de fracturamiento por extensión de la superficie sería similar o igual al producido por el esfuerzo térmico que causa extensión (Turcotte y Schubert, 2002), por lo que las rocas plutónicas experimentarían deformación retrógrada. En ese sentido, actúa sobre los intrusivos un esfuerzo remanente que se refiere a esfuerzos in situ de rocas que están actualmente a poca profundidad o expuestos a la superficie y que sufrieron enfriamiento, levantamiento y exhumación (Price and Cosgrove, 1991). De acuerdo con lo anterior, la orientación de los esfuerzos remanentes se obtiene a partir de la orientación de las fracturas.

La apariencia que guardan las fracturas horizontales se muestra en la Figura 8.a. En muchos lugares son tan persistentes que su aspecto es similar al de las rocas estratificadas. Las fracturas longitudinales, que a partir de ahora se nombrarán verticales, tienden a ser perpendiculares a las horizontales y son igualmente persistentes. Para que la medición de las fracturas en el campo fuera representativa y para evitar la redundancia, se procuró tomar un mínimo de 3 mediciones por sitio con la condición de que la estruc-

tura fuera penetrativa y separada del dato anterior, entendiéndose que un rasgo estructural penetrativo es aquel que puede observarse por decenas de metros y que no es único del afloramiento de muestreo. De acuerdo con lo anterior, cada dato representaría el promedio de más de diez mediciones, por lo que, independientemente de la densidad de las fracturas, las estructuras cuyos rasgos geométricos se repiten sólo se consideraron una vez.

En la Figura 5 se muestran los sectores y los sitios de muestreo para los que se elaboraron los estereogramas de fracturas de la Figura 9. Cada sector representa cada uno de los cinco complejos de plutones y una alineación de pequeños intrusivos (E2) que separa al plutón EQ<sub>D</sub> del SOC<sub>A</sub>. En el sitio de muestreo E2 tiene el aspecto de un dique que composicional y temporalmente puede ser parte de SOC<sub>A</sub> (Figura 6). En las secciones siguientes se discute de oeste a este el significado del fracturamiento vertical y horizontal en cada uno de los seis sectores.

### PLUTÓN EL QUIOTE D (EQ<sub>D</sub>)

En el plutón EQ<sub>D</sub> se midieron seis fracturas verticales y dos horizontales en los sitios 1 y 2. Ambos tipos de fracturas son muy persistentes y representan el fracturamiento dominante en el plutón. El promedio de los polos de los cinco datos concentrados en el cuadrante SW del estereograma está en S81°W/27°, cuyo plano se encuentra en N10°W/63°E (Figuras 5 y 9.1.a). Las fracturas horizontales son muy persistentes y están representadas por un polo por sitio, cuyo promedio se localiza en N46°E/68° que define el plano S44°E/22°SW (Figura 9.1.b). La inclinación de las fracturas horizontales hacia el occidente sugiere que el plutón podría estar basculado en esa dirección por el emplazamiento de los intrusivos más jóvenes localizados en el oriente.

### COMPLEJO PLUTÓNICO EL SOCORRO

EQ<sub>D</sub> está separado del complejo plutónico El Socorro por el alineamiento de intrusivos E2. Para facilitar su descripción, El Socorro se dividió en los complejos discretos El Socorro A (SOC<sub>A</sub>) y El Socorro B (SOC<sub>B</sub>), que aunque estructuralmente son similares (Figuras 9.2 y 9.3), composicionalmente son distintos (Figura 6). Aunque E2 es aparentemente una estructura que corta a SOC<sub>A</sub>, los dos sitios del alineamiento se agruparon con ese complejo pues tanto su composición como la actitud de sus fracturas son similares. Además, se infiere de esa similitud que ambos cuerpos son penecontemporáneos.

### EL SOCORRO A (SOC<sub>A</sub>) Y E2

E2 se muestreó en los sitios 4 y 5 (Figuras 5 y 9.2). Las fracturas verticales son penetrativas, persistentes y perpendiculares entre sí. Las fracturas horizontales contrastan ligeramente con respecto a las de EQ<sub>D</sub> pues están menos inclinadas, lo que sugiere que este cuerpo no ha sido perturbado por el emplazamiento de los plutones vecinos.

El muestreo del complejo plutónico SOC<sub>A</sub> se hizo en los sitios 6 al 12 donde, de acuerdo con la interpretación de lineamientos de la imagen satelital, los tres últimos se localizan en una zona de traslapo

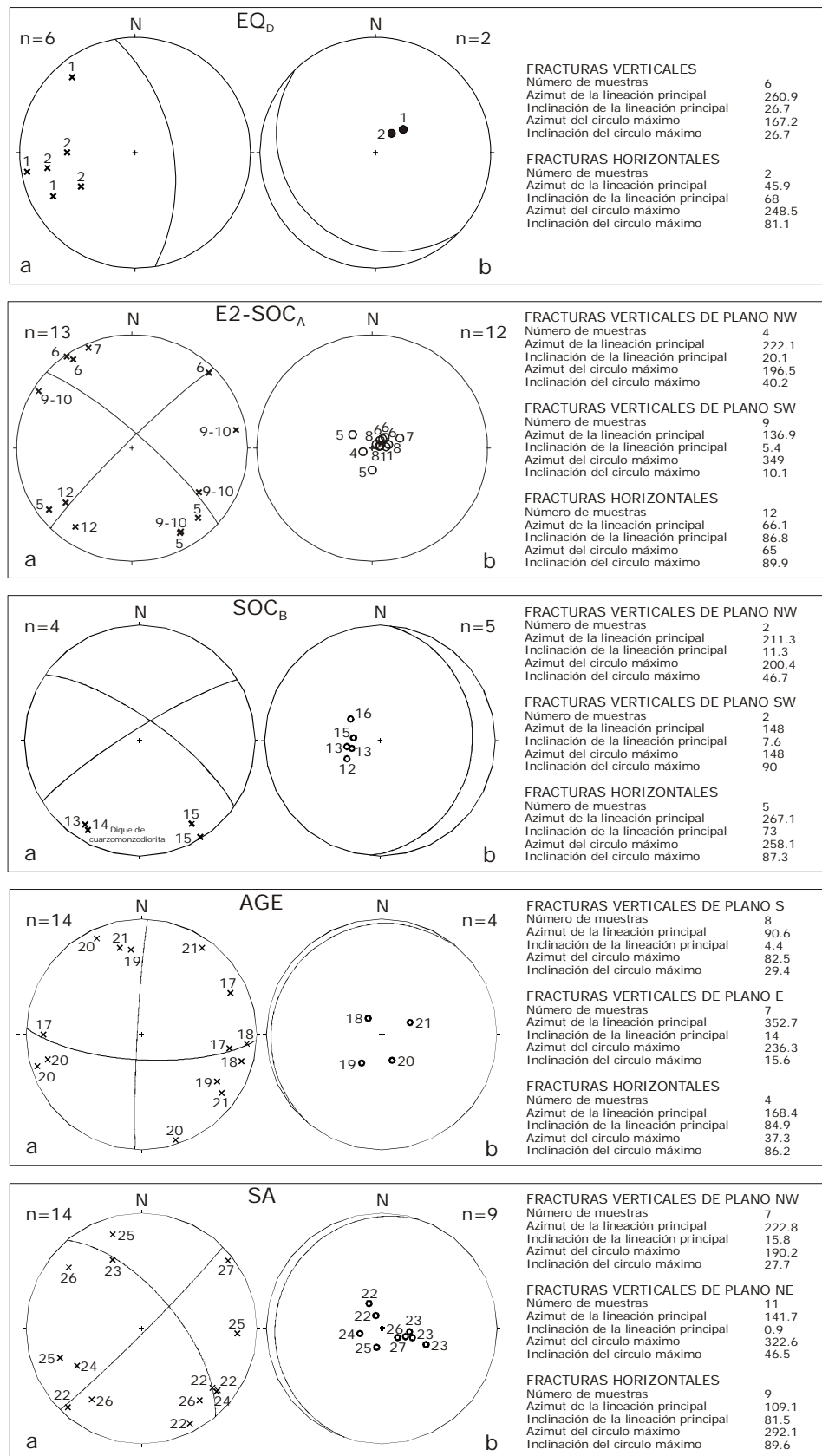


Figura 9. Estereogramas de las fracturas verticales (a) y horizontales (b) según la proyección de Schmidt de El Quiote D (EQ<sub>D</sub>), E2, El Socorro A (SOC<sub>A</sub>), El Socorro B (SOC<sub>B</sub>), Agua Escondida (AGE) y El Salto (SA). Se indica en la base de cada estereograma el azimut e inclinación de la lineación principal y del gran círculo de cada plano. Los números dentro del estereograma representan el número de sitio.

con el complejo El Socorro B ( $SOC_B$ ; Figura 5). Con base en las relaciones de contacto entre los plutones  $SOC_A$  y  $SOC_B$ , discutidas en la sección de descripción petrográfica de los plutones, se interpreta que A es más joven que B, por lo que A le imprime su estilo de fracturamiento a B. En la Figura 7.2a se presentan los polos de las fracturas verticales que muestran un arreglo ortogonal según se resuelve en los planos  $N48^\circ W/80^\circ NE$  y  $S45^\circ W/85^\circ NW$ . Los planos tienden a ser paralelos, tanto a la orientación e inclinación de los planos de las fracturas verticales de la alineación E2, como a la orientación de los lineamientos regionales y de las alineaciones de las estructuras curvilíneas que aparentemente definen a  $SOC_A$  (Figuras 3 y 4). El arreglo ortogonal de fracturas verticales sugiere un aspecto dómico al complejo. Los polos de las fracturas horizontales se concentran notablemente alrededor de  $N63^\circ E/80^\circ$ , cuyo plano se encuentra en  $S25^\circ E/10^\circ W$ .

### EL SOCORRO B ( $SOC_B$ )

Los sitios considerados para el análisis de fracturas de  $SOC_B$  comprenden del 13 al 16, pues los sitios localizados hacia el oriente tienen la huella estructural del plutón Agua Escondida, que se supone que es más joven. Los polos de las fracturas verticales están contenidos en los planos  $S58^\circ W/82^\circ NW$  y  $N59^\circ W/22^\circ NE$ , cuyo arreglo es casi ortogonal (Figura 9.3). Todas las fracturas horizontales buzaban hacia el oriente según el plano  $S3^\circ W/27^\circ E$ , cuyos polos tienen una concentración promedio  $S87^\circ W/73^\circ$ . Las fracturas verticales de  $SOC_B$  tienen orientaciones prácticamente idénticas a las de  $SOC_A$ , en ambos complejos, sus fracturas horizontales se orientan casi N-S. Es notable que todas las fracturas horizontales de  $SOC_A$  buzaban hacia el occidente mientras que las de  $SOC_B$  lo hacen hacia el oriente, lo que le imprime un aspecto de antifirma al conjunto.

### AGUA ESCONDIDA (AGE)

La periferia del complejo plutónico Agua Escondida (AGE) corta a  $SOC_B$  y podría ser contemporáneo al plutón El Salto pues con éste las relaciones de contacto no están bien definidas. En AGE se midieron fracturas entre los sitios 17 y 21. Como se muestra en la Figura 9.4, los polos de las fracturas verticales definen los planos  $S03^\circ W/87^\circ W$  y  $S87^\circ E/72^\circ S$ , ortogonales entre sí. Son más abundantes las fracturas cuya orientación es casi N-S, paralelas a la tendencia de los lineamientos mostrados en la Figura 4, sugiriendo cierto control estructural regional en su emplazamiento. Con respecto a las fracturas horizontales, sus polos se distribuyen alrededor del centro del estereograma, lo que sugiere que no hubo perturbación estructural debida al emplazamiento de los plutones cercanos o por fallamiento posterior. Finalmente, es probable que AGE sea posterior a  $SOC_B$  pues en la zona de traslape (sitios 17 y 18) domina el estilo estructural del primero.

### EL SALTO (SA)

En este complejo plutónico formado por alineaciones de intrusivos de dimensiones variables en diferentes direcciones se midieron fracturas en los sitios 22 al 27 (Figura 5). Al igual que en

$SOC_A$ , los polos de las fracturas verticales de SA definen los planos  $N40^\circ W/65^\circ NE$  y  $N45^\circ E/87^\circ SE$ , que son casi ortogonales y paralelos a la tendencia estructural regional.

Las fracturas horizontales de SA tienen una tendencia similar a la observada en el complejo de AGE pues el plano resultante es  $N19^\circ E/8^\circ NW$ , por lo que se interpreta que está ligeramente basculado hacia el occidente.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De la interpretación regional de las estructuras de una imagen satelital que cubre 5,000 km<sup>2</sup> se interpretó una serie de lineamientos que define un Lineamiento Principal. Este lineamiento está orientado  $N30^\circ W$  y coincide burdamente con la frontera magnetita-ilmenita que separa a los plutones ricos en Fe del occidente de los ricos en Ti del oriente (Gastil *et al.*, 1990). Las estructuras dominantes en la región de San Pedro Mártir se orientan hacia el NW, mientras que las dominantes en la región cercana a San Quintín son casi N-S. En las dos regiones los rasgos orientados  $N40^\circ E$  son muy notables y se considera que se formaron como resultado de un sistema de deformación en cizalla durante el proceso de captura del extremo occidental de Norteamérica por la placa Pacífico (Delgado-Argote *et al.*, 2002). Este proceso de deformación es similar al observado actualmente en el norte de la península, donde son comunes los rasgos de fracturas orientadas hacia el NE (Böhnel *et al.*, 2002) y con alineaciones de epicentros (Frez y Frías-Camacho, 1998). Consistente con las observaciones anteriores, Frez *et al.* (2004), a partir de datos de sismicidad, interpretaron la propagación de fracturamiento en sentido NE-SW, casi perpendicular a las fallas transcurrentes activas del norte de la península. Con base en la geometría de las fracturas y las interpretaciones sismológicas, inferimos que los sistemas de fracturas del área de estudio, ahora inactivos, se formaron durante los periodos iniciales del sistema San Andrés-Golfo de California.

Utilizando como referencia la frontera magnetita-ilmenita se observa, en lo general, que los plutones orientales son más grandes y se emplazaron en rocas paleozoicas, mientras que los occidentales están asociados con rocas del arco cretácico del Grupo Alisitos.

De la interpretación más detallada de la imagen de satélite del sector de El Socorro de 1,100 km<sup>2</sup> al oriente de San Quintín, se identificaron cinco complejos plutónicos, uno de ellos (E2) formado por la alineación de rasgos curvilíneos. El conjunto está litológicamente definido por rocas que varían de diorita a granodiorita, aunque ninguno de ellos muestra zonamiento bien definido, como el que caracteriza a plutones como San Telmo en el norte (Delgado-Argote *et al.*, 1995). Se interpreta que los complejos fueron formados por intrusiones múltiples y los emplazamientos sucesivos se manifiestan como cuerpos anidados complejos, donde el proceso de mezcla de magmas es común, particularmente en ambos bordes del cuerpo  $SOC_A$ .

En el oriente de la región de El Socorro, el Lineamiento Principal y la frontera magnetita-ilmenita son subparalelos y se cruzan al norte de la sección El Socorro (Figura 2.b); la región se caracteriza por el dominio de rasgos estructurales lineales cuyas concentraciones máximas se orientan N10°E, N25°W y N40°E, similares a las regionales. Los lineamientos individuales varían entre 0.5 y 10 km de longitud, pueden estar asociados a la deformación regional o bien, a deformaciones debidas a la evolución de complejos volcánico-plutónicos discretos. El significado tectónico del Lineamiento Principal puede referirse al contacto entre los subterrenos occidental (arco) y oriental (cuenca) del terreno Yuma propuesto por Rangin (1978) y Sedlock *et al.* (1993). Al igual que los autores anteriores, Johnson *et al.* (1999b) infieren que el terreno del oriente está emplazado tectónicamente sobre el occidental en una zona de sutura que coincidiría con este lineamiento.

En los cinco plutones se observa un marcado paralelismo entre las orientaciones promedio de las fracturas verticales primarias con respecto a los lineamientos. Las relaciones de campo indican además que el plutón EQ está separado de SOC<sub>A</sub> por la alineación de plutones E2 orientada N-S. Hacia el oriente, SOC<sub>A</sub> y SOC<sub>B</sub> forman un plutón complejo donde el primero intrude al segundo, según se desprende por las relaciones de mezcla mecánica de magma (mingling) de componentes dioríticos de SOC<sub>B</sub> en cuarzomonzodiorita de SOC<sub>A</sub>, así como por la presencia de diques de SOC<sub>A</sub> cerca del borde occidental de SOC<sub>B</sub>. Además, del análisis estructural se observa que el estilo del fracturamiento vertical de SOC<sub>A</sub> está impreso en el borde de SOC<sub>B</sub>. Composicionalmente, el contacto de SOC<sub>B</sub> con el de AGE es difuso o poco contrastante pero, este último imprime su arreglo de fracturamiento vertical en el borde oriental del complejo SOC<sub>B</sub>. Por su parte, el plutón SA es un complejo plutónico formado por

cuerpos alineados con orientación NNE que, aparentemente, no afectan directamente al plutón AGE; sin embargo, es probable que lo basculen ligeramente hacia el occidente, según se desprende del análisis de fracturas horizontales.

A partir de las relaciones de contacto observadas, de las relaciones temporales propuestas por Ortega-Rivera (2003) y del análisis de las fracturas horizontales, se propone el esquema de la Figura 10. Se asume que las fracturas se asocian a un régimen de extensión al actuar sobre los intrusivos un esfuerzo remanente interpretado como los esfuerzos *in situ* de rocas que sufrieron enfriamiento, levantamiento y exhumación. En esa figura se propone que EQ<sub>b</sub> pudo haber sido levantado por el cuerpo de plutones alineados (E2) y basculado hacia el SW. E2 se presenta como una estructura angosta que posiblemente está asociada a un sistema de fracturas o fallas que separa a los plutones EQ de SOC<sub>A</sub>; este último se considera contemporáneo o más joven pues asimila a una fracción de E2 sin afectar la tendencia horizontal de sus fracturas. También a partir del fracturamiento horizontal se infiere que el complejo plutónico El Socorro (SOC<sub>A</sub> y SOC<sub>B</sub>) forma una estructura antiformal amplia desarrollada por el emplazamiento diapírico de dos cuerpos, donde el de composición diorítica (SOC<sub>B</sub>) es más antiguo y fue intrudido por diques cuarzomonzoníticos de SOC<sub>A</sub>. El arreglo de fracturas horizontales que imprime el aspecto de antiformal al conjunto permite considerar un régimen común de emplazamiento. El borde oriental de SOC<sub>B</sub> contiene diques de la composición de AGE, más joven. Las relaciones de contacto entre AGE y SA no se observan, pero el buzamiento promedio hacia el occidente del fracturamiento horizontal de AGE, permite inferir que este plutón fue basculado por el emplazamiento posterior de SA.

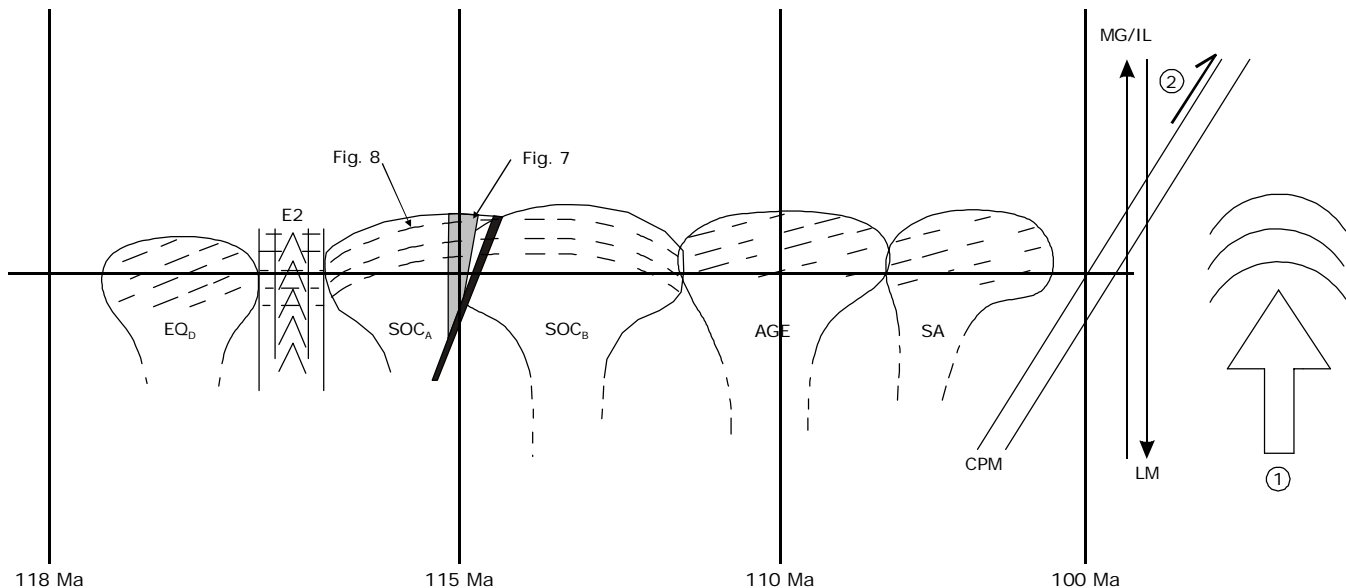


Figura 10. Representación esquemática de las estructuras plutónicas de la sección El Socorro. Entre SOC<sub>A</sub> y SOC<sub>B</sub> la región sombreada representa a la zona de mezcla, o bordera, y la línea gruesa el dique cuarzomonzonítico que intrude en las rocas dioríticas de SOC<sub>B</sub>. Como referencia se muestra los contornos de edades de <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar en biotita (Ortega-Rivera, 2003). Las flechas verticales indicadas como Mg/Il al extremo derecho representan la frontera de magnetita-ilmenita de Gastil *et al.* (1990) y al Lineamiento Principal (LM) de Delgado-Argote *et al.* 2003 (LM). El aparente basculamiento de los plutones hacia el occidente de la sección El Socorro posiblemente se deba al Cabalgamiento Principal Mártir (CPM) interpretado por Johnson *et al.* (1999b) o al emplazamiento más joven de los plutones localizados al oriente de la frontera magnetita-ilmenita/Lineamiento Principal. La escala vertical es mucho mayor que la horizontal.



Las fracturas horizontales de estos dos últimos plutones buzan de forma casi paralela hacia el occidente, por lo que se infiere que fueron levantados y basculados en estado rígido (posterior a la acción de los esfuerzos térmicos que causan extensión) al emplazarse los plutones orientales más jóvenes. Es posible, sin embargo, que el basculamiento haya ocurrido también bajo condiciones más dúctiles durante el emplazamiento de los plutones orientales a lo largo de la zona de deformación del Lineamiento Principal, tal y como ha sido documentado por métodos paleomagnéticos y de fábrica magnética entre los plutones San José y San Pedro Mártir, al norte de El Socorro (Molina-Garza *et al.*, 2003a y 2003b; 2 en Figura 10).

Para tener una estimación de la profundidad de emplazamiento, que es importante para considerar la rigidez del medio, se hizo un estudio de barometría de Al en hornblenda (Hbl) de una cuarzomonzodiorita de Bi-Hbl (muestra 23) del plutón SA. Los cristales de Hbl, de aproximadamente 200 a 400  $\mu$ , están fracturados pero no muestran evidencias de alteración hidrotermal. Para el estudio se utilizaron las paqueterías AMPHCAL de Yavuz (1996) y HBPL 1.2 de Holland y Blundy (1994).

AMPHCAL calcula la fórmula estructural de la Hbl, clasifica los anfíboles y resuelve las presiones utilizando los principales geobarómetros de Hbl de la literatura. La composición de los anfíboles que resulta del análisis corresponde a magnesio-hornblenda, edenita y actinolita, mientras que el promedio de las presiones calculadas de 15 puntos de análisis por microsonda de cinco cristales es de  $1.8 \pm 0.6$  kbar. Las presiones se obtuvieron aplicando el geobarómetro de Schmidt (1992), cuya expresión es  $P = -3.01 + 4.76Al_{tot}$ . La elección de ese geobarómetro, que considera presiones en las zonas de frontera o extremos de los plutones, se basó principalmente en la semejanza entre la asociación mineralógica para la que se desarrolló el método (hornblenda-biotita-plagioclasa-ortoclasa-cuarzo-esfena-óxido Ti-Fe) y la de la muestra seleccionada del plutón SA.

HBPL 1.2 es un geotermobarómetro que complementa, con base en los análisis de la plagioclasa y la Hbl, los resultados de AMPHCAL. En la Figura 11 se muestra la estimación de las presiones "máximas" y temperaturas resultantes al aplicar este método. En los grupos se observa una tendencia similar en la variación de presión de cada uno de los cristales, cuyas presiones medias están ubicadas a los  $4 \pm 0.4$  kbar y  $2 \pm 0.5$  kbar, con temperaturas correspondientes a  $692 \pm 13^\circ\text{C}$  y  $682 \pm 26^\circ\text{C}$ , respectivamente.

Ambos métodos coinciden en la estimación de una presión mínima cercana a 2 kbar que, para la asociación mineralógica de la muestra, la temperatura cercana a  $700^\circ\text{C}$  correspondería a una región cercana al punto eutéctico (Best y Christiansen, 2001). Por ello, se considera que la presión refleja la profundidad de la roca cristalizada cuya densidad sería cercana a  $2.7 \text{ g/cm}^3$  (Best y Christiansen, 2001), que ubica al plutón a una profundidad del orden de 7 km para esa presión, dentro de la zona de deformación frágil. Si la presión fuera de 4 kbar, la profundidad sería aproximadamente del doble, lo que definiría un ambiente de emplazamiento en la frontera entre dúctil y frágil de la corteza, que es la región en donde el movimiento lateral de magma es más acentuado (Shaw, 1980).

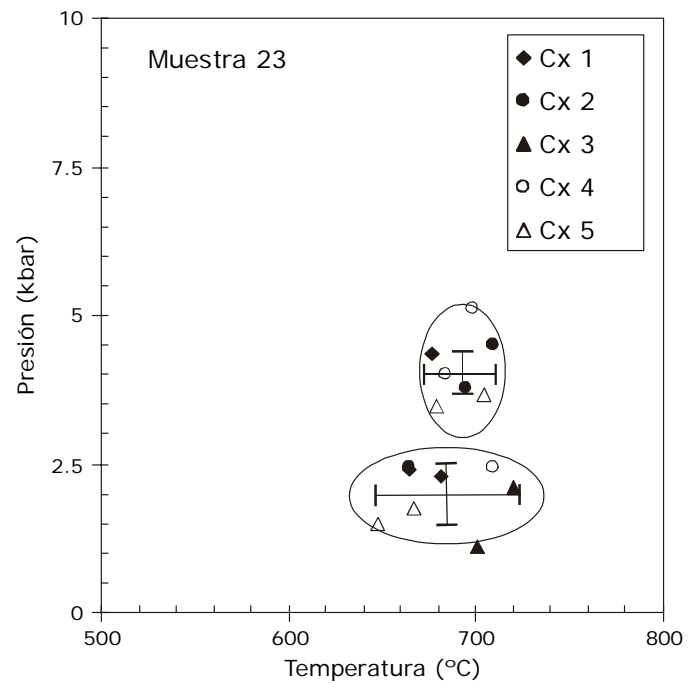


Figura 11. Gráfica P-T acerca de la variación de las presiones máximas en cinco cristales (Cx) de la muestra 23 de El Salto, obtenidas mediante la paquetería HBPL 1.2 (Holland y Blundy, 1994). Los puntos indican la intersección entre las rectas resultantes de los dos modelos termodinámicos (TA y TB) propuestos por Holland y Blundy (1994), en los que se cumple que  $TA > TB$ , donde TA es el termómetro Edenita-Tremolita para asociaciones con cuarzo y TB es el termómetro Edenita-Richterita para asociaciones con o sin cuarzo. Las barras indican los valores promedio y desviación estándar de las presiones y las temperaturas de los grupos.

Las presiones de los cuerpos más orientales se localizarían dentro de la región de deformación frágil, donde el magma avanza a través de un medio fracturado, por lo que la presencia de diques y troncos, así como otras estructuras subvolcánicas, son más comunes. Si suponemos que la composición de los plutones tuvo un equivalente volcánico en el arco magmático, entonces los productos volcánicos asociados a cada uno de estos complejos plutónicos serían de andesita basáltica ( $SOC_B$ ) hasta riolita ( $SOC_A$ ), posiblemente relacionados con estratovolcanes en el caso de  $SOC_B$ , o con una caldera o volcanes compuestos en el caso de  $SOC_A$ . Con respecto a AGE, los productos volcánicos serían de cuarzolita y, con SA, de andesita rica en cuarzo, posiblemente asociados con sistemas caldéricos. La actividad volcánica del complejo El Socorro podría tener manifestaciones efusivas y explosivas, lo que promovería relaciones de contacto complejas al interior de la o las cámaras magmáticas, según se deduce de la mezcla de magmas, la presencia de diques félsicos en el contacto  $SOC_A$ - $SOC_B$  y la intensidad de actividad hidrotermal de alta temperatura manifestada por las vetillas de actinolita con arreglo en enrejado. Por su lado, los plutones AGE y SA, por su composición más félsica, podrían asociarse a manifestaciones volcánicas más explosivas, correspondientes a niveles de emplazamiento más someros.



Finalmente, se puede considerar que las manifestaciones plutónicas en la sección El Socorro muestran un ambiente de actividad magmática continua caracterizado por relaciones cortantes entre plutones que pueden tener equivalentes volcánicos, cuyas cámaras magmáticas, corresponden a profundidades máximas localizadas en y arriba de la frontera dúctil-frágil. Las variaciones mineralógicas indican procesos de diferenciación magmática por cristalización fraccionada y mezcla de magmas por efectos mecánicos, posiblemente relacionados con la actividad volcánica dominante. Aunque los cratónos ofrecen una buena referencia temporal regional, éstos no tienen la resolución suficiente para resolver las relaciones de contacto a la escala de trabajo de este estudio. Se espera que el muestreo con fines paleomagnéticos y geocronológicos efectuado durante el trabajo de campo resuelva en el futuro la relación temporal de los emplazamientos individuales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por CONACYT (33-100T) y el CICESE (proyecto 6941). Agradecemos las discusiones en el campo con Bodo Weber y sus estudiantes, la colaboración de Luis Gradilla en el microscopio electrónico del CICESE y de Víctor Frías en la edición del material gráfico. Los arbitrajes de Jaime Roldán y Jorge Aranda ayudaron enormemente a mejorar este trabajo.

## REFERENCIAS

- Best, M.G. and Christiansen, E.H., 2001. *Igneous Petrology*, Blackwell Science, Inc., 458 pp.
- Böhnell, H. and Delgado-Argote, L.A., 2000. Paleomagnetic data from northern Baja California (México): Preliminary results from the Cretaceous San Telmo Batholith. *En: H. Delgado, G. Aguirre and J. Stock, editors, Cenozoic Tectonics and Volcanism of México*, Geological Society of America Special Paper 334, p. 157-165.
- Böhnell, H., Delgado-Argote, L.A., and Kimbrough, D., 2002. Discordant paleomagnetic data for middle-Cretaceous intrusive rocks from northern Baja California: latitude displacement, tilt, or vertical axis rotation? *Tectonics*, vol. 21, no. 5, p. 1049-1062.
- Chávez Cabello, G., 1998. Mecanismos de ascenso, emplazamiento y evolución magmática de varios plutones al oeste de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California, México. Tesis de Maestría, División de Ciencias de la Tierra, CICESE, 165 pp.
- Delgado-Argote, L.A. and García-Abdeslem, J., 1999. Shallow Miocene basaltic magma reservoirs in the Bahía de los Angeles Basin, Baja California, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 88-1, p. 29-46.
- Delgado-Argote, L., López-Martínez, M., Pérez-Flores, M., and Fernández-Tomé, R., 1995. Emplacement of the nucleus of the San Telmo Pluton, Baja California, from geochronologic, fracture, and magnetic data, *Geological Society of America, Special Paper 301*, p. 191-204.
- Delgado-Argote, L.A., Frías-Camacho, V.M. e Hinojosa-Corona, A., 2002. Reconocimiento estructural de plutones localizados entre la costa Pacífico y San Pedro Mártir, Baja California. *GEOS*, vol. 22-2, p. 170-171.
- Delgado-Argote, L., Böhnell, H., Molina-Garza, R., and Ortega-Rivera, A., 2003. Structural survey in plutons from the pacific coast to the Sierra San Pedro Mártir, Central Baja California: 2003, *Geological Society of America, Abstracts with Programs, Cordilleran Section*, vol. 35, no. 4, p. 73.
- Frez, J., Nava, E.A., and Acosta, J., 2004. Source rupture plane determination from doppler effect for small earthquakes recorded by local networks. *Geophysical Research Letters* (en prensa).
- Frez C., J. y Frías-Camacho, V.M., 1998. Mapas anuales de sismicidad para la región fronteriza de ambas californias. *GEOS*, vol.18-2, p. 112-130.
- Gastil, R. G., 1983. Mesozoic and Cenozoic granitic rocks of Southern California and Western Mexico. *En: J.A. Roddick, editor, Circumpacific plutonic terranes*, Geological Society of America, Memoir 159, p. 265-275.
- Gastil, R. G., Phillips, R.P., and Allison, E.C., 1975. Reconnaissance geology of the State of Baja California, *Geological Society of America Memoir* 140, 170 pp.
- Gastil, R., Diamond, J., and Knaack, C., 1986. The magnetite ilmenite line in peninsular California, *Geological Society of America, Abstracts with Programs* 18, 109.
- Gastil, R. G., Diamond, J., Knaack, C., Wallawender, M., Marshall, M., Boyles, C., Chadwick, B., and Erskine, B., 1990. The problem of the magnetite/ilmenite boundary in southern and Baja California. *En: Anderson, J.L., ed., The Nature and Origin of Cordilleran Magmatism*, Geological Society of America Memoir 174, p. 19-32.
- Holland, T. and Blundy, J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 116, p. 433-447.
- Johnson, S. E, Paterson, S. R. and Tate, M. C., 1999a. Structure and emplacement history of a multiple-center, cone-sheet-bearing ring complex: The Zarza Intrusive Complex, Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 111-4, p. 607-619.
- Johnson, S. E., Tate, M. C. and Fanning, C. M., 1999b. New geologic mapping and SHRIMP U-Pb zircon data in the Peninsular Ranges batholith, Baja California, *Geology*, vol.27, no. 8, p. 743-746.
- Marsh, B.D., 2000. Magma chambers. *En: Encyclopedia of Volcanoes*, H. Sigurdsson (editor), Academic Press, p. 191-206.
- Molina-Garza, R., Böhnell, H., Chávez-Cabello, G., Ortega-Rivera, A., and Delgado-Argote, L. A., 2003a. A Paleomagnetic Transect of the Peninsular Ranges Batholith near the 31<sup>st</sup> parallel, Part II, 99<sup>th</sup> Annual Meeting Cordilleran Section, 2003 Abstracts with Programs, vol. 35, Number 4, p. 74.
- Molina-Garza, R., Böhnell, H. y Delgado-Argote, L. A., 2003b. Paleomagnetismo y fábrica magnética en los plutones de la Sierra San Pedro Mártir, Baja California: implicaciones tectónicas y modelos de emplazamiento. *GEOS*, vol. 23-2, p. 97-98.

- Nicholson, C., Sorlien, C. C., Atwater, T., Crowell, J. C., and Luyendyk, B. P., 1994. Microplate capture, rotation of the Western Transverse Ranges and initiation of the San Andreas transform as a low-angle fault system, *Geology*, vol. 22, 491-495.
- Ortega-Rivera, A., 2003. Geochronological constraints on the tectonic history of the Peninsular Ranges Batholith of Alta and Baja California: tectonic implications for western Mexico. *En* Johnson, S.E., Paterson, S.R., Fletcher, J.M., Girty, G.H., Kimbrough, D.L., and Martín-Barajas, A., eds., *Tectonic evolution of northwestern México and the southwestern USA: Boulder, Colorado Geological Society of America Special Paper 374*, p. 297-335.
- Peña Alonso, T.A., 2003. Características petrográficas y de fracturamiento de los plutones localizados entre San Quintín y sur de San Pedro Mártir, transecto El Socorro, Baja California, Departamento de Ciencias de la Tierra, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, 2003, 100 pp.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1991. *Analysis of geological structures*, Cambridge University Press, Cambridge, G.B., 502 pp.
- Rangin, C., 1978. Evidence for superimposed subduction and collision processes during Jurassic-Cretaceous time along Baja California continental borderland. *En*: Abbott P. L. and Gastil R. G., (editors), 1979, *Baja California Geology Field Guides and Papers*, Department of Geological Science, San Diego State University, San Diego, California, p. 37-51.
- Romero-Espejel, J.G.H. y Delgado-Argote, L.A., 1997. Granitoides en el noreste de Sierra Juárez, Baja California: Una historia de emplazamiento para la parte norte del Batolito Oriental del Cretácico Tardío, *GEOS*, vol. 17-3, p. 139-154.
- Ross, D. C., 1984. Possible correlations of basement rocks across the San Andreas, San Gregorio-Hosgri and Rinconada-Reliz-King City Faults, California, U. S. Geological Survey, Professional Paper, 37 pp.
- Schmidt, M., 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 110, p. 304-310.
- Sedlock, R.L., Ortega-Gutiérrez, F., and Speed, R.C., 1993. Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico, *Geological Society of America Special Paper 278*, Boulder Colorado, 153 pp.
- Shaw, H. R., 1980. The fracture mechanisms of magma transport from the mantle to the surface. *En*: R.B. Hargraves, editor, *Physics of Magmatic Processes*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, p. 201-264.
- Silver, L. T., 1982. Evidence and a model for west-directed early to mid-Cenozoic basement overthrusting in southern California, *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, vol. 14, p. 617.
- Silver, L. T., and Chapell, B. W., 1988. The Peninsular Ranges Batholith: an insight into the evolution of the cordilleran batholiths of southwestern North America, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, vol. 79, p. 105-121.
- Silver, L. T., and Mattinson, J. M., 1986. Orphan Salinia, has a home, *EOS Transactions*, vol. 67, p. 1215.
- Silver, L. T., Taylor, H. P., and Chapell, B., 1979. Some petrological, geochemical and geochronological observations of the Peninsular Ranges batholith near the international border of the U.S.A. and Mexico. *En*: P. L. Abbott, and V. R. Todd, editors, *Geological Society of America, Guidebook 1979*, p. 83-110.
- Streckeisen, A. L., 1973. Plutonic rocks—Classification and nomenclature, *Geotimes*, vol. 18, p. 26-30.
- Turcotte, D.L. and Schubert, G., 2002. *Geodynamics. Second Edition*, Cambridge University Press, 456 pp.
- Yavuz, F. (1996) AMPHCAL: quickbasic program for determining the amphibole name from electron microprobe analysis using the IMA rules. *Computer & Geosciences*, vol. 22-2, p. 101-107.

Recepción del manuscrito: 15 marzo, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 15 de septiembre, 2004

Aceptación del manuscrito: 1 de octubre, 2004

## EL CONOCIMIENTO DE LA TIERRA A TRAVÉS DEL IMPACTO TECNOLÓGICO EN LA SISMOLOGÍA

Juan Martín Gómez-González<sup>1</sup>, Harald Böhnel<sup>1</sup>, Luis A. Delgado-Argote<sup>2</sup>, Arturo Gómez-Tuena<sup>1</sup>, Marco Guzmán-Speziale<sup>1</sup>,  
Román Pérez-Enriquez<sup>1</sup> y Birgit Steinich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Geociencias, UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro

Correo electrónico: gomez@geociencias.unam.mx

<sup>2</sup> Depto. de Geología, CICESE

### RESUMEN

Dentro de las diferentes disciplinas que constituyen la investigación geofísica, la sismología es una de las que ha tenido mayores avances en los últimos 100 años. Varios de estos avances se deben en buena medida al desarrollo tecnológico, instrumental y computacional que ha permitido desarrollar el conocimiento en múltiples áreas de las geociencias. La materia prima de la sismología son los datos registrados por los sismógrafos. El valor de estos instrumentos es comparable al de las máquinas de rayos X en la medicina o al del telescopio en la astronomía. Sin ellos, simplemente no habría sido posible conocer la composición física e inferir la química del interior del planeta que habitamos. En este texto mencionamos algunos de los aportes de la sismología impulsados por el desarrollo tecnológico. El impacto que han tenido los sismógrafos en el avance del conocimiento, en el siglo XX, consolidó a la sismología como una ciencia de vanguardia, la cual hizo visible el anteriormente inexpugnable interior de la Tierra.

**Palabras clave:** Sismología, tecnología, sismógrafos.

### ABSTRACT

Among the various disciplines constituting geophysical research, seismology is one of those that have had major advances in the last 100 years. Many of its contributions are due, in good measure, to technological, instrumental, and computational advances, which have permitted development of knowledge in several areas of the Earth sciences. The raw materials of seismology are the data recorded by seismographs. The value of these instruments is comparable to that of X-Rays in medicine or that of the telescope in astronomy. Without them, it would have been simply impossible to know the physical, and even chemical, composition of the planet we live in. In the present text, we mention some of the contributions of seismology spurred by technological developments. The impact that seismographs have had in the advance of knowledge in the 20th century has consolidated seismology as a vanguard science, which has made visible the formerly inexpugnable interior of the Earth.

**Keywords:** Seismology, technology, seismographs.

### INTRODUCCIÓN

El fuerte impacto de la sismología al conocimiento de la Tierra se debe a que cada uno de sus descubrimientos está ligado a los saltos en la tecnología. El fenómeno geológico fundamental son los terremotos; cuando ocurren se generan ondas sísmicas que atraviesan el interior de la tierra y al llegar a la superficie son registradas por una gran cantidad de sismógrafos. El trayecto que siguen las ondas es un importante elemento de análisis, ya que ayuda a conocer, entre otras cosas, las propiedades físicas de los materiales que atraviesan y a describir el proceso de ruptura y evolución del sismo.

Desde que fue posible determinar la estructura interna de la tierra aumentó el interés por conocer más sobre su composición y sus características físicas. Los conceptos han evolucionado paralelamente con los instrumentos; en general el desarrollo de la tecno-

logía ha favorecido que los métodos indirectos sean las herramientas más robustas para estudiar el interior del planeta. El objetivo central de la sismología es escudriñar dicho interior con el mayor detalle posible y conocer mejor la dinámica terrestre. Gracias a que la parte sólida del planeta es en cierto modo transparente a las ondas sísmicas, la medición de tiempos de viaje, refracciones, reflexiones y oscilaciones de las ondas sísmicas ha revelado más información acerca de su estructura interna que ninguna otra propiedad física (Doyle, 1995).

La mayoría de los avances ocurridos en los últimos 20 años descansa en buena medida en la instalación de redes instrumentales y de comunicación cada vez más densas, tanto regionales como globales. Varios de los aspectos más relevantes en la evolución de la sismología están ligados al desarrollo tecnológico, mientras que otros avances resultan de la conjunción de aportes previos; por ello, en algunos casos destacamos el momento en que dicha conjunción

tuvo más trascendencia (ver Tabla 1). En la época más reciente muchas contribuciones carecen de apellido; son tantos los investigadores que han contribuido, directa o indirectamente, en el desarrollo de determinado tema que es difícil asignar determinado avance a una sola persona, al igual que precisar el momento específico en el que éste ocurrió. Un ejemplo de ello es la tomografía sísmica, en la que convergen conocimientos previos como el de los tiempos de trayecto, el conocimiento de la estructura de la tierra, los sismogramas sintéticos y los métodos de inversión. En este ejercicio señalamos algunos de los avances de la sismología guiados por una importante evolución tecnológica (Tabla 1).

## PRIMERAS INQUIITUDES, PRIMEROS APORTES

El primer instrumento para detectar el movimiento del suelo, provocado por un sismo, fue el sismoscopio. Este instrumento medía el azimut del terremoto, pero carecía de la posibilidad de registrar el tiempo. El sismoscopio fue inventado por el filósofo chino Chang Heng aproximadamente en el año 132 D.C. Parecía una jarra de vino de casi 2 m de diámetro (Figura 2) y tenía ocho cabezas de dragón en su superficie exterior orientadas hacia los principales puntos cardinales. Cuando ocurría un sismo, un dispositivo pendular en el interior del sismoscopio empujaba una pelota colocada en la boca de cada dragón y la hacía caer en dirección en que ocurría el movimiento (Dewey and Byerly, 1969). Desde entonces la evolución de los sismógrafos ha sido constante y su máxima sofisticación ocurrió en el siglo XX.

Tabla 1. Algunos de los momentos históricos más importantes en el desarrollo de la sismología.

1828	Poisson	Primero en mostrar que hay 2 tipos de ondas internas (P y S).
1887	Rayleigh	Predice la existencia de ondas superficiales
1889	Paschwitz	Descubre las ondas telesísmicas.
1899	Oldham	Verifica la existencia de ondas P, S y superficiales de Rayleigh
1900	Wiechert	Construcción del sismógrafo de Wiechert.
1906	Oldham	Verifica sismológicamente la hipótesis de un núcleo de hierro terrestre.
1906	Reid	Teoría del rebote elástico.
1909	Mohorovičić	La corteza terrestre esta limitada por una discontinuidad aguda, posteriormente llamada discontinuidad de Mohorovičić.
1911	Love	Ondas superficiales del tipo Love.
1913	Gutenberg	Determina la profundidad del núcleo exterior a 2900 km.
1922	Turner	Propone la existencia de sismos profundos
1928	Wadati	Comprueba la existencia de sismos profundos.
1930s	Jeffreys y Bullen	Determinan las primeras tablas de tiempo de viaje-trayecto de la tierra
1935	Benioff	Construye el sismógrafo de "deformación".
1935	Richter	Escala de magnitud.
1936	Lehmann	Descubrimiento del núcleo interno.
1952	Benioff	Determinación de las oscilaciones propias de la tierra.
1960	USA	Establecimiento de la red mundial WWSSN (sismógrafos Benioff).
1960		Cálculo detallado y modelado de la dispersión de ondas superficiales (mejora en el conocimiento de la corteza y el manto).
1950-1960		Cálculo y modelado de sismogramas sintéticos
1980		Modelado 3D de la estructura profunda de la tierra mediante modelado tomográfico.
1986	USA	Sustitución de la red WWSSN por la GDSN de instrumentos digitales.

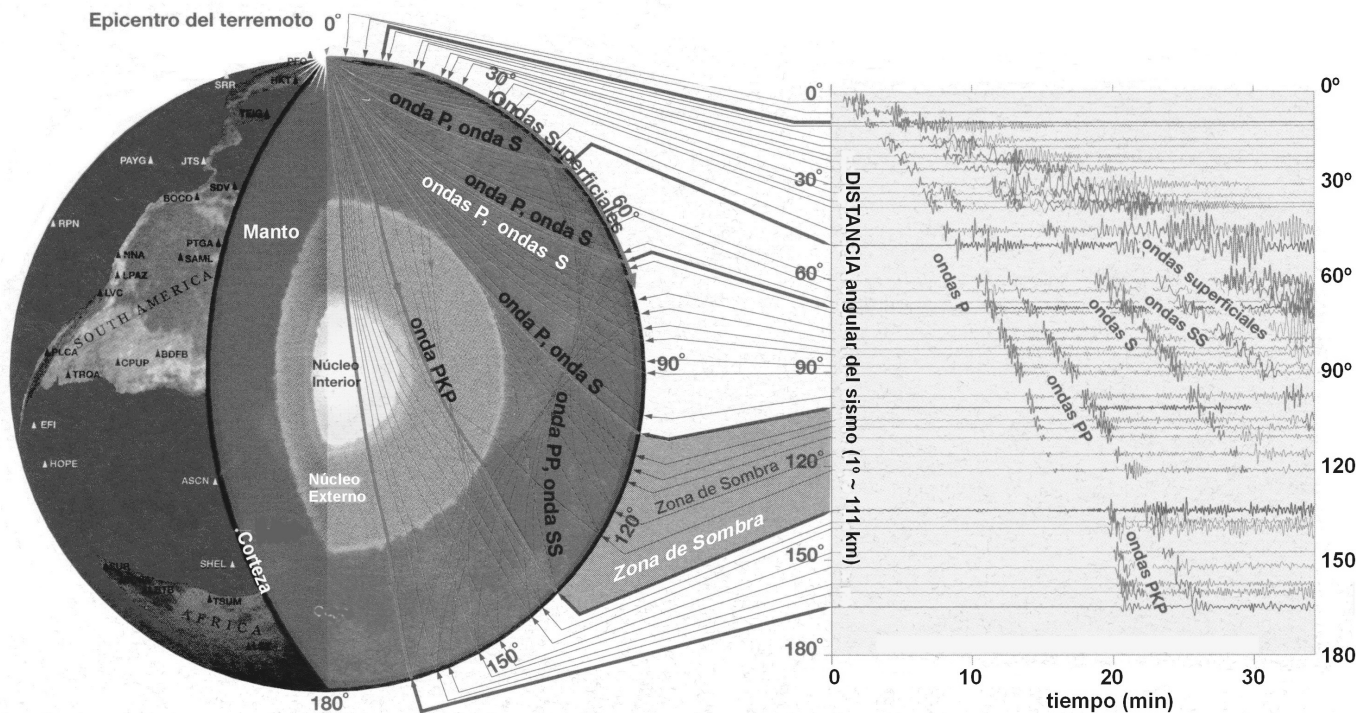


Figura 1. Modelo de la estructura interna de la Tierra definido por el estudio de la propagación de ondas sísmicas. El registro de la energía sobre la superficie de la tierra permite construir las tablas tiempo-trayecto de las cuales se ha inferido el modelo mostrado (Modificado de IRIS, <http://www.iris.edu/about/publications.htm>).





Figura 2. Primer "sismógrafo" inventado por el filósofo chino Chang Heng aproximadamente en el año 132 D.C. Este sismoscopia no tiene ningún control del tiempo de registro. Al ocurrir un sismo las pelotas sostenidas por dragones caían en la dirección del movimiento (fotografía de Science Museum/Science & Society Picture Library; <http://www.nmsi.ac.uk>).

En 1889, Paschwitz descubre un fenómeno que cambiaría el destino de los sismógrafos. Hasta esa época sólo eran utilizados para registrar el movimiento del terreno sin atender las causas ni la ubicación del fenómeno que lo producía. Paschwitz realizaba mediciones de inclinometría, utilizando un péndulo horizontal de Zollner, para estudiar las mareas terrestres. Este científico alemán observó en sus registros una señal muy peculiar, una perturbación que coincidía con un sismo ocurrido el 18 de abril de 1889 del otro lado del mundo, en Tokio. Con ello se determinó que las ondas sísmicas pueden viajar grandes distancias a través del interior de la tierra. Este descubrimiento tendría un gran impacto en el desarrollo posterior de la sismología (Kanamori, 1986) y motivó a los investigadores a usar las ondas sísmicas para explorar el interior de la tierra (Tabla 1).

Otro aporte de gran trascendencia fue el descubrimiento de la discontinuidad de Mohorovicic, que marca el límite entre la corteza y el manto. En 1910, Mohorovicic encontró una discontinuidad distinta en la pendiente de las curvas de tiempo-trayecto obtenidas de un sismo ocurrido en los Balcanes el 8 de octubre de 1909, así como de otros eventos sísmicos similares. A partir de ese momento el uso de los sismógrafos adquiría un objetivo más definido: utilizar la propagación de las ondas sísmicas a través de la tierra para conocer su estructura interna. Mohorovicic hizo un estudio extensivo sobre reflexiones y refracciones de ondas sísmicas en una discontinuidad. El impacto del descubrimiento fue tan grande para la ciencias de la tierra en general, como la incidencia que tuvo en la sismología en particular (Kanamori, 1986).

El estudio de los tiempos de viaje fue un elemento que marcó las investigaciones de principios del siglo XX, la acumulación de datos permitió construir tablas de tiempo de viaje que permitieron determinar globalmente la estructura interna de la tierra. Para ello ya se contaba con el antecedente de la existencia del núcleo de la tierra gracias a los trabajos de Oldham (1906). Dicho descubrimiento, junto con el conocimiento de las tablas de tiempos de viaje,

como las de Jeffreys-Bullen (Jeffreys y Bullen, 1935; Bullen, 1937, 1938, 1939; Jeffreys, 1939), sería fundamental para establecer el primer modelo completo de la estructura de la tierra (ver Lowrie, 1997) y entender la forma en que opera su interior (Figura 1). Desde ese momento, en la sismología ya no sería suficiente entender los procesos que generan un sismo, ahora se requeriría entender el origen de las modificaciones de los tiempos de arribo, las causas de la atenuación de la energía, la distribución de las heterogeneidades que componen la tierra, etc. Compilaciones posteriores de datos sísmicos permitieron construir otras tablas tiempo-trayecto cada vez más precisas, basadas en datos de mejor calidad obtenidos con sismógrafos electrónicos. Las nuevas correcciones derivaron en las tablas de Herrín (1968) y después en las denominadas PREM y IASP91 (Dziewonski y Anderson, 1981; Kennet y Engdhal, 1991). Pese a que a principio del siglo XX los instrumentos eran meramente mecánicos, gracias a su calidad y sensibilidad la definición que se obtuvo de la estructura interna de la tierra fue muy buena.

Dentro de los diferentes sismógrafos que se diseñaron en el siglo XX hay uno que está ligado a otro avance muy importante en sismología. Se trata del sismógrafo Wood-Anderson que utilizó Charles Richter en 1935 para crear la primera escala de magnitud, al estudiar los terremotos locales del sur de California (Udías, 1999). Gracias a este avance se hizo la primera cuantificación objetiva de la energía liberada por un sismo (Figura 3, Tabla 1); así se pasaba de un plano meramente descriptivo a otro cuantitativo. Se daban los primeros pasos para entender cómo está relacionada la energía liberada por un sismo con las fuerzas que interactúan en la corteza terrestre. Este aporte dio pie para estudiar intensamente la mecánica de los terremotos.

Los sismógrafos, al registrar implícitamente la naturaleza del fallamiento en forma de sismogramas, permiten investigar los procesos físicos que ocurren antes, durante y después de la ruptura. Ello permitió verificar la teoría de la tectónica de placas, propuesta en 1912 por Wegener. Este científico basó sus argumentos en compa-



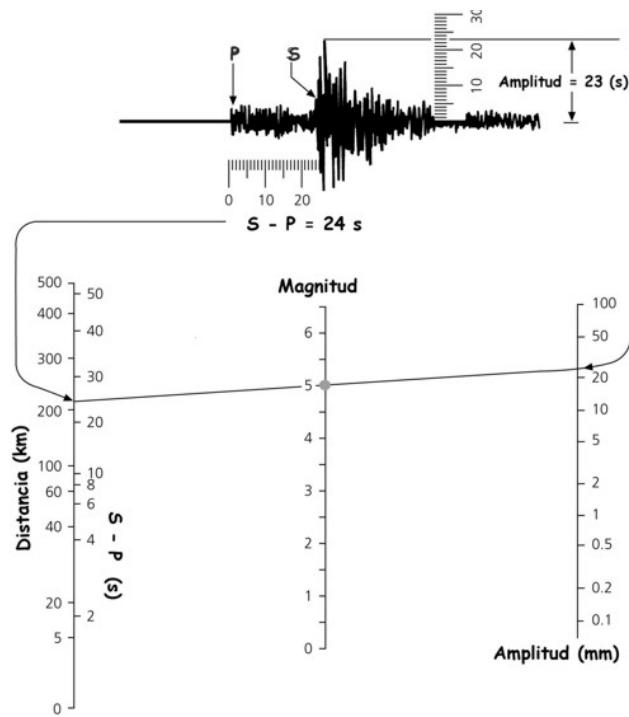


Figura 3. Nonograma para la determinación gráfica de la Magnitud de Richter. La línea que conecta los tiempos de llegada de la onda S-P y la amplitud máxima, de la onda sobre el sismograma medida sobre un instrumento Wood-Anderson, determina dicho valor (Modificado de Stein y Wysession, 2003).

raciones geográficas, litológicas, estructurales y paleontológicas entre Sudamérica y África. Sin embargo, no pudo convencer al mundo de la existencia de la deriva continental. No fue sino hasta 1960 que se aceptó dicha teoría; este fue un momento especial para los métodos geofísicos. Mientras que el descubrimiento de las anomalías magnéticas en el piso oceánico fue un indicador esencial de la validez de la teoría, la sismología tendría su aporte mediante la observación de los mecanismos de ruptura de los terremotos y la precisión en su localización. Los primeros mapas de sismicidad indicaron inmediatamente que existen movimientos relativos en los límites delimitados por las poblaciones de terremotos y que grandes áreas de la superficie terrestre no están sujetas a deformación. Estas áreas corresponden al interior de las placas tectónicas, mientras que la deformación se concentra principalmente en los límites de las mismas. En 1968 Isacks, Oliver y Sykes determinaron la orientación de los planos de falla y direcciones de deslizamiento de un gran número de terremotos. Estos mecanismos fueron usados para conocer el movimiento relativo en los límites de placas (Isacks *et al.*, 1968; Stein *et al.*, 1988; DeMets *et al.*, 1990). En este caso el avance tecnológico está implícito en la localización exacta de los terremotos analizados que requiere de las señales registradas por los sismógrafos y de un análisis preciso de los tiempos de viaje de las ondas. De hecho, dicha localización, junto con el movimiento relativo entre fallas son los datos más importantes para entender la tectónica de placas (Figuras 4 y 5; Tabla 1). En el caso de estudios de fuente sísmica, el hipocentro se determina igualmente mediante el análisis de primeros arribos con señales registradas en diferentes sitios (Báth, 1979; Schwartz *et al.*, 1989) y la geometría de la falla sobre la que ocurre

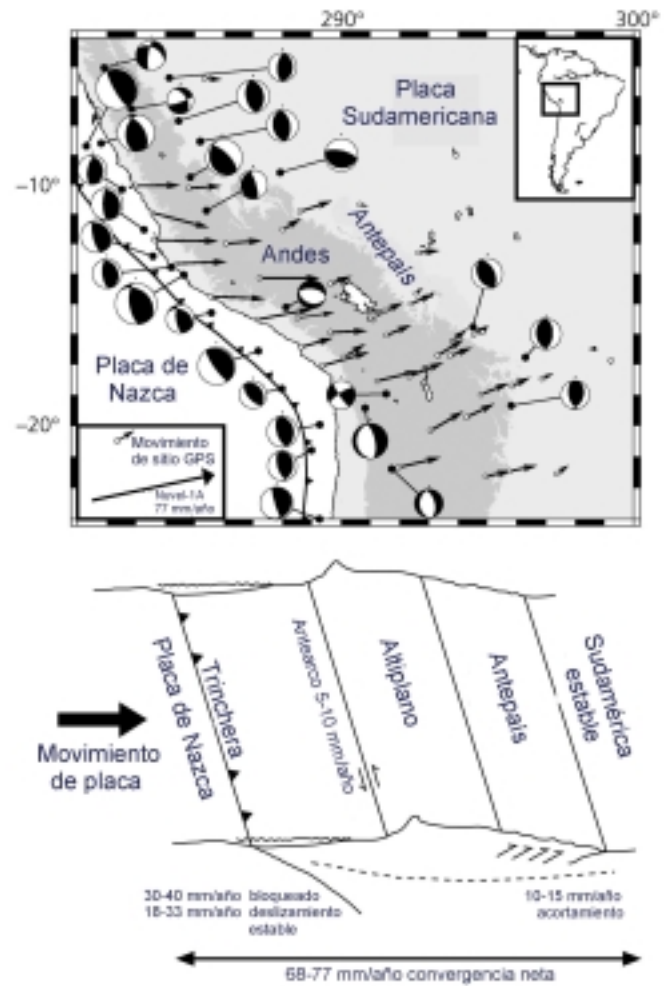


Figura 4. Determinación de las características tectónicas a partir de los mecanismos focales producidos por sismos mayores. Su asociación con mediciones GPS ayuda a verificar la dirección de movimiento de placa y a conocer la geodinámica regional (Modificado de Stein y Wysession, 2003).

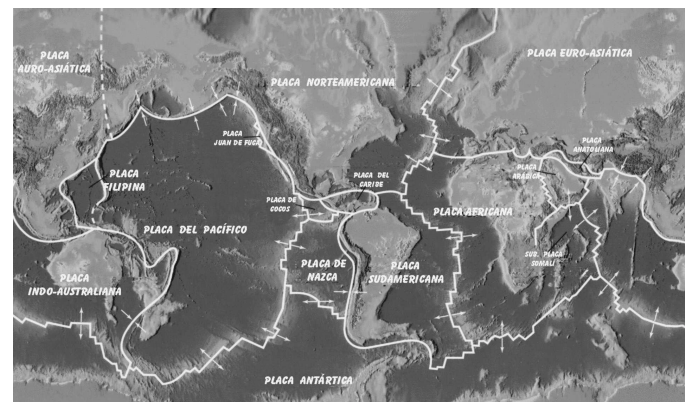


Figura 5. Placas mayores de la corteza, su movimiento relativo horizontal se indica con las flechas.

el terremoto (Figura 6) se infiere a través del patrón de radiación de las ondas sísmicas registradas (Bolt, 1999; Kennett, 2001). Es así como gracias al análisis de sismogramas ha sido posible entender el proceso de subducción, al igual que sus causas y efectos tectónicos.

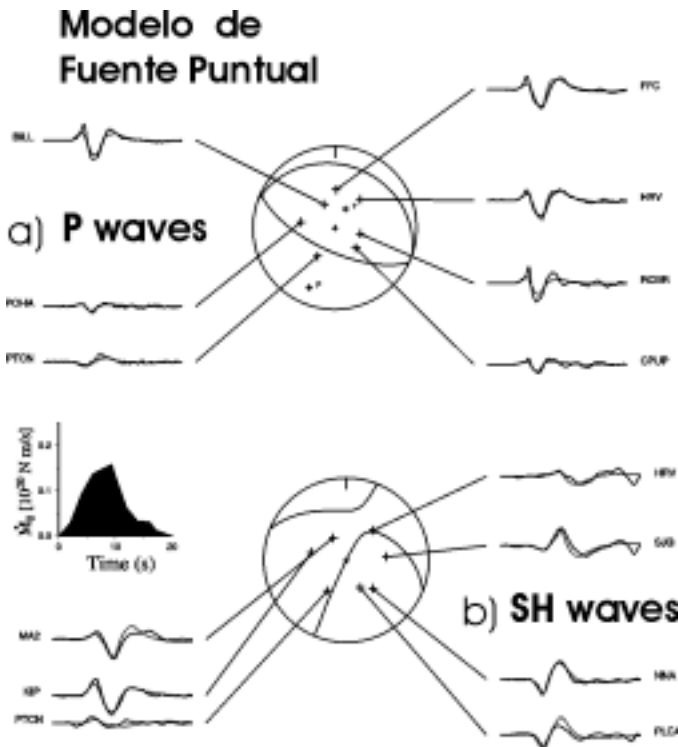


Figura 6. Inversión y modelado de la forma de onda de un sismo. Este permite obtener el plano de falla (pelotas de playa del centro) y la historia espacio-temporal de la distribución de momento sísmico (al centro a la izquierda). Las líneas continuas indican los sismogramas observados, mientras que las punteadas las señales modeladas.

Para finales de los 80 la calidad técnica de los sismógrafos se caracterizó por lograr un rango dinámico más amplio. Todo estaba listo para la aparición de los sismógrafos de banda muy ancha (VBB), cuya capacidad permite registrar, al mismo tiempo, tanto sismos regionales de magnitud pequeña como telesismos (Figura 7; Tabla 1). Los sismógrafos VBB tienen una mayor sensibilidad y capacidad de almacenamiento, con una respuesta plana en un intervalo de frecuencias más amplio (0.00033 - 50 Hz) y un rango dinámico superior a 145 dB de amplitud. Estos instrumentos superan la dualidad de los de periodo corto y periodo largo, pues son capaces de simular una respuesta plana casi en cualquier intervalo de frecuencias (Figura 7). En la época analógica se necesitaban 6 sismógrafos en cada estación para registrar 3 componentes del movimiento en periodo corto y 3 para las de periodo largo. Los primeros servían para registrar adecuadamente las ondas de volumen provenientes de sismos cercanos y los otros las ondas superficiales de los telesismos. En conjunto la banda de operación de ambos instrumentos era mucho menor a la de los actuales VBB. Con estos instrumentos de mayor resolución se redujeron las pérdidas de información (Figura 7).

## LOS AVANCES SON EN CADENA

Los avances tecnológicos que ocurrieron durante el siglo XX no sólo permitieron el incremento en la cantidad y calidad de los datos sísmicos, también propiciaron el desarrollo de métodos de

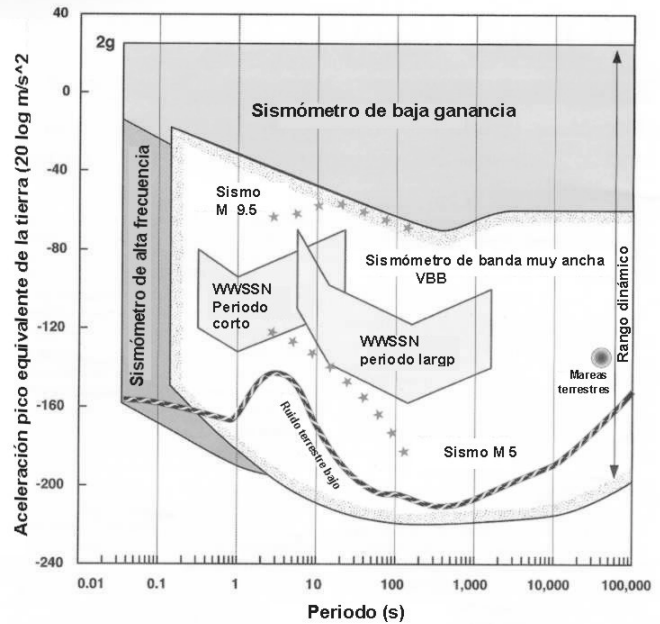


Figura 7. Ancho de banda y resolución de los instrumentos GSN distribuidos alrededor del mundo. Se observan los intervalos de registros de las estaciones de periodo corto y largo, así como el amplio intervalo y mayor resolución de los instrumentos VBB (Modificado de Butler et al., 2004).

modelado y una interpretación más sofisticada de los resultados. De esta forma fue posible estudiar el interior de la Tierra por medio de modelos inhomogéneos estratificados (Aki y Richards, 2002; Spudich y Orcutt, 1980). Los métodos de modelado e inversión surgieron como un complemento para explicar las señales observadas (Braile y Smith, 1975; Grand y HelMBERGER, 1984; Lay y Wallace, 1988; Shearer, 1991; Silver y Chan, 1991). Al mismo tiempo, la aplicación de los procedimientos de cálculo se sustentó en el desarrollo de otro elemento fundamental, no sólo de la geofísica, sino de la humanidad entera: la computadora. Su aparición permitió que en las décadas de los 50 y 60 se realizaran análisis que demandaban tanto una gran velocidad de procesamiento como de almacenamiento. Esta posibilidad, junto con el avance en el conocimiento sobre el comportamiento de la propagación de la energía, abrió el camino para reproducir cuantitativamente las señales registradas. De esta forma, con la llegada de los sismogramas sintéticos, en los años 50, apareció la posibilidad de construir diferentes escenarios sobre el origen físico del fenómeno que genera las señales sísmicas (Langston y HelMBERGER, 1975; Chapman, 1978). Los primeros sismogramas sintéticos se usaron para analizar registros sísmicos de reflexión (Figura 8; Tabla 1), lo que se convirtió rápidamente en un procedimiento estándar de interpretación (Peterson et al., 1955; Durschner, 1958; Anstey, 1960; Dennison, 1960). Su popularización en la sismología de terremotos fue muy rápida, debido principalmente a que un sismograma sintético es un modelo sísmico de respuesta basado en señales de la fuente y de las estructuras geológicas interpretadas o inferidas. Los sismogramas sintéticos permiten obtener más detalles de la estructura mediante una comparación de registros con sismogramas sintéticos calculados a partir de modelos geológicos (Robinson, 1967). Lo anterior ofreció la alternativa de explorar una gran variedad de modelos para verificar múltiples hipótesis sobre la variación de las propiedades

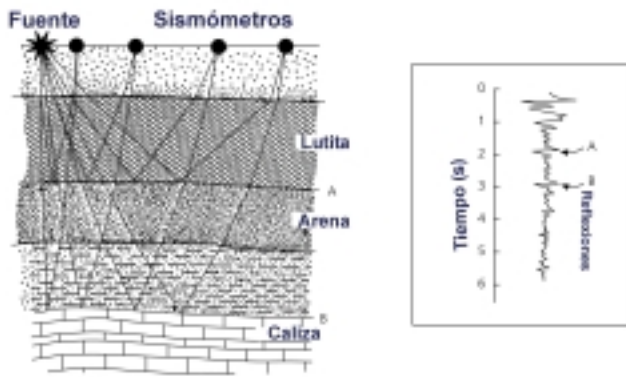


Figura 8. Esquema de la propagación de ondas en experimentos de exploración con fuente controlada, las diferentes reflexiones permiten inferir la estructura de la corteza. A la derecha se muestra un sismograma sintético típico (Modificado de Stein y Wysession, 2003).

físicas de la tierra, así como para explicar los procesos físicos que generan un sismo (Kanamori y Steward, 1978; Helmberger, 1983; Wallace *et al.*, 1983; Hartzell y Heaton, 1985).

De esta forma, los análisis de ondas superficiales de periodo largo, apoyados en la capacidad, velocidad de procesamiento y almacenamiento de las computadoras, revelaron variaciones laterales sistemáticas en la estructura profunda de la Tierra (Lay, 1987; Dziewonski *et al.*, 1981; Anderson, 1989; Dziewonski y Anderson, 1981; Romanowicz, 1991). Es en este momento cuando aparecen los primeros destellos de una herramienta que se posicionaría rápidamente como fundamental para explicar las características y el comportamiento del manto: la tomografía sísmica (Nolet, 1987; Ammon y Vidale, 1993; Iyer e Hirahara, 1993).

Durante los años ochenta muchos sismólogos dedicados al análisis de la tierra global, analizaron activamente diferentes tipos de datos sísmicos para determinar la estructura tridimensional profunda de la tierra (Figura 9), principalmente mediante tomografía sísmica (Nolet, 1987; van der Hilst, 1998; Morgan *et al.*, 2002). Estos investigadores encontraron que cada región, con la excepción del núcleo exterior, tiene heterogeneidades detectables (Bishop *et al.*, 1985). La habilidad para resolver esta variación alrededor de un modelo de Tierra radial unidimensional impulsó una revolución en las investigaciones geofísicas del interior profundo (Bishop *et al.*, 1985; Grand *et al.*, 1977; Wysession *et al.*, 1992; Young y Lay, 1987). En consecuencia, se logró un mejor conocimiento sobre la variación de densidades con la profundidad, la cual es muy importante en el análisis de la composición de la Tierra, ya que su combinación con velocidades permite derivar constantes elásticas (Mathisen *et al.*, 1995; Bachrach *et al.*, 2000).

El estudio de variaciones de atenuación sísmica mediante métodos tomográficos (Romanowicz, 1998; Roth *et al.*, 1999) motivó un gran interés por mapear las variaciones de temperatura sobre distancias cortas, lo que permite inferir variaciones significativas de atenuación. Los datos que se compilaban con instrumentos más sofisticados, y con mayor capacidad de almacenamiento, permitieron que los estudios de atenuación adquirieran un gran valor, princi-

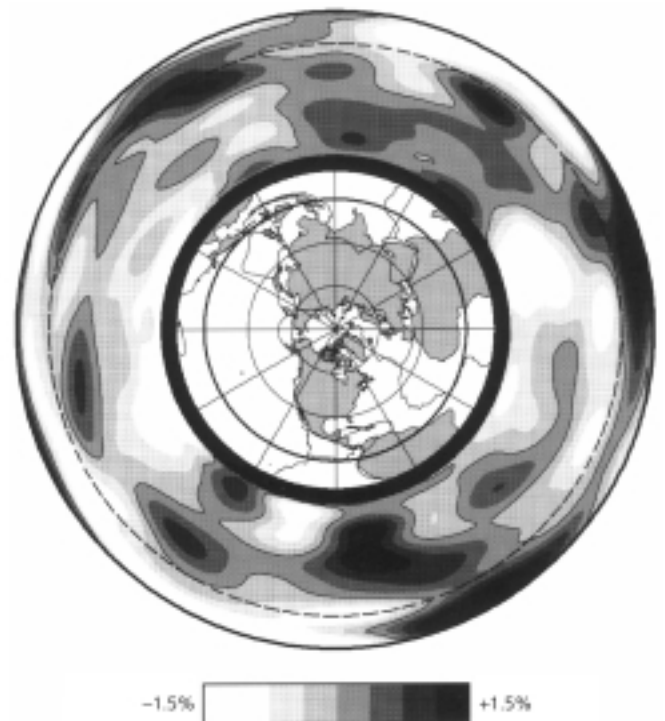


Figura 9. Imagen tomográfica de velocidades de ondas S a lo largo del gran círculo sobre el ecuador, obtenida por inversión de la forma de onda y tiempos de viaje (Modificada de Su *et al.*, 1994).

palmente en los análisis tectónicos, al ser combinados con la información geológica, geodésica, geomagnética, geoquímica o de la física y química de materiales a altas temperaturas y presiones (Stein y Wysession, 2003). Por otro lado, la dependencia hacia la computación se incrementó exponencialmente por los requisitos para el cálculo de tiempos de viaje. Este trabajo es considerable pero plenamente justificado porque permite obtener modelos geométricos del manto superior y conocer la variación de sus propiedades (Figura 9). La enorme cantidad de operaciones, procesamiento y almacenamiento de datos no se podrían haber llevado a cabo sin el uso de las computadoras.

## LA GLOBALIZACIÓN

Hoy en día los estudios globales no sólo implican el uso de una gran cantidad de estaciones distribuidas a lo largo y ancho del planeta, sino también del acceso rápido y sencillo a los datos por toda la comunidad científica. En 1960, Estados Unidos llevó a cabo un proyecto sin precedentes, al crear la *Worldwide Standard Seismograph Network (WWSSN)*, se trata de una red mundial que mejoró enormemente la precisión de los estudios de sismicidad global. Dicha red contribuyó a mejorar el monitoreo de zonas sísmicamente activas y tuvo aportes directos tales como la comprobación de la teoría de tectónica de placas (Figura 6). La red WWSSN fue posteriormente reemplazada por otras redes aún más grandes, en la que se generalizó el uso de instrumentos digitales de banda muy ancha. Finalmente, en 1986 nació la *Global Seismographic Network (GSN)*,



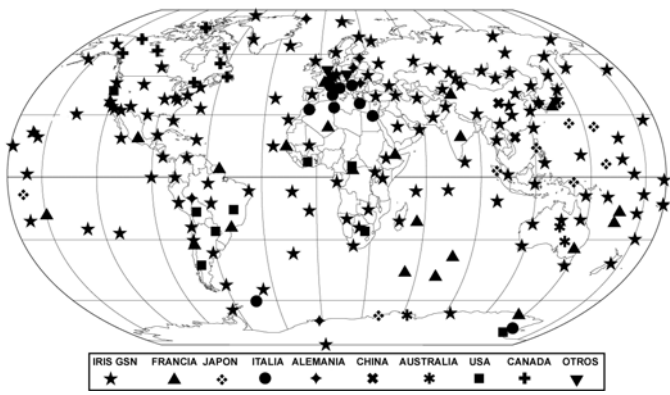


Figura 10. Estaciones GSN (estrellas) y miembros afiliados alrededor del mundo (Modificado de IRIS, <http://www.iris.edu/about/publications.htm>).

que es la red global permanente más importante del mundo. Su capacidad es mucho mayor que cualquier otra puesta en marcha anteriormente y representa el estado del arte en sensores de sismología y geofísica (Butler *et al.*, 2004). Actualmente la GSN tiene más de 136 estaciones distribuidas en todo el mundo (Figura 10) e inclusive tiene acceso a múltiples redes locales de varios países, lo que ha incrementado la cobertura y cantidad de datos disponibles prácticamente en tiempo real (Butler *et al.*, 2004).

Esta masificación de la información ha permitido que se puedan obtener resultados preliminares prácticamente inmediatos del análisis de cualquier evento sísmico. Ello ha promovido el desarrollo de estudios de predicción sísmica cuyo objetivo es proporcionar una idea de la probabilidad de ocurrencia de un terremoto y de su peligrosidad en función de la magnitud (Sykes y Nishenko, 1984; Kanamori *et al.*, 1997; Triep y Sykes, 1997; Wiemer y Wyss, 1997). También ha despertado el interés por desarrollar dispositivos de alerta sísmica que reduzcan pérdidas humanas provocadas por el derrumbe de edificaciones, o por otros fenómenos asociados directamente a los terremotos, como los tsunamis, deslizamientos del terreno y la licuefacción del suelo (Bachrach *et al.*, 2001).

Los sismógrafos de tecnología contemporánea son capaces de medir y registrar con alta fidelidad todas las vibraciones producidas por un sismo, desde las altas frecuencias producidas por el movimiento fuerte del terreno alrededor del epicentro (Aki y Richards, 2002; Stein y Wysession, 2003), hasta las más lentas oscilaciones libres de la Tierra (Geller and Stein, 1977; Dziewonski, 1984; Dahlen and Tromp, 1998; Zhao *et al.*, 2000). Además, el control de tiempo en los registros ha mejorado notablemente con la incorporación de dispositivos de *geo-posicionamiento por satélite* (GPS). En ellos la sincronización es permanente y permite tener una autocorrección constante con una menor deriva, además de una perfecta ubicación espacial. La red actual de sismógrafos que se ha desplegado alrededor del mundo ha sido fundamental para la investigación; los instrumentos de banda ancha permiten estudiar la anisotropía en el núcleo interno de la Tierra, el gradiente de velocidades en el núcleo externo hacen posible localizar zonas de materiales con baja densidad en la interfaz manto-núcleo (Young and Lay, 1987; Inoue *et al.*, 1990; Wysession, 1996).

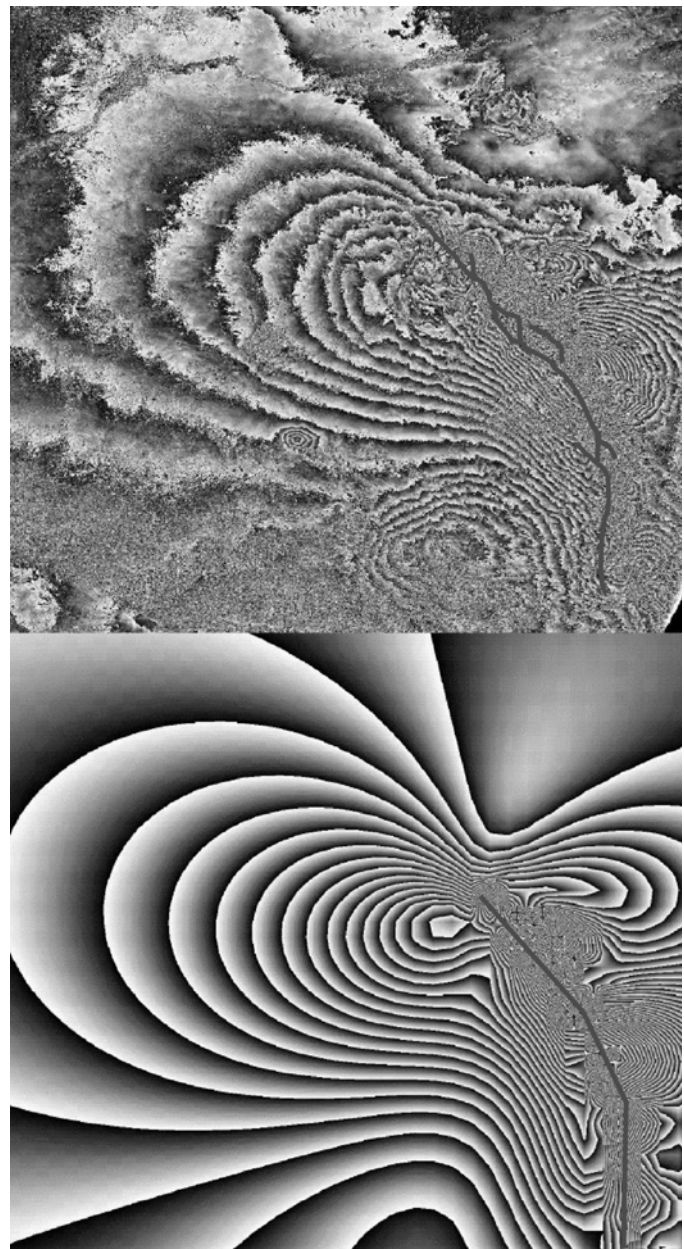


Figura 11 . Interferograma del sismo de Lander de 1992, USA. El área muestra los desplazamientos del terreno a lo largo de la línea de vista de radar. Los diferentes tonos de gris corresponden al rango de desplazamientos. La Figura inferior es un interferograma sintético calculado usando un modelo de los desplazamientos predichos por los mecanismos focales. Las líneas oscuras son una suposición de las fallas observadas y modeladas, respectivamente (Modificado de Hernández *et al.*, 1994).

Son varias las generaciones de investigadores que han hecho modelos tomográficos del manto gracias a la disposición de una gran cantidad de registros de ondas de cuerpo, ondas mantélicas y oscilaciones libres que, junto con otros datos, han proporcionado nuevos modelos de la dinámica del manto terrestre, incluso de su evolución química. El mapeo de las discontinuidades del manto ha sido posible gracias a la disponibilidad de datos globales y locales, lo que ha permitido estudiar la estructura profunda del planeta y la forma de la raíz de los continentes (Figura 1). Del mismo modo, se han obtenidos modelos globales de la variación de la atenuación en el manto



superior (Barazangi and Isacks, 1971; Sipkin and Jordan, 1979; Roth et al., 1999) y se han podido modelar ondas guiadas en la corteza (Bott et al., 1970; Snelson et al., 1998). El crecimiento global de estaciones que ha hecho posible explorar la mayor parte del planeta ha consolidado a la sismología como parte fundamental del conocimiento humano al hacer visible el otrora inaccesible interior de la tierra.

## CONCLUSIONES

Dentro de las diferentes disciplinas que componen a la geofísica, la sismología es una de las que ha tenido mayores avances en el último siglo. Varios de sus aportes se deben en buena medida a los avances tecnológicos instrumentales y computacionales, los cuales han permitido desarrollar el conocimiento en múltiples áreas. Es difícil imaginar en que nivel estaría la sismología hoy sin la evolución que han tenido los sismógrafos y las computadoras. La estimación de velocidades de propagación de ondas sísmicas es actualmente una de las herramientas fundamentales para conocer las propiedades físicas y las variaciones en la composición del interior del planeta. El conjunto de avances en sismología, principalmente durante el siglo XX, la han proyectado como parte esencial del conocimiento humano. Hoy es más válido que nunca el hecho de que la contribución instrumental en la sismología es comparable a la de las máquinas de rayos X en la medicina o la del telescopio en la astronomía, ya que los sismógrafos han permitido un progreso extraordinario en el conocimiento humano y han hecho accesible el otrora inescrutable interior de la Tierra.

## AGRADECIMIENTOS

Esta contribución fue financiada por la DGAPA, UNAM, proyectos IN102102 e IX112304. La versión final se vio enriquecida por los comentarios de un revisor anónimo.

## REFERENCIAS

- Aki, K. and Richards, P., 2002. *Quantitative Seismology*, University Science Books, California, 704 pp.
- Ammon, C.J., and Vidale, J.E., 1993. Tomography without rays, *Seismological Society of America Bulletin*, v. 83, p. 509-528.
- Anderson, D.L., 1989. *Theory of the Earth*, Balckwell, 366 pp.
- Anstey, N.A., 1960. Attacking the Problems of the Synthetic Seismograms, *Geophy. Prospect.*, v. 8, p. 242-259.
- Barazangi, M., and Isacks, B.L., 1971. Lateral variations of seismic-wave attenuation in the upper mantle above the inclined earthquake zone of the Tonga Island arc: Deep anomaly in the upper mantle, *Journal of Geophysical Research*, v. 76, 8493-8516 pp.
- Bachrach, R., Agnon, A., and Nur, A., 2001. Liquefaction and Dynamic Poroelasticity, *Journal of Geophysical Research*, v. 106, p. 13515-13526.
- Bachrach, R., Dvorkin, J., and Nur, A., 2000. Seismic velocities and Poisson's ratio of shallow unconsolidated sands, *Geophysics*, v. 65, p. 559-564.
- Bishop, T.N., Bube, K.P., Cutler, R.T., Langan, R.T., Love, P.L., Resnick, J.R., Shuey, R.T., Spindler, D.A. and Wyld, H.W., 1985. Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media, *Geophysics*, v. 50, p. 903-923.
- Braile, L.W., and Smith, R., 1975. Guide to the interpretation of crustal refraction profiles. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, v. 40, p. 145-176.
- Båth, M., 1979. *Introduction to Seismology*, Birkhäuser Verlag, Basel, 428 pp.
- Bolt, B.A., 1999. *Earthquakes*, Freeman, New York, 377 pp.
- Bott, M.H., Holder, A.P., Long, R.E., and Lucas, A.L., 1970. Crustal structure beneath the granites of south-west England. En: G. Newall and N. Rast (eds), Mechanism of Igneous Intrusion, *Geological Journal, Special Issue*, v. 2, 93-102 pp.
- Bullen, K.E., 1937, 1938, 1939. The ellipticity correction to travel-times of P and S earthquake waves. *Mon. Not. R. Astr. Soc., Geophys. Suppl.* 4, 143-157, 317-331, 332-335, 469-471.
- Butler, R., Lay, T., Creager, K., Earl, P., Fisher, K., Gaherty, J., Laske, G., Leith, B., Park, J., Ritzwoller, M., Tromp, J., and Wen L., 2004. The Global Seismographic Network Surpasses Its Design Goal, *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, v. 85, p. 225 and 229.
- Chapman, C.H., 1978. A new method for computing synthetic seismograms, *Geophysical Journal Research of Astronomical Society*, v. 54, p. 481-518.
- Dahlen, F.A., and Tromp, J., 1998. *Theoretical Global Seismology*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1025 p.
- Dennison, A.T., 1960. An Introduction to Synthetic Seismograms Techniques, *Geophy. Prospect.*, v. 8, p. 231-241.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., and Stein, S., 1990. Current plate motions, *Geophysical Journal International*, v. 101, p. 425-478.
- Doyle, H., 1995. *Seismology*, Ed. Wiley and sons, Australia, 218 pp.
- Dewey, J. and Byerly, P., 1969. The Early History of Seismometry (to 1900), *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 59, p. 183-227.
- Durschner, H., 1958. Synthetic Seismograms from Continuous Velocity Logs, *Geophy. Prospect.*, v. 6, p. 272-284.
- Dziewonski, A.M., and Anderson, D.L., 1981. Preliminary reference Earth model. *Physics, Earth and Planetary Interior*, v. 25, p. 297-356.
- Dziewonski, A.M., Chou, T.A., and Woodhouse, J.H., 1981. Determination of earth source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *Journal of Geophysical Research*, v. 86, p. 2825-2852.
- Dziewonski, A.M., 1984. Mapping the lower mantle: determination of lateral heterogeneity in P velocity up to degree and order 6, *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 5929-5952.

- Geller, R.J., and Stein, S., 1977. Split free oscillation amplitudes for the 1960 Chilean and 1964 Alaskan earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 67, p. 651-660.
- Grand, S.P. and Helmberger, D.V., 1984. Upper mantle shear structure of North America, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, v. 76, p. 399-438.
- Hartzell, S.H. and Heaton, T.H., 1985. Teleseismic time functions for large, shallow subduction zone earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 75, p. 965-1004.
- Helmberger, D.V., 1983. Theory and application of synthetic seismograms. En: "Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation", p. 174-222, Societa Italiana di Fisica, Bologna.
- Hernández, B.F. Cotton, M. Campillo, and D. Massonet, 1994. A comparison between short-term (coseismic) and long-term (1 year) slip for the Landers earthquake: Measurements from strong motion and SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, v. 24, p. 1579-1582.
- Herrin, E., 1968. 1968 seismological tables for P phases. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 58, p. 1193-1241.
- Isacks, B., Oliver, J., and Sykes, L., 1968. Seismology and the new global tectonics, *Journal of Geophysical Research*, v. 73, p. 5855-5899.
- Inoue, H., Fukao, Y., Tanabe, K., and Ogata, Y., 1990. Whole mantle P wave travel time tomography, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, v. 59, p. 294-328.
- Iyer, H.M., and Hirahara, K., 1993. *Seismic Tomography*, Chapman and Hall, London, 842 pp.
- Jeffreys, H., 1939. The times of P, S and SKS and the velocities of P and S. *Mon. Not. R. Astr. Soc., Geophys. Suppl.* 4, 498-533.
- Jeffreys, H. and Bullen, K.E., 1935. Times of transmission of earthquake waves. *Bur. Centr. Seism. Internat. A., Fasc.* 11, 202 pp.
- Kanamori, H., 1986. Small Science and Unexpected Discoveries in Seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 76, p. 1501-1503.
- Kanamori, H., Hauksson, E., and Heaton, T.H., 1997. Real-time seismology and earthquake hazard mitigation, *Nature*, v. 390, p. 461-464.
- Kanamori, H. and Steward, G.S., 1978. Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976, *Journal of Geophysical Research*, v. 83, p. 3427-3434.
- Kennet, B.L.N. and Engdhal, E.R., 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification, *Geophysical Journal International*, v. 105, p. 429-465.
- Kennett, B.L.N., 2001. *The seismic Wavefield, Vol. 1: Introduction and Theoretical Development*, Ed. Cambridge University Press, 370 pp.
- Langston, C.A. and Helmberger, D.V., 1975. A procedure for modeling shallow dislocation source, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, v. 42, p. 117-130.
- Lay, T., 1987. Structure of the mantle and core. *Review of Geophysics*, v. 25, p. 1161-1167.
- Lay, T. and Wallace, T.C., 1988. Multiple ScS attenuation and travel times beneath western North America, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 78, p. 2041-2061.
- Lowrie, W., 1997. *Fundamentals of Geophysics*, Ed. Cambridge University Press, United Kingdom, 354 pp.
- Mathisen, M.E., Cunningham, P. Shaw, J., Vasiliou, A.A., Justice, J.H., and Guinzy, N.J., 1995. Crosswell seismic radial survey tomograms and the 3-D interpretation of a heavy oil steamflood., *Geophysics*, v. 60, p. 651-659.
- Morgan, J.V., Christeson, G.L., and Zelt, C., 2002. 3D velocity tomogram across the Chicxulub crater: Testing the resolution, *Tectonophysics*, v. 355, p. 215-226.
- Nolet, G., 1987. *Seismic Tomography—With Applications in Global Seismology and Exploration Geophysics*, Reidel, Dordrecht. 386 pp.
- Oldham, R.D., 1906. The constitution of the interior of the earth, as revealed by earthquakes, *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, v. 62, p. 456-475.
- Peterson, R.A., Fillipponne, W.R., and Coker, F.B., 1955. The Síntesis of Seismograms from Well Log Data, *Geophysics*, v. 20, p. 516-538.
- Robinson, E.A., 1967. Multichannel z-transform and minimum delay, *Geophysics*, v. 31, p. 482-500.
- Romanowicz, B., 1991. Seismic tomography of the Earth Mantle. *Annali Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 19, p. 77-99.
- Romanowicz, B., 1998. Attenuation tomography of the Earth Mantle: A review of current status, *Pure and Applied Geophysics*, v. 153, p. 257-272.
- Roth, E.G., Wiens, D.A., Dorman, L.M., Hildebrand, J. and Webb, S.C., 1999. Seismic attenuation tomography of the Tonga-Fiji region using phase pairs methods, *Journal of Geophysical Research*, v. 104, 4795-4809 pp.
- Schwartz, S.Y., Dewey, J.W. and Lay, T., 1989. Influence of fault plane heterogeneity on the seismic behavior in the southern Kurile Islands arc, *Journal of Geophysical Research*, v. 94, p. 5637-5649.
- Shearer, P.M., 1991. Constraints on upper mantle discontinuities from observations of long-period reflected and converted phases, *Journal of Geophysical Research*, v. 96, 18147-18182.
- Silver, P. and Chan, W.W., 1991. Shear eave splitting and subcontinental mantle deformation. *Journal of Geophysical Research*, v. 96, 16429-16454.
- Sipkin, S.A. and Jordan, T.H., 1979. Frequency dependence of QScS, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 69, p. 1055-1079.
- Snelson, C.M., Henstock, T.J., Séller, G.R., Miller, K.C. and Levander, A., 1998. Crustal and uppermost mantle structure along the Deep Probe seismic profile, *Rocky Mountains Geology*, v. 33, p. 181-198.
- Spudich, P. and Orcutt, J., 1980. A new look at the velocity structure of the crust, *Review of Geophysical Space Physics*, v. 18, p. 627-645.

- Stein, S., DeMets, C., Gordon, R.G., Brodholt, J., Argus, D., Engeln, J.F., Lundgren, P., Stein, C., Wiens, D.A. and Woods, D.F., 1988. A test of alternate Caribbean Plate relative motion models. *Journal of Geophysical Research*, v. 93, p. 3041-3050.
- Stein, S. and Wysession, M., 2003. An introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure, Ed. Blackwell, 498 pp.
- Su, W., R.L., Woodward and A.M. Dziewonski, 1994. Degree 12 model of shear velocity heterogeneity in the mantle. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 6945-6980.
- Sykes, L.R. and Nishenko, S.P., 1984. Probabilities of occurrence of large plate rupturing earthquakes for the San Andreas, San Jacinto, and Imperial Faults, California, 1983-2003, *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 5905-5927.
- Triep, E.G. and Sykes, L.R., 1997. Frequency of occurrence of moderate to great earthquakes in intracontinental regions: Implications for changes in stress, earthquake prediction, and hazard assessments, *Journal of Geophysical Research*, v. 102, p. 9923-9948.
- Udías, A., 1999. *Principles of Seismology*. Ed. Cambridge University Press, United Kingdom, 475 pp.
- Van der Hilst, R.D., Widiyantoro, D., Creager, K.C. and McSweeney, T.J., 1998. Deep subduction and aspherical variations in P-wavespeed at the base of earth's mantle. En: M. Gurnis, M.E. Wysession, E. Knittle, and B. Buffet (eds), *The Core-Mantle Boundary Region*, American Geophysical Union, Washington 5-20 p.
- Wallace, T., Helmberger, D.V. and Engen, G.R., 1983. Evidence of tectonic release from underground nuclear explosions in long-period P waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 73, p. 593-613.
- Wiemer, S. and Wyss, M., 1997. Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times?, *Journal of Geophysical Research*, v. 102, p. 15115-15128.
- Wysession, M.E., Okal, E.A. and Bina, C.R., 1992. The structure of the core-mantle boundary from diffracted waves, *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 8749-8764.
- Wysession, M.E., 1996. Imaging cold rock at the base of slabs: The sometimes fate of slabs?. En: G.E. Bebout, D.W. Scholl, S.H.
- Young, C.J. and Lay, T., 1987. The core-mantle boundary, *Annual Review of Earth and Planetary Science*, v. 15, p. 15-46.
- Zhao, L., Jordan, T. and Chapman, C., 2000. Three-dimensional Frechet differential kernels for seismic delay times, *Geophysical Journal International*, v. 141, 558-576.
- IRIS, Consorcio (2004), <http://www.iris.edu/>
- IRIS/PASSCAL (2004), <http://www.passcal.nmt.edu/~bob/passcal/>
- Sismicidad en la Luna, <http://psn.quake.net/dave/moonqk.htm>

Recepción del manuscrito: 24 agosto, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 22 de septiembre, 2004

Aceptación del manuscrito: 30 de septiembre, 2004

# SELECCIÓN DE EVENTOS DENTRO DE UN POLÍGONO Y EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA CON *MATLAB*

José Frez C.

División de Ciencias de la Tierra, CICESE

## RESUMEN

Sea un catálogo de puntos en la superficie de la Tierra del cual necesitamos seleccionar un subconjunto con el criterio de que los puntos estén dentro de un polígono. El problema computacional tiene solución conocida a distancias locales y regionales ( $< \sim 500$  km) ya que, entonces, la superficie de la Tierra se puede aproximar como plana. El propósito de este trabajo es entregar un programa de cómputo que aprovecha funciones de *MATLAB* para resolver compactamente el problema. Al mismo tiempo, se divulgan técnicas de programación; en particular, de código vectorizado. El procedimiento se comprueba con un catálogo de 76545 hipocentros, cada uno descrito por 23 parámetros (columnas, en el catálogo). El catálogo contiene relocalizaciones de sismos que ocurren en la región fronteriza de ambas Californias (Shearer *et al.*, 2003). Un resultado lateral es que un nido con 17 epicentros ubicados en la falla Agua Blanca tiene un error sistemático fuerte y no señala una actividad de la falla.

**Palabras clave:** Mapa de epicentros, polígono, *MATLAB*.

## ABSTRACT

Consider a catalog of points on the surface of the Earth, from which we need to select a subset according to the criterion that the points be inside a polygon. The computational problem has a known solution for local and regional distances ( $< \sim 500$  km) since, for these ranges, the Earth's surface may be approximated by a plane. The purpose of the present work is to present a program that solves this program in a compact form, using *MATLAB* functions. At the same time, some programming techniques, particularly for vectorized code, are presented. The procedure is applied to a catalog containing 76545 hypocenters, each one described by 23 parameters (catalog columns). The catalog contains relocations of earthquakes occurring in the border region between both Californias (Shearer *et al.*, 2003). An incidental result is that 17 epicenters located on the Agua Blanca fault have a strong systematic error and do not indicate fault activity.

**Keywords:** Epicenter mapping, polygon, *MATLAB*.

## INTRODUCCIÓN

Un problema clásico de Geometría Computacional en dos dimensiones cartesianas es determinar si un punto está o no dentro de un polígono. Una solución puede encontrarse, por ejemplo en Sedgewick (1992); el lector debe cuidarse de errores en los códigos (escritos en C) de la versión en castellano (Sedgewick, 1995). Con estos resultados, podemos resolver el problema cuando los puntos están situados en la superficie de la Tierra, si es que aplicamos una aproximación plana que sea suficientemente exacta. Lo anterior nos permite obtener resultados correctos para mapeos regionales y locales (distancias menores a unos 500 km). A pesar de lo dicho, es común encontrar que los catálogos sísmicos no se acompañan con la herramienta computacional que mencionamos. Para mi trabajo, escribí hace años un largo programa en *Fortran*, con uso de la biblioteca de graficado *Plot88* (Young y Van Woert, 1992) y basado en Sedgewick (1992). Sin embargo, ahora, resulta más atractivo utilizar *MATLAB* (incluyendo la caja de herramientas para hacer mapas)

ya que este paquete de programas (doble precisión implícita) contiene la función *inpolygon* (que soluciona el problema en coordenadas cartesianas), sin contar con la facilidad de que se pueden codificar muy compactamente las lecturas, escrituras, cálculos y dibujos de mapas. Los programas resultantes son cortos, así como fáciles de leer y de adaptar a distintos objetivos.

El objetivo de esta publicación es divulgar técnicas de programación y entregar el listado de un programa (Figura 1) además de comentarios para programadores; también, se incluye un ejercicio de comprobación (figuras 2 y 3) que usa un catálogo grande de eventos sísmicos. Espero que el programa sea útil a investigadores y estudiantes de Ciencias de la Tierra y que incentive la escritura de programas más complicados.

En la sección siguiente, describiremos el programa; luego, la aplicación; finalmente, discutiremos un detalle interesante relacionado con la sismotectónica del norte de Baja California.



```

% -----
% Obtiene epicentros dentro de una ventana poligonal; hace el mapa
% correspondiente.
% Entradas:
% temp05.cat: Región 5 del catálogo de Shearer et al.(2003)
% poly.dat: Coordenadas geográficas de los vértices del polígono.
% Salida:
% temp06.cat: Subcatálogo de eventos, con epicentros dentro del
% polígono.
% Funciones externas:
% distaz: Calcula distancias y acimuts con el método de Richter
% linfallas: Lee y dibuja líneas (fallas, lagos), excepto costas.
% Todas las demás funciones son de MATLAB.
% Historia: J. Frez C. Febrero 2004, CICESE.
% -----
clear all,close all,
path(path,'c:\usur\1\MATLAB\mapas\mapsis') % Ruta de archivos a utilizar.
% Coordenadas del cuadro del mapa
lonul=-118.0; lonlr=-114.5; avlon=(lonul+lonlr)/2;
latul=33.5; latlr=31.00; avlat=(latul+latlr)/2;
% Calcula escala para transformación grados -> km.
[distx,az]=distaz(avlat,lonlr,avlat,lonul);
dglntkm=abs(distx/(lonlr-lonul));
[disty,az]=distaz(latul,avlon,latul,avlon);
dgltkm=abs(disty/(latul-latlr));
% Archivo con coordenadas geográficas de los vértices del polígono;
% los reduce a coordenadas planas.
load 'poly.dat'
ypr=dgltkm*abs(poly(:,1)-latlr); xpr=dglntkm*abs(poly(:,2)-lonul);
% Carga el catálogo de eventos
load temp05.cat;
% Reduce las coordenadas de epicentros a planas.
epx=dglntkm*abs(temp05(:,9)-lonul);
epy=dgltkm*abs(temp05(:,8)-latlr);
% Aplica el filtro poligonal
in=inpolygon(epx,epy,xpr,ypr);
% Pasa el subcatálogo a temp06
temp06=temp05(in>0,:);
clear('temp05')
% Parametrización del mapa
hm=axesm('MapProjection','mercator',...
'MapLatLimit',[latlr latul], 'MapLonLimit',[lonul lonlr], ...
'AngleUnits','degrees',...
'Origin',[0 0 0], 'ScaleFactor',[1.0], ...
'frame','on','grid','on',...
'flatlim',[latlr latul], 'flonlim',[lonul lonlr], 'flinewidth',2,...
'mlinelimit',[latlr latul], 'plinelimit',[lonul lonlr],...
'MLabelLocation',[118 -117 -116 -115],
'PLabelLocation',[31 32 33], ...
'PLabelRound',[-1], 'MLabelRound',[-1],...
'FontSize',[11], ...
'ParallelLabel','on', 'MeridianLabel','on', ...
'MLineLocation',0.5, 'PLineLocation',0.5, ...
'GLineWidth',[0.6]);
hidem(gca) % "Limpia" la figura del marco entre ventanas.
textm(30.85,-117.0,'Longitud','FontSize',[13])
textm(32.80,-114.35,'Latitud','FontSize',[13],'Rotation',-90)
% Dibuja sismicidad; tamaño de símbolos proporcionales a la magnitud
% (columna 11)
scatterm(temp06(:,8),temp06(:,9),2*(temp06(:,11)+0.1),'b')
scaleruler % Dibuja escala del mapa
% Dibuja el polígono
plotm(poly(:,1),poly(:,2),'r','LineWidth',1.5);
% Dibuja líneas de costa y límite internacional que provienen de NGDC.
load c15854.dat;
[nl,nc]=size(c15854);
plotm(c15854(:,2),c15854(:,1),'k','LineWidth',1.2);
clear('c15854');
% Dibuja fallas, río Colorado y otras líneas geográficas.
linfallas;
% Escribe resultado en archivo de texto y formateado (primeras 15
% columnas)
nom(1:6)='temp06'; ext(1:4)='(.cat)';
filename=[nom,ext]; fid=fopen(filename,'w');
if(fid<0), 'Error: No pude abrir el archivo',filename; end
nx=length(temp06(:,1));
for k=1:nx,
fprintf(fid,'%4d %2d %2d %2d %2d %5.2f %9d %8.5f %9.5f %5.2f %5.2f
%3d %3d %5.2f %5.2f\n', ...
temp06(k,1:15));
end
fclose(fid);

```

Figura 1. Listado del programa de computación (MATLAB) utilizado para generar la Figura 3.

## INDICACIONES DE IMPLEMENTACIÓN

El programa (Figura 1) se inicia con la lecturas de parámetros, para pasar a la de dos archivos: uno contiene las coordenadas geográficas de los vértices de un polígono; el otro, el catálogo sísmico. En la aplicación, se leen los parámetros hipocentrales de 76545 eventos (filas), en 23 columnas. Después de reducir el problema a uno de superficie plana, el programa selecciona los eventos que están dentro del polígono, vuelve a coordenadas geográficas y dibuja el mapa correspondiente. El resultado es que un programa de menos de 100 líneas de un código muy transparente realiza la tarea; mi programa anterior (Fortran y Plot88) tenía varias veces ese número de líneas.

Con la recomendación de leer la documentación de las funciones de *MATLAB* que utiliza el programa, agrego algunas indicaciones que, por mi experiencia, me parecen útiles. Las variables y funciones se escriben en cursiva.

1. El catálogo se lee con la función *load* que lo despliega como una matriz. La limitación de ello es que la lectura es para formato libre y sólo para números. Esto implica que el catálogo debe estar libre de letras y símbolos no-numéricos. Además, todas las columnas deben estar llenas con valores numéricos (los blancos no deben reemplazar ceros), al menos con un hueco que los separen. Si estas condiciones no se cumplen, se puede reemplazar las letras o símbolos por números, introducir explícitamente los ceros y separar "a mano" los números que quedan juntos. Una opción más drástica es reemplazar *load* por una función que lea con formato (quizás, sólo a variables de interés); recomiendo, en ese caso, el uso vectorizado de *textread*.
2. Para transformar las coordenadas geográficas a planas, las coordenadas cartesianas son referidas al extremo izquierdo inferior del cuadrángulo del mapa. Las distancias en la superficie de la Tierra (en km) se calculan con el algoritmo de Richter (Lee y Stewart, 1981) que es usado en *Hypo71* (Lee y Lahr, 1975) y que incluye el efecto elipsoidal. La función *distaz* es una traducción a *MATLAB* de las fórmulas de Lee y Stewart (1981). Si al usuario no le gustan las cajas negras, puede tomar de algún texto de Geodesia, por ejemplo Pearson (1990), expresiones para calcular las distancias a lo largo de meridianos y paralelos. Utilizando el elipsoide WGS-72, se comprueba que las expresiones de Pearson (1990) entregan resultados que difieren en 3 m del algoritmo de Richter, que tiene integrado un elipsoide de referencia no explicitado; esta diferencia se encuentra para valores de 1° a latitudes de 43° y 30°. Por supuesto que la aproximación plana está en el subsiguiente uso del teorema de Pitágoras para calcular la distancia. Un uso de esta aproximación plana para distancias de 500 km o más debe ser comprobada con experimentos numéricos.
3. No es necesario entregar la función *linfallas*. Ella sirve para dibujar las trazas de las fallas en la superficie y está compuesta por líneas de código semejantes a las cuatro usadas para dibujar las líneas de costa y que aparecen en el listado (Figura 1). Por lo tanto, es trivial escribir la versión de *linfallas* que se nece-

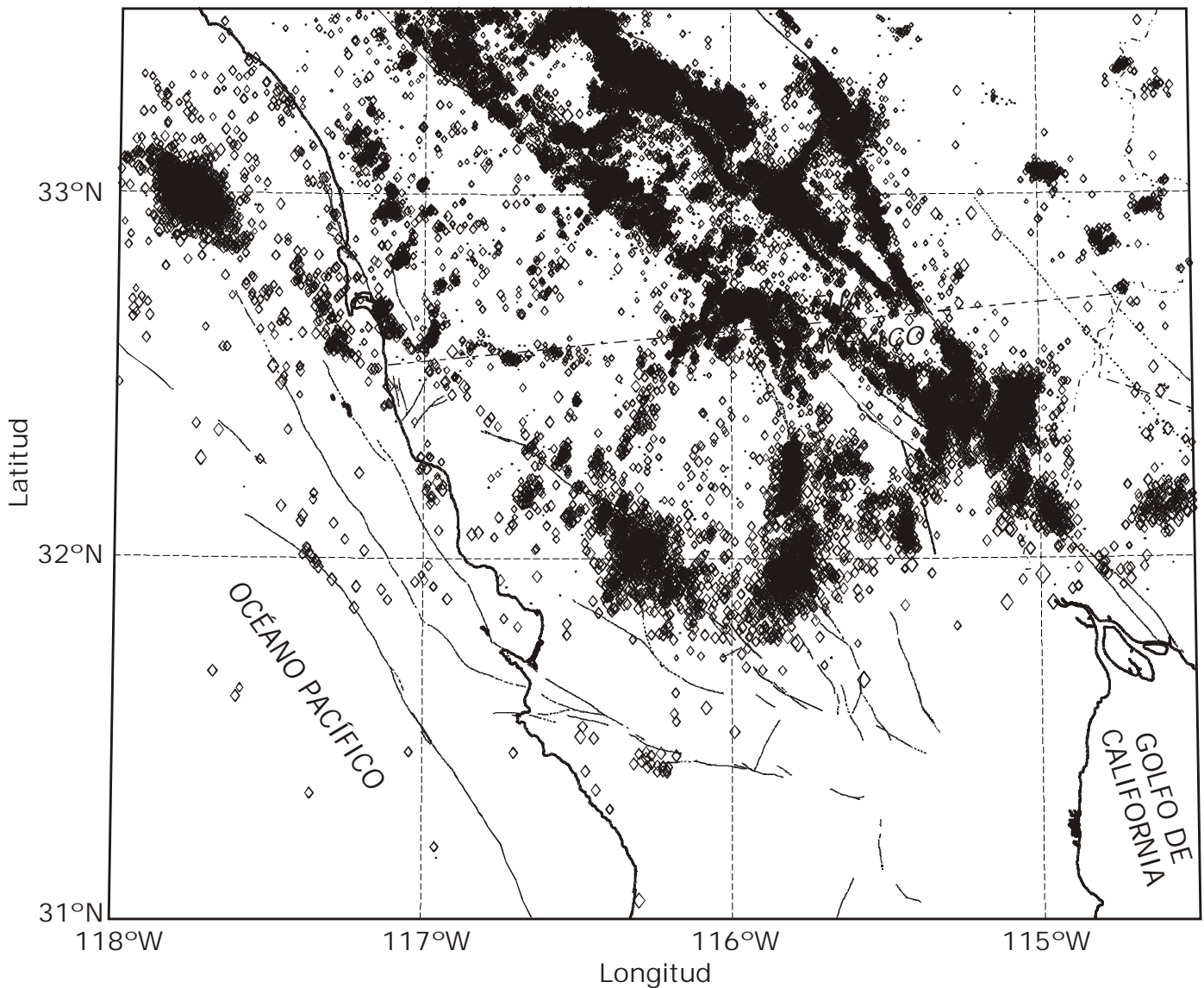
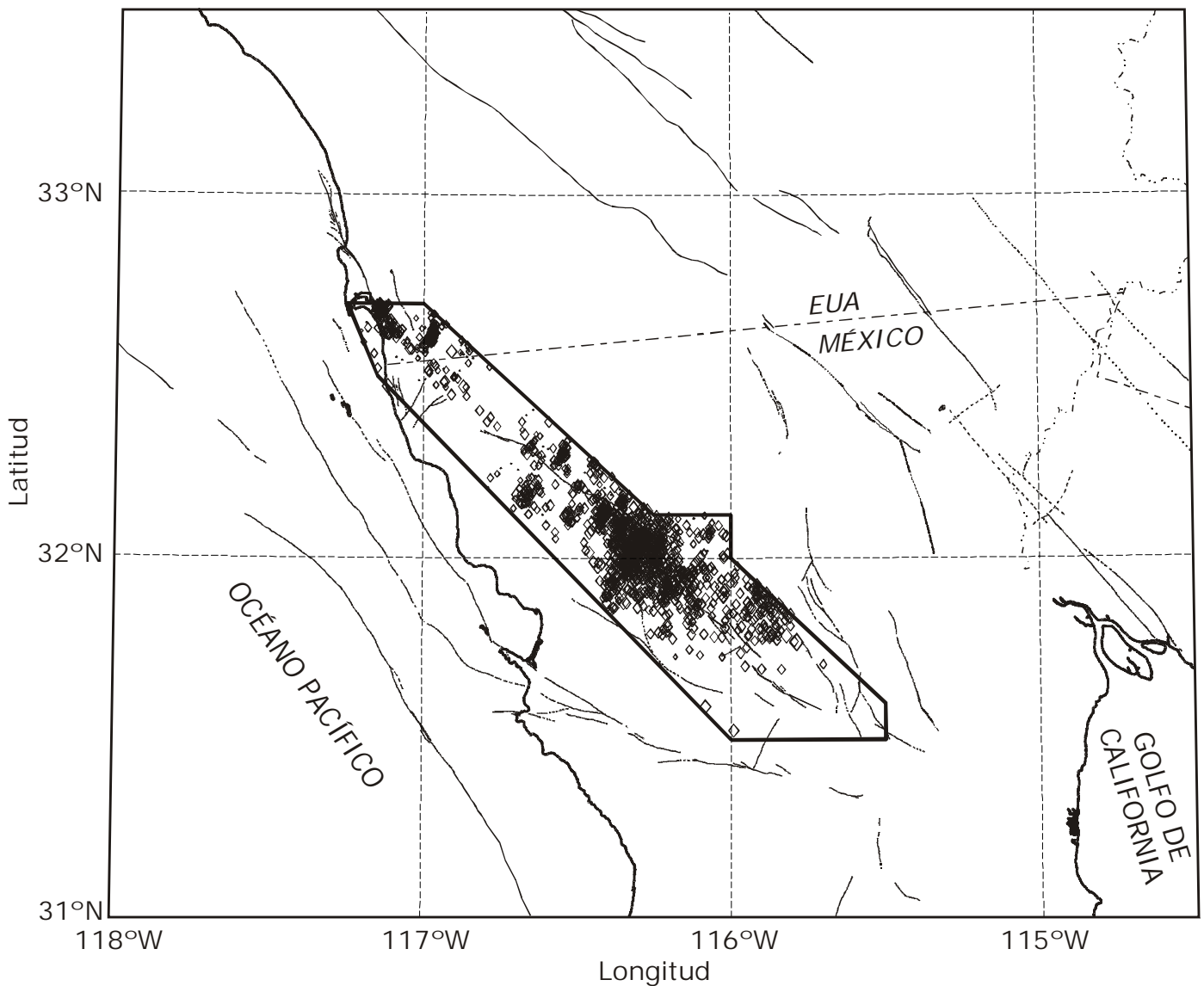


Figura 2. Mapa con los epicentros de la región 5, tomados del catálogo de Shearer *et al.* (2003). El mapa corresponde a la región fronteriza de ambas Californias. Las líneas gruesas representan la costa y el límite internacional; las líneas delgadas, fallas, el río Colorado y las depresiones del Salton y Laguna Salada. Ver, Frez y Frías-Camacho (1999) para el marco tectónico y nombres de sus características.

- site. Cada línea de los archivos de líneas de costas y de fallas contiene la latitud y la longitud de cada punto, consecutivamente; los segmentos discontinuos se separan con la línea (*NaN, NaN*).
- 4. Es fácil agregar otras características en el mapa, como señalización de sitios geográficos (use *plotm*), letreros (use *textm*), barras de error de la localizaciones catalogadas, etc.
- 5. El subcatálogo resultante se escribe en un archivo de texto, utilizando *fprintf*; el usuario puede introducir el formato adecuado a sus propósitos. Esta opción es más general que el comando *save* ya que es más portable y legible; esto último, aunque *save* sea usado con la opción *ASCII*.
- 6. *MATLAB* permite aplicar ventanas con código vectorizado. Por ejemplo, el programa (Figura 1) utiliza, en dos líneas inmediatamente después de llamar a *inpolygon*, al vector *in* (salida de *inpolygon*) para filtrar el catálogo de entrada y formar el de salida. Si se necesita el catálogo que no está dentro de la región limitada por el polígono, reemplazamos la línea *temp06=temp05(in>0.;*) por *temp06=temp05(~in>0.;*). Con un código vectorizado podemos también filtrar en magnitudes, profundidades u otras características. Por ejemplo, las dos líneas siguientes filtran en latitud y longitud, columnas 9 y 10 respectivamente del catálogo *temp05*; el subcatálogo resultante se guarda como *temp06*.

```
mwl=(temp05(:,8) < 31.5 & temp05(:,8) > 31.4 & temp05(:,9) > -116.35 & temp05(:,9) < -116.15);
```



**Figura 3.** Resultado de aplicar una ventana poligonal al catálogo de hipocentros ilustrado en la Figura 2. Note que el polígono no es convexo.

temp06=temp05(mwI > 0,:);

7. La documentación de la función *axesm* debe ser estudiada con cuidado. Los parámetros modificados en el listado de la Figura 1 son los que nos parecen importantes destacar.
8. Las líneas de costas y del límite internacional fueron tomadas del sitio web de la National Geophysical Data Center (NGDC) de NOAA.
9. Puede que se tengan problemas de memoria con catálogos muy grandes. Además de aumentar la memoria virtual de la computadora, se puede leer línea a línea, aplicar una ventana y, si el evento está dentro de la ventana, guardar el resultado antes de pasar a la línea siguiente. Este procedimiento es costoso en tiempo pero usa muy poca memoria. Otra opción es reducir el catálogo a otro que tenga sólo los parámetros necesarios para

el propósito del trabajo, por ejemplo, sólo las coordenadas geográficas y la magnitud, si sólo ellas se necesitan para hacer un mapa.

10. La función *inpolygon* es general, es decir, discrimina eficientemente los puntos que están dentro, sobre y fuera de cualquier tipo de polígono, sea o no convexo; la documentación alienta al usuario a trabajar con polígonos con seis coordenadas aleatorias para los vértices, con lo cual resultan polígonos de todos tipos, incluso con lados que se cruzan. El lector interesado puede considerar también el algoritmo que aparece en el paquete ZMAP (Wiener, 2001) que es más simple, corto y con resultados indistinguibles a los que produce *inpolygon*, excepto para polígonos tan distorsionados que no son de uso práctico.

## APLICACIÓN

El programa anterior se aplica al catálogo de eventos sísmicos *temp05.cat*. Este corresponde a la región 5 (región fronteriza de ambas Californias), con 76545 relocalizaciones del catálogo del Sur de California entre 1984 y 2002, hechas por Shearer *et al.* (2003). La Figura 2 contiene todos los eventos localizados dentro del marco de la figura; la Figura 3 entrega un polígono y los epicentros ubicados en su interior. Las relocalizaciones están basadas en un algoritmo que identifica agrupamientos ("clusters") y usa, en un segundo paso, diferencias de tiempos de arribo. El mapa llama la atención por ciertas propiedades de la distribución de la sismicidad. En particular, la doble alineación que se observa a lo largo de algunas fallas en territorio de EEUU ha sido discutida por Shearer *et al.* (2002). Shearer *et al.* (2003) destaca la existencia de alineaciones que indican "un número sorprendente" de fallas conjugadas; vale la pena anotar que el carácter ortogonal de las alineaciones de las réplicas del sismo de Superstition Hill de 1987 ha sido tratado, entre otros, por Hudnut *et al.* (1989). También al respecto, Frez *et al.* (2004) han determinado que la dirección de fractura de varios sismos del norte de Baja California es perpendicular a la de las trazas cartografiadas de las fallas cercanas. Otra característica que llama la atención es la existencia de una agrupación de eventos cerca de la falla Agua Blanca, alrededor del punto (31.45; -116.27). Hemos utilizado nuestro programa para aislar el grupo, el que resulta estar compuesto de 17 sismos que ocurrieron entre 1984 y 1987. Ningunos de los dos catálogos regionales, el del Sur de California y del Noroeste de México, muestran esta aglomeración; ver, por ejemplo, Frez y Frías-Camacho (1999). Los tiempos de arribo correspondientes pueden obtenerse de las bases de datos de la Red del Noroeste de México (RESNOM) y del Southern California Earthquake Center (SCEC). Los tiempos de RESNOM no son compatibles con las localizaciones en la agrupación señalada. Una relocalización que utiliza datos de las dos redes regionales, *Hypo71* (Lee y Lahr, 1975) y la estructura de Nava y Brune (1982) coloca los 17 eventos en otro agrupamiento, esta vez ubicado cerca del punto (31.7 - 115.95).

La Figura 2 maneja 76545 eventos con 23 columnas. Con una computadora personal Pentium 4, 256 Mb de memoria de trabajo y una memoria virtual sin un máximo declarado, se necesitan alrededor de dos minutos para formar la Figura 1 y algunos segundos para la Figura 3. Ello se explica porque la mayor parte del tiempo de ejecución se gasta en escalar los símbolos de los epicentros tomando en cuenta la magnitud.

## CONCLUSIONES

Entregamos un programa que selecciona sismos cuyos epicentros están dentro de un polígono cuyos vértices están marcados por coordenadas geográficas en la superficie de la Tierra; además, hace el mapa que incluye los sismos seleccionados. El programa escrito en *MATLAB*, es compacto, fácil de comprender y debe ayudar a escribir programas semejantes. La ventaja con respecto a utilizar un buen paquete como ZMAP (Wiener, 2001), con más de 50000 líneas de código, es obvia. Un programa relativamente pequeño y

con control personal es simplemente más fácil manejar; entre otras cosas, puede fácilmente ser a) puesto al día con respecto a las versiones de *MATLAB*, b) ampliado y modificado para propósitos específicos de la investigación del usuario y c) transportable. Dada la popularidad que ha alcanzado *MATLAB* en los centros de educación superior, creo que su acceso no es una limitación para estudiantes de Ciencias de la Tierra. El caso de aplicación que entregamos demuestra que se pueden manipular catálogos relativamente grandes con computadoras modernas. Si ello no es así por limitaciones de la memoria de trabajo de la computadora, además de un aumento de la memoria virtual, la alternativa es reducir el tamaño del catálogo por eliminación de columnas que no se utilizan; otra es modificar el programa de tal modo que realice el trabajo, incluyendo leer y guardar resultados, para cada línea del catálogo. De este modo, no se necesita mantener todo el catálogo en memoria.

Hemos aprovechado el caso de aplicación para discutir brevemente algunas características de la sismicidad que se muestra en la Figura 2. Una, no comentada en la literatura, es la existencia de un agrupamiento o nido de sismos en la falla Agua Blanca, que se puede fácilmente identificar con nuestro programa. La relocalización de los hipocentros con los tiempos de arribo de RESNOM indica que es un artefacto del método, probablemente producto de la lejanía de las estaciones receptoras de la Red del Sur de California y el agrupamiento, que es real. Concluimos que la falla Agua Blanca no tiene una clara sismicidad regional asociada ( $M_L > 2.1$ ); tal como se ha señalado, por ejemplo, en Frez y Frías-Camacho (1998).

## AGRADECIMIENTOS.

Agradezco al Dr. P. Shearer por darme acceso a su catálogo; igualmente, a RESNOM, SCEC y la Red del Sur de California por utilizar sus bases de datos. Los comentarios en el arbitraje nos fueron de utilidad para mejorar la presentación del artículo.

## REFERENCIAS

- Frez, J. y V.M. Frías-Camacho, 1998. Mapas anuales de sismicidad para la región fronteriza de ambas Californias, *GEOS*, 18, 112-130.
- Frez, J., F.A. Nava and J. Acosta, 2004. Source rupture plane determination from Doppler effect for small earthquakes recorded by local networks, *Bulletin of the Seismological Society of America* (sometido).
- Hudnut, K.W., L. Seeber and J. Pacheco, 1989. Cross-fault triggering in the November 1987 Superstition Hills earthquake sequence, *Southern California, Geophysical Research Letters*, 16, 199-202.
- Lee, W.K.H. and S.W. Stewart, 1981. *Principles and Applications of Microearthquake Networks*, Academic Press, Londres, Inglaterra.
- Lee, W.K.H. and J.C. Lahr, 1975. *HYP071 (revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes*, U.S. Geological Survey, Open-File Rep. (U.S.) 75-311.



- Nava, A. and J.N. Brune, 1982. An earthquake-explosion reversed refraction line in the Peninsular Ranges of Southern California and Baja California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72, 1195-1206.
- Pearson, F., 1990. *Map Projections: Theory and Applications*, CRC Press, Florida, E.U.A.
- Sedgewick, R., 1992. *Algorithms in C++*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, E.U.A.
- Sedgewick, R., 1995. *Algoritmos en C++*, Addison-Wesley/Días de Santos, Wilmington, Delaware, E.U.A.
- Shearer, P.M., 2002. Parallel fault strands at 9-km depth resolved on the Imperial fault, Southern California, *Geophysical Research Letters*, 29, doi: 10.129.2002/2002GL015302.
- Shearer, P., E. Hauksson, G. Lin and D. Kilb, 2003. Comprehensive waveform cross-correlation of southern California seismograms: Part 2. Events locations obtained using cluster analysis, *EOS Trans. AGU*, 84(46), Fall Meeting. Suppl., Abstract S21D-0326.
- Young, T.L. and M.L. Van Woert, 1992. *Plot88, Software Library Reference Manual*, Plotworks Inc., Ramona, California, E.U.A.
- Wiener, S., 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP, *Seismological Research Letters*, 72, 273-382.

Recepción del manuscrito: 12 de febrero, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 25 de junio, 2004

Aceptación del manuscrito: 10 de agosto, 2004

## ECUACIONES QUE ESTIMAN LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO DE LA LLUVIA

Domitilo Pereyra-Díaz, José Antonio A. Pérez-Sesma y Leonorilda Gómez-Romero  
 Carrera de Ciencias Atmosféricas de la Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana  
 Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, 91000, México  
 E-mail: dpereyra@uv.mx

### RESUMEN

En este estudio se presentan algunos modelos matemáticos no lineales que estiman las curvas intensidad-duración-período de retorno de la lluvia (IDT), los cuales se ajustaron a registros pluviométricos de la ciudad de Xalapa, Veracruz. Para esto se utilizaron datos de precipitación de las tormentas más intensas de cada año, registradas en el observatorio climatológico del Servicio Meteorológico Nacional (1927-1998) y en la estación climatológica de la Zona Universitaria (1999-2002). Conocida la intensidad de la lluvia,  $i$ , para la duración,  $d$ , y el período de retorno correspondiente,  $T$ , se resolvieron las ecuaciones de cada modelo utilizando el método de aproximaciones sucesivas de Quasi-Newton, en el módulo de estimación no-lineal del software STATISTICA v.5.5. También se realizó el análisis de residuales y se calculó el error estándar de estimación. Lo anterior mostró que el modelo de Koutsoyiannis *et al.* (1998) es el que mejor explica la intensidad de la lluvia, con base en la duración de la tormenta y al período de retorno asignado, con  $R^2 = 0.988$  y error estándar de estimación  $R_e = 2.7$  mm/hr, seguido por Chow *et al.* (1994) y Sherman (1931) con  $R^2 = 0.934$  y  $R_e = 6.5$  mm/hr ambos, y Bernard (1932) con  $R^2 = 0.903$  y  $R_e = 7.8$  mm/hr. Por lo anterior se recomienda utilizar, como primera opción, el de Koutsoyiannis *et al.* (1998) y como segunda opción los modelos de Chow *et al.* (1994) y Sherman (1931) si se cuenta con herramienta computacional y, por su sencillez, se recomienda el de Bernard (1932), que genera resultados aceptables.

Palabras clave: Retorno de lluvia, modelos matemáticos, registros pluviométricos.

### ABSTRACT

Some non-linear mathematical models that estimate the rain intensity-duration-return period curves (IDT), fitted to pluviometric records of the city of Xalapa, Veracruz, are presented. Precipitation data of each year's most intense storms registered by the climatologic observatory of the Servicio Meteorológico Nacional (1927-1998) and by the climatological station in the Zona Universitaria (1999-2002) were used. Given the rain intensity  $i$ , the equations for each model were solved for the duration  $d$ , and for the corresponding return period  $T$ , by a Quasi-Newton method of successive approximations, using the non-linear estimation module of the STATISTICA v.5.5 software. A residuals analysis was also made, and the estimation standard error was calculated. The results showed that the Koutsoyiannis *et al.* (1998) model is the one that best explains the rain intensity, based on the storm duration and the assigned return period, with  $R^2 = 0.988$  and estimation standard error  $R_e = 2.7$  mm/hr, followed by Chow *et al.* (1994) and Sherman (1931), with  $R^2 = 0.934$  and  $R_e = 6.5$  mm/hr ambos, and by Bernard (1932) with  $R^2 = 0.903$  and  $R_e = 7.8$  mm/hr. Thus, it is recommended to use, as a first option the Koutsoyiannis *et al.* (1998) model and, as a second option, the Chow *et al.* (1994) and Sherman (1931) models if one has the computational tools. The Bernard (1932) model is recommended because it is very simple but gives acceptable results.

Keywords: Rain return, mathematical models, pluviometric records.

### INTRODUCCIÓN

Antes de entrar en materia es conveniente definir que es la intensidad de la lluvia. La intensidad de la lluvia se define como la cantidad de agua de lluvia que cae, en un punto, por unidad de

tiempo, y ésta es inversamente proporcional a la duración de la tormenta. La duración de la tormenta es el tiempo que transcurre desde que inicia la precipitación de la tormenta hasta que ésta cesa.

Willems (2000) define las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) como la relación que existe entre la intensidad de precipitación media y la frecuencia de ocurrencia (inverso del período de retorno); estas curvas son herramientas ampliamente utilizadas en

ingeniería para fines de planeación, diseño y operación de los proyectos hidráulicos, así como para la protección de obras de ingeniería contra avenidas máximas (Koutsoyiannis *et al.*, 1998). Según Smith (1993) el análisis de frecuencia de la precipitación es usado ampliamente para diseño de obras de ingeniería que controlan los escurrimientos generados por las tormentas. Esto incluye sistemas de alcantarillado municipales, vertedores, puentes y sistemas de drenaje agrícola. Willems (2000) menciona también que la relación intensidad-duración-frecuencia de precipitaciones extremas es ampliamente usada para estimar las avenidas de diseño en los sitios donde se construirán las obras hidráulicas.

El planteamiento de las primeras relaciones matemáticas data desde el inicio de la década de los treinta, del siglo pasado; Sherman (1931) y Bernard (1932). Desde entonces varios conjuntos de relaciones han sido desarrollados para varias partes del mundo. Desde la década de los sesenta, la distribución geográfica de la relación IDF ha sido estudiada en varios países desarrollados y algunos mapas han sido construidos para conocer la intensidad de la lluvia o la lámina de lluvia [esta última se define como la cantidad de lluvia acumulada durante una tormenta y se mide generalmente en milímetros] para varios períodos de retorno y duración. Según Koutsoyiannis *et al.* (1998) en Estados Unidos de América los mapas han sido desarrollados desde 1961 por el US Weather Bureau, posteriormente por la NOAA para el Oeste, Este y Centro. Estos mapas han sido reproducidos en algunos manuales y libros de texto de hidrología como en Chow (1964), Linsley *et al.* (1977), Viessman *et al.* (1989), Ponce (1989), Maidment (1993) y Chow *et al.* (1994). Koutsoyiannis *et al.* (1998) también menciona que en el Reino Unido e Irlanda los mapas han sido realizados por el instituto de Hidrología y que mapas similares han sido construidos para Australia, India, SWA-Namibia e Italia.

Genovez y Pegoraro (2001) realizaron un estudio validando y adecuando las ecuaciones de Bell y Chen, de lluvias intensas generalizadas, con registros pluviográficos de 23 ciudades del estado de Sao Pablo, Brasil. En ambos casos se obtuvieron resultados satisfactorios.

Para la República Mexicana se sabe, por comunicación personal, que existe un mapa de curvas IDT elaborado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes pero no se conoce la metodología; en la literatura se encuentran estudios como el de Campos (1990) que obtuvo las curvas IDT para Cazadero, Zacatecas, aplicando las ecuaciones de Bell y Chen, de lluvias intensas generalizadas; también existe el de Pereyra y Bando (2002) que, en un estudio preliminar, ajustaron las ecuaciones de Sherman (1931), Wenzel (modificada por Chow *et al.*, 1994) y Koutsoyiannis *et al.* (1998) a las intensidades de 11 tormentas severas, registradas durante el período 1999-2002, en la estación climatológica automática ubicada en el edificio que alberga la carrera de Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana, zona universitaria de Xalapa, mostró que el mejor modelo fue el de Koutsoyiannis con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.952$ .

Debido a la escasez de registros pluviométricos para duraciones pequeñas (del orden de minutos) en la República Mexicana, en este estudio se plantean los siguientes objetivos: a) presentar los

diferentes modelos matemáticos que se han utilizado, a nivel mundial, para estimar las curvas IDT, b) ajustar los modelos a los registros de precipitación de tormentas severas ocurridas en la ciudad de Xalapa, Veracruz, en el período 1927-2002, y c) recomendar el más viable y fácil de aplicar para la República Mexicana. El mejor modelo propuesto en c) puede ser utilizado en la construcción del mapa de curvas IDT para la República Mexicana, que es tan importante para el diseño hidráulico.

## MODELOS MATEMÁTICOS PARA LAS CURVAS IDT

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia también pueden expresarse como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de la lluvia de diseño, en una gráfica (Chow *et al.*, 1994). A continuación se presentan los modelos matemáticos más conocidos, a nivel mundial, que se utilizan para estimar las curvas IDT.

### A) ECUACIONES QUE RELACIONAN LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA CON LA DURACIÓN DE LA TORMENTA

Una ecuación que relaciona la lámina de lluvia, generada por una tormenta, con su duración, es:

$$h = cd^n \quad (1)$$

donde  $h$  es la lámina de lluvia registrada, en centímetros,  $d$  es la duración de la tormenta, en horas,  $c$  es un coeficiente y  $n$  es un exponente positivo menor que uno; típicamente  $n$  varía entre 0.2 y 0.5 (Ponce, 1989).

Se sabe que la intensidad y duración de una tormenta están inversamente relacionadas, por lo que de la ecuación (1) se puede obtener la intensidad de la lluvia diferenciando la lámina de lluvia con respecto al tiempo,

$$\frac{dh}{dt} = i = cnd^{n-1} \quad (2)$$

donde  $i$  es la intensidad de la tormenta, simplificando la ecuación (2) se obtiene

$$i = \frac{\lambda}{d^n} \quad (3)$$

En este caso  $\lambda = cn$  y  $\eta = 1-n$ . Se sabe que  $n$  es menor que 1, por lo que  $\eta$  también es menor que 1.

Otro modelo intensidad-duración es el descrito por la ecuación (4), (Ponce, 1989),

$$i = \frac{\lambda}{d + \theta} \quad (4)$$

donde  $\lambda$  y  $\theta$  son parámetros que se determinan por análisis de regresión. Un modelo general que combina las ecuaciones (3) y (4) es el siguiente:

$$i = \frac{\lambda}{(d + \theta)^\eta} \quad (5)$$

Para  $\theta = 0$ , la ecuación (5) se reduce a la ecuación (3); para  $\eta = 1$  la ecuación (5) se reduce a la ecuación (4).

## B) ECUACIONES QUE RELACIONAN LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA DE UNA TORMENTA CON LA DURACIÓN Y FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE ÉSTA

1. *Modelo propuesto por Bernard (1932)*. Este modelo relaciona simultáneamente la intensidad, la duración y el período de retorno de la lluvia en una familia de curvas (Ec. 6). Bernard supuso que si el parámetro  $I$  de las ecuaciones (3), (4) y (5) está relacionado con el período de retorno, la ecuación (3) se podía escribir de la siguiente manera:

$$i = \frac{\lambda T^\psi}{d^\eta} \quad (6)$$

donde  $\psi$  es un parámetro adimensional constante e independiente de la duración.

2. *Modelo propuesto por Sherman (1931)* para la ciudad de Boston, Massachusetts, USA (Raudkivi, 1979):

$$i = \frac{\lambda T^\psi}{(d + \theta)^\eta} \quad (7)$$

3. *Modelo propuesto por Wenzel (1982)*. Wenzel propuso y estimó los coeficientes  $\lambda$ ,  $\eta$ , y  $\theta$  de la ecuación (8) para algunas ciudades de los Estados Unidos:

$$i = \frac{\lambda}{d^\eta + \theta} \quad (8)$$

4. *Modelo propuesto por Chow et al. (1994)*, que consiste en incluir el período de retorno  $T$  a la ecuación propuesta por Wenzel (1982),

$$i = \frac{\lambda T^\psi}{d^\eta + \theta} \quad (9)$$

5. *Modelo propuesto por Koutsoyiannis et al. (1998)*. Este modelo fue ajustado para Atenas, Grecia, y considera que la variable intensidad  $i$ , tiene una distribución doble exponencial o Gumbel,

con el parámetro adimensional  $\psi$  constante e independiente de la duración, y el parámetro de escala varía con la duración  $d$ , como  $1/(d + \theta)^\eta$ . La ecuación es:

$$i = \lambda \left\{ \frac{\psi - \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(d + \theta)^\eta} \right\} \quad (10)$$

donde  $i$  es la intensidad de la lluvia en mm/h,  $T$  es el período de retorno en años,  $d$  es la duración de la tormenta en horas y  $\lambda$ ,  $\psi$ ,  $\eta$  y  $\theta$  son parámetros que varían con el lugar y el período de retorno, cuyos valores se estiman por aproximaciones sucesivas cuando se ajusta cada modelo.

## METODOLOGÍA PARA AJUSTAR LAS ECUACIONES IDT

Para ajustar las ecuaciones IDT presentadas anteriormente, se utilizaron los registros pluviográficos correspondientes al periodo 1927-1998 del observatorio climatológico de la ciudad de Xalapa, Veracruz del Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N.) y los del periodo 1999-2002 de la estación climatológica automática (marca Davis) de la Universidad Veracruzana ubicada en la zona universitaria. Se eligieron 53 tormentas severas, considerando como tormenta severa aquella que generó precipitaciones de al menos 7 mm en 10 minutos y causó fuertes escurrimientos en las calles, e inundaciones en algunas partes bajas de la ciudad.

Las precipitaciones generadas por las tormentas severas, registradas durante el periodo 1927-2002, que se utilizaron en este estudio se muestran en la tabla 1. Los años sin registro de tormenta severa se deben a la falta de información o a su dudosa precisión al leer los pluviogramas.

En la figura 1 se muestra, como ejemplo, el hietograma de la tormenta severa más intensa del periodo 1927-2002, ocurrida el día 26 de marzo del año 1996, en el cual se observa que la tormenta fue aumentando su intensidad hasta alcanzar los 30 mm en 10 minutos. Esta tormenta se originó por el paso del frente N° 54, acompañado de una masa de aire ártico, que ocasionó nublados de gran desarrollo vertical, lo que originó precipitaciones intensas. Cabe comentar que esta tormenta tiene el record de precipitación en 24 horas (119.4 mm) para el mes de marzo.

El primer paso para ajustar los modelos (ecuaciones 3 a 10) fue transformar las precipitaciones máximas registradas (tabla 1) para las duraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 y 120 minutos en intensidades (mm/h; tabla 2).

El segundo paso fue ordenar las intensidades máximas de cada duración, de mayor a menor, para asignarle el período de retorno,  $T$ , correspondiente (tabla 3).



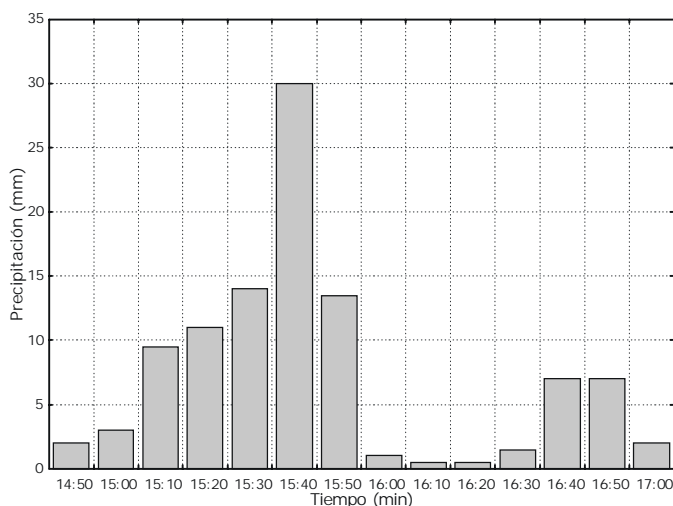


Figura 1. Histograma de la tormenta ocurrida el 26 de marzo de 1996 en la ciudad de Xalapa, Veracruz.

Con los valores de  $i$ ,  $d$  y  $T$  de la tabla 3 se procedió a ajustar cada uno de los modelos presentados anteriormente (ecs. 3 a 10). Debido a que las ecuaciones que describen cada modelo son no-lineales e hiperbólicas, para resolverlas se utilizó el método de aproximaciones sucesivas de Quasi-Newton (Nocedal y Wright, 2000; Fletcher, 2000), esto en el módulo de estimación no-lineal del software STATISTICA v.5.5, Statsoft (1999). Luego del ajuste se hizo el análisis de residuales ( $R_e =$  intensidad observada - intensidad estimada por el modelo) con el propósito de verificar que éstos se distribuyeran aleatoriamente alrededor del cero. Finalmente, se calculó el error estándar de estimación que se define como la raíz cuadrada de la varianza residual (Haber y Runyon, 1973).

## RESULTADOS

La tabla 4 muestra los parámetros de cada modelo, resultado del ajuste a las precipitaciones extremas de la ciudad de Xalapa, registradas en el periodo 1927-2002, así, como el coeficiente de determinación  $R^2$  y el error estándar de estimación,  $R_e$ .

La tabla 4 muestra que el modelo que mejor se ajustó a las precipitaciones de las tormentas severas registradas en la ciudad de Xalapa, fue el de Koutsoyiannis *et al.* (1998) con un  $R^2 = 0.988$ , es decir que éste explica 98.8% de los casos (Figura 2). En segundo lugar están el de Chow *et al.* (1994) y Sherman (1931) con un  $R^2 = 0.934$  (Figuras 3 y 4, respectivamente), seguido por Bernard (1932) con un  $R^2 = 0.904$  (Figura 5); estos tres últimos explican más del 90% de los casos. En cuanto al modelo de Wenzel (ec.8) y los descritos por las ecuaciones 3, 4 y 5 su coeficiente de determinación varió entre 0.473 y 0.493, es decir que explican menos del 50% de los casos.

Finalmente, las figuras 6 a 9 muestran las curvas IDF ajustadas a las precipitaciones de la ciudad de Xalapa durante el periodo 1927-2002.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De los modelos ajustados en este estudio, resultó que el de Koutsoyiannis *et al.* (1998) es el mejor con  $R^2 = 0.988$  y error estándar de estimación de  $R_e = 2.7$  mm/hr. Este resultado es congruente con el obtenido por Koutsoyiannis *et al.* (1998) para la ciudad de Atenas, Grecia, cuando compararon su ecuación con la de Sherman (1931). Este modelo puede ser utilizado si se cuenta con una PC que tenga un paquete estadístico que resuelva ecuaciones no-lineales.

Además del modelo de Koutsoyiannis *et al.* (1998) los presentados por Sherman (1931) y Chow *et al.* (1994) mostraron un buen ajuste,  $R^2 = 0.934$ , y un error estándar de estimación de  $R_e = 6.5$  mm/hr, por lo que se recomienda en el cálculo de las curvas IDT. Para su aplicación se requiere la misma herramienta computacional que en el modelo de Koutsoyiannis *et al.* (1998).

Por último se recomienda el modelo de Bernard (1932) por su sencillez, ya que no es necesario utilizar la herramienta computacional recomendada en los otros. Este modelo presentó un  $R^2 = 0.903$ , y un error estándar de estimación de  $R_e = 7.8$  mm/hr. Cabe aclarar que dicho modelo sobreestima las intensidades para duraciones pequeñas entre 10 y 20 minutos.

En cuanto al modelo de Wenzel (Ec. 8) y los descritos por las ecuaciones (3), (4) y (5) se puede comentar que no son recomendables, debido a que explican menos del 50% de los casos (tabla 4).

Los modelos ajustados en este estudio (Ecs. 6, 8, 9 y 10) pueden ser utilizados en el diseño urbano, con cierta reserva, para otra ciudad donde se presenten lluvias convectivas y que tenga características climáticas similares a la ciudad de Xalapa, Veracruz, si es que no se cuenta con registros continuos de precipitación para validarlos.

Como se mencionó anteriormente, el presente estudio muestra la necesidad de contar con registros continuos de precipitación, para las principales ciudades del país, con el fin de utilizar las precipitaciones extremas en el diseño urbano.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por haber proporcionado la información pluviométrica de las tormentas más intensas registradas en el observatorio climatológico de la ciudad de Xalapa, Veracruz, a la DEPI-UNAM por haber permitido el acceso a su biblioteca para realizar la investigación bibliográfica, así como a los dos árbitros, que revisaron el texto, por sus valiosas observaciones, en particular al Dr. Ernesto S. Caetano Neto que se identificó en su evaluación.

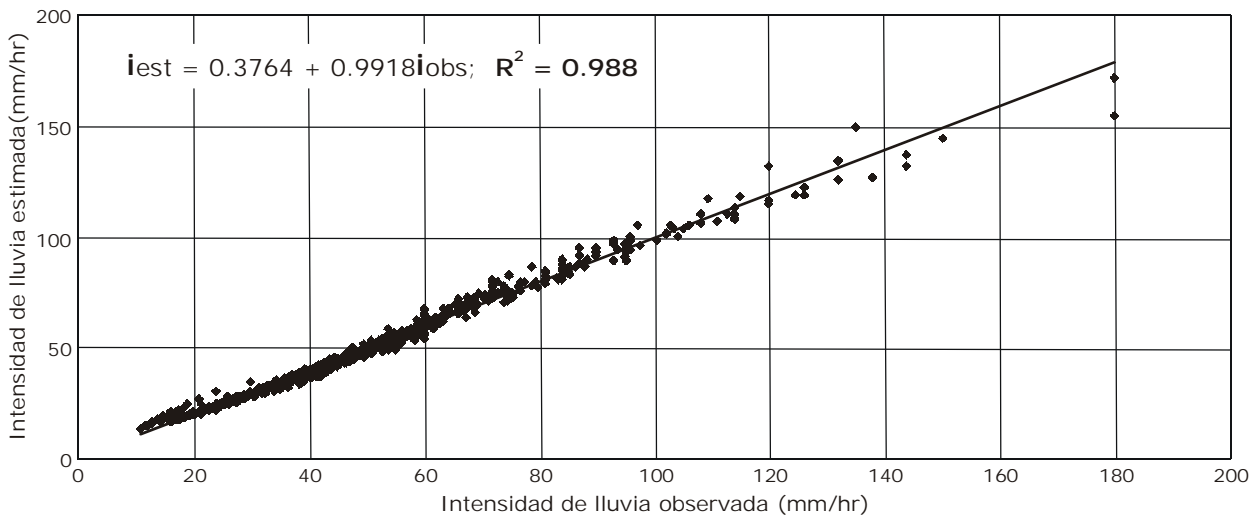


Figura 2. Correlación entre intensidades observadas y estimadas por la ecuación de Koutsoyiannis et al. (1998) para la ciudad de Xalapa, durante el período 1927-2002.

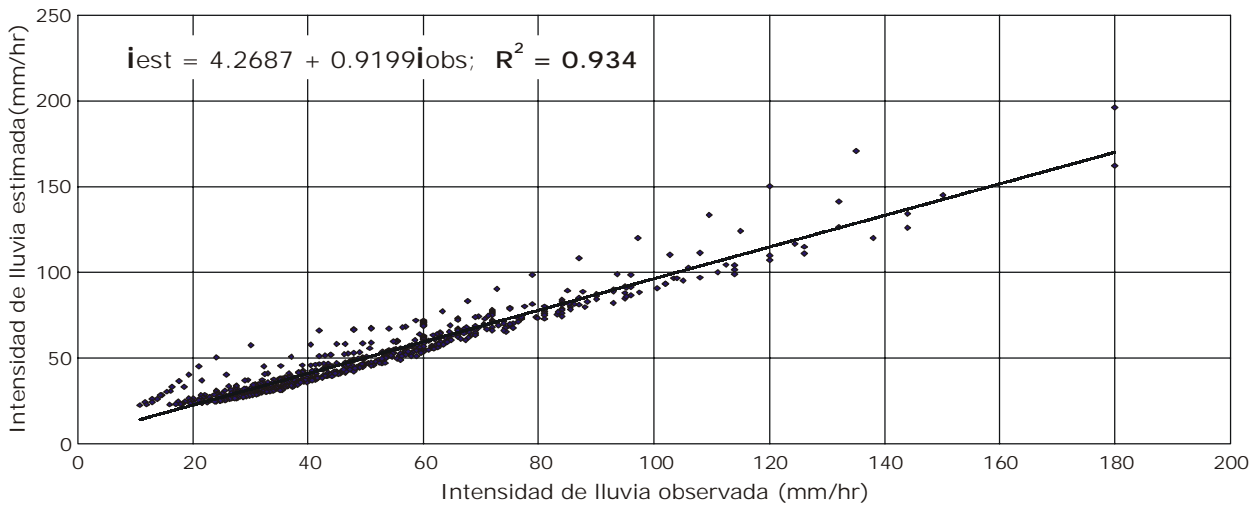


Figura 3. Correlación entre intensidades observadas y estimadas por la ecuación de Chow et al. (1994) para la ciudad de Xalapa, durante el período 1927-2002.

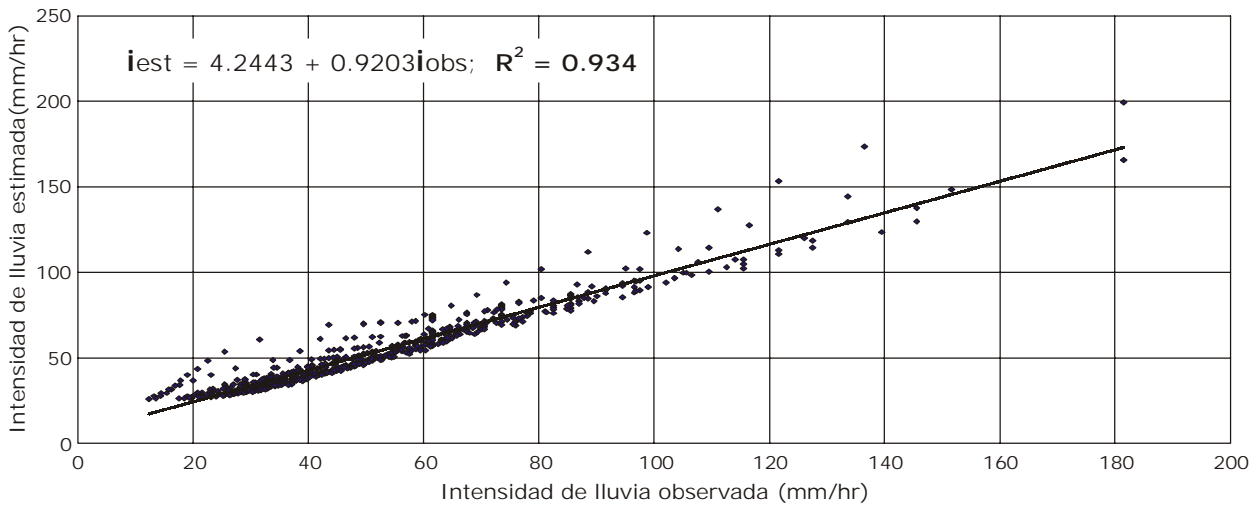


Figura 4. Correlación entre intensidades observadas y estimadas por la ecuación de Sherman (1931) para la ciudad de Xalapa, durante el período 1927-2002.

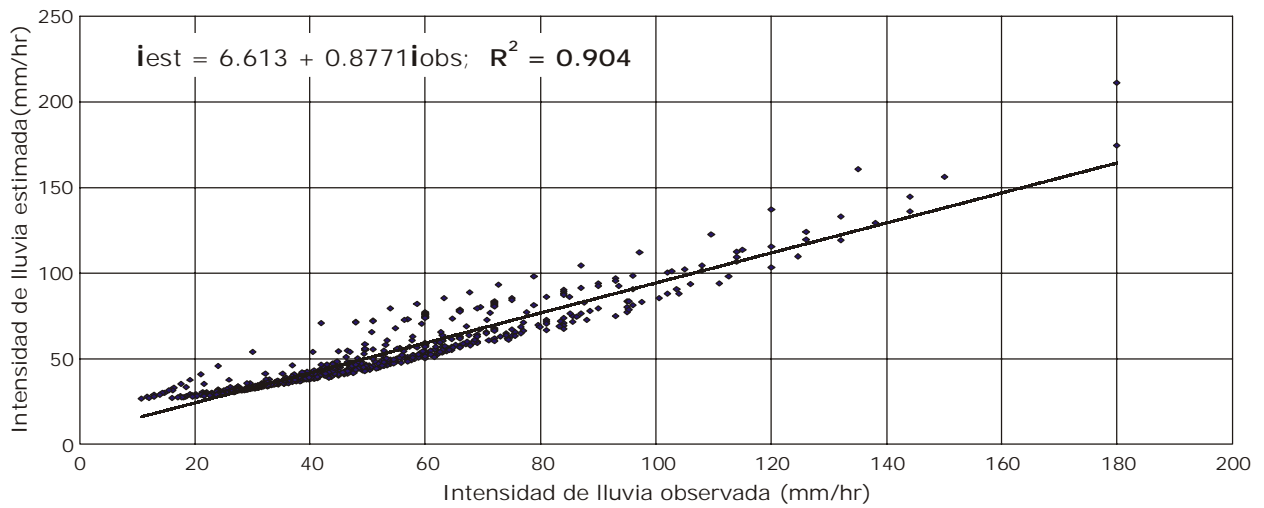


Figura 5. Correlación entre intensidades observadas y estimadas por la ecuación de Bernard (1932) para la ciudad de Xalapa, durante el período 1927-2002.

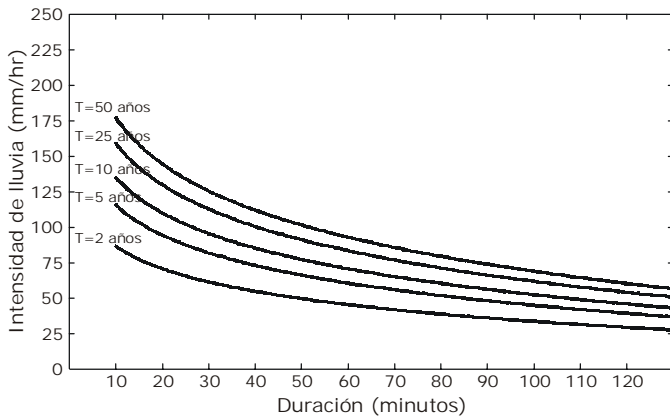


Figura 6. Curvas IDT generadas a partir del modelo de Koutsoyiannis et al. (1998) para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

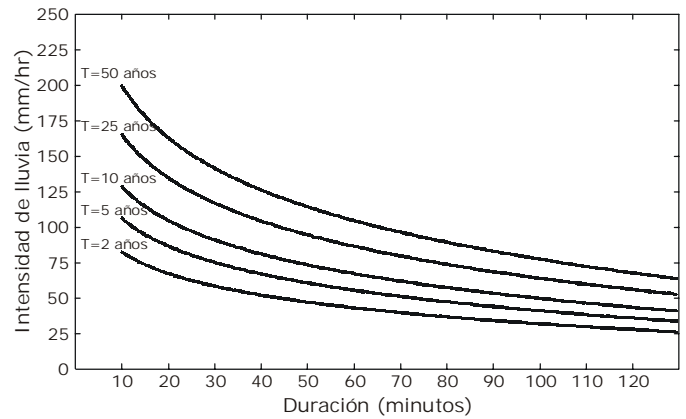


Figura 8. Curvas IDT generadas a partir del modelo de Sherman (1931) para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

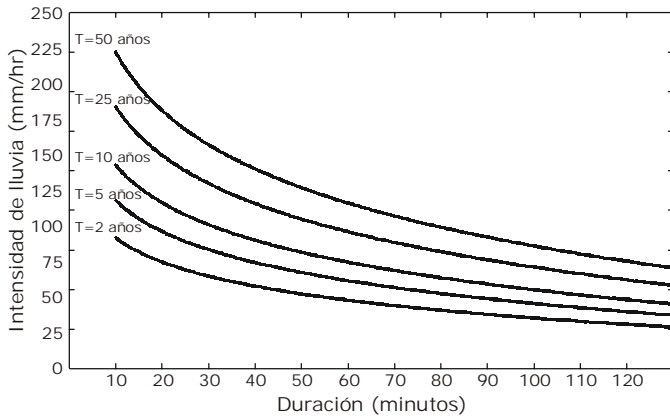


Figura 7. Curvas IDT generadas a partir del modelo de Chow et al. (1994) para la ciudad de Xalapa, Veracruz.

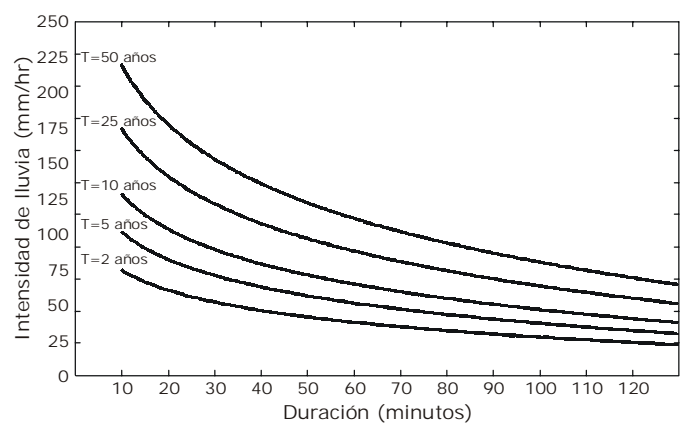


Figura 9. Curvas IDT generadas a partir del modelo de Bernard (1932) para la ciudad de Xalapa, Ver.

## REFERENCIAS

- Bernard, M.M., 1932. Formulas for rainfall intensities of long durations. Trans. ASCE, vol. 96, p. 592-624.
- Campos, D.F., 1964. Procedimiento para obtener curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos. Ingeniería Hidráulica en México, vol. V, núm. 2, 1990, p. 39-52.
- Chow, V.T., 1964. Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W., 1994. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill. Interamericana, S. A. Colombia, 584 pp.
- Fletcher, R., 2000. Practical Methods of Optimization. John Wiley y Sons LTD, Great Britain, 436pp.
- Genovez, A.M. y Pegoraro, R. de C.F., 2001. Análisis y evaluación de las ecuaciones de lluvias intensas generalizadas, Ingeniería Hidráulica en México, vol. XVI, núm. 3, p. 15-23.
- Haber, A. y Runyon, R.P., 1973. Estadística General. Fondo Educativo Interamericano, S.A., USA, 371 pp.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D. and Manetas, A., 1998. A Mathematical Framework for Studying Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationships. Journal of Hydrology, vol. 206, p. 118-135.
- Linsley, Jr., R.K., Kohler, M.A. y Paulhus J.L., 1977. Hidrología para ingenieros, McGraw-Hill, Inc. segunda edición, 386 pp.
- Maidment, D.R., 1993. Handbook of Hydrology, Ch. III: Precipitation, McGraw-Hill, Inc., 1<sup>st</sup> Ed., USA, p. 1-47.
- Nocedal, J. and Wright, J., 2000. Springer Series in Operations Research: Numerical Optimization. Springer-Verlag New York, Inc, 636 pp.
- Pereyra, D. y Bando, U., 2002. Aplicación de tres ecuaciones para estimar las curvas intensidad de la lluvia-duración-período de retorno de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México. XII Congreso Nacional de Meteorología, del 23 al 26 de octubre, Cancún, Quintana Roo, México.
- Ponce, V.M., 1989. Engineering Hydrology. Principles and Practices, Prentice Hall, primera edición. New Jersey, USA, 640 pp.
- Raudkivi, A.J., 1979. Hydrology. An Advanced Introduction to Hydrological Processes and Modeling, Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, England, 479 pp.
- Sherman, C.W., 1931. Frequency and intensity of excessive rainfall at Boston, Mass. Trans. Am. S.C.E., vol. 95, p. 951-960.
- Smith, J.A., 1993. Handbook of Hydrology, capítulo III, Precipitation, McGraw-Hill, Inc. primera edición, USA, p. 1-47.
- Statsoft, Inc., 1999. Statistica for windows, computer program manual, 99 edition, Tulso OK. USA.
- Viessman, Jr., W., Lewis, G. L., and Knapp, J. W., 1989. Introduction to Hydrology, Harper y Row, tercera edición., New York, 704 pp.
- Wenzel, H.G., 1982. Rainfall for urban stormwater design, in Urban Storm Water Hydrology. Water Resources Monograph 7, American Geophysical Union. Washington, D.C., USA.
- Willems, P., 2000. Compound intensity/duration/frequency-relationships of extreme precipitation for two season and two storm types. Journal of Hydrology, vol. 233, p.189-205.



Tabla 1. Precipitación máxima, por intervalos de tiempo, de las tormentas severas registradas en la ciudad de Xalapa, Veracruz. Período 1927-2002.

Fecha	Duración (min)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
16-06-27	11.0	21.5	30.5	36.5	42.0	47.5	52.5	57.5	62.0	66.5	70.5	74.0
07-07-28	14.0	23.5	31.0	38.0	44.5	49.5	54.0	57.0	59.0	60.5	62.0	63.0
05-06-29	10.0	19.5	29.0	38.0	44.5	50.5	56.5	62.0	66.0	68.0	70.0	71.5
18-04-30	15.0	28.0	37.0	46.0	54.0	61.0	67.5	74.0	77.0	80.0	83.0	85.0
22-05-31	14.0	27.0	33.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
03-07-33	11.0	21.0	30.0	33.5	34.5	35.5	35.5	35.5	35.5	35.5	35.5	35.5
11-07-34	19.0	33.5	47.5	57.0	66.5	75.0	82.5	89.5	94.0	96.5	98.0	99.0
22-06-35	08.5	16.5	24.0	31.0	36.5	41.5	44.5	47.5	49.5	51.5	53.5	55.0
11-07-36	15.5	25.5	32.0	38.0	43.0	47.5	50.5	52.5	54.5	55.5	56.5	57.5
03-08-37	12.0	23.5	33.5	43.5	53.5	63.0	72.0	79.5	84.5	88.0	91.0	94.0
20-06-38	16.0	28.5	35.5	42.5	48.5	51.0	53.5	55.0	56.0	56.5	57.0	57.5
07-06-39	23.0	32.5	42.0	49.5	56.5	63.0	67.5	70.5	73.5	75.5	76.5	77.5
29-07-43	14.5	23.0	30.0	35.5	41.0	46.0	51.0	54.5	57.5	59.0	60.0	60.5
10-06-44	08.0	13.5	18.5	23.5	27.0	29.5	32.0	34.0	36.0	38.0	39.5	40.5
21-04-46	24.0	34.0	42.0	48.0	49.0	50.0	50.5	51.0	51.5	52.0	52.5	52.5
13-06-47	12.0	22.0	29.5	36.0	42.0	47.5	51.0	53.5	55.5	57.0	58.5	59.5
05-03-48	08.0	15.0	22.0	28.5	32.5	36.5	39.5	42.0	43.5	45.0	46.5	48.0
05-08-49	18.0	29.0	36.0	41.0	45.5	49.5	52.5	55.0	57.0	59.0	61.0	63.0
01-06-50	09.5	17.0	22.0	27.0	30.5	34.0	37.0	38.5	40.0	41.0	42.0	43.0
25-05-52	30.0	44.0	54.0	63.5	73.0	77.0	80.5	83.5	86.0	87.5	88.5	89.5
24-06-53	12.0	22.0	28.0	32.0	36.0	40.0	44.0	47.5	48.0	48.5	49.0	49.5
11-06-54	21.0	40.0	46.5	51.0	52.5	53.5	54.0	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5
13-07-56	07.0	10.0	12.0	14.0	16.0	17.5	19.0	20.5	22.0	23.0	23.5	24.0
11-06-58	12.0	24.0	34.0	43.0	50.0	56.0	60.5	63.5	66.5	69.5	72.5	74.5
08-06-59	21.0	41.5	53.0	63.5	71.0	77.5	81.0	84.0	86.5	88.5	90.5	92.5
20-06-61	10.0	20.0	27.0	31.5	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0
08-07-62	10.0	20.0	30.0	40.0	48.0	53.0	58.0	63.0	67.0	69.0	70.0	71.0
11-08-63	12.5	22.0	28.5	33.0	35.5	37.0	38.5	40.0	41.5	43.0	44.0	45.0
07-06-64	10.0	20.0	26.5	31.5	36.0	39.0	41.5	43.5	45.5	47.5	49.5	51.0
03-10-67	12.5	22.5	27.5	32.5	37.0	40.5	44.0	47.5	50.5	53.5	56.0	58.5
14-05-70	15.5	30.0	44.0	54.0	63.0	68.5	74.0	78.5	80.0	80.5	81.0	81.5
18-04-73	13.5	26.5	36.5	43.0	49.0	52.5	56.0	59.0	60.5	61.5	62.0	62.0
20-06-75	19.0	37.0	52.0	64.0	69.5	74.0	78.5	82.5	84.0	85.0	85.5	86.0
22-09-78	14.0	24.0	33.0	41.5	49.5	54.5	58.0	61.0	64.0	66.5	68.5	70.0
01-06-80	14.0	24.0	33.0	41.0	47.5	52.5	57.5	62.5	65.0	67.0	69.0	71.0
24-04-81	25.0	45.0	60.0	73.0	81.0	87.0	92.0	97.0	101.5	105.5	107.5	108.0
21-04-82	20.0	32.0	42.0	50.0	57.0	60.0	61.0	62.0	62.5	63.0	63.0	63.0
22-06-83	15.0	27.0	37.0	42.0	44.0	45.0	45.5	46.0	46.5	47.0	47.5	47.5
14-05-84	10.0	20.0	29.0	32.0	34.0	35.0	36.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5
18-06-85	10.0	20.0	21.0	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
02-05-86	17.0	27.0	34.5	41.0	43.5	45.0	46.5	48.0	49.0	50.0	50.0	50.0
21-08-87	08.5	15.5	21.5	27.5	32.5	35.0	37.0	39.0	40.5	41.5	42.5	43.0
09-06-88	10.0	20.0	27.0	30.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
24-05-90	24.0	37.5	47.5	57.5	62.0	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
05-02-91	12.0	21.0	27.0	33.0	38.5	43.5	47.5	51.5	55.5	59.5	62.5	65.5
02-06-92	10.0	18.5	24.5	29.0	32.0	35.0	37.5	40.0	42.0	43.5	44.5	45.0
26-03-96	30.0	44.0	57.5	68.5	78.0	85.0	92.0	95.0	97.0	99.0	100.5	101.5
22-06-97	19.0	29.5	38.5	43.0	46.5	49.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5
10-09-98	11.5	18.5	23.5	26.0	27.5	29.0	30.5	32.0	33.0	33.5	34.0	34.0
12-07-99	09.4	18.4	23.2	28.0	32.6	36.8	40.4	44.0	47.4	50.6	53.2	55.4
07-05-00	11.6	20.6	29.0	36.6	43.2	46.6	48.2	48.6	49.0	49.2	49.4	49.4
14-10-01	11.0	20.8	27.6	32.0	36.2	40.0	42.4	44.6	46.4	48.0	49.6	51.0
05-06-02	17.5	34.5	47.5	55.5	63.0	66.5	69.5	70.5	71.0	71.2	71.4	71.6

Precipitación (mm)

Tabla 2. Intensidades máximas, por intervalos de tiempo, de las tormentas registradas en la ciudad de Xalapa, Veracruz.

Fecha	Duración (min)											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
16-06-27	66.0	64.5	61.0	54.8	50.4	47.5	45.0	43.1	41.3	39.9	38.5	37.0
07-07-28	84.0	70.5	62.0	57.0	53.4	49.5	46.3	42.8	39.3	36.3	33.8	31.5
05-06-29	60.0	58.5	58.0	57.0	53.4	50.5	48.4	46.5	44.0	40.8	38.2	35.8
18-04-30	90.0	84.0	74.0	69.0	64.8	61.0	57.9	55.5	51.3	48.0	45.3	42.5
22-05-31	84.0	81.0	66.0	54.0	43.2	36.0	30.9	27.0	24.0	21.6	19.6	18.0
03-07-33	66.0	63.0	60.0	50.3	41.4	35.5	30.4	26.6	23.7	21.3	19.4	17.8
11-07-34	114.0	100.5	95.0	85.5	79.8	75.0	70.7	67.1	62.7	57.9	53.5	49.5
22-06-35	51.0	49.5	48.0	46.5	43.8	41.5	38.1	35.6	33.0	30.9	29.2	27.5
11-07-36	93.0	76.5	64.0	57.0	51.6	47.5	43.3	39.4	36.3	33.3	30.8	28.8
03-08-37	72.0	70.5	67.0	65.3	64.2	63.0	61.7	59.6	56.3	52.8	49.6	47.0
20-06-38	96.0	85.5	71.0	63.8	58.2	51.0	45.9	41.3	37.3	33.9	31.1	28.8
07-06-39	138.0	97.5	84.0	74.3	67.8	63.0	57.9	52.9	49.0	45.3	41.7	38.8
29-07-43	87.0	69.0	60.0	53.3	49.2	46.0	43.7	40.9	38.3	35.4	32.7	30.3
10-06-44	48.0	40.5	37.0	35.3	32.4	29.5	27.4	25.5	24.0	22.8	21.5	20.3
21-04-46	144.0	102.0	84.0	72.0	58.8	50.0	43.3	38.3	34.3	31.2	28.6	26.3
13-06-47	72.0	66.0	59.0	54.0	50.4	47.5	43.7	40.1	37.0	34.2	31.9	29.8
05-03-48	48.0	45.0	44.0	42.8	39.0	36.5	33.9	31.5	29.0	27.0	25.4	24.0
05-08-49	108.0	87.0	72.0	61.5	54.6	49.5	45.0	41.3	38.0	35.4	33.3	31.5
01-06-50	57.0	51.0	44.0	40.5	36.6	34.0	31.7	28.9	26.7	24.6	22.9	21.5
25-05-52	180.0	132.0	108.0	95.3	87.6	77.0	69.0	62.6	57.3	52.5	48.3	44.8
24-06-53	72.0	66.0	56.0	48.0	43.2	40.0	37.7	35.6	32.0	29.1	26.7	24.8
11-06-54	126.0	120.0	93.0	76.5	63.0	53.5	46.3	40.9	36.3	32.7	29.7	27.3
13-07-56	42.0	30.0	24.0	21.0	19.2	17.5	16.3	15.4	14.7	13.8	12.8	12.0
11-06-58	72.0	72.0	68.0	64.5	60.0	56.0	51.9	47.6	44.3	41.7	39.5	37.3
08-06-59	126.0	124.5	106.0	95.3	85.2	77.5	69.4	63.0	57.7	53.1	49.4	46.3
20-06-61	60.0	60.0	54.0	47.3	42.6	36.0	31.3	27.8	25.0	22.8	21.0	19.5
08-07-62	60.0	60.0	60.0	60.0	57.6	53.0	49.7	47.3	44.7	41.4	38.2	35.5
11-08-63	75.0	66.0	57.0	49.5	42.6	37.0	33.0	30.0	27.7	25.8	24.0	22.5
07-06-64	60.0	60.0	53.0	47.3	43.2	39.0	35.6	32.6	30.3	28.5	27.0	25.5
03-10-67	75.0	67.5	55.0	48.8	44.4	40.5	37.7	35.6	33.7	32.1	30.5	29.3
14-05-70	93.0	90.0	88.0	81.0	75.6	68.5	63.4	58.9	53.3	48.3	44.2	40.8
18-04-73	81.0	79.5	73.0	64.5	58.8	52.5	48.0	44.3	40.3	36.9	33.8	31.0
20-06-75	114.0	111.0	104.0	96.0	83.4	74.0	67.3	61.9	56.0	51.0	46.6	43.0
22-09-78	84.0	72.0	66.0	62.3	59.4	54.5	49.7	45.8	42.7	39.9	37.4	35.0
01-06-80	84.0	72.0	66.0	61.5	57.0	52.5	49.3	46.9	43.3	40.2	37.6	35.5
24-04-81	150.0	135.0	120.0	109.5	97.2	87.0	78.9	72.8	67.7	63.3	58.6	54.0
21-04-82	120.0	96.0	84.0	75.0	68.4	60.0	52.3	46.5	41.7	37.8	34.4	31.5
22-06-83	90.0	81.0	74.0	63.0	52.8	45.0	39.0	34.5	31.0	28.2	25.9	23.8
14-05-84	60.0	60.0	58.0	48.0	40.8	35.0	30.9	27.4	24.3	21.9	19.9	18.3
18-06-85	60.0	60.0	42.0	32.3	25.8	21.5	18.4	16.1	14.3	12.9	11.7	10.8
02-05-86	102.0	81.0	69.0	61.5	52.2	45.0	39.9	36.0	32.7	30.0	27.3	25.0
21-08-87	51.0	46.5	43.0	41.3	39.0	35.0	31.7	29.3	27.0	24.9	23.2	21.5
09-06-88	60.0	60.0	54.0	45.0	38.4	32.0	27.4	24.0	21.3	19.2	17.5	16.0
24-05-90	144.0	112.5	95.0	86.3	74.4	62.5	53.6	46.9	41.7	37.5	34.1	31.3
05-02-91	72.0	63.0	54.0	49.5	46.2	43.5	40.7	38.6	37.0	35.7	34.1	32.8
02-06-92	60.0	55.5	49.0	43.5	38.4	35.0	32.1	30.0	28.0	26.1	24.3	22.5
26-03-96	180.0	132.0	115.0	102.8	93.6	85.0	78.9	71.3	64.7	59.4	54.8	50.8
22-06-97	114.0	88.5	77.0	64.5	55.8	49.5	44.1	38.6	34.3	30.9	28.1	25.8
10-09-98	69.0	55.5	47.0	39.0	33.0	29.0	26.1	24.0	22.0	20.1	18.5	17.0
12-07-99	56.4	55.2	46.4	42.0	39.1	36.8	34.6	33.0	31.6	30.4	29.0	27.7
07-05-00	69.6	61.8	58.0	54.9	51.8	46.6	41.3	36.5	32.7	29.5	26.9	24.7
14-10-01	66.0	62.4	55.2	48.0	43.4	40.0	36.3	33.5	30.9	28.8	27.1	25.5
05-06-02	105.0	103.5	95.0	83.3	75.6	66.5	59.6	52.9	47.3	42.7	38.9	35.8

Intensidad (mm/h)

Tabla 3. Intensidades máximas, ordenadas de mayor a menor, con sus respectivos períodos de retorno, para las tormentas registradas en la ciudad de Xalapa, Veracruz.

N	T	Duración (min)											
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	54.0000	180.0	135.0	120.0	109.5	97.2	87.0	78.9	72.8	67.7	63.3	58.6	54.0
2	27.0000	180.0	132.0	115.0	102.8	93.6	85.0	78.9	71.3	64.7	59.4	54.8	50.8
3	18.0000	150.0	132.0	108.0	96.0	87.6	77.5	70.7	67.1	62.7	57.9	53.5	49.5
4	13.5000	144.0	124.5	106.0	95.3	85.2	77.0	69.4	63.0	57.7	53.1	49.6	47.0
5	10.8000	144.0	120.0	104.0	95.3	83.4	75.0	69.0	62.6	57.3	52.8	49.4	46.3
6	9.0000	138.0	112.5	95.0	86.3	79.8	74.0	67.3	61.9	56.3	52.5	48.3	44.8
7	7.7143	126.0	111.0	95.0	85.5	75.6	68.5	63.4	59.6	56.0	51.0	46.6	43.0
8	6.7500	126.0	103.5	95.0	83.3	75.6	66.5	61.7	58.9	53.3	48.3	45.3	42.5
9	6.0000	120.0	102.0	93.0	81.0	74.4	63.0	59.6	55.5	51.3	48.0	44.2	40.8
10	5.4000	114.0	100.5	88.0	76.5	68.4	63.0	57.9	52.9	49.0	45.3	41.7	38.8
11	4.9091	114.0	97.5	84.0	75.0	67.8	62.5	57.9	52.9	47.3	42.7	39.5	37.3
12	4.5000	114.0	96.0	84.0	74.3	64.8	61.0	53.6	47.6	44.7	41.7	38.9	37.0
13	4.1538	108.0	90.0	84.0	72.0	64.2	60.0	52.3	47.3	44.3	41.4	38.5	35.8
14	3.8571	105.0	88.5	77.0	69.0	63.0	56.0	51.9	46.9	44.0	40.8	38.2	35.8
15	3.6000	102.0	87.0	74.0	65.3	60.0	54.5	49.7	46.9	43.3	40.2	38.2	35.5
16	3.3750	96.0	85.5	74.0	64.5	59.4	53.5	49.7	46.5	42.7	39.9	37.6	35.5
17	3.1765	93.0	84.0	73.0	64.5	58.8	53.0	49.3	46.5	41.7	39.9	37.4	35.0
18	3.0000	93.0	81.0	72.0	64.5	58.8	52.5	48.4	45.8	41.7	37.8	34.4	32.8
19	2.8421	90.0	81.0	71.0	63.8	58.2	52.5	48.0	44.3	41.3	37.5	34.1	31.5
20	2.7000	90.0	81.0	69.0	63.0	57.6	51.0	46.3	43.1	40.3	36.9	34.1	31.5
21	2.5714	87.0	79.5	68.0	62.3	57.0	50.5	46.3	42.8	39.3	36.3	33.8	31.5
22	2.4545	84.0	76.5	67.0	61.5	55.8	50.0	45.9	41.3	38.3	35.7	33.8	31.3
23	2.3478	84.0	72.0	66.0	61.5	54.6	49.5	45.0	41.3	38.0	35.4	33.3	31.0
24	2.2500	84.0	72.0	66.0	61.5	53.4	49.5	45.0	40.9	37.3	35.4	32.7	30.3
25	2.1600	84.0	72.0	66.0	60.0	53.4	49.5	44.1	40.9	37.0	34.2	31.9	29.8
26	2.0769	81.0	70.5	64.0	57.0	52.8	47.5	43.7	40.1	37.0	33.9	31.1	29.3
27	2.0000	75.0	70.5	62.0	57.0	52.2	47.5	43.7	39.4	36.3	33.3	30.8	28.8
28	1.9286	75.0	69.0	61.0	57.0	51.8	47.5	43.3	38.6	36.3	32.7	30.5	28.8
29	1.8621	72.0	67.5	60.0	54.9	51.6	46.6	43.3	38.6	34.3	32.1	29.7	27.7
30	1.8000	72.0	66.0	60.0	54.8	50.4	46.0	41.3	38.3	34.3	31.2	29.2	27.5
31	1.7419	72.0	66.0	60.0	54.0	50.4	45.0	40.7	36.5	33.7	30.9	29.0	27.3
32	1.6875	72.0	66.0	59.0	54.0	49.2	45.0	39.9	36.0	33.0	30.9	28.6	26.3
33	1.6364	72.0	64.5	58.0	53.3	46.2	43.5	39.0	35.6	32.7	30.4	28.1	25.8
34	1.5882	69.6	63.0	58.0	50.3	44.4	41.5	38.1	35.6	32.7	30.0	27.3	25.5
35	1.5429	69.0	63.0	58.0	49.5	43.8	40.5	37.7	35.6	32.0	29.5	27.1	25.5
36	1.5000	66.0	62.4	57.0	49.5	43.4	40.0	37.7	34.5	31.6	29.1	27.0	25.0
37	1.4595	66.0	61.8	56.0	48.8	43.2	40.0	36.3	33.5	31.0	28.8	26.9	24.8
38	1.4211	66.0	60.0	55.2	48.0	43.2	39.0	35.6	33.0	30.9	28.5	26.7	24.7
39	1.3846	60.0	60.0	55.0	48.0	43.2	37.0	34.6	32.6	30.3	28.2	25.9	24.0
40	1.3500	60.0	60.0	54.0	48.0	42.6	36.8	33.9	31.5	29.0	27.0	25.4	23.8
41	1.3171	60.0	60.0	54.0	47.3	42.6	36.5	33.0	30.0	28.0	26.1	24.3	22.5
42	1.2857	60.0	60.0	54.0	47.3	41.4	36.0	32.1	30.0	27.7	25.8	24.0	22.5
43	1.2558	60.0	60.0	53.0	46.5	40.8	36.0	31.7	29.3	27.0	24.9	23.2	21.5
44	1.2273	60.0	58.5	49.0	45.0	39.1	35.5	31.7	28.9	26.7	24.6	22.9	21.5
45	1.2000	60.0	55.5	48.0	43.5	39.0	35.0	31.3	27.8	25.0	22.8	21.5	20.3
46	1.1739	60.0	55.5	47.0	42.8	39.0	35.0	30.9	27.4	24.3	22.8	21.0	19.5
47	1.1489	57.0	55.2	46.4	42.0	38.4	35.0	30.9	27.0	24.0	21.9	19.9	18.3
48	1.1250	56.4	51.0	44.0	41.3	38.4	34.0	30.4	26.6	24.0	21.6	19.6	18.0
49	1.1020	51.0	49.5	44.0	40.5	36.6	32.0	27.4	25.5	23.7	21.3	19.4	17.8
50	1.0800	51.0	46.5	43.0	39.0	33.0	29.5	27.4	24.0	22.0	20.1	18.5	17.0
51	1.0588	48.0	45.0	42.0	35.3	32.4	29.0	26.1	24.0	21.3	19.2	17.5	16.0
52	1.0385	48.0	40.5	37.0	32.3	25.8	21.5	18.4	16.1	14.7	13.8	12.8	12.0
53	1.0189	42.0	30.0	24.0	21.0	19.2	17.5	16.3	15.4	14.3	12.9	11.7	10.8

Intensidad (mm/h)

Tabla 4. Parámetros de las ecuaciones IDT ajustadas a registros de precipitación de la ciudad de Xalapa, Veracruz.

Ecuación	$\lambda$	$\theta$	$\psi$	$\eta$	$R^2$	Error estándar de estimación
$i = \frac{\lambda}{d^\eta}$	269.876	—	—	0.446	0.473	18.7
$i = \frac{\lambda}{d + \theta}$	5362.611	50.607	—	—	0.491	17.8
$i = \frac{\lambda}{(d + \theta)^\eta}$	203548.7	108.451	—	1.625	0.493	17.8
$i = \frac{\lambda T^\psi}{d^\eta}$	174.603	—	0.275	0.394	0.904	7.8
$i = \frac{\lambda T^\psi}{(d + \theta)^\eta}$	120.794	1.388	0.274	1.378	0.934	6.5
$i = \frac{\lambda}{d^\eta + \theta}$	98.655	1.014	—	1.175	0.493	17.8
$i = \frac{\lambda T^\psi}{d^\eta + \theta}$	70.218	—	0.274	1.12	0.934	6.5
$i = \lambda \left\{ \frac{\psi - \ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{(d + \theta)^\eta} \right\}$	12046.41	82.71	3.036	1.368	0.988	2.7

Recepción del manuscrito: 17 de junio, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 17 de agosto, 2004

Aceptación del manuscrito: 18 de agosto, 2004



# HURACANES EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, Y SUS IMPLICACIONES EN LA SEDIMENTACIÓN EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

Genaro Martínez-Gutiérrez<sup>1</sup> y Larry Mayer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Depto. de Geología Marina, UABCS

<sup>2</sup> Dept. of Geosciences, University of Arizona

## RESUMEN

El aporte de sedimento de grano grueso de las costas de la península de Baja California al Golfo de California es acarreado por corrientes de inundación producidas por tormentas extremas. Las depresiones tropicales que se forman en la cuenca del Pacífico nororiental durante los meses de verano generan al menos un huracán por año, acercándose a la línea de costa de Baja California dentro de un radio 250 Km. Aunque las inundaciones producidas por huracanes son relativamente frecuentes, registros históricos revelan que los huracanes causan inundaciones catastróficas cada 50 años aproximadamente. Durante inundaciones extraordinarias, eventos episódicos de depositación ocurren sobre abanicos deltas y el sedimento de grano grueso es transportado a la costa oriental del Golfo de California. Posiblemente, no menos de 200 incrementos de depositación significativos han ocurrido durante el Holoceno. El sistema, que erosiona, transporta y suministra sedimentos al Golfo de California es variable por naturaleza, y su constancia es fuertemente afectada por la frecuencia de huracanes que afectan la península.

**Palabras clave:** huracanes, Golfo de California, sedimentación, detección de cambio, percepción remota.

## ABSTRACT

Floods generated by extreme storms drive coarse-grained sediment supply from the Baja peninsula to the Gulf of California. Hurricanes formed from tropical depressions in the eastern North Pacific basin during the summer months, generate about one hurricane per year that approaches to within 250 km of the coastline of Baja California. Although hurricane floods are relatively frequent, historical records suggest that hurricanes cause catastrophic flooding perhaps every 50 years or so. During extreme flooding, depositional episodes on fan deltas occur and coarse-grained sediment is delivered to the Gulf of California. Possibly not less than 200 significant depositional increments have occurred throughout the Holocene. The system, which erodes, transports, and delivers sediment to the Gulf of California from Baja California, is episodic by nature, and its periodicity is strongly affected by the frequency of hurricanes that affect the peninsula.

**Keywords:** Hurricanes, Gulf of California, sedimentation, change detection, remote sensing.

## INTRODUCCIÓN

El papel de las tormentas extremas en procesos fluviales en Baja California ha permanecido como un tópico inexplorado a pesar de su largo registro histórico de desastres e inundaciones. Baja California es una región de México que está sujeta a inundaciones extremas producidas por el escurrimiento extraordinario generado por huracanes. La historia de inundaciones en la península de Baja California está registrada en los comentarios escritos por los misioneros, así como también en los relatos recogidos por historiadores (Martínez-Gutiérrez, 2002). Los primeros acontecimientos históricos de inundaciones datan de la conquista española en México por Cortés (Taylor, 1971). Los españoles establecieron la primera Misión de Baja California en Loreto en 1697. Loreto fue también la primera capital provincial de la península y fue repetidamente dañada por inundaciones producidas por huracanes. De ella existen registros. En los primeros 25 años de establecida la Misión de Loreto, ya había sido seriamente inundada y dañada en dos ocasiones. Finalmente, las continuas inundaciones que afectaban Loreto propiciaron su aban-

dono como capital de las Californias en favor de La Paz. Sin embargo, grandes inundaciones también habían afectado a La Paz, al menos cinco veces antes de que fuera la nueva capital. La última inundación que dañó a La Paz, ocurrió en 1976, al paso del huracán Liza, matando a más de 1000 personas en la ciudad y en áreas circundantes (Smith, 1986). El mismo huracán Liza, que devastó La Paz, continuó su trayectoria hacia el norte, hacia el estado de California, E.U.A. en forma de tormenta tropical, la cual produjo inundaciones en el Valle de la Muerte. En el 2001, el huracán Juliette causó extensas inundaciones en la región de Los Cabos. Esta tormenta tiene el registro más alto de precipitación en la historia, pero solamente causó 2 muertes como resultado de las inundaciones.

El uso de la percepción remota en el estudio de la superficie de la Tierra es una herramienta poderosa para evaluar multi-temporalmente los eventos y procesos. Por ejemplo, en el caso de que existan cambios en la cubierta del terreno, éstos mostrarán un cambio en la reflectancia de los materiales, la cual será detectada en imágenes satelitales o aeroplanos. Esta técnica fue empleada en el presente trabajo a fin de evaluar el impacto de los huracanes sobre el paisa-

je y su papel en el aporte de sedimento al Golfo de California. Los objetivos de este artículo son: 1) describir las características de frecuencia de los huracanes que afectan Baja California, 2) resaltar en un contexto climatológico y geomorfológico la importancia de la precipitación derivada de huracanes; 3) resumir la evidencia de los efectos que traen los huracanes a los sistemas fluviales y el transporte de sedimento; y 4) discutir las implicaciones de estos datos para la sedimentación terrígena clástica en el Golfo de California.

## RESULTADOS

### FRECUENCIA DE HURACANES

Los huracanes que afectan la península de Baja California se forman en aguas tropicales de la cuenca oriental del Pacífico Norte. La productividad de esta área para la iniciación y generación de depresiones tropicales, tormentas, y huracanes, es mayor que la de la cuenca occidental del Atlántico Norte, y es la segunda después del Océano Pacífico Occidental. La mayoría de los huracanes inician como perturbaciones tropicales entre las latitudes 10°N y 18°N y entre las longitudes 95°O y 110°O. Después de su formación inicial, las tormentas tropicales y huracanes se mueven con dirección oeste-noroeste hacia aguas abiertas del Océano Pacífico. Sin embargo, una porción de estas tormentas y huracanes siguen una trayectoria con dirección norte-noroeste hacia la península de Baja California y suroeste de los Estados Unidos (Figura 1). Varias de las tormentas que se generan en la cuenca oriental del Pacífico Norte con una trayectoria hacia el norte entran al Golfo de California trayendo consigo enormes cantidades de humedad. Algunos huracanes en su trayectoria hacia el norte pueden virar, ya sea hacia la península, al macizo continental, o al suroeste de los Estados Unidos. El ciclo de vida completo de un huracán puede ser de 1 a 10 días antes de que se disipe, aunque pueden existir excepciones.

Las condiciones atmosféricas influyen en la trayectoria de una tormenta propiciando que se dirija hacia al oeste o al norte. Ely (1997) construyó mapas de anomalías atmosféricas de 700 mb de presión asociados específicamente con tormentas tropicales y tormentas generadas por frentes fríos que produjeron inundaciones en el suroeste de los Estados Unidos. Sus resultados indican que ambas inundaciones producidas en verano e invierno estuvieron asociadas con la circulación meridional en las latitudes medias. Estas mismas condiciones atmosféricas pueden resultar en patrones de clima que intensifican el desvío de tormentas tropicales hacia la península de Baja California y al suroeste de los Estados Unidos. Por ejemplo, los patrones de circulación omega, que evolucionan a un sistema de baja presión en las latitudes medias u otros sistemas de baja presión en latitudes medias, sirven para conducir los ciclones tropicales hacia Baja California y al suroeste de los Estados Unidos (Smith, 1986; Webb y Betancourt, 1990). Por lo tanto, la frecuencia de huracanes que afectan Baja California será mayor cuando estas condiciones atmosféricas sean más comunes, favoreciendo una trayectoria de las tormentas hacia al norte. Estas características y condiciones se pueden inferir a partir del registro de huracanes.

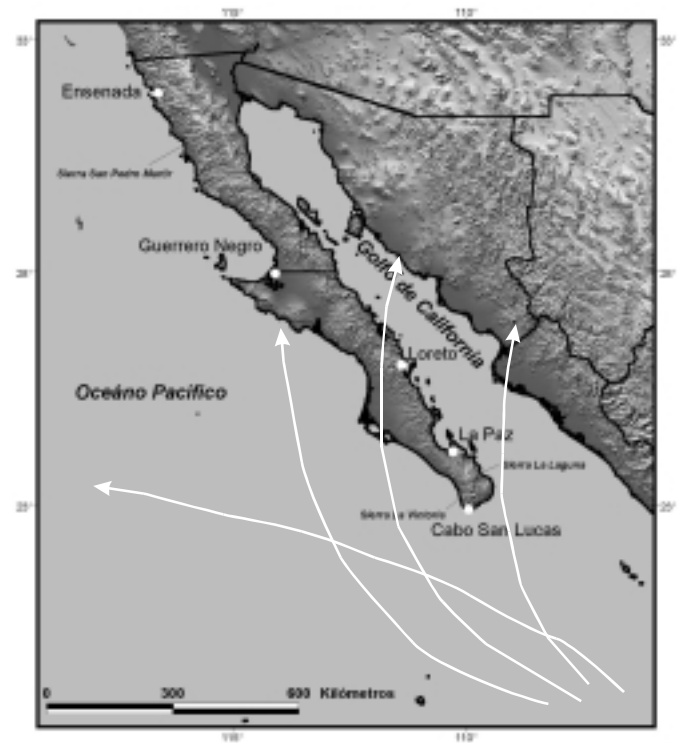


Figura 1. Sombreado del relieve mostrando la ubicación de lugares preferenciales referidos en el texto y direcciones de trayectorias de huracanes en la cuenca oriental del Pacífico Norte. La Laguna Salada está al este de Ensenada.

Un registro razonablemente completo de tormentas tropicales y huracanes generadas en la cuenca oriental del Pacífico Norte existe para el periodo de 1949-2001 (Figura 2). Estos datos indican que la frecuencia de tormentas es mas alta en los meses de julio, agosto, y septiembre. La mayor frecuencia de huracanes ocurre en septiembre, en todo el registro. Las tormentas tropicales están representadas por frecuencias mensuales similares. Septiembre es también el mes con la mayor probabilidad de que un huracán siga hacia el norte con dirección hacia la península de Baja California, principalmente entre septiembre 1 y 10 (Crutcher y Quayle, 1974). La frecuencia de huracanes en la cuenca oriental del Pacífico se resume en la Tabla 1. El número de huracanes esperado en un año cualesquiera puede tener una variación alta; esta característica se evidencia por las altas fluctuaciones que ocurren cada diez años, de ahí que el porcentaje de huracanes que se dirigen hacia la península pueda tener una estadística ascendente. Del registro disponible se encontró que entre 12 y 16 % de los huracanes formados en la cuenca oriental del Pacífico Norte afectan la península de Baja California; aquí se define "afecta" como aquella tormenta que se ubica a una distancia de 250 km de la península. El número más alto de huracanes que han afectado a Baja California en un periodo de 10 años fue de 15 y ocurrieron en el periodo de 1971-1980.

### CONTEXTO CLIMATOLÓGICO DE HURACANES

Una manera de evaluar la importancia de la precipitación relacionada a huracanes en el proceso de transporte de sedimentos es registrar la cantidad de precipitación en un contexto climatológico y fisiográfico. De aquí cabe la pregunta: ¿qué cantidad total de preci-

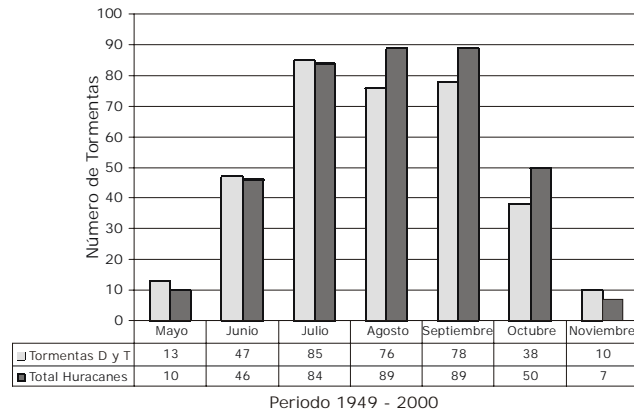


Figura 2. Histogramas de frecuencias mostrando el número de tormentas tropicales y huracanes que ocurrieron en meses seleccionados para el periodo 1949-2001. Los datos provienen de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2001). D: depresión tropical, T: tormenta tropical.

Tabla 1. Resumen de ocurrencia de huracanes para la cuenca oriental del Pacífico Norte mostrando la frecuencia de huracanes en intervalos por décadas. Para determinar que tan importantes son estos huracanes, en términos de impacto en Baja California, se trazo la trayectoria de los huracanes y se determino cuales y cuantos presentaban una trayectoria dentro de un radio de 250 km de la costa.

Año	1949-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000
1		2	2	12	8	10
2		3	2	8	12	15
3		2	4	7	12	11
4		4	1	11	13	10
5		2	1	9	13	7
6		7	7	9	9	5
7		9	7	4	10	9
8		5	6	14	7	9
9	2	5	4	6	9	
0	6	5	4	7	16	
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>52</b>	<b>38</b>	<b>87</b>	<b>109</b>	<b>76</b>
<b>250 km</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>13</b>
<b>Porcentaje</b>	<b>17</b>	<b>26</b>	<b>17</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>17</b>

pitación es vertida en Baja California producto de tormentas extremas tales como huracanes, como una proporción de la cantidad total de precipitación?. Consideremos el registro en Loreto como ejemplo: La precipitación media anual en Loreto es de aproximadamente 140 mm (Markham, 1972). Entre 1949 y 1960, tres huracanes trajeron lluvia a Loreto en cantidades de 264, 184, y 174 mm. Cada una de estas tormentas individualmente trajeron lluvia que sobrepasó la precipitación media anual. Markham (1972) informa un ejemplo de precipitación extrema producida por un huracán al norte de Cabo San Lucas, la cual trajo 1015 mm de lluvia en un solo evento. Markham (1972) además sugiere que más del 30% de la precipitación (total) que se presenta en la parte sur de Baja California es vertida como lluvia "intensa". Sin embargo, la precipitación producida por huracanes, especialmente cuando el huracán está en mar profundo a distancias que exceden 250 km, puede ser espacialmente errática. Consideremos el huracán Linda, por ejemplo: El ciclón tropical Linda, formado en septiembre 9 de 1997, rápidamente creció a huracán el 10 de septiembre, a 800 km al sur del extremo de Baja California. En septiembre 12 Linda había alcanzado su pico, con vientos que alcanzaron 300 km/h; las estimaciones sugieren que Linda fue el huracán mas fuerte registrado en la cuenca oriental del Pacífico Norte. Las predicciones habían inicialmente sugerido que Linda podría llegar al sur de California, E.U.A.;

sin embargo, el 13 de septiembre, Linda comenzó a moverse al noroeste en respuesta al crecimiento de una cresta de alta presión que se dirigía hacia el Norte. Para el 16 de septiembre, Linda se había degradado a depresión tropical y el 17 de septiembre, la tormenta se había disipado. Aunque Linda no tocó tierra, su tamaño nos da una idea del potencial para inundaciones extraordinarias. La precipitación en el sur de la península que estuvo asociada con Linda y sus tormentas secundarias se muestra en la Figura 3. Los histogramas indican el volumen relativo de precipitación durante cinco días que duró el huracán en su aproximación y partida. Estos patrones espaciales de precipitación están fuertemente modulados por la topografía, así como las ocurrencias resultantes de inundaciones extraordinarias. La elevación es otro factor que también afecta a la distribución de la precipitación media anual. La precipitación media anual varía de aproximadamente 50 mm en el área del Delta del Colorado a 400 mm en regiones elevadas de la Sierra de San Pedro Martir y la Sierra La Victoria. Los valores mas típicos para la precipitación media anual son de 200 mm para áreas elevadas y 100 mm cerca de las costas (Markham, 1972). La región noroeste de Baja California cerca de Ensenada, es fuertemente afectada por sistemas invernales del Pacífico, donde las montañas de la Sierra de San Pedro Martir resultan ser una sombra de lluvia hacia el este, en el Delta del Rio Colorado. La región sur de la península, sin embargo, es mas afectada por sistemas tropicales. La topografía en Baja California intensifica la precipitación en las áreas montañosas, causando inundaciones en las cuencas adyacentes. Por ejemplo, una inundación en una cuenca de Los Cabos resulta de una intensa precipitación en la Sierra de La Laguna.

## EFFECTOS DE HURACANES

Los efectos de inundaciones por huracanes pueden ser evaluados a través de la observación directa, detección de cambio basada en percepción remota, o por medio de una modelación validada. Martínez-Gutiérrez (2002) empleó modelos hidrológicos con parámetros espaciales junto con tratamiento de imágenes Landsat basadas en una clasificación de la cubierta del terreno para estimar la descarga. Las estimaciones son el resultado de la precipitación producida por huracanes en pequeñas cuencas situadas en los alrededores de La Paz y San José del Cabo. De ahí que, la importancia de los huracanes en el cambio del paisaje y en el transporte de sedimentos puede ser determinada a través de la detección de cambio basada en datos de imágenes Landsat (Mayer, 1998). El cambio de paisaje acumulativo producido por mas de 20 años, puede ser cuantificado usando métodos de detección de cambio a través del empleo de percepción remota (Martínez-Gutiérrez, 2002). El huracán Nora desarrollado el 16 de septiembre de 1997, trajo consigo fuertes vientos que produjeron olas de 3 metros de altura en la línea de costa Mexicana. El huracán hizo contacto en tierra al norte de Baja California el 25 de septiembre, dirigiéndose posteriormente hacia Arizona. En su camino, el huracán pasó por Laguna Salada, una cuenca endorreica localizada al sur de la frontera de Baja California y Estados Unidos de Norteamérica. Una comparación de imágenes de satélite, basada en técnicas de detección de cambio, antes y después del evento en la región exhibe el resultado de inundaciones inducidas por huracanes.

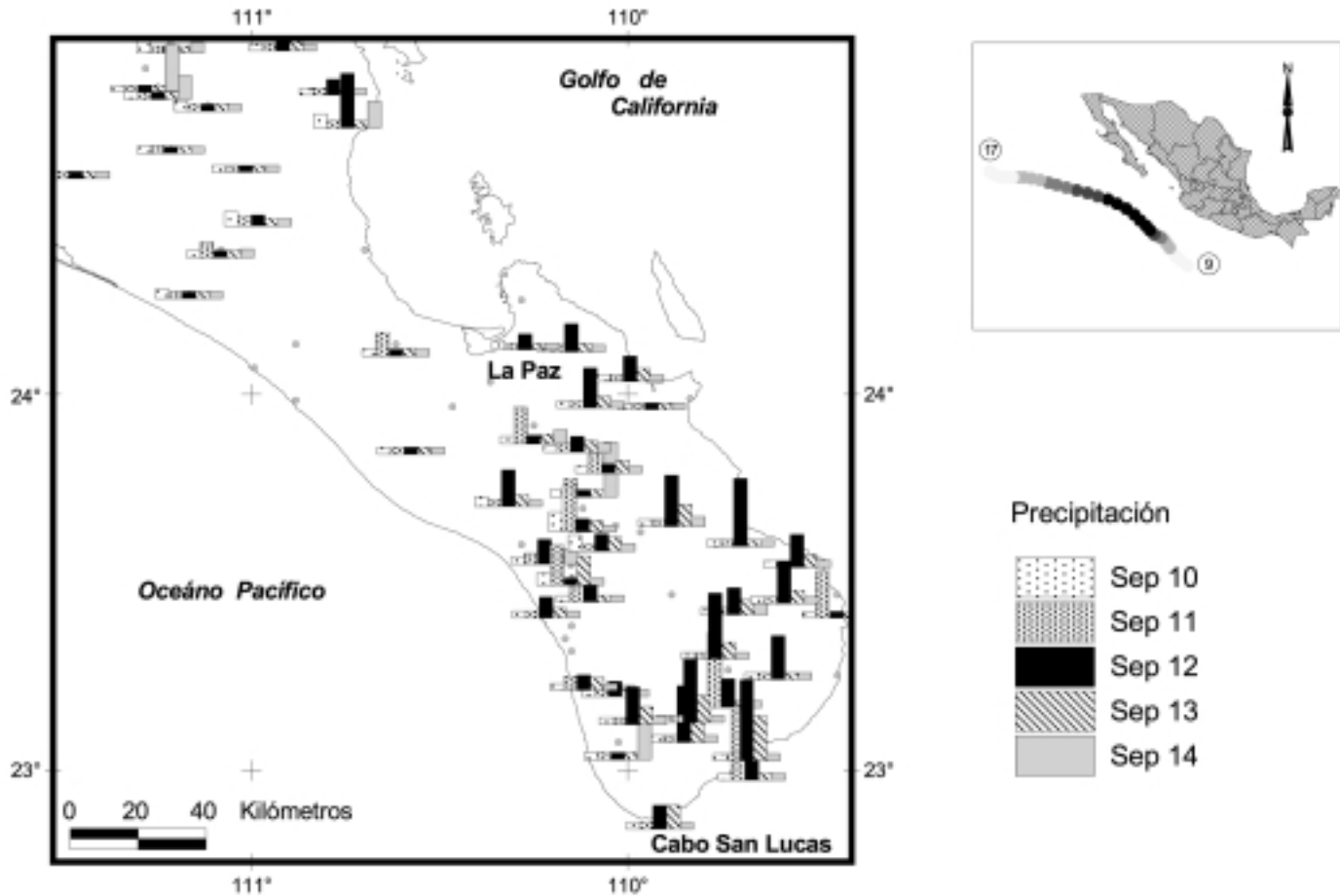


Figura 3. Histogramas de precipitación de estaciones pluviométricas en el sur de Baja California durante el tiempo de afectación del huracán Linda, 1997. Cada barra del histograma representa 24 horas de precipitación para cada estación, iniciando el 10 de septiembre, 1997. Observe que algunas cantidades de precipitación son bajas para un periodo de 5 días y están asociadas con áreas con relieve bajo. En el recuadro se muestra la trayectoria del huracán Linda.

Uno de los métodos empleados para la detección de cambio está basado en la comparación de valores de brillantez de una sola banda en diferente tiempo (año, mes, o día) de adquisición (Weismiller *et al.*, 1977). En nuestro análisis, las dos escenas utilizadas fueron adquiridas en diferentes periodos del año, en este caso agosto y diciembre, por lo tanto hubo diferencias inherentes en la brillantez de las dos imágenes, esto debido a una diferencia en la iluminación solar. Estas diferencias pueden ser parcialmente corregidas realizando una igualación de histogramas en las imágenes. Este método trabaja bien en áreas con poco relieve, tales como planicies aluviales; sin embargo, el método no corrige las diferencias de sombras en áreas montañosas o con relieve abrupto. En este trabajo se aplicó una igualación de histogramas para cada una de las escenas (antes y después del evento) de un área al sur de Laguna Salada, donde se comparó la banda 3 de cada imagen. Para el sensor Landsat TM, la banda 3 corresponde a la longitud de onda del rojo visible, mostrando la vegetación como áreas oscuras, a pesar de que la región está caracterizada por ser árida a hiper-árida carente de vegetación. Se generó una imagen en falso color asignando a la banda 3 de la imagen después del huracán (de diciembre) un color verde y a la banda 3 de la imagen antes del evento (agosto) se asignó un color rojo. Esta combinación resultó en una imagen de color con tres colores principales rojo, verde y amarillo (Figura 4).

El color rojo indica que el área fue mas brillante antes del huracán (agosto) y el verde indica que la brillantez era mayor después del evento (diciembre). Por otro lado, el color amarillo indica poco cambio en la brillantez de los píxeles. Si uno se enfoca en las corrientes trenzadas o los canales de los abanicos, se puede observar que estas superficies están dominadas por un color verde, que indica que la superficie de reflectancia en los cauces y abanicos es mayor después del huracán. El transporte de sedimento fresco sobre las superficies del terreno causa una mayor reflectancia. Por lo tanto, los mayores eventos de transporte y depositación de sedimento están relacionados con tormentas extremas, tales como huracanes.

Cuando estos huracanes entran a tierra cerca de ciudades o poblaciones causan inundaciones donde los resultados son siempre devastadores. El huracán Liza, en 1976, no tocó tierra en Baja California y no dejó enormes cantidades de agua, pero sí generó una inundación relámpago en las montañas cercanas a La Paz, rompiendo el bordo de contención, dirigiéndose a la ciudad (Figura 5). El huracán Isis (1998) y el huracán Juliette (2001), dejaron completamente incomunicados a muchos poblados de la región de Los Cabos, después del rompimiento de los caminos y carreteras (Figura 6). La cantidad de sedimento transportado y depositado durante estas inundaciones de huracanes es muy significativa. Por ejemplo,



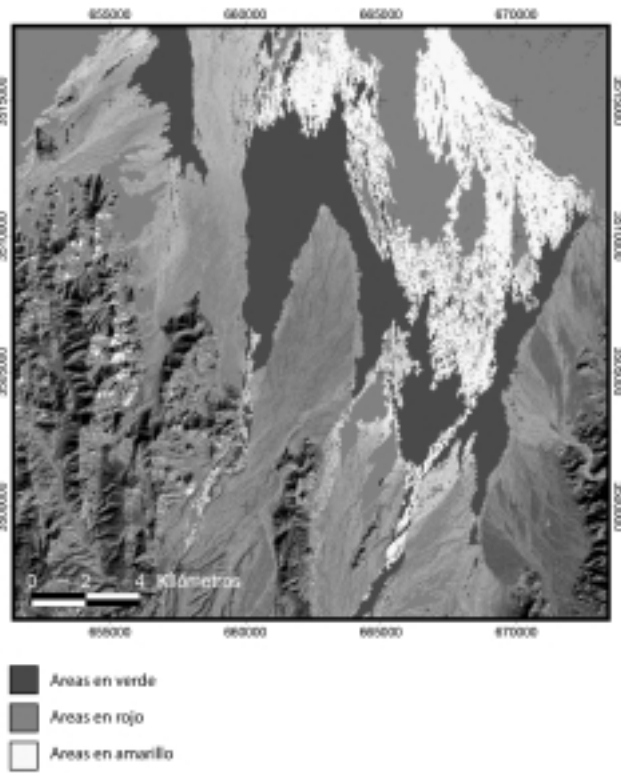


Figura 4. Imagen de cambio de una región al sur de Laguna Salada, Baja California, basada en imágenes Landsat TM. Los cambios entre estas dos imágenes son atribuidos al huracán Nora, 1997 y a las diferencias en iluminación solar entre agosto y diciembre. Las áreas en verde [gris claro], color que domina sobre los abanicos aluviales que están hacia el norte, son el resultado del transporte de sedimento y depositación sobre la superficie del abanico. Las áreas en negro, color que predomina sobre los arroyos muestran que no hubo cambios entre las dos imágenes. El patrón en forma de "leopardo" [gris claro-oscuro] sobre las montañas es causado por diferencia de iluminación estacional entre las dos imágenes. La imagen es de aproximadamente 2.1 km de ancho. Ver texto para discusión.

cauces más anchos que profundos son rellenados de agua más rápidamente, asemejándose más al Río Mississippi que a un cauce arenoso de Baja California (Figura 7). Áreas que drenan sobre rocas graníticas generan arena, la cual, durante inundaciones, producen depósitos muy potentes (Figura 8). El huracán Isis desarrollo abanico deltas en solo un día (Figura 9).

### IMPLICACIONES PARA LA SEDIMENTACIÓN EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

La sedimentación en el norte del Golfo de California estuvo dominada por el Río Colorado; éste trajo enormes cantidades de sedimento hacia el sur como una fuente puntual de aporte longitudinal. Por otro lado, la península de Baja California aporta relativamente poco sedimento al Golfo, debido a su angosta franja de tierra, cuya área de drenaje hacia el Golfo es muy pequeña. Regionalmente, la topografía está caracterizada por cuencas pequeñas que drenan hacia el este y que están asociadas con el Escarpe Principal del Golfo. Al oeste del parteaguas principal, que separa las corrientes que fluyen al este u oeste, están las cuencas más grandes que drenan al Océano Pacífico. Aunque el Golfo de California es claramente una



Figura 5. Porción de un fotomosaico ortorectificado de La Paz, Baja California Sur, mostrando la trayectoria de la inundación catastrófica después del huracán Liza, 1976. La inundación causó un número considerable de pérdidas de vida.



Figura 6. Cortes de la carpeta asfáltica de la carretera Federal No. 1 y 19, ocurrieron después del paso de los huracanes Isis (1998) y Juliette (2001). La fotografía muestra el arroyo de San Dionisio que corta la carretera cada año por las corrientes de lodo.

cuenca "hambrienta" de sedimento, la sedimentación clástica ocurre en una franja angosta a lo largo de la costa. El sistema de aporte terrígeno clástico hacia el Golfo es conducido por las avenidas extraordinarias que solamente toman lugar durante las tormentas, las cuales tienen una dimensión suficiente para generar grandes cantidades de escurrimiento. No existe en la península otro tipo de transporte de tal magnitud entre el lapso de la generación de tormentas, de ahí que no se observe un transporte significativo de sedimento hacia el Golfo. Estimaciones de descarga modeladas de una cuenca de 21 km<sup>2</sup> mostraron que la cuenca produjo una descarga de ~348 m<sup>3</sup>/s durante un periodo de 24 horas y ~89 mm de precipitación (Martínez-Gutiérrez, 2002). Estudios sobre transporte de sedimento en corrientes efímeras de cauces aluviales han sido desarrollados

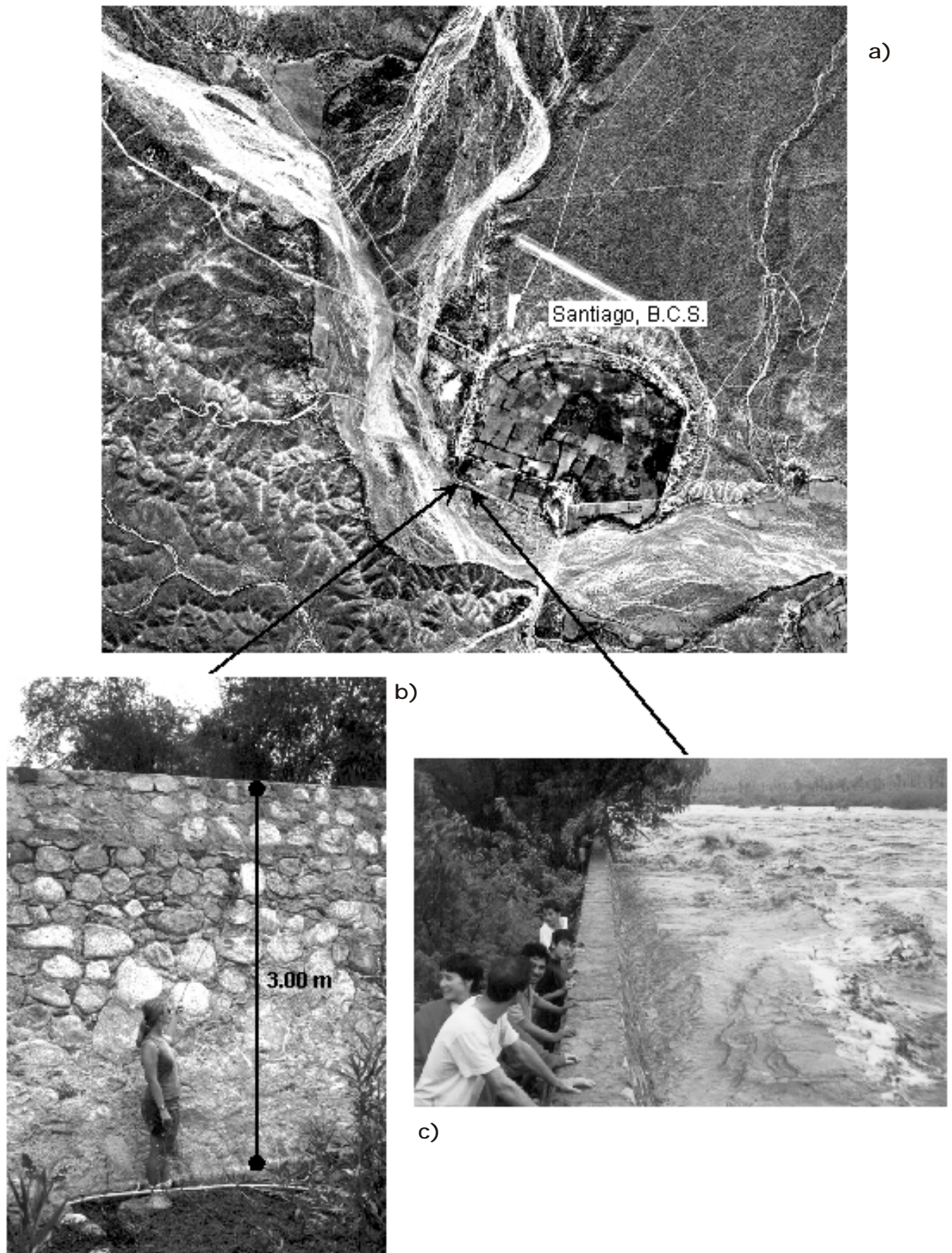


Figura 7. Inundación producida por el huracán Fausto, cerca de Santiago, Baja California Sur. A] Fotografía aérea mostrando el arroyo que fue inundado. El material de fondo está dominado por arena gruesa. B] Una pared de contención construida para proteger el poblado de Santiago de inundaciones. C] Residentes del poblado confiando en el muro de contención para prevenir inundaciones del huracán Fausto.



Figura 8. Residentes "minan" una camioneta de un depósito de arena después de la estación de tormentas sobre el Arroyo Guaymitas cerca de San José del Cabo.

después de lluvias extremas (Gerson, 1977; Nordin, 1963). Estos estudios indican que la concentración de sedimento durante una inundación puede alcanzar de  $\sim 300,000$  a  $\sim 640,000$  ppm de arena y limo. Usando estos parámetros, una estimación del total de carga de sedimento fue calculada para una lluvia producida por el huracán Henriette, en 1995. El huracán produjo  $\sim 162$  mm de precipitación en 24 horas y se calculó una descarga de  $\sim 132$  m<sup>3</sup>/s para la cuenca modelada. Los resultados indicaron que una descarga de  $\sim 132$  m<sup>3</sup>/s produciría un total de carga de  $\sim 63$  m<sup>3</sup> de sedimento y una descarga de  $\sim 348$  m<sup>3</sup>/s una carga total de sedimento de  $\sim 4833$  m<sup>3</sup> para 21 km<sup>2</sup> de cuenca. Comparando estas estimaciones con cuencas de mayores dimensiones, por ejemplo, la cuenca de Río Puerco, Nuevo México, que tiene una extensión de  $\sim 16,000$  km<sup>2</sup>, ésta puede llegar a producir una concentración de 680,000 ppm o  $\sim 28,630$  m<sup>3</sup> de sedimento (Nordin, 1963).

La recurrencia general de huracanes provee una señal de la frecuencia de sedimento aportado al Golfo. Aproximadamente 10 huracanes por década afectan a la península de Baja California (Tabla 1). Inundaciones pueden ocurrir más frecuentemente debido a que pueden ser generadas por tormentas de invierno o por corrientes convectivas durante el monzón de verano. Del registro histórico, sin embargo, un intervalo de recurrencia muy aproximado de huracanes grandes que deriven en inundaciones en una región dada es de 30-50 años. Usando un número más conservador, se sugiere que el tiempo básico para el aporte de sedimento clástico sea del orden de 50 años, de tal manera que solamente 20 de tales eventos se esperarían por cada mil años. Suponiendo un clima estacionario para los últimos 10,000 años, se propone que 200 eventos significativos ocurrieron durante todo el Holoceno, que aportaron sedimento al Golfo. Esta estimación está probablemente en el límite inferior y es muy incierta, pero todavía provee algunas ideas acerca de las condiciones climáticas que dieron lugar al crecimiento de deltas abanicos a lo largo del Golfo de California.



Figura 9. Vista hacia el norte en Costa Azul, un poblado pequeño aproximadamente a 2 km al sur de San José del Cabo. A) Condiciones de la costa durante junio de 1998, B) Mismo sitio seguido de una inundación relámpago producida por el huracán Isis, un abanico delta "instantáneo" fue desarrollado. La alta energía de la costa rápidamente erosiona este prominente depósito de arena.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los huracanes, fenómenos hidrometeorológicos que afectan a la península de Baja California anualmente, contribuyen en los procesos de modelación del paisaje y aporte de sedimento al Golfo de California. La trayectoria de los huracanes generados en el Pacífico Oriental es principalmente oeste-noroeste, virando ocasionalmente al norte-noreste hacia la península y suroeste de los Estados Unidos. El cambio de trayectoria es atribuido principalmente a sistemas de circulación omega que evolucionan a sistemas de baja presión generados en latitudes medias, que contribuyen para conducir a los huracanes hacia el macizo continental y la península. La cantidad de precipitación vertida por los huracanes en la península es un factor determinante para que exista transporte de sedimento hacia el Golfo de California y modelación del paisaje. Registros de precipitación mayores de 100 mm han producido efectos "significativos". Aun cuando los huracanes se encuentran a 250 km de la costa, han aportado grandes cantidades de agua, como el caso del huracán Linda (1997), que produjo una precipitación de  $>300$  mm en algunas localidades. Las secuelas de los huracanes, producto de intensa precipitación y escurrimientos extraordinarios, se identifican desde la avulsión hasta el ensanchamiento de cauces, y en muchas ocasiones inundaciones en los poblados cercanos a la costa y al margen de



los arroyos, las cuales pueden ser detectadas empleando imágenes satelitales temporales, donde la diferencia de reflectancia de los materiales es empleada para identificar los cambios producidos. La sustracción de bandas es un procedimiento rápido y confiable para la identificación de los efectos producidos por precipitación extraordinaria.

Los escurrimientos extraordinarios generados por las tormentas monzónicas y tropicales en la península de Baja California han contribuido en la sedimentación del Golfo de California. El aporte y volumen de material dependerá de las características hidrológicas de la cuenca donde ocurra la precipitación; por ejemplo, cuencas con rocas muy intemperizadas aportarán mayor cantidad de sedimento. Las estimaciones realizadas muestran que una subcuenca de ~21 km<sup>2</sup> puede suministrar 4833 m<sup>3</sup> de sedimento. De ahí que cuencas de mayores dimensiones como la cuenca de San José del Cabo, podrían aportar mayor volumen de sedimento al Golfo de California.

## AGRADECIMIENTOS

G. Martínez Gutiérrez agradece al Ing. Vicente Aguilar por proporcionar el registro climatológico del estado de Baja California Sur. L. Mayer agradece el apoyo brindado por parte del Servicio Geológico de los Estados Unidos, Centro de Datos EROS Data por su apoyo de este proyecto piloto el cual fue iniciado durante su estancia científica en EROS en 1998. Este artículo es un resultado de los Principios de la iniciativa de la Aplicación de Tecnología del Espacio (FaSt). El apoyo a la investigación fue otorgado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, bajo USGS del acuerdo No. 99CRAG0009 y el fondo NSF EAR-9802790. Los autores agradecen las revisiones y sugerencias hechas por M. en C. Manuel Cruz Castillo y un revisor anónimo, las que ayudaron a mejorar sustancialmente el manuscrito. El apoyo para el trabajo de campo en Baja California durante el verano de 1998 fue proporcionado a través de la NASA en apoyo para evaluar los efectos del Huracán Nora.

## REFERENCIAS

- Crutcher, H.L., and Quayle, R.G., 1974. Mariners worldwide climatic guide to tropical storms at sea: Naval Weather Service Environmental Detachment, Asheville, NC, 426 pp.
- Ely, L.L., 1997. Response of extreme floods in the southwestern United States to climatic variations in the late Holocene: *Geomorphology*, v. 19, p. 175-201.
- Gerson, R., 1977. Sediment transport for desert watersheds in erodible materials: *Earth Surface Processes*, v. 2, p. 343-361.
- Markham, C., 1972. Baja California's climate: *Weatherwise Magazine*, Volume April, p. 64-76.
- Martínez-Gutiérrez, G., 2002. Assessment of landscape change associated with tropical cyclone phenomena in Baja California Sur, Mexico, using satellite remote sensing [Dissertation thesis-Ph.D.]: Oxford, OH, Miami University, 146 pp.

- Mayer, L., 1998. Satellite remote sensing of flood related landscape change resulting from hurricanes in Baja California and the southwestern United States, *en* Hassan, M., Slaymaker, O., Berkowicz, S., y Church, M., eds., *Drainage Basin Dynamics and Morphology*: Jerusalem, International Association of Hydrological Sciences, (en prensa).
- NOAA, 2001. Hurricane database, National Oceanic and Atmospheric Administration, [<http://hurricane.csc.noaa.gov/hurricanes/>].
- Nordin, C.F.J., 1963. A preliminary study of sediment transport parameters Rio Puerco near Bernardo, New Mexico, United States Geological Survey, 21 pp.
- Smith, W., 1986. The effects of eastern North Pacific tropical cyclones on the southwestern United States, National Oceanic and Atmospheric Administration, Technical Memorandum National Weather Service WR-197, 229 pp.
- Taylor, A.S., 1971. A historical summary of Baja California from its discovery in 1532 to 1867: Socio-Technical Books, Pasadena, Ca., 200 pp.
- Webb, R.H., and Betancourt, J.L., 1990. Climatic variability and flood frequency of the Santa Cruz river, Pima County, Arizona: Tucson, AZ, United States Geological Survey, Open-File Report 90-553, 69 pp.
- Weismiller, R.A., Kristoof, S.J., Scholz, D.K., Anuta, P.E., and Momen, S.A., 1977. Change detection in coastal zone environments: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 43, p. 1533-1539.

Recepción del manuscrito: 18 marzo, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 13 septiembre, 2004

Aceptación del manuscrito: 25 septiembre, 2004

## BOLETÍN DE LA RED SÍSMICA DEL NOROESTE DE MÉXICO (PERIODO ENERO A JUNIO DE 2004)

GRUPO RESNOM

Depto. de Sismología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE

E-mail: resnom@cicese.mx

### INTRODUCCIÓN

El objetivo de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) es registrar la actividad sísmica de la región norte de Baja California y la porción occidental del estado de Sonora, México, entre los 30° y 33° de latitud norte y 114° y 117° de longitud oeste, aproximadamente (Figura 1). La información digital de los temblores que esta red registra es esencial para estudios sismotectónicos de la región por estar en un segmento importante de la frontera entre las placas Norteamérica y Pacífico.

La red consiste de 12 estaciones de periodo corto, 3 estaciones de banda ancha y una estación de periodo largo. Cada estación está constituida por tres sismómetros que registran dos componentes mutuamente ortogonales de movimiento horizontal y una componente de movimiento vertical. Una descripción de las características de la instrumentación usada en las estaciones puede verse en Grupo RESNOM (2002). Las señales digitales generadas en los diferentes sitios de ubicación de las estaciones se envían por medio de enlaces de radio (para estaciones de periodo corto) o mediante un sistema de transmisión combinado de radio enlaces e internet (para estaciones de banda ancha) al centro de procesado en Ensenada, B.C. La descripción de los sistemas de adquisición de las señales de periodo corto y de periodo largo se encuentra en Arregui (2004) y, la del sistema de adquisición de las señales de banda ancha, en Grupo Resnom (2003).

Como resultado del funcionamiento de RESNOM se ha generado un importante banco de datos formado por sismogramas, tiempos de arribo, localizaciones hipocentrales y magnitudes de los sismos del norte de Baja California principalmente. En este trabajo se presenta una descripción breve del procesamiento de los datos sísmicos y una exposición sucinta de la sismicidad registrada por RESNOM durante el periodo de enero a junio de 2004.

---

#### PERSONAL DEL GRUPO RESNOM

Investigadores Responsables: Antonio Vidal Villegas y Luis Munguía Orozco

Técnicos en electrónica: Luis Orozco León y Oscar Gálvez Valdez

Técnicos lectoristas: Ignacio Méndez Figueroa y Francisco Farfán Sánchez

Programador: Sergio Arregui Ojeda

### PROCESAMIENTO DE DATOS

Para un sismo dado, tanto las señales de periodo corto como las señales de banda ancha y, en algunos casos, las señales provenientes de la estación de periodo largo se cambian al formato SEISAN. Una vez que se tienen todas las señales en un solo formato, se agrupan y se genera un solo archivo con toda la información del sismo. Este archivo se registra a continuación en la base de datos de RESNOM (siguiendo la estructura de SEISAN) para efectuar el procesamiento estándar del sismo registrado. Dicho procesamiento consiste en leer tiempos de arribo, localizar el hipocentro y calcular la magnitud correspondiente.

#### LOCALIZACIÓN DE HIPOCENTROS

A partir de enero de 2003, para la localización de los sismos, se utiliza el programa HYPOCENTER de Lienert y Havskov (1995), el que forma parte del paquete SEISAN. Los modelos de velocidades de la corteza usados en el proceso de localización son los propuestos por Nava y Brune (1982) para las Sierras Peninsulares de Baja California (SPBC) y Munguía (1995) para el Valle de Mexicali (VM). Este último modelo está basado en la estructura de velocidades propuesta por McMechan y Mooney (1980) para el Valle Imperial. Para sismos que ocurren en la vecindad de la frontera con el estado de California se utilizan frecuentemente los tiempos de arribo proporcionados por la Red Sísmica del Sur de California (SCSN), U.S. Geological Survey (USGS) y por el Centro de Datos del Sur de California (SCEDC).

#### CÁLCULO DE MAGNITUDES

A partir de enero de 2003 se reportan dos tipos de magnitud: la magnitud local y la magnitud de duración. La magnitud local se calcula a partir de las amplitudes máximas medidas en sismogramas Wood-Anderson equivalentes. Estas amplitudes se utilizan en combinación con alguna de las dos relaciones empíricas propuestas por Vidal y Munguía (1999) para el cálculo de la magnitud local: una para las SPBC y otra para el VM. La magnitud de duración se calcula con base en la duración medida en los registros de periodo corto y la relación propuesta por González y García (1989).

Como resultado del procesamiento de los datos, se generan Boletines de Información Sísmica, los cuales contienen tiempos de arribo, localizaciones hipocentrales y valores de magnitud de los sismos registrados. A partir del año 2003 estos boletines se envían



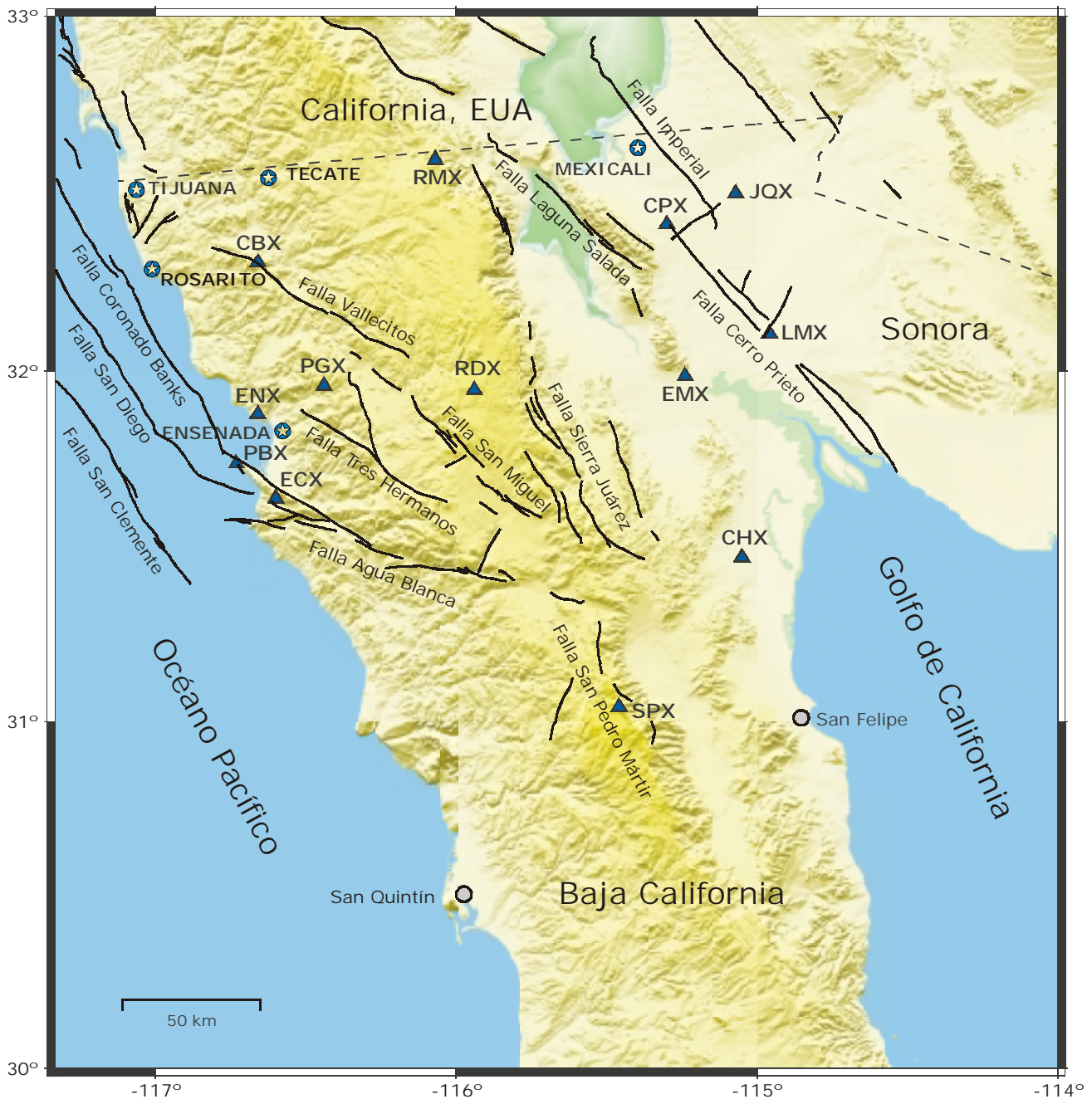


Figura 1. Fallas principales de la región norte de Baja California y estaciones sísmicas (triángulos) de la Red Sísmica del Noroeste de México.

al International Seismological Center y además pueden consultarse en la página electrónica de RESNOM (<http://sismologia.cicese.mx/resnom>).

## SISMICIDAD DE ENERO A JUNIO DE 2004

Durante este semestre se localizaron alrededor de 950 sismos en la región, con magnitudes comprendidas entre 0.6 y 5.5. Los epicentros de estos sismos definen varias áreas de actividad sísmica (Figura 2). De la Figura 2 se aprecia que en la región de las Sierras

Peninsulares de Baja California, la sismicidad se concentra en la porción central de la falla Sierra Juárez y a lo largo de las fallas San Miguel y Vallecitos. Con respecto a la región del Valle de Mexicali, la sismicidad se concentra entre las fallas Imperial y Cerro Prieto y en el extremo sur de la falla Laguna Salada. En la Tabla I se presentan las localizaciones hipocentrales de 49 sismos de magnitud igual o mayor que 3.0. De estos sismos, 9 se localizaron en el Golfo de California ( $3.1 \leq M \leq 4.9$ ), 7 en los extremos sur y norte de las fallas Imperial y Cerro Prieto ( $3.4 \leq M \leq 4.2$ ), 16 en la región de las Sierras Peninsulares de Baja California ( $3.0 \leq M \leq 3.9$ ) y 9 en el sur de California ( $3.0 \leq M \leq 3.9$ ). Sobresale este semestre el

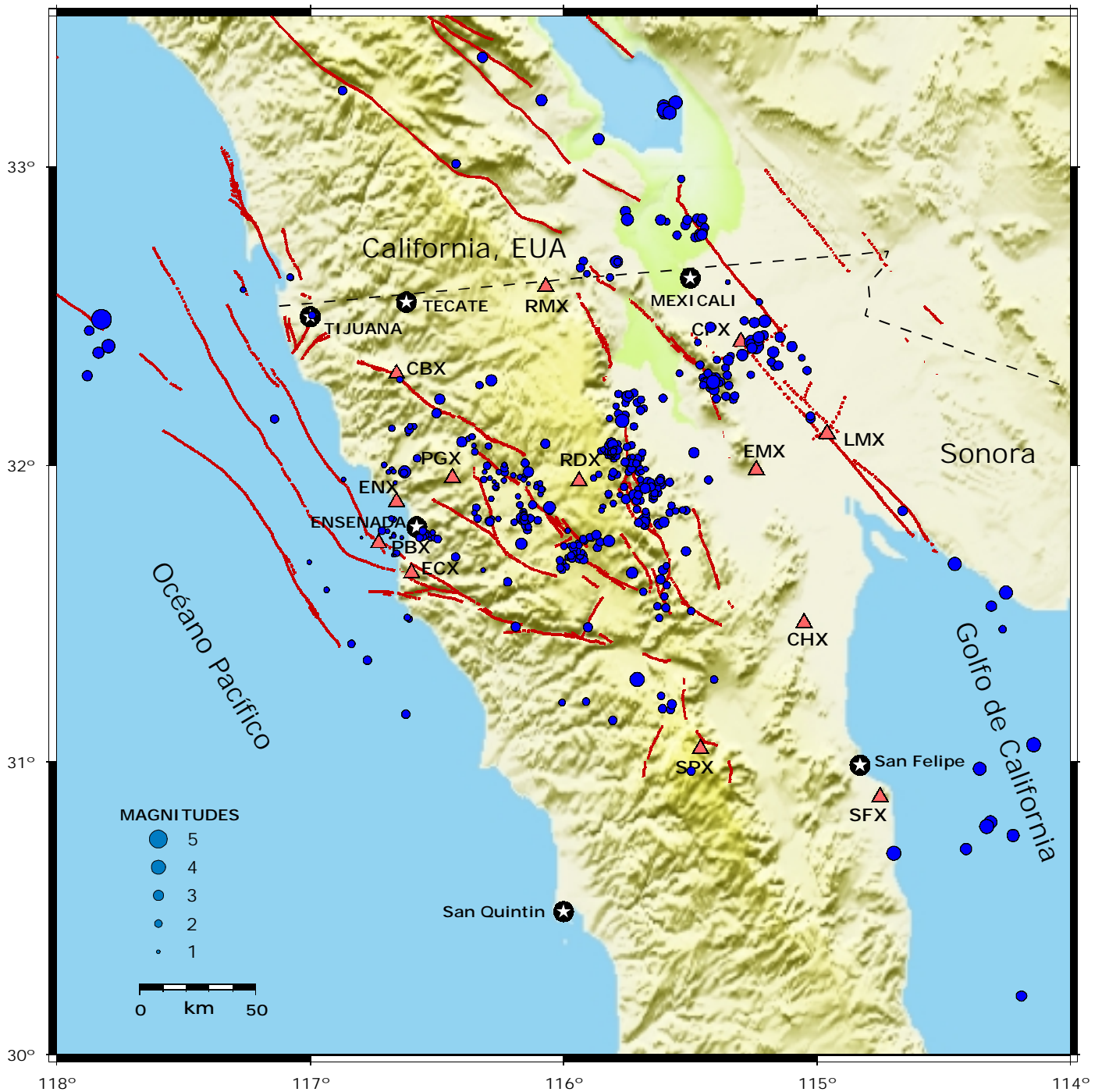


Figura 2. Epicentros de temblores (círculos) de la región registrados durante el primer semestre de 2004.

sismo de magnitud 5.5 ocurrido el 15 de junio de 2004 a las 22:28 (Tiempo Universal Coordinado). El sismo tuvo su origen en la falla San Clemente, frente a las costas de Tijuana, Baja California y fue precedido de un evento premonitor (M 3.1) 4 segundos antes del sismo principal. Este sismo fue sentido ampliamente en ciudades fronterizas de Baja California, México (Tijuana, Rosarito, Ensenada y Tecate) y del sur de California, Estados Unidos (San Diego y el sur de Los Angeles). No se reportaron daños producidos por este temblor.

## AGRADECIMIENTOS

El financiamiento de RESNOM es posible gracias al apoyo proporcionado por el CICESE a través del proyecto no. 5152. Es de agradecer el apoyo secretarial de Enid A. Morán en las actividades diarias de la red. Es de reconocer también la colaboración de Victor M. Frías Camacho en la edición final de las figuras.

## REFERENCIAS

Tabla 1. Localizaciones hipocentrales de los sismos ( $M \geq 3$ ) registrados por RESNOM durante el primer semestre de 2004.

Fecha	Origen	Latitud	Longitud	Prof.	RMS	ERH	Mag
<b>ENERO</b>							
2004-01-05	03:57:40.6	32°25.86	115°13.74	5.0*	0.1	1.3	3.1
2004-01-05	05:58:04.2	32°16.98	115°24.60	5.0*	0.2	2.0	3.6
2004-01-11	20:18:29.3	31°58.80	116°08.28	3.5	0.1	1.5	3.0
2004-01-12	17:24:52.2	32°16.74	115°24.90	5.0*	0.2	1.9	3.7
2004-01-13	07:58:53.3	31°03.48	114°08.70	7.0*	0.1	7.3	4.1
2004-01-16	12:04:13.6	30°58.62	114°21.42	6.0*	0.2	2.8	3.8
2004-01-16	17:40:00.9	32°09.12	115°46.14	5.0*	0.3	2.0	3.6
2004-01-17	09:47:21.7	30°46.80	114°19.80	11.3	0.1	4.4	4.0
2004-01-17	10:11:30.7	30°47.70	114°18.84	16.3	0.1	3.6	3.6
2004-01-26	07:14:23.8	31°40.20	114°27.36	7.0*	0.1	1.1	3.6
2004-01-26	07:27:52.0	31°34.38	114°15.24	7.0*	0.2	2.5	3.6
2004-01-26	19:16:27.0	31°16.74	115°42.54	5.5	0.1	0.9	3.9
2004-01-28	12:00:14.2	31°58.80	116°37.62	8.1	0.1	0.8	3.4
2004-01-30	17:21:16.9	31°44.82	115°49.26	8.0	0.2	1.6	3.3
2004-01-31	15:24:50.9	32°17.22	116°17.10	5.5	0.2	0.9	3.3
<b>FEBRERO</b>							
2004-02-01	16:58:01.1	32°13.98	115°44.82	5.0*	0.3	1.4	3.1
2004-02-03	03:18:20.7	31°55.44	115°40.62	5.0*	0.2	2.5	3.0
2004-02-18	07:37:12.8	32°22.92	115°10.38	7.0*	0.3	2.4	3.1
2004-02-25	03:09:04.8	31°38.34	115°43.74	1.0*	0.2	4.2	3.1
2004-02-29	16:41:38.6	32°28.80	115°14.76	5.0*	0.2	2.2	3.0
<b>MARZO</b>							
2004-03-05	07:23:55.8	32°04.26	115°48.36	2.0	0.2	1.3	3.0
2004-03-09	19:50:42.2	32°29.10	115°12.30	7.0*	0.3	2.1	3.4
2004-03-09	19:54:48.1	32°24.12	115°14.40	7.0*	0.3	2.2	4.2
2004-03-13	22:08:51.3	31°51.60	116°03.36	8.0*	0.1	1.1	3.5
2004-03-14	13:04:46.0	30°42.24	114°24.72	4.0*	0.2	2.9	3.1
2004-03-15	17:19:12.6	30°41.34	114°41.82	4.0*	0.1	4.3	3.9
2004-03-16	00:30:51.0	33°10.80	115°34.86	1.4	0.4	3.9	3.7
2004-03-16	00:33:34.2	33°11.34	115°36.06	6.0*	0.3	2.5	3.9
2004-03-16	00:55:59.5	33°12.78	115°33.48	1.0*	0.2	1.6	3.6
2004-03-16	04:06:03.6	30°45.00	114°13.50	5.0*	0.2	4.5	3.4
2004-03-21	11:23:45.4	32°41.04	115°47.40	6.0*	0.3	1.3	3.4
2004-03-23	00:01:06.7	29°35.46	113°35.04	8.0*	0.3	14.9	4.9
2004-03-26	17:10:17.5	33°13.32	116°05.22	7.0*	0.2	0.8	3.2
2004-03-28	03:40:10.6	32°04.80	116°24.12	10.8	0.2	0.9	3.0
<b>ABRIL</b>							
2004-04-01	21:15:36.9	31°49.02	115°40.86	8.0*	0.2	2.3	3.4
2004-04-03	07:20:55.0	32°49.50	115°44.88	4.6	0.3	1.5	3.4
2004-04-08	15:46:22.3	33°05.52	115°51.66	10.3	0.3	1.4	3.2
2004-04-10	01:53:37.1	31°44.28	116°10.02	5.1	0.2	1.5	3.3
2004-04-15	02:28:09.1	33°56.46	116°59.34	9.0	0.3	2.1	3.4
2004-04-18	01:13:41.5	32°49.38	115°36.96	6.0*	0.3	1.3	3.0
2004-04-22	12:46:49.6	33°10.62	115°36.24	1.0*	0.3	1.7	3.3
2004-04-29	17:23:51.2	31°41.76	115°55.98	5.9	0.2	1.1	3.6
<b>MAYO</b>							
2004-05-13	06:04:29.2	33°38.94	116°44.10	12.6	0.2	2.7	3.1
<b>JUNIO</b>							
2004-06-15	22:28:46.5	32°22.82	117°50.20	15.2	0.2	3.6	3.1
2004-06-15	22:28:50.1	32°23.05	117°50.40	10.0*	0.3	2.0	5.5
2004-06-16	00:43:48.3	32°25.14	117°48.12	12.0*	0.3	2.3	3.6
2004-06-17	06:44:45.8	32°18.42	117°52.98	11.4	0.1	3.2	3.0
2004-06-21	12:12:40.3	32°22.32	115°17.64	3.0*	0.2	1.4	3.3
2004-06-30	05:46:32.0	32°24.84	115°15.42	7.0*	0.4	3.7	4.0

Arregui, S., 2004. Adquisición y visualización de datos de la Red Sísmica del Noroeste de México. Tesis de licenciatura, UABC, Ensenada, Baja California, 93 pp.

González, J.J. y R.A. García, 1986. Escala de magnitud-coda para estaciones sísmográficas en el norte de Baja California, Resumen extenso en Memorias de la Reunión 1986 de la Unión Geofísica Mexicana, A. C., 399-406.

Grupo RESNOM, 2002. Estado actual de RESNOM y sismicidad de la región noroeste de México en el periodo septiembre-diciembre de 2001. GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A. C., V. 22-1, 43-48.

Grupo RESNOM, 2003. Procesamiento de datos y sismicidad registrada por RESNOM durante el periodo enero a junio de 2003. GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A. C., V. 23-1, 37-41.

Lienert, B.R. and J. Havskov, 1995. A computer program for locating earthquakes both locally and globally, Seismological Research Letters, V. 66-5, p. 26-36.

McMechan, G.A. and W.D. Mooney, 1980. Asymptotic ray theory and synthetic seismograms for laterally varying structures: theory and application to the Imperial, Valley, California. Bulletin of the Seismological Society of America, V. 70, 2021-2035.

Munguía, L., 1995. Estudio de microsismicidad en la zona de Riito, Sonora, México. Informe técnico final CICESE-CFE, 33 pp.

Nava, F.A. and J.N. Brune, 1982. An earthquake-explosion reversed refraction line in the Peninsular Ranges of southern California and Baja California Norte. Bulletin of the Seismological Society of America, V. 72- 4, p. 1195-1206.

Vidal, A. and L. Munguía, 1999. The ML scale in northern Baja California, México. Bulletin of the Seismological Society of America, V. 89-3, p. 750-763.

# LA INFLUENCIA DE LOS CICLONES TROPICALES EN LA LLUVIA DEL NOROESTE DE BAJA CALIFORNIA Y SUROESTE DE CALIFORNIA

Edgar G. Pavía

Depto. de Oceanografía Física, CICESE

Correo electrónico: epavia@cicese.mx

## RESUMEN

En el noroeste de Baja California, México y suroeste de California, Estados Unidos de América (33° N, 117° W), generalmente llueve poco durante el verano, pero como la temporada ciclónica en el Océano Pacífico nororiental es de mayo a noviembre, podemos suponer que es posible detectar en los registros de precipitación de esta región la influencia de los ciclones tropicales. Se propone un método estadístico específicamente diseñado para intentar detectar esta influencia y se verifica con los archivos de ciclones disponibles (1949-2003). Los resultados de esta investigación sugieren que los ciclones tropicales provocan las lluvias de verano en esta región; sin embargo esta relación causa-efecto no parece tener ni un patrón temporal, ni una relación directa con el número de ciclones por temporada, ni la intensidad o aproximación a la región de estos. Finalmente un estudio preliminar de los datos de precipitación de 1921 a 1948 sugiere la existencia de por lo menos 4 ciclones productores de lluvia en esta región que proponemos nombrarlos: Amando en 1925, Katsuo en 1936, Pedro en 1939 y Ricardo en 1941.

**Palabras clave:** Ciclón tropical, Baja California, Océano Pacífico nororiental.

## ABSTRACT

In northwestern Baja California, Mexico, and southwestern California, USA (33° N, 117° W), there is usually little rain during summer, but, since the cyclone season in the Pacific Ocean is from May to November, we can suppose that it should be possible to detect, in the regional precipitation logs, the influence of tropical cyclones. We propose a statistical method, specifically designed to try to detect this influence, and check it with the available (1949-2003) archives on cyclones. The results of this research suggest that tropical cyclones cause the summer rains in this region; however this cause-effect relation seems to have neither a temporal pattern, nor a direct relationship to the number of cyclones in a season, nor to their intensity or closeness to the region. Finally, a preliminary study of precipitation data from 1921 to 1948 suggests the existence of at least four rain-producing cyclones in the region that we propose to name: Amando in 1925, Katsuo in 1936, Pedro in 1939, and Ricardo in 1941.

**Keywords:** Tropical cyclone, Baja California, Northeastern Pacific Ocean.

## INTRODUCCIÓN

La media de la precipitación pluvial de mayo a octubre (período que llamaremos verano extendido) en el noroeste de Baja California y suroeste de California, Ee. Uu. (33°N, 117°W), es sólo alrededor de 20 mm, mientras que durante el invierno es de alrededor de 200 mm. La media total anual es alrededor de 250 mm. Sin embargo el índice de variación, definido como la razón de la desviación estándar sobre la media ( $I \equiv \sigma/\mu$ ), de la precipitación del verano extendido es más alto ( $I \sim 1$ ) que el de la precipitación de invierno ( $I \sim 1/2$ ). La variabilidad de esta última es muy probable que esté asociada al fenómeno de "El Niño-Oscilación Austral" (ENOA), pero la variabilidad de verano probablemente esté más asociada a la actividad tropical que al ENOA. Como la precipitación de invierno en esta región representa aproximadamente el 80% de

la precipitación anual, ésta ha sido más estudiada que la de verano y su relación (así como la de la precipitación total) con el fenómeno de ENOA es bien conocida (ver, por ejemplo, Schonher y Nicholson 1989). De hecho se puede sugerir que de una manera físicamente similar también existe una relación con fenómenos de más baja frecuencia como la "Oscilación Decenal del Pacífico" (ver, por ejemplo, Gershunov *et al.* 1999). Por otro lado, como en esta zona la precipitación de verano representa menos del 10% de la precipitación anual, no ha sido muy estudiada y su relación con la actividad tropical no se conoce muy bien. Es por eso que este estudio se enfocará en la lluvia de verano en el noroeste de Baja California y suroeste de California y su posible relación con los ciclones tropicales del Océano Pacífico nororiental. La motivación de este estudio es en dos sentidos, primero para estudiar su alta variabilidad, como mencionamos más arriba, y segundo para investigar la posible relación entre la actividad tropical y la lluvia en esta región. No

está de más mencionar que esta zona se caracteriza por su alto crecimiento demográfico, económico e industrial y por ser el agua el factor limitante de este crecimiento. Para ver la influencia de los ciclones tanto del Pacífico como del Golfo de México en la precipitación del norte del país el lector puede consultar el trabajo de Jáuregui (1989).

Este trabajo está basado en los archivos de ciclones de *Unisys Corporation*, que pueden ser consultados en [http://weather.unisys.com/hurricane/e\\_pacific/](http://weather.unisys.com/hurricane/e_pacific/) (lo que explica la ausencia de gráficas en este trabajo) y los registros de precipitación de 1949 a 2003 en dos estaciones: Ensenada, Baja California, México (de la Comisión Nacional del Agua), y San Diego, California, Estados Unidos de América (del *National Weather Service*); las características generales de estos registros se pueden consultar en Pavía (2004). Para representar mejor las temporadas de ciclones de estos 55 años analizaremos los datos del verano extendido (junio a octubre) en lugar de analizar sólo los datos del verano. También se presenta una extensión preliminar de este estudio a los datos de precipitación de San Diego y de ciclones tropicales reportados por Serra (1971) cubriendo el periodo de 1921 a 1948.

Los archivos de ciclones de *Unisys* muestran que, entre tormentas tropicales y huracanes, cada año se generan aproximadamente unos 14 ciclones tropicales en el Océano Pacífico nororiental. Estos concentran la mayor parte de su actividad ciclónica en un cuadro de  $20^\circ \times 20^\circ$  centrado en el punto  $20^\circ\text{N}$ ,  $110^\circ\text{W}$  (este último se encuentra cerca de la isla Socorro). Los archivos muestran un aparente aumento en el número de ciclones por año, pero como los métodos de observación han cambiado con el tiempo (el uso de aviones de reconocimiento empezó en 1944 y el de satélites artificiales en 1966) esta tendencia no puede ser tomada en cuenta. La idea es examinar los registros de lluvia para ver si es posible detectar la influencia de los ciclones en esta región. Las lluvias pueden no estar asociadas directamente a la intensidad del ciclón (ya sea tormenta tropical o huracán), ni a la localización de su ojo, ni a su duración, sino más bien al campo de nubosidad que el ciclón genera pues puede llover antes o después del ciclón.

## MÉTODOS

Para resaltar los años en los que la temporada de ciclones tuvo influencia en los registros de lluvias de nuestra región (alrededor de  $33^\circ\text{N}$ ,  $117^\circ\text{W}$ ) primeramente construimos una serie de "anomalías estandarizadas redondeadas" de precipitación de la temporada para cada una de las dos estaciones. Lo anterior se hace de la siguiente manera:

- i) Se suman las precipitaciones de junio a octubre de cada año (de aquí obtenemos 55 datos:  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 55$ ).
- ii) Se calcula el promedio,  $\mu$ , y la desviación estándar,  $\sigma$ , de estos 55 datos.
- iii) A cada dato de i) se le resta el promedio y se divide entre la desviación estándar,  $\beta_i = (x_i - \mu) / \sigma$ .

- iv) Se redondea hacia cero cada dato de iii),  $\alpha_i = \text{fix}(\beta_i)$ .

El punto iv) es para obtener claridad, a costa de perder un poco de resolución, ya que la función *fix* se define como el redondeo al entero más cercano hacia el cero, por ejemplo:  $\text{fix}(1.6) = 1$ ,  $\text{fix}(-0.9) = 0$ ; con este método no encontramos ningún  $\beta < -1$ , es decir ningún verano anómalamente seco, por lo que el valor mínimo de  $\alpha$  es cero. Una vez obtenido lo anterior sólo resta investigar si los valores diferentes de cero están verdaderamente asociados a actividad tropical; es decir, veremos si los  $\alpha_i \neq 0$  corresponden a la presencia de uno o varios ciclones, en el Océano Pacífico nororiental de acuerdo con los archivos de *Unisys*.

## RESULTADOS

Con los criterios mencionados arriba el primer resultado importante es la ausencia de una temporada ciclónica productora de lluvia en nuestra región durante los últimos 16 años, ya que el último verano lluvioso ocurrió en 1987. Lo anterior a pesar de los "notorios" huracanes del 2003, Ignacio durante agosto y Marty durante septiembre, que no produjeron precipitación en el noroeste de Baja California, pero causaron grandes daños en el extremo sur de la península; o Juliette, que después de atravesar el Golfo de California tocó tierra en San Felipe el 3 de octubre de 2001. Algunos otros ciclones probablemente sí produjeron lluvia en nuestra región, pero no la suficiente para contribuir a un  $\alpha_i \geq 1$  durante el verano extendido (por ejemplo, la tormenta tropical Olivia durante los primeros días de octubre de 2000, el huracán Nora a mediados de septiembre de 1997 (Farfán y Zehnder, 2001), el huracán Hernán durante los primeros días de octubre de 1996, los huracanes Linda y Marty durante octubre de 1991, y el huracán Olivia durante octubre de 1982 que causó fuertes lluvias y destrucción al norte del estado de California EUA, según reportó Gunther *et al.* en 1983).

Las temporadas ciclónicas que claramente produjeron lluvia en nuestra región y se registraron en ambas estaciones son:

- i) 1987, causada por el huracán Ramon a principios de octubre y/o la tormenta tropical Selma a finales de octubre ( $\alpha_i = 3$ , en Ensenada y  $\alpha_i = 2$ , en San Diego),
- ii) 1976, causada por la tormenta tropical Kathleen a mediados de septiembre ( $\alpha_i = 1$ , en Ensenada y en San Diego),
- iii) 1972, causada por los huracanes Hyacinth y/o Joanne durante septiembre y octubre ( $\alpha_i = 4$ , en Ensenada y en  $\alpha_i = 1$  San Diego), y
- iv) 1957, causada por uno, dos o los tres huracanes H10, H11 y H12 (aún no se les designaba con nombres propios) durante octubre ( $\alpha_i = 1$ , en Ensenada y  $\alpha_i = 2$ , en San Diego).

Otras temporadas menos claras, registradas sólo en la estación San Diego son:

- i) 1986, probablemente causada por los huracanes Paine y/o Roslyn durante septiembre y octubre ( $\alpha_i = 2$ ),



- ii) 1977, causada por la tormenta tropical Doreen durante agosto ( $\alpha_i=2$ ),
- iii) 1971, causada por el huracán Priscilla durante octubre ( $\alpha_i=1$ ),
- iv) 1963, causada por la tormenta tropical Kathrine durante septiembre ( $\alpha_i=1$ ), y
- v) 1951, probablemente causada por la tormenta tropical TS6 (aún no se les designaba con nombres propios) durante agosto ( $\alpha_i=1$ ).

Similarmente a lo anterior presentamos las temporadas sólo registradas en la estación Ensenada:

- i) 1983, causada por los huracanes Manuel y/o Priscilla y/o la tormenta tropical Octave durante septiembre y octubre ( $\alpha_i=2$ ), y
- ii) 1974, causada por el huracán Patricia durante octubre ( $\alpha_i=3$ ).

En resumen, lo anterior muestra un total de 11 temporadas ciclónicas productoras de lluvia en el noroeste de Baja California y suroeste de California en los 55 años del periodo principal de estudio (1949-2003).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Debido a que la temporada ciclónica del Océano Pacífico nororiental coincide con la temporada seca del noroeste de Baja California y suroeste de California, encontramos que es relativamente fácil detectar en sus registros mensuales de precipitación la influencia de los ciclones tropicales. A grandes rasgos podemos decir que, como las precipitaciones son mínimas de junio a octubre en esta región, cualquier evento de lluvia durante este periodo está asociado a un fenómeno tropical. Por eso este análisis se centra en la identificación de las temporadas ciclónicas que suponemos produjeron clara y apreciablemente precipitaciones en la región. El análisis anterior indica que al parecer no existe un patrón claro y definido. Por ejemplo, en promedio se presenta una temporada ciclónica productora de lluvia en el noroeste de Baja California y suroeste de California cada 5 años; sin embargo esto no ha ocurrido en los últimos 16 años. Podríamos decir que muy probablemente pronto tengamos una temporada ciclónica lluviosa en nuestra región, pero la distribución temporal de estos eventos también es bastante irregular. Por ejemplo, mientras que en la década de los 70 se presentaron 5 temporadas ciclónicas productoras de lluvia, en la década de los 90 no se presentó ninguna. Lo anterior puede deberse a que nuestra región se encuentra en el límite septentrional de la actividad tropical del Océano Pacífico nororiental; de hecho el que San Diego registre más  $\alpha_i \neq 0$  (es decir veranos lluviosos) que Ensenada sugiere la existencia de una contribución extra-tropical en las precipitaciones inicialmente de origen ciclónico tropical.

Las once temporadas ciclónicas productoras de lluvia en nuestra región mencionadas en la sección anterior presentan algunas características que es necesario señalar. Por ejemplo la de 1987, claramente registrada en San Diego y Ensenada, fue causada por la acción combinada del huracán Ramón y la tormenta tropical Selma, a pesar de que ninguno de los dos se aproximó a nuestra región (ver los archivos de *Unisys* en la dirección de internet dada más arriba). La de 1976, también registrada en las dos estaciones, fue causada por la tormenta tropical Kathleen, que –en contraste con los ciclones de 1987– cruzó la frontera México-EUA por Tecate (ver los archivos de *Unisys*). La de 1972, registrada en las dos estaciones pero mucho más claramente en Ensenada, que causada por el huracán Hyacinth, que tocó San Diego como depresión tropical y por el posterior huracán Joanne que tocó tierra al sur de San Quintín (ver los archivos de *Unisys*). La de 1957, registrada en las dos estaciones pero más claramente en San Diego, sólo pudo ser causada por las condiciones originadas por los huracanes H10, H11 y H12; sin embargo H10 cruzó Baja California Sur y se internó a EUA por la región de Ciudad Juárez, y H11 y H12 tocaron tierra y se disiparon en Sinaloa (ver los archivos de *Unisys*).

De las temporadas que sólo fueron registradas en San Diego es necesario mencionar lo siguiente: la de 1986, al parecer, fue causada por los huracanes Paine y Roslyn, pero no es claro si los remanentes de dos ciclones anteriores (la tormenta tropical Madeline y el huracán Newton) también contribuyeron (ver Gunther y Cross 1987). En contraste, la de 1977 fue claramente causada por la tormenta tropical Doreen. La de 1971 parece haber sido causada por el huracán Priscilla, pero el previo huracán Olivia pudo también haber contribuido. En la de 1963 la situación es más confusa, aunque fue causada por la tormenta tropical Kathrine (llamada Jen-Kath en los archivos de *Unisys*). Esta tormenta no fue detectada sino hasta que estaba a unos 300 km al suroeste de nuestra región el 17 de septiembre y posteriormente tocó tierra al sur de Ensenada (Garza 1999). La de 1951 fue causada por la tormenta tropical TS6 que también tocó tierra al sur de Ensenada, con contribución probable de la tormenta tropical TS5 (ver los archivos de *Unisys*).

De las temporadas que sólo fueron registradas en Ensenada es necesario mencionar lo siguiente: la de 1983 parece haber sido causada por la acción combinada de los huracanes Manuel y Priscilla; sin embargo, la tormenta tropical Octave produjo precipitaciones de 2 a 3 veces mayores que las que produjeron Manuel o Priscilla (Garza 1999), por lo que no se descarta su contribución. La de 1974 sólo pudo haber sido causada por el huracán Patricia, a pesar de que nunca se acercó a nuestra región (ver los archivos de *Unisys*).

Recapitulando, podemos concluir que es posible detectar la influencia de los ciclones tropicales en los registros de lluvia de la temporada seca del noroeste de Baja California y suroeste de California. Eventos claros y bien definidos de lo anterior ocurren en promedio cada 5 años, pero con una fuerte irregularidad temporal. Como esta región se localiza en el extremo septentrional de la zona de actividad ciclónica, los mecanismos físicos que producen lluvia durante el verano extendido pueden incluir algún tipo de influencia

extra-tropical, especialmente en octubre hacia fines de la temporada ciclónica, pero la conclusión preliminar anterior requiere de mayores estudios, no sólo estadísticos, sino preferentemente físicos.

Finalmente, la aplicación de este análisis a los datos de precipitación de 1921 a 1948 en San Diego sugiere la existencia de por lo menos 4 ciclones productores de lluvia en esta región, pero es difícil saber si fueron o no detectados (ver Serra 1971). De manera preliminar proponemos que la temporada ciclónica lluviosa de 1925, registrada muy claramente, fue causada por lo menos por un ciclón no identificado al que llamaremos Amando. Similarmente, la de 1936 pudo haber sido causada por un ciclón que proponemos llamar Katsuo. La de 1939, registrada muy claramente, probablemente causada por un ciclón que similarmente llamaremos Pedro y la de 1941, también registrada muy claramente, probablemente causada por el huracán Ricardo. De manera similar hemos estudiado los antiguos registros de lluvia del siglo XIX y principios del siglo XX (1850-1920) en nuestra región, pero en este caso requerimos de información adicional, porque los datos de precipitación no son totalmente confiables, y por lo tanto no presentamos los resultados.

## AGRADECIMIENTOS

Respetuosamente he escogido los nombres de cuatro maestros ya fallecidos de la Facultad de Ciencias Marinas, de la Universidad Autónoma de Baja California, para nombrar los ciclones que al parecer no fueron identificados: Amando Dieguez, Katsuo Nishikawa, Pedro Mercado y Ricardo Suárez. Mi trabajo es financiado por el sistema CONACYT. Agradezco a Armando Garza del *National Weather Service* el envío de su memorando técnico NOAA NWS WR-258, sus comunicaciones personales sobre ciclones tropicales y los registros de precipitación en San Diego, y a Luis Farfán de la estación de CICESE en La Paz, por haberme hecho saber del trabajo del desaparecido doctor Sergio Serra. Las opiniones de dos revisores anónimos contribuyeron a mejorar este artículo. Agradezco a la Comisión Nacional del Agua los datos de precipitación de Ensenada.

## REFERENCIAS

- Farfán, L.M. and J.F. Zehnder, 2001. An analysis of the landfall of hurricane Nora (1997). *Monthly Weather Review*, v. 129, p. 2073-2088.
- Garza, A.L., 1999. 1985-1998 North Pacific tropical cyclones impacting the southwestern United States and northern Mexico: An updated climatology. NOAA Technical Memorandum NWS WR-258, San Diego, 83 pp.
- Gershunov, A., Barnett, T.P. and Cayan, D., 1999. North Pacific interdecadal oscillation seen as a factor in ENSO-related North American climate anomalies. *Eos*, v. 80, p. 25-30.
- Gunther, E.B. and Cross, R.L., 1987. Eastern north Pacific tropical cyclones of 1986. *Monthly Weather Review*, v. 115, p. 2507-2523.
- Gunther, E.B., Cross, R.L. and Wagoner, R.A., 1983. Eastern north Pacific tropical cyclones of 1982. *Monthly Weather Review*, v. 111, p. 1080-1101.
- Jáuregui, E., 1989. Los ciclones del norte de México y sus efectos sobre la precipitación. *Ingeniería Hidráulica en México*, Septiembre-Diciembre, 43-50.
- Pavía, E.G., 2004. The uncertainty of climatological values. *Geophysical Research Letters*, v. 31, L14206, doi:10.1029/2004GL020526.
- Schonher, T. and Nicholson, S.E., 1989. The relationship between California Rainfall and ENSO events. *Journal of Climate*, v. 2, p. 1256-1269.
- Serra, S., 1971. Hurricanes and tropical storms of the west coast of Mexico, *Monthly Weather Review*, v. 99, p. 302-308.

Recepción del manuscrito: 24 de mayo, 2004

Recepción del manuscrito corregido: 25 agosto, 2004

Aceptación del manuscrito: 27 septiembre 2004

## ADENDA DEL 1 DE OCTUBRE, 2004

Después de casi dos décadas de no tener en la región de estudio lluvias significativas de verano (de acuerdo con la definición dada en este trabajo), la temporada de huracanes de 2004 (hasta el 30 de septiembre) parecía ser la primera en producir precipitaciones de verano en esta región. El huracán Howard, degradado a tormenta tropical, se acercó a nuestra región el 9 de septiembre (aproximadamente a 25° N, al sur de Ensenada), produciendo precipitaciones moderadas en los valles y regiones montañosas a los alrededores de la región (Met. Santiago Higuera, Laboratorio de Pronóstico Meteorológico del CICESE, comunicación personal), pero no se registraron precipitaciones ni en la estación Ensenada, ni en las estaciones de San Diego ni Los Ángeles. El huracán Javier, degradado también a tormenta tropical, se acercó a nuestra región el 18 de septiembre (aproximadamente a 30° N, en el Golfo de California), pero no produjo precipitaciones significativas en la región. De no presentarse un huracán productor de precipitación en esta región en las pocas semanas que faltan para el fin de la temporada 2004, serían los Huracanes Ramón y Selma en 1987 los últimos en producir precipitación en la zona costa del sur de California y noroeste de Baja California durante los meses del verano extendido.

## INFORME DEL TESORERO

Como ha sido costumbre en los últimos años, la Reunión Anual 2003 de la UGM albergó las reuniones anuales de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM) y de la Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de información Geográfica (SEPLER). La Tesorería de la UGM se encargó del registro de participantes y de calcular el porcentaje de participación de ambas sociedades invitadas y de acreditar proporcionalmente las ganancias correspondientes. En las Tablas I, II y III se presentan los ingresos, los egresos y el balance final de la Reunión 2003. La Tabla IV es el estado de cuenta de la UGM al 31 de diciembre de 2003. Aquí se consignan todos los ingresos y gastos relativos exclusivamente a la UGM durante el ejercicio 2003.

El Tesorero de la UGM, (2002-2003)

Dr. José Manuel Romo Jones

Tabla 1. INGRESOS Reunión Anual 2003

Sociedad	Inscripción Socio		Inscripción No-Socio		Inscripción Estudiante		Costo resúmenes	Asistentes	Ingreso	Participación	
	#	Monto	#	Monto	#	Monto	Monto				
UGM	119	\$ 142,800.00	0	-	4	\$ 2,600.00	145	\$ 29,000.00	123	\$ 174,400.00	43.86
SELPER	21	\$ 25,200.00	0	-	2	\$ 1,300.00	17	\$ 3,400.00	23	\$ 29,900.00	7.52
AGM	4	\$ 4,800.00	0	-	0	-	3	\$ 600.00	4	\$ 5,400.00	1.36
Sin Sociedad	0	-	68	\$ 115,600.00	70	\$ 45,500.00	134	\$ 26,800.00	138	\$ 187,900.00	47.26
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 172,800.00</b>		<b>\$ 115,600.00</b>		<b>\$ 49,400.00</b>		<b>\$ 59,800.00</b>		<b>\$ 397,600.00</b>	<b>100.00</b>

Ingresos por concepto de renta de stands:	
Empresas:	\$ 75,000.00
Instituciones:	\$ 15,000.00
Por cobrar:	\$ 7,500.00
	<b>\$ 97,500.00</b>

TOTAL DE INGRESOS EN LA REUNIÓN 2003	
	<b>\$ 495,100.00</b>

Tabla 2. EGRESOS Reunión Anual 2003

# Factura	Concepto	Cantidad
169	Logo para Reunión 2003	\$ 5,200.00
170	Elaboración de posters	\$ 3,692.00
58123	Carpetas para la reunión	\$ 3,222.77
150	Impresión de Carpetas para la reunión	\$ 2,112.36
2527	Programas de reunión	\$ 15,015.00
21013923	Envío de papelería por camión a Pto. Vallarta	\$ 721.05
21012056	Envío de libro de resúmenes por camión a Pto. Vallarta	\$ 823.00
58050	Papelería	\$ 2,721.54
2516	GEOS VOL. 23 No. 2 "Resúmenes"	\$ 67,298.00
712 / 326	GEOS "Resúmenes" en CD	\$ 17,864.00
34	Renta de mamparas y montaje de stands	\$ 34,419.50
242	Renta de computadoras e impresoras para mesa de registro	\$ 33,166.00
3518	Renta de proyectores	\$ 8,050.00
87311	Servicios de Hotel Camino Real (café, salas, rompehielos, etc.)	\$ 70,338.25
s/n	Viáticos de personal de apoyo en mesa de registro (Araceli Chamán y Alejandra Gómez)	\$ 7,000.00
41015 y 16001	Boletos de avión a Pto. Vallarta de personal de apoyo (Ángel D. Peralta y Alejandra Gómez)	\$ 8,700.00
s/n	Apoyo técnico Informática (Ángel Daniel Peralta)	\$ 5,000.00
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 285,343.47</b>

**Tabla 2. BALANCE Reunión Anual 2003**

Sociedad	Participación	Ingresos	Egresos	Saldo
UGM	43.86%	\$ 217,166.60	\$ 125,160.72	\$ 92,005.88
SELPER	7.52%	\$ 37,232.12	\$ 21,458.17	\$ 15,773.94
AGM	1.36%	\$ 6,724.20	\$ 3,875.39	\$ 2,848.81
Sin Sociedad	47.26%	\$ 233,977.09	\$ 134,849.19	\$ 99,127.90
<b>T O T A L E S</b>	<b>100.00%</b>	<b>\$ 495,100.00</b>	<b>\$ 285,343.47</b>	<b>\$ 209,756.53</b>

**El saldo a favor SIN SOCIEDAD prorateado entre las sociedades participantes**

Sociedad	%	Prorrateo de \$ 99,127.90	SALDO FINAL
UGM	83%	\$ 82,441.13	\$ 174,447.01
SELPER	14%	\$ 14,134.12	\$ 29,908.06
AGM	3%	\$ 2,552.65	\$ 5,401.46
<b>TOTAL</b>	<b>100.00%</b>	<b>\$ 99,127.90</b>	<b>\$ 209,756.53</b>

**Tabla 4. ESTADO DE CUENTA Unión Geofísica Mexicana, A.C.**

<b>Saldo del ejercicio anterior</b>	<b>\$ 72,666.00</b>
<b>INGRESOS</b>	
Ingresos Reunión Anual 2003 (parte proporcional)	217,166.60
Inscripciones sin sociedad (parte proporcional)	82,441.13
Membresías	37,000.00
Intereses bancarios sobre saldos	636.61
	<b>337,244.34</b>
<b>EGRESOS</b>	
Gasto en organización Reunión/03 (parte proporcional)	125,160.72
Honorarios	62,700.00
Equipo de Cómputo y mantenimiento	3,923.00
Mensajería y Papelería	2,822.76
Gastos Varios	8,876.50
Camisteads y Vino	16,061.71
Pasajes y Viáticos	4,134.00
Premios en IX Olimpiada de C. T.	3,325.00
GEOS Vol. 22 No. 3	33,000.00
	<b>260,003.69</b>
<b>SALDO DEL EJERCICIO 2003</b>	<b>\$ 149,906.65</b>




## DIRECTORIO DE MIEMBROS DE LA UGM 2004

La base de datos de la Unión Geofísica Mexicana, A.C., contiene información general de los miembros así como la información de la antigüedad de sus membresías. En ella, se ha asignado a cada miembro un número de afiliación que permitirá efectuar búsquedas más eficientes acerca de su estatus. La base de datos permite tener, también, un historial por miembro de la asistencia a las reuniones.

Con base en este directorio se efectuarán los envíos de los números de las revistas **GEOS** y **GEOFÍSICA INTERNACIONAL**. Por lo anterior, lo invitamos a que verifique si sus datos están correctos y completos y, en caso de que exista algún error u omisión, nos lo haga saber vía correo electrónico ([ugm@cicese.mx](mailto:ugm@cicese.mx)) o por medio de nuestra página (<http://www.ugm.org.mx>). Junto con el primer número de **GEOS** de cada año estaremos enviando una credencial de afiliación, la cual le permitirá identificarse para recibir precios especiales en la adquisición de los libros y revistas que la UGM edita, así como obtener precios especiales en la Reunión Anual.

Finalmente, agradeceremos que divulgue la existencia de este directorio entre sus compañeros de institución, con el fin de que aquellas personas que por algún error no hayan recibido las revistas puedan conocer su situación.

 <p><b>UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA</b> • <b>Membresía 2004</b> •</p> <small>unión geofísica mexicana a.c.</small>	
<p><b>Rolando Labacha</b> Miembro # 999</p>	
<p><b>IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra Juriquilla, Qro., México 1 al 5 Noviembre de 2004</b></p>	<p><b>E-mail: <a href="mailto:ugm@cicese.mx">ugm@cicese.mx</a> Internet: <a href="http://www.ugm.org.mx">http://www.ugm.org.mx</a></b></p>



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004

No.	Miembro	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Nombre	Institución	Correo Electrónico
1	298	X								Aceves Quesada Fernando	UNAM	
2	476									Aco Palestina Abel	CICESE	abeloaco@cicese.mx
3	477								X	Aco Palestina Abel	CICESE	abeloaco@cicese.mx
4	405						X			Aguayo Ríos Alejandra	UNAM	ale@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
5	16	X	X	X			X		X	Aguirre Díaz Gerardo J.	UNAM	gjad@geociencias.unam.mx
6	360			X	X				X	Aguirre González Jorge	UNAM	joagg@pumas.iingen.unam.mx
7	457							X		Aguirre Sáenz Benito	UACH	baguirre@uach.mx
8	13	X	X		X	X	X	X		Alaniz Álvarez Susana A.	UNAM	alaniz@geociencias.unam.mx
9	444							X		Alarcon Ferreira Ana María	CENAPRED	mariana@cenapred.unam.mx
10	153		X		X					Alatorre Zamora Miguel Ángel	UDG	alatorre@quantum.ucting.udg.mx
11	15	X	X		X	X	X			Alatríste Vilchis David Rey	UNAM	david_alatríste@yahoo.com
12	288	X	X	X	X	X		X		Alva Valdivia Luis Manuel	UNAM	lalva@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
13	379					X	X			Alvarado Cano Rodney Radames	UAZ	elcano@elfoco.com
14	403						X	X		Álvarez Béjar Román	UNAM	rab@eibniz.iimas.unam.mx
15	4	X	X	X	X					Álvarez Borrego Josué	CICESE	josue@cicese.mx
16	3	X	X	X	X	X		X	X	Álvarez Borrego Saúl	CICESE	saul@cicese.mx
17	296	X								Álvarez Manilla Alfonso	IMT	amanilla@imt.mx
18	152	X			X				X	Álvarez Sánchez Luis Gustavo	CICESE	lalvarez@cicese.mx
19	154				X	X				Amador Buenrostro Alberto	CICESE	aamador@cicese.mx
20	8	X	X	X	X	X				Aragón Arreola Manuel de Jesús	CICESE	maragon@pangea.cicese.mx
21	157			X	X		X			Aranda Gómez Jorge Javier	UNAM	jjaag@geociencias.unam.mx
22	14	X		X	X	X			X	Arellano Gómez Víctor Manuel	IIE	vag@axp2.iie.org.mx
23	156		X							Arellano Guadarrama José Fco.	CFE	
24	18				X			X	X	Argote Espinoza María Luisa	CICESE	argote@cicese.mx
25	17		X			X				Armienta Hernández María Aurora	UNAM	victoria@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
26	12			X						Arredondo Fragoso Jesús	CFE	cfeinf@mail.giga.com
27	372				X	X	X	X		Arreygue Rocha Eleazar	UMICH	arrocha@zeus.umich.mx
28	384					X				Arteaga Flores Lorenzo	INEGI	
29	10			X						Arzate Flores Jorge Arturo	UNAM	arzatej@geociencias.unam.mx
30	351				X					Ávila Serrano Guillermo E.	UABC	gavila@bahia.ens.uabc.mx
31	160	X	X	X	X	X	X	X		Axen Gary	UCLA	gaxen@ess.ucla.edu
32	390					X				Backstrom Lars	UNAM	backstrom_lars@hotmail.com
33	161	X	X	X	X	X	X	X	X	Bandy William L.	UNAM	bandy@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
34	22	X	X	X	X	X	X	X	X	Barajas Díaz Pablo	ITESO	pablobd@colima.com
35	23					X	X			Barradas Miranda Víctor Luis	UNAM	vbarrada@miranda.ecologia.unam.mx
36	24	X		X	X	X		X	X	Barragán Reyes Rosa María	IIE	rmb@iie.org.mx
37	361				X					Bautista Belmonte Aarón	IPN	sjimenez@vmredipn.ipn.mx
38	317			X		X				Bautista Romero José Jesús	CIBNOR	jbautro@cibnor.mx
39	162		X						X	Beier Martín Emilio José	CICESE	ebeier@cicese.mx
40	25					X	X			Belmonte Jiménez Salvador	IPN	sbelmont@prodigy.net.mx
41	462								X	Benammi Mouloud	UNAM	mouloud
42	20	X	X							Bermúdez Angulo María Luisa	UNAM	maria@gea.iingen.unam.mx
43	208			X						Bermúdez Juárez María Blanca	BUAP	bbj@xanum.uam.mx
44	324		X							Bernal Franco Gladys	UABC	gbernal@bahia.ens.uabc.mx
45	29			X		X				Birkle Peter	IIE	birkle@iie.org.mx
46	28	X	X	X	X	X	X	X	X	Böhnel Norbert Harald	UNAM	harald@geociencias.unam.mx
47	467								X	Borboa Gómez Martín	MEX. ATLANTICA	m_borboa@yahoo.com
48	475									Bori Segura Efrain	CRM	ebsegura@coremisgm.gob.mx
49	426						X			Bote Cab Gilmer Eduardo	ITLP	eduardobotec@hotmail.com
50	27		X							Brassea Ochoa Jesús	CICESE	jbrassea@geofisica.cicese.mx
51	21	X		X	X		X	X		Bravo Cabrera José Luis	UNAM	jlbravo@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
52	19	X		X	X			X		Brito Castillo Luis	CIBNOR	lbrito@cibnor.mx
53	26	X	X							Buendía Carrera Enrique	UNAM	
54	275	X	X	X	X	X		X		Bulgakov Sergey N.	UDG	sbulgano@udgserv.cencar.udg.mx
55	232	X	X							Burrola Sánchez María Sara	CIBNOR	sburrola@cibnor.mx
56	166		X	X						Caballero Miranda Cecilia	UNAM	maga@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
57	318			X				X		Cabral Cano Enrique	UNAM	ecabral@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
58	396						X			Calderón Macías Carlos	IMP	ccalderon@imp.mx
59	33		X	X	X	X			X	Calmus Thierry	UNAM	tcalmus@servidor.unam.mx
60	399						X			Camarillo Barranco Lucio		
61	143		X	X	X	X				Campa Uganda María Fernanda	UAEG	mfernanda@data.net.mx
62	347					X				Campos Emiliano	UNAM	campossm@servidor.unam.mx
63	167	X	X		X	X			X	Campos Enriquez Oscar	UNAM	ocampos@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
64	214			X					X	Candela Pérez Julio	CICESE	jcandela@cicese.mx
65	258	X	X	X	X	X				Cañón Tapia Edgardo	CICESE	ecanon@pangea.cicese.mx



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004 Continuación

No.	Miembro	Dirección	C.P.	Ciudad	Estado	País
1	298	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
2	476	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
3	477	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
4	405	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
5	16	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
6	360	Hueycalco, 20, San Andres Ahuayucan Xochimilco	16810	México	D.F.	México
7	457	Cd. Universitaria, S/N		Chihuahua	Chih.	México
8	13	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Querétaro	Qro.	México
9	444	Av. Delfin Madrigal, 665, Col. Pedregal de Santo Domingo	4360	México	D.F.	México
10	153	Prol. El Mediero, 517, Mod. F-201, Col. San Gilberto	45150	Zapopan	Jal.	México
11	15	Temaca, 6241, , Col. Aragón Inguarán	7820	México	D.F.	México
12	288	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
13	379	Hda. El Cuidado, 11, Fracc. Nuevo Bernárdez	98600	Guadalupe	Zac.	México
14	403	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
15	4	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
16	3	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
17	296	Circuito Jardín, 356, 3, Col. Álamos 3ª Sección	76160	Querétaro	Qro.	México
18	152	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
19	154	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
20	8	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
21	157	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
22	14	Av. Reforma, 113, Col. Palmira	62490	Temixco	Mor.	México
23	156	Km 26.5, Carret. Pascualitos-Pescadero, Cerro Prieto	21100	Mexicali	B.C.	México
24	18	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
25	17	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
26	12	Alejandro Volta, 655, Col. Electricistas	58290	Morelia	Mich.	México
27	372	Pino Humboldtzi, 392, Fracc. Los Pinos	58080	Morelia	Mich.	México
28	384	Salto de los Salados, 409, , Fracc. Ojo Caliente	20190	Aguascalientes	Ags.	México
29	10	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
30	351	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
31	160	P.O. Box 951567, UCLA	90095-1567	Los Ángeles	California	USA
32	390	Verdi, 412, Col. León Moderno	37480	León	Gto.	México
33	161	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
34	22	Manuel M. Dieguez, 539, Zona Centro	44600	Tlaquepaque	Jal.	México
35	23	Apdo. Postal No. 70-275, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
36	24	Av. Reforma, 113, Col. Palmira	62490	Temixco	Mor.	México
37	361	Meza de Anahuac, 17, A, Col. Volcanes		Oaxaca	Oax.	México
38	317	Lic. Primo Verdad, 206, Depto 7, Zona Centro		La Paz	B.C.S	México
39	162	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
40	25	Mesa de Anahuac, 207, A, Col. Volcanes	68020	Oaxaca	Oax.	México
41	462	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
42	20	Calle 128A, 2915, Depto. 403	70472	Santa Fé de Bogota	Bogota	Colombia
43	208	Priv. 29 Ote., 1816, Col. Mirador	72540	Puebla	Pue.	México
44	324	Villa de San Miguel, 36, Fracc. San Miguel	22760	Ensenada	B.C.	México
45	29	Apdo. Postal No. 1-475	62001	Cuernavaca	Mor.	México
46	28	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
47	467	VID 282, 282, Nueva Santa Maria	2800	México	D.F.	México
48	475	Real del Monte, 5-B, Venta Prieta	42080	Pachuca, Hidalgo	Hgo.	México
49	426	Márquez de León, 343, Col. Centro	23000	La Paz	B.C.S	México
50	27	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
51	21	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
52	19	Km 2.35, Camino al Tular, Estero de Bacochibampo	85454	Guaymas	Son.	México
53	26	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
54	275	Av. Vallarta, 2602, Sector Juárez	44100	Guadalajara	Jal.	México
55	232	Km 2.35, Camino al Tular, Estero de Bacochibampo	85465	Guaymas	Son.	México
56	166	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
57	318	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
58	396	Pino, 8, Col. Lomas Quebradas	10000	México	D.F.	México
59	33	Apdo. Postal No. 1039, Zona Centro	83000	Hermosillo	Son.	México
60	399	Anaxágoras, 814, Col. Navarte	3020	México	D.F.	México
61	143	Hda. Xajay, 426, Fracc. Hda. Echeagaray	53300	Naucalpan	EdoMéx	México
62	347	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
63	167	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
64	214	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
65	258	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004

No.	Miembro	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Nombre	Institución	Correo Electrónico
66	34	X	X	X	X	X		X	X	Carbajal Pérez Noel	IPICYT	noelc@ipicyt.edu.mx
67	243	X								Carbonell Ramón	CSIC	rcarbonell@ija.csic.es
68	36		X							Carcione José M.	OGS	
69	165	X				X		X		Cárdenas Soto Martín	UNAM	martinc@servidor.unam.mx
70	395						X			Carranza Castañeda Oscar	UNAM	oscar@geociencias.unam.mx
71	169	X			X					Carrasco Núñez Gerardo	UNAM	gerardoc@geociencias.unam.mx
72	168	X	X		X					Carreño Ana Luisa	UNAM	anacar@servidor.unam.mx
73	310			X						Carrillo García Verónica Karina	CENAM	vcarrill@cenam.mx
74	435							X		Castillo Roman Jose	CUPD	jocaroman@hotmail.com
75	412						X			Castillo Romano Cervando	IMTA	cervando@tlaloc.imta.mx
76	284	X	X	X						Castrejón González Israel	UAEG	
77	235	X		X	X					Castrejón Pineda Héctor Ricardo	UNAM	castrejo@sacbe.fi-a.unam.mx
78	31	X	X	X	X	X	X	X		Castro Escamilla Raúl	CICESE	raul@sismo.cicese.mx
79	30	X		X						Castro Govea Renato	UNAM	
80	32		X							Castro Leyva Teresa	IMP	tcastro@agi-cdc.com.mx
81	437							X		Castro Valdes Ruben	UABC	rubenc@uabc.mx
82	6					X		X		Centeno García Elena	UNAM	
83	35		X		X	X			X	Cerca Martínez Luis Mariano	UNAM	mcerca@geociencias.unam.mx
84	37						X	X		Cervantes Duarte Rafael	IPN	rcervan@ipn.mx
85	459								X	Cervantes Pérez Juan	UV	jcervantes@uv.mx
86	391					X				Cervantes Sánchez Alfredo	UAT	alcervan@uamac.uat.mx
87	285	X	X							Charre Meza Adolfo Salomé	IMP	acharre@yahoo.com
88	41				X					Chávez Cabello Gabriel	UANL	gachavez@ccr.dsi.uanl.mx
89	409						X			Chávez González Mario	UNAM	chavez@servidor.unam.mx
90	43		X	X	X	X	X	X	X	Chávez Pérez Sergio		
91	158			X	X	X				Choumiline Evguine	IPN	eshumili@vmredipn.ipn.mx
92	272	X								Cifuentes Nava Gerardo	UNAM	gercifue@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
93	336		X	X	X	X	X	X		Cisneros Stoianowski Gerardo	SILICON	gerardo@cray.com
94	364				X	X		X	X	Concha Dimas Aline	UNAM	
95	341			X						Contreras Pérez Juan	CICESE	juanc@pangea.cicese.mx
96	394						X			Cordero Ángeles Edgar	UNAM	once25@yahoo.com
97	244	X	X	X		X				Córdoba Barba Diego	UCM	dcordoba@eucmos.sim.ucm.es
98	303		X	X						Corona Chávez Pedro	UMICH	pcorona@zeus.umich.mx
99	38	X								Corona Ruiz Martín	CFE	
100	248	X							X	Correa Mora Francisco	UNAM	pancho@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
101	333		X	X		X				Cortés Abel	UCOL	cortes@cgic.ucol.mx
102	427						X			Cosío Castro Héctor Guillermo		kraftwer@yahoo.com
103	452							X		Cossio Torres Tomás	UANL	
104	315			X	X					Cruz Atienza Víctor Manuel	FJBS	victor@ollin.igeofcu.unam.mx
105	39	X	X	X	X	X	X	X	X	Cruz Castillo Manuel	IMP	mcruz@imp.mx
106	450							X		Cruz Medina Isidro Roberto	ITSON	
107	371				X					Cruz Orozco Rodolfo	UABCS	rroca@balandra.uabcs.mx
108	163		X							Cuenca Julio César	UNAM	julio@gea.iingen.unam.mx
109	304		X							Cupul Magaña Amílcar Levi	UDG	amilcarc@pv.udg.mx
110	245	X	X	X						Dañobeitía Juan José	CSIC	jjdanobeitia@ija.csic.es
111	172	X				X			X	Davydova Belifskaya Valentina	UDG	vdavidov@udgserv.cencar.udg.mx
112	45		X	X				X		De laCruzReyna Servando	UNAM	sdelacr@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
113	46				X					De León Gómez Héctor	UANL	hdeleon@ccr.dsi.uanl.mx
114	418					X				De Mets Charles Dennis	UW	chuck@geology.wisc.edu
115	44	X	X	X	X	X		X		DeCserna Gömbos Zoltan	UNAM	
116	357			X	X					Del Río Jesús Antonio	UNAM	antonio@servidor.unam.mx
117	49	X	X	X	X	X	X	X	X	Delgado Argote Luis Alberto	CICESE	ldelgado@pangea.cicese.mx
118	47	X		X						Delgado Contreras Juan Antonio	CICESE	jdelgado@cicese.mx
119	170		X	X	X		X			Delgado Granados Hugo	UNAM	hugo@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
120	305		X	X	X					Díaz Navarro Ricardo	IMP	rdiazn@imp.mx
121	440							X		Díaz Viera Martín Alberto	UNAM	mdiaz@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
122	205	X	X	X	X					Diego Orozco Arturo	IMP	adieago@imp.mx
123	50			X		X	X			Domínguez Reyes Tonatiuh	UCOL	tonatiuh@ucol.mx
124	468							X		Durand Manterola Héctor Javier	UNAM	
125	48						X			Durazo Arvizu Reginaldo	UABC	rdurazo@faro.ens.uabc.mx
126	171	X	X	X	X	X	X			Dworak Robinson Juan A.	SEP	jdworak@cicese.mx
127	252	X								Eliás Herrera Mariano	UNAM	elias@servidor.unam.mx
128	257				X	X		X		Escalona Alcázar Felipe de Jesús	GODEZAC	fescalona@hotmail.com
129	173			X						Escobar Sánchez Alejandra	UANL	
130	51	X	X	X	X					Esparza Hernández Francisco J.	CICESE	fesparz@geofisica.cicese.mx



## UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004 Continuación

No.	Miembro	Dirección	C.P.	Ciudad	Estado	País
66	34	Apdo. Postal No. 3-74	78231	Tangamanga	S.L.P.	México
67	243	Lluis Solé i Sabaris, s/n	8028	Barcelona	Barcelona	España
68	36	P.O. Box 2011	34016	Opicina	Trieste	Italy
69	165	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
70	395	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
71	169	Apdo. Postal No. 1-742, Zona Centro	76001	Querétaro	Qro.	México
72	168	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
73	310	Cerrada Heriberto Jara, 18, Fracc. V. Querétaro	76000	Querétaro	Qro.	México
74	435	3 Sur, 303 Altos, Centro Historico	72000	Puebla	Pue.	México
75	412	Paseo Cuauhnahuac, 8532, Col. Progreso	62550	Jiutepec	Mor.	México
76	284	Ex-Hacienda de San Juan Bautista, Taxco El Viejo	40200	Taxco	Gro.	México
77	235	10 Oeste, Manzana 33, Lote 6, Col. Isidro Fabela	14030	México	D.F.	México
78	31	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
79	30	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
80	32	Apdo. Postal No. 224	24101	Ciudad del Carmen	Camp.	México
81	437		22830	Ensenada	B.C.	México
82	6	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
83	35	Apdo. Postal No. 1-742, Zona Centro	76001	Querétaro	Qro.	México
84	37	Av. IPN, s/n, Playa Palo de Santa Rita	23096	La Paz	B.C.S	México
85	459	Av. Lazaro Cardenas, 47, Hidalgo	91140	Xalapa	Ver.	México
86	391	Matamoros entre 8 y 9, Zona Centro	87000	Ciudad Victoria	Tamps.	México
87	285	Av. Universidad, 12, Col. Petrolera	24180	Ciudad del Carmen	Camp.	México
88	41	Km 8, Carret. Linares-Cerro Prieto, Col. Hda. De Guadalupe	67700	Linares	N.L.	México
89	409	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
90	43	Shetland, 348, Col. Cosmopolita	2670	México	D.F.	México
91	158	Apdo. Postal No. 592	23000	La Paz	B.C.S	México
92	272	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
93	336	Av. Vasco de Quiroga, 3000, Col. Santa Fé	1210	México	D.F.	México
94	364	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
95	341	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
96	394	24 de Febrero, 6, Col. Polvora, Primera Sección	1100	México	D.F.	México
97	244	Av. Complutense, s/n	28040	Madrid	Madrid	España
98	303	Edificio U, Cd. Universitaria	58070	Morelia	Mich.	México
99	38	Km 26.5, Carret. Pascualitos-Pescadero, Cerro Prieto	21100	Mexicali	B.C.	México
100	248	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
101	333	Av. 25 de Julio, 965, Col. Villas San Sebastián	28045	Colima	Col.	México
102	427	U. Misioneros, Edif. 621, Depto. 301, Col. Turapan		La Paz	B.C.S	México
103	452	Km 8, Carret. Linares-Cerro Prieto, Col. Hda. De Guadalupe	67700	Linares	N.L.	México
104	315	5 de Mayo, 117, Col. Tepepan	16020	México	D.F.	México
105	39	Av. Volcán Fernandina, 92, Col. El Mirador	14449	México	D.F.	México
106	450	5 de Febrero, 818 Sur, Zona Centro		Ciudad Obregón	Son.	México
107	371	Km 5.5, Carret. Al Sur, Zona Universitaria	23080	La Paz	B.C.S	México
108	163	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
109	304	Av. Universidad de Guadalajara, 203, Deleg. Ixtapa	48280	Puerto Vallarta	Jal.	México
110	245	Lluis Solé i Sabaris, s/n	8028	Barcelona	Barcelona	España
111	172	San Francisco 606-PH, 3100, Col. del Valle	3100	México	D.F.	México
112	45	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
113	46	Km 8, Carret. Linares-Cerro Prieto, Col. Hda. De Guadalupe	67700	Linares	N.L.	México
114	418	W. Dayton St., 1215	53706	Madison	Wisconsin	USA
115	44	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
116	357	Apdo. Postal No. 34	62580	Temixco	Mor.	México
117	49	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
118	47	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
119	170	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
120	305	Hda. Ajuluapan, 107, Fracc. Hda. Echeagaray	53310	Naucalpan	EdoMéx	México
121	440	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
122	205	Eje Central Lázaro Cárdenas, 152, Col. San Bartolo Atepehuacán	7730	México	D.F.	México
123	50	Av. Universidad, 333		Colima	Col.	México
124	468	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
125	48	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
126	171	Km 4, Carret. A Varadero Nacional, Sector Playitas	85425	Guaymas	Son.	México
127	252	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
128	257	Blvd. López Portillo, 30, C, Zona Centro	98600	Guadalupe	Zac.	México
129	173	Km 8, Carret. Linares-Cerro Prieto, Col. Hda. De Guadalupe	25015	Saltillo	Coah.	México
130	51	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004

No.	Miembro	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Nombre	Institución	Correo Electrónico
131	52	X	X	X	X	X	X	X	X	Espindola Castro Juan Manuel	UNAM	jme@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
132	53	X	X	X	X			X		Espinosa Cardena Juan Manuel	CICESE	jespinos@geofisica.cicese.mx
133	55	X			X					Fabriol Beauville Hubert	BRGM	h.fabriol@brgm.fr
134	464							X		Farfán Molina Luis M	CICESE	farfane@cicese.mx
135	174	X	X	X	X	X	X	X	X	Farreras Sanz Salvador	CICESE	sfarrera@cicese.mx
136	54	X	X		X	X	X	X	X	Ferrari Luca Pedraglio	UNAM	luca@geociencias.unam.mx
137	85	X	X	X	X	X		X	X	Filonov Anatoly E.	UDG	afilonov@udgserv.cencar.udg.mx
138	59	X	X							Fletcher John Mackrain	CICESE	jfletche@pangea.cicese.mx
139	299	X								Flores Cruz Fernando		
140	362				X					Flores Estrella Hortencia	UNAM	flori@data.net.mx
141	175	X	X	X	X	X		X		Flores Luna Carlos Francisco	CICESE	cflores@geofisica.cicese.mx
142	375					X	X			Flores Maciel Roberto	UDG	romaciell@cucba.udg.mx
143	130		X			X	X	X		Flores Saldaña Ricardo	IIE	rsf@p.iie.org.mx
144	58	X	X	X	X	X	X	X		Frez Cárdenas José	CICESE	jofrez@cicese.mx
145	300	X	X	X	X	X				Fuentes Vargaz Carlos	UNAM	carlos@geociencias.unam.mx
146	64	X	X	X	X	X				Galicia Pérez Marco Antonio	UCOL	galicia@volcan.ucol.mx
147	255	X	X							Gallegos Cruz Apolonio	IPN	
148	350				X	X		X		Garatza Payan Jaime	ITSON	garatza@yaqui.itson.mx
149	378					X				García Daniel	UANL	
150	62	X	X	X	X	X	X	X	X	García Abdeslem Juan	CICESE	igarcia@geofisica.cicese.mx
151	63	X	X	X	X	X	X	X		García Arthur Rosalía Eugenia	CICESE	arthur@cicese.mx
152	183				X					García Córdoba Joaquín Alberto	CICESE	joaquin@cicese.mx
153	377					X	X			García Cueto Rafael	UABC	rcueto@iing.mx1.uabc.mx
154	181	X	X	X	X	X	X	X	X	García García Fernando	UNAM	ffgg@atmosfera.unam.mx
155	233			X		X	X	X		García Gutiérrez Alfonso	IIE	aggarcia@iie.org.mx
156	5					X	X			García López Ramón Victorino	UAS	rgarcia@uas.uasnet.mx
157	423						X			García Puga José Luis	UDG	puga@pv.udg.mx
158	184				X	X	X			García y Barragán Juan Carlos	UNAM	jcarlosg@servidor.unam.mx
159	178		X	X	X	X			X	Garduño López René	UNAM	rene@atmosfera.unam.mx
160	61	X	X		X			X	X	Garduño Monroy Víctor Hugo	UMICH	vgmonroy@zeus.umich.mx
161	182	X	X		X					Garf Ziehl Federico	CICESE	fgrarf@cicese.mx
162	280			X						Garza Rocha Daniel	UANL	dagarza@ccr.dsi.uanl.mx
163	334		X	X	X					Gavilanes Ruíz Juan Carlos	UCOL	gavilan@cgic.ucol.mx
164	72	X	X	X	X	X		X	X	Gaviño Rodríguez Juan Heberto	UCOL	gavino@volcan.ucol.mx
165	180		X	X	X	X	X			Gay García Carlos	UNAM	cgay@servidor.unam.mx
166	74	X	X	X	X	X	X	X		Glowacka Ewa	CICESE	glowacka@cicese.mx
167	176				X		X		X	Gómez González Juan Martín	UNAM	gomez@geociencias.unam.mx
168	369				X	X		X		Gómez López David Roberto	UV	dgomez@xal.megared.net.mx
169	73	X	X	X	X	X	X	X	X	Gómez Treviño Enrique	CICESE	egomez@geofisica.cicese.mx
170	67	X	X	X	X	X	X	X	X	Gómez Valdés José	CICESE	igomez@cicese.mx
171	292	X	X	X	X	X	X			González Fernández Antonio	CICESE	mindundi@pangea.cicese.mx
172	68	X	X		X					González García José Javier	CICESE	javier@cicese.mx
173	354				X	X	X			González Ibarra Alfonso	IMP	agibarra@imp.mx
174	69					X		X	X	González León Carlos M.	UNAM	cmgleon@servidor.unam.mx
175	471								X	González Matos O'Leary Fernando	CENAIIS	oleary@cenais.ciges.inf.cu
176	71		X							González Morales Carlos Alberto	CICESE	cgonzale@cicese.mx
177	60		X		X					González Morán Tomás	UNAM	tglez@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
178	400							X		González Navarro Juan Ignacio	CICESE	ignaci@cicese.mx
179	70						X	X		González Pomposo Guillermo	BUAP	gugonzal@siu.buap.mx
180	366				X					González Yajimovich Oscar	UABC	
181	307		X							Gorsline Donn S.	USC	gorsline@earth.usc.edu
182	189	X	X							Grajales Nishimura Manuel	IMP	grajales@geologia.unam.mx
183	250	X	X			X	X	X		Green Ruíz María de Jesús	ODU	mxgreen@odu.edu
184	415					X		X		Grijalva Noriega Francisco Javier	UNISON	grijalva@marina.geologia.uson.mx
185	436							X		Grimalsky Volodymyr	INAOE	vggrim@inaoep.mx
186	66	X	X							Guerrero García José C.	UNAM	josec@servidor.unam.mx
187	466								X	Guerrero Grajeda Jose	UNAM	
188	65			X						Guerrero Guadarrama José Luis	CFE	geoexplo@mich1.telnet.net.mx
189	407						X			Guevara O. Enrique	CENAPRED	ego@cenapred.unam.mx
190	177					X				Gutiérrez de Velasco Guillermo	CICESE	ggutierr@cicese.mx
191	479								X	Gutiérrez Martínez Carlos Antonio	CENAPRED	cgm@cenapred.unam.mx
192	179				X					Guzmán Speziale Marco	UNAM	marco@geociencias.unam.mx
193	461								X	Gzebennikov Alexandre	UAP	agzebe@fefm.buap.mx
194	76	X								Helenes Escamilla Javier	CICESE	jhelenes@pangea.cicese.mx
195	75		X	X	X	X		X	X	Herguera García Juan Carlos	CICESE	herguera@cicese.mx



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004 Continuación

No.	Miembro	Dirección	C.P.	Ciudad	Estado	País
131	52	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
132	53	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
133	55	Avenue de Luminy, B.P. 167, 117	13276		Marseille cedex	France
134	464	Miraflores entre Muleg y La Paz, 334, Fracc. BellaVista	23050	México	D.F.	México
135	174	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
136	54	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
137	85	Río Autlan, 2180, 34, Sector Atlas	44421	Guadalajara	Jal.	México
138	59	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
139	299	Antonia Nava, s/n, Col. Carmen Serdán	4910	México	D.F.	México
140	362	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
141	175	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
142	375	Juárez, 975, Sector Juárez		Guadalajara	Jal.	México
143	130	Av. Reforma, 113, Col. Palmira	62490	Temixco	Mor.	México
144	58	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
145	300	Plaza del Carmen, 69, Col. Plazas del Sol, 2a. Sección	76090	Querétaro	Qro.	México
146	64	Apdo. Postal No. 275, Zona Centro	28200	Manzanillo	Col.	México
147	255	Te, 950, Col. Iztacalco	8400	México	D.F.	México
148	350	5 de Febrero, 818 Sur, Zona Centro		Ciudad Obregón	Son.	México
149	378	Km 8, Carret. Linares-Cerro Prieto, Col. Hda. De Guadalupe	67700	Linares	N.L.	México
150	62	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
151	63	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
152	183	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
153	377	Blvd. Benito Juárez, s/n, Col. Insurgentes Este	21280	Mexicali	B.C.	México
154	181	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
155	233	Av. Reforma, 113, Col. Palmira	62490	Temixco	Mor.	México
156	5	Galileo, 1175, Col. Villa Universidad	80010	Culliacán	Sin.	México
157	423	Apdo. Postal No. 96-B	48280	Puerto Vallarta	Jal.	México
158	184	Luis Donald Colosio y Madrid, s/n, Campus UNISON	83000	Hermosillo	Son.	México
159	178	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
160	61	Av. Rey Tariacuri, 374, D, Col. Villabella	58090	Morelia	Mich.	México
161	182	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
162	280	Km 8, Carret. Linares-Cerro Prieto, Col. Hda. De Guadalupe	67700	Linares	N.L.	México
163	334	Av. 25 de Julio, 965, Col. Villas San Sebastián	28045	Colima	Col.	México
164	72	Apdo. Postal No. 275, Zona Centro	28200	Manzanillo	Col.	México
165	180	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
166	74	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
167	176	Apdo. Postal No. 1-742, Zona Centro	76001	Querétaro	Qro.	México
168	369	Mendez Alcalde, 3, Col. Salud	91070	Xalapa	Ver.	México
169	73	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
170	67	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
171	292	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
172	68	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
173	354	Magdalena, 410, Depto. 303, Col. Del Valle	3100	México	D.F.	México
174	69	Apdo. Postal No. 1039, Zona Centro	83000	Hermosillo	Son.	México
175	471	Calle 17, 61 e/4 y 6, Reparto Vista Alegre	90400	Santiago de Cuba	Santiago	Cuba
176	71	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
177	60	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
178	400	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
179	70	Blvd. Valsequillo y Circuito CU, s/n, Cd. Universitaria		Puebla	Pue.	México
180	366	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
181	307	S. Vermont Ave. KAP-246, 3620	90089-2538	Los Ángeles	California	USA
182	189	Tokio, 921, 202-B, Col. Portales	3300	México	D.F.	México
183	250	Elkhorn Ave., 4600	23529	Norfolk	Virginia	USA
184	415	Alejandro García, 522, , Col. Jardines	83113	Hermosillo	Son.	México
185	436	Luis Enrique Erro, 1, Col. Santa Maria Tonantzintla	72000	Puebla	Pue.	México
186	66	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
187	466	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
188	65	Alejandro Volta, 655, Col. Electricistas	58290	Morelia	Mich.	México
189	407	Av. Delfín Madrigal, 665, Col. Pedregal de Santo Domingo	4360	México	D.F.	México
190	177	Miraflores entre Muleg y La Paz, 334, Fracc. BellaVista	23050	La Paz	B.C.S	México
191	479	Av. Delfín Madrigal, 665, Col. Pedregal de Santo Domingo	4360	México	D.F.	México
192	179	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
193	461	19 sur, 3504-11, Reforma Agua Azul	72430	Puebla	Pue.	México
194	76	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
195	75	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004

No.	Miembro	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Nombre	Institución	Correo Electrónico
196	251	X	X	X	X	X	X			Hernández Bernal María del Sol	UNAM	msol@quetzalcoatl.igeofcu.unam.mx
197	259	X								Hernández Guerrero Joel	PEMEX	zyanya@hotmail.com
198	247	X								Hernández Treviño Teodoro	UNAM	tht@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
199	456							X		Hernández Walls Rafael	UABC	rwalls@uabc.mx
200	343					X				Herrera Aztegui Luis Eduardo	UNAM	electron@altavista.com
201	306		X							Herrera Charles Roberto	IPN	charles@citedi.mx
202	186					X				Herrera Revilla Ismael	UNAM	iherrera@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
203	188		X	X	X			X		Hinojosa Corona Alejandro	CICESE	alhinc@pangea.cicese.mx
204	187			X	X	X				Huerta López Carlos Isidro	CICESE	huerta@cicese.mx
205	289	X								Hughes Simon	UNAM	shuhs@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
206	77	X	X	X	X	X	X	X	X	Huidobro González Adolfo	UNAM	lermo@inti.iingen.unam.mx
207	78		X							Huizar Álvarez Rafael	UNAM	huizar@servidor.unam.mx
208	432							X		Hurtado Artunduaga Angel David	UNAM	adhurtado@yahoo.com
209	331		X	X	X	X	X			Hutton Wallis	UNAM	wallis@geology.wisc.edu
210	474								X	Ibarra Serrano Atanacio	FRISCO	aibarra@grupofrisco.com.mx
211	316			X						Iglesias Mendoza Arturo	FJBS	amg@tornado.com.mx
212	332		X							Israde Alcántara Isabel	UMICH	aisrade@zeus.umich.mx
213	80		X	X					X	Jacques Ayala César	UNAM	jacques@geologia.unam.mx
214	79		X							Jáuregui Ostos Ernesto	UNAM	ejos@atmosfera.unam.mx
215	340			X						Jiménez Sergio	UABC	
216	82	X								Jiménez Illescas Ángel R.	IPN	ajimenez@ipn9021.ipn.mx
217	81	X								Jiménez Jiménez Zenón	UNAM	zenon@ollin.igeofcu.unam.mx
218	442						X			Jimenez Romano Gerardo	CENAPRED	termica@cenapred.unam.mx
219	349				X	X				Jödicke Hartmut	UNIMUNSTER	jodike@earth.uni.munster.de
220	411					X				Juárez Aguilar Luis	IMP	ljuarez@imp.mx
221	190		X	X						Juárez Sánchez Faustino	UNAM	tino@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
222	90			X						Keller Torres Jaime	UNAM	keller@servidor.unam.mx
223	387					X				Kepiie Jhon Duncan	UNAM	duncan@servidor.unam.mx
224	138			X		X				Koshevaya Svetlana S.	INAOE	svetlana@tonali.inaoep.mx
225	83	X	X	X	X	X		X	X	Kostoglodov Vladimir	UNAM	vladimir@ollin.igeofcu.unam.mx
226	438							X		Kotsarenko Anatoliy	UNAM	kotsarenko@geociencias.unam.mx
227	84	X								Kouzoub Nikolai	UANL	nkouzoub@ccr.dsi.uanl.mx
228	283	X		X	X	X				Kuraica Ogie	KINEMATRICS	sales@kmi.com
229	454							X		Ladrón de Guevara María A.	SEP	
230	40			X						Lara José Rubén	CICESE	rlara@cicese.mx
231	261	X					X			Lares Reyes María Lucila	CICESE	llares@cicese.mx
232	87	X	X	X		X		X		Lavín Peregrina Miguel Fernando	CICESE	mlavin@cicese.mx
233	192	X	X							Lázaro Mancilla Octavio	CICESE	olazaro@geofisica.cicese.mx
234	439							X		Leal Lupericio Juan Carlos	IMADES	jcleal@cideson.mx
235	216	X	X	X	X	X		X		Ledesma Vázquez Jorge	UABC	ledesma@bahia.ens.uabc.mx
236	193	X		X	X		X	X		Lermo Samaniego Javier Francisco	UNAM	lermo@inti.iingen.unam.mx
237	385					X	X			Lesser Luis E.	ASU	lesser@asu.edu
238	443							X		Leyva Contreras Amando	UNAM	
239	262	X	X	X						Lira Herrera Héctor	CFE	
240	376					X	X	X		Lizarraga Celaya Carlos	UNISON	carlos@fisica.uson.mx
241	338		X	X						Lluch Cota Daniel Bernardo	CIBNOR	dblluch@cibnor.mx
242	339		X							Lluch Cota Salvador Emilio	CIBNOR	sluch@cibnor.mx
243	155		X					X		Lobato Sánchez René	IMTA	rlobato@tlaloc.imta.mx
244	414						X			López Dorcel Rubén	UASLP	rlopez@uaslp.mx
245	301			X				X		López Loera Héctor	UNAM	lopezdes@col1.telmx.net.mx
246	89	X			X				X	López Mariscal Juan Manuel	CICESE	malopez@cicese.mx
247	445							X		Lopez Martínez Cesar Honorio	CENAPRED	
248	308			X						López Martínez Juana	CIBNOR	jlopez@cibnor.mx
249	88	X	X	X	X	X				López Martínez Margarita	CICESE	marlopez@pangea.cicese.mx
250	380					X	X			López Pineda Leobardo	CESUES	odranoel@yahoo.com
251	191	X								Lozada Zumaeta Manuel	IMP	mlozada@imp.mx
252	269	X	X			X				Machain Castillo María Luisa	UNAM	machain@ola.icml.unam.mx
253	91					X				Macias Vázquez José Luis	UNAM	macias@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
254	282	X								Magaña Rueda Víctor Orlando	UNAM	victormr@servidor.unam.mx
255	236			X	X	X				Makarov Vyacheslav G.	IPN	smakarov@redipn.ipn.mx
256	428						X			Malagón Montalvo Arturo	UDG	malagon_arturo@hotmail.com
257	429						X			Maldonado Sánchez Guadalupe	UNAM	magmaldonado@hotmail.com
258	368				X		X			Malishewsky Peter G.	UNIJENA	mali@geo.uni.jena.de
259	448							X		Marie Baur Juan Luis	REPSOL YPF	mariej@repslypf.com
260	102	X					X			Marinone Moschetto Silvio Guido L.	CICESE	marinone@cicese.mx



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004 Continuación

No.	Miembro	Dirección	C.P.	Ciudad	Estado	País
196	251	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
197	259	Av. Sitio Grande, 2000, Edif. 3, Piso 1, Fracc. Carrizal	86035	Villahermosa	Tab.	México
198	247	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
199	456	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada		Ensenada	B.C.	México
200	343	Cerro Chinaco, 121, Col. Campestre Churubusco	4200	México	D.F.	México
201	306	Av. Del Parque, 1310, Col. Mesa de Otay	25510	Tijuana	B.C.	México
202	186	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
203	188	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
204	187	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
205	289	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
206	77	Av. México, 120, , Col. Del Carmen	4100	México	D.F.	México
207	78	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
208	432	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
209	331	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
210	474	Inglaterra, 1283, Fracc, Villafontana	21180	Mexicali	B.C.	México
211	316	Siracusa, 130, Edif. 5 B-22, Col. Lomas Estrella	9890	México	D.F.	México
212	332	Edificio U, Cd. Universitaria	58070	Morelia	Mich.	México
213	80	De la Rivera, 21	83288	Hermosillo	Son.	México
214	79	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
215	340	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
216	82	Colegio Militar, 192, Col. Esterito	23020	La Paz	B.C.S	México
217	81	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
218	442	1a. Cda. De Acanto, Manz. 73, Lote 21, Col. Amp. Miguel Hidalgo	14250	México	D.F.	México
219	349	Corrensstr, 24, D-48149,	48149	Munster		Germany
220	411	Talcolutla, Edificio 17, Depto. 12, Fracc. Las Brisas	24178	Ciudad del Carmen	Camp.	México
221	190	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
222	90	Fuente de la Juventud, 64, Fracc. Tecamachalco	53950	Naucalpan	EdoMéx	México
223	387	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
224	138	Apdo. Postal No. 51	72000	Puebla	Pue.	México
225	83	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
226	438	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
227	84	Pedro Noriega Sur, 569	67700	Linares	N.L.	México
228	283	Vista Avenue, 222	91107	Pasadena	California	USA
229	454					
230	40	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
231	261	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
232	87	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
233	192	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
234	439	Reyes y Aguascalientes, s/n, Col. San Benito	83190	Hermosillo	Son.	México
235	216	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
236	193	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
237	385	Arizona State University, P.O. Box 875306	85287-5306	Tempe	Arizona	USA
238	443			México	D.F.	México
239	262	Km 26.5, Carret. Pascualitos-Pescadero, Cerro Prieto	21100	Mexicali	B.C.	México
240	376	José M. Salvatierra, 33, Col. Los Arcos	83250	Hermosillo	Son.	México
241	338	Apdo. Postal No. 128	23000	La Paz	B.C.S	México
242	339	Km 0.5, Carret. Al Conchalito	23000	La Paz	B.C.S	México
243	155	Paseo Cuauhnahuac, 8532, Col. Progreso	62550	Jiutepec	Mor.	México
244	414	Av. Dr. Manuel Nava, 5, Zona Universitaria	78240	San Luis Potosí	S.L.P.	México
245	301	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
246	89	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
247	445	Av. Delfin Madrigal, 665, Col. Pedregal de Santo Domingo	4630	México	D.F.	México
248	308	Retorno Mondorica, 2056, Col. Infonavit	23070	La Paz	B.C.S	México
249	88	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
250	380	Ley Federal del Trabajo y Perimetral, s/n, Col. Apolo	83100	Hermosillo	Son.	México
251	191	Eje Central Lázaro Cárdenas, 152, Col. San Bartolo Atepehuacán	7730	México	D.F.	México
252	269	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
253	91	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
254	282	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
255	236	Av. IPN, s/n, Playa Palo de Santa Rita	23096	La Paz	B.C.S	México
256	428	La Paz, 63, Casa 51, Atemajac del Valle		Zapopan	Jal.	México
257	429	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
258	368	Burgweg, 11	7749	Jena		Germany
259	448	Jaime Balmes, 8, 701,	11510	México	D.F.	México
260	102	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004

No.	Miembro	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Nombre	Institución	Correo Electrónico
261	93	X	X	X	X	X	X	X		Márquez Azúa Bertha	UDG	bmarquez@udgserv.cencar.udg.mx
262	381					X				Márquez García Antonio Zoilo	UAM	azmg@xanum.uam.mx
263	297	X	X							Márquez González Álvaro	UCM	alvaromg@eucmax.sim.ucm.es
264	164			X						Marshall Kyle Jeffrey	FANDM	i_marshall@fandm.edu
265	293	X	X	X	X	X		X		Martín Atienza Beatriz	CICESE	batienza@cicese.mx
266	2	X	X	X	X		X			Martín Barajas Arturo	CICESE	amartin@pangea.cicese.mx
267	348				X					Martínez DíazdeLeón Asdrúbal	UABC	asdrubal@faro.ens.uabc.mx
268	194	X	X	X	X	X	X	X	X	Martínez García Mario	CIBNOR	mmartine@cibnor.mx
269	9					X				Martínez Gutiérrez Genaro	UABCS	martingg@uabcs.mx
270	373					X				Martínez Hernández Enrique	UNAM	emar@servidor.unam.mx
271	408						X			Martínez Noriega César	UABCS	martinez@uabcs.mx
272	422						X			Martínez Retana Silvia	UNISON	
273	404						X			Martínez Reyes Juventino	UNAM	
274	92	X						X		Martínez Serrano Raymundo G.	UNAM	rms@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
275	273	X				X				Martínez Zatarain Alejandro	UDG	amartine@udgserv.cencar.udg.mx
276	96					X				Martiny Kramer Bárbara	UNAM	martiny@servidor.unam.mx
277	367				X					Mascareño Gastelum Ramón A.	UAS	alejandro_trami@hotmail.com
278	287	X	X	X	X	X		X		Matthes Miguel	APASCO	
279	313			X						Mazariegos Alfaro Rubén Alberto	PANAM	rubenm@panam.edu
280	480								X	Medina Chena Alexandro	IE	medina@ecologia.edu.mx
281	200	X								Mejía Trejo Adán	UABC	amejia@bahia.ens.uabc.mx
282	97	X	X	X	X					Méndez Delgado Sóstenes	UANL	somendez@ccr.dsi.uanl.mx
283	198			X		X				Mendieta Jiménez Francisco Javier	CICESE	jmendiet@cicese.mx
284	11					X				Mengelle López Jorge Jaime	IPN	se_vinculacion@hotmail.com
285	274		X							Meulenert Peña Ángel R.	UDG	ameulene@udgserv.cencar.udg.mx
286	57	X								Michaud Francois	UPMC	micho@ccrv.obs-vlfr.fr
287	94						X			Mikumo Kamura Takeshi	UNAM	mikumo@ollin.igeofcu.unam.mx
288	323			X						Milán Valdés Marcos	IPN	milan@mexico.com
289	202						X			Miranda Ubaldo	IIE	umiranda@iie.org.mx
290	98					X				Mitre Salazar Luis Miguel	UNAM	lmitre@geociencias.unam.mx
291	388					X	X			Molina Garza Roberto	UNAM	rmolina@geociencias.unam.mx
292	99	X	X		X		X	X	X	Montesinos Silva Genaro	UGTO	genaros@dulcinea.ugto.mx
293	419						X			Montjo González Alejandra	UNISON	amontjo@geologia.uson.mx
294	196		X	X		X	X	X		Monzón César Octavio	UDG	monzon@cupei.udg.mx
295	195						X	X		Moraila V. Carlos Ramón	UAS	cmoraila@uas.uasnet.mx
296	203			X						Morales Blake Alejandro	UCOL	mblake@volcan.ucol.mx
297	197	X	X			X				Moran Zenteno Dante Jaime	UNAM	dante@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
298	101	X	X	X	X	X				Morandi Soana María Teresa	ULA	maria@ciens.ula.ve
299	455							X		Moreles Vázquez Miguel Ángel	CIMAT	moreles@cimat.mx
300	472								X	Moreno Toiran Bladimir	CENAI	bladimir@sssn.ciges.inf.cu
301	270	X	X		X	X		X		Mortera Gutiérrez Carlos A.	UNAM	carlosm@ollin.igeofcu.unam.mx
302	406						X			Mouloud Bennami	UNAM	
303	265	X								Moya Juan Carlos	UC	moya@creep.colorado.edu
304	95	X	X	X						Munguía Orozco Luis	CICESE	lmunguia@cicese.mx
305	302			X	X	X				Muñoz Diosdado Alejandro	IPN	amunoz@acei.upibi.ipn.mx
306	328					X				Murillo Nava Janette	IPN	
307	199	X	X		X	X		X		Murrieta Hernández José Luis	UV	josel@dino.coacade.uv.mx
308	374					X				Nájera Garza Jesús		jng1207@hotmail.com
309	473								X	Narcía López Carlos	UNACH	nnarcia@prodigy.nte.mx
310	103		X		X		X	X		Natividad Baizabal Miguel Ángel	UV	navidad@dino.coacade.uv.mx
311	410						X			Nava de la Riva Julio César	GODEZAC	
312	104	X	X	X	X	X	X	X		Nava Pichardo Alejandro Fidencio	CICESE	fnava@cicese.mx
313	290	X	X		X			X		Nava Sánchez Enrique H.	IPN	enava@redipn.ipn.mx
314	266			X						Nevárez Martínez Manuel Otilio	INP	nevarez@altavista.net
315	416					X				Nieto Obregón Jorge	UNAM	nieto@servidor.unam.mx
316	105	X	X		X	X	X			Nieto Samaniego Ángel Francisco	UNAM	afns@geociencias.unam.mx
317	312		X	X		X		X		Norzagaray Campos Mariano	IPN	mnorzaga@ipn.mx
318	106	X	X	X	X	X	X	X	X	Núñez Cornú Francisco Javier	UDG	fcornu@vallarta.cuc.udg.mx
319	370				X	X				Núñez Peralta Marco Antonio	UAM	manp@xanum.uam.mx
320	108					X	X	X		Obeso Nieblas Maclovio	IPN	mniebla@redipn.ipn.mx
321	107	X	X	X		X	X		X	Ocampo Torres Francisco Javier	CICESE	ocampo@cicese.mx
322	204	X		X	X	X				Ochoa Dela Torre José Luis	CICESE	jochoa@cicese.mx
323	206	X	X			X		X		Oda Noda Bertha	UNAM	oda@atmosfera.unam.mx
324	356				X	X				Oesterreich Masuch Dirk	UANL	dmasuch@ccr.dsi.uanl.mx
325	327		X	X						Olenshko Lutkova Klaudia	UNAM	olechko@servidor.unam.mx



## UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004 Continuación

No.	Miembro	Dirección	C.P.	Ciudad	Estado	País
261	93	Maestros y Mariano Bárcena, s/n	44260	Guadalajara	Jal.	México
262	381	Av. Purísima y Michoacán, s/n, Col. Vicentina	9340	México	D.F.	México
263	297	Av. Complotense, s/n	28040	Madrid	Madrid	España
264	164	W. Chestnut St., 625	17604	Lancaster	Pennsylvania	USA
265	293	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
266	2	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
267	348	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
268	194	Km 1, Carret. San Juan de la Costa, Col. El Comitán	23000	La Paz	B.C.S	México
269	9	Km 5.5, Carret. Al Sur, Zona Universitaria	23080	La Paz	B.C.S	México
270	373	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
271	408	Km 5.5, Carret. Al Sur, Zona Universitaria	23080	La Paz	B.C.S	México
272	422	Blvd. Transversal y Rosales, s/n, Zona Centro	83000	Hermosillo	Son.	México
273	404	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
274	92	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
275	273	Av. Vallarta, 2602, Sector Juárez	44100	Guadalajara	Jal.	México
276	96	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
277	367	Las Lichis, 1839, Fracc. La Campiña	80060	Culiacán	Sin.	México
278	287	Campos Eliseos, 345, Piso 16, Col. Polanco	11550	México	D.F.	México
279	313	Pacific Ave., 810	78539	Edinburg	Texas	USA
280	480	Km. 2.5 Carret. Ant Coatepec, 351	91070	Xalapa	Ver.	México
281	200	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
282	97	Km 8, Carret. Linares-Cerro Prieto, Col. Hda. De Guadalupe	67700	Linares	N.L.	México
283	198	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
284	11	Av. Ticomán, 600, Col. San José Ticomán	7340	México	D.F.	México
285	274	Av. Las Praderas, 320, Prados Vallarta	45020	Zapopan	Jal.	México
286	57	La Darse B-P, 48, ,	6230	Villefranche sur Mer	Paris	France
287	94	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
288	323	Acueducto, 63, Col. Acueducto de Guadalupe	1120	México	D.F.	México
289	202	Av. Reforma, 113, Col. Palmira	62490	Temixco	Mor.	México
290	98	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
291	388	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
292	99	Apdo. Postal No. 311, Zona Centro	36500	Irapuato	Gto.	México
293	419	Blvd. Transversal y Rosales, s/n, Zona Centro	83000	Hermosillo	Son.	México
294	196	Marcelino García Barragán y Olímpica, 1421	44421	Guadalajara	Jal.	México
295	195	Mutualismo, 1277, Fracc. Los Pinos	80120	Culiacán	Sin.	México
296	203	Villa Florencia, 54, Fracc. Soleares	28869	Manzanillo	Col.	México
297	197	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
298	101		5101	Mérida	Yuc.	Venezuela
299	455	Callejon Jalisco, s/n, Mineral de Valenciana	36240	Guanajuato	Gto.	México
300	472	Calle 17, 61 e/4 y 6, Reparto Vista Alegre	90400	Santiago de Cuba	Santiago	Cuba
301	270	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
302	406	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
303	265	30th, A1-24, 1300	80303	Boulder	Colorado	USA
304	95	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
305	302	Valle del Po, 16, Col. Valle de Aragón	55280	Ecatepec	EdoMéx	México
306	328	Av. IPN, s/n, Playa Palo de Santa Rita	23096	La Paz	B.C.S	México
307	199	Zona Universitaria, s/n, Cd. Universitaria	91090	Xalapa	Ver.	México
308	374	Ventura Salazar, 334, 2, Zona Centro	98000	Zacatecas	Zac.	México
309	473	Av. Rosario, 546, Santa Ana	29090	Tuxtla Gutierrez	Chis.	México
310	103	Apdo. Postal No. 278, Zona Centro	91000	Xalapa	Ver.	México
311	410	Rebote de Barbosa, 605, Zona Centro	98000	Zacatecas	Zac.	México
312	104	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
313	290	Apdo. Postal No. 592	23000	La Paz	B.C.S	México
314	266	Blvd. Las Plazas, 75, Fracc. Las Plazas	85430	Guaymas	Son.	México
315	416	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
316	105	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
317	312	Av. Ticomán, 600, Col. San José Ticomán		Culiacán	Sin.	México
318	106	Apdo. Postal No. 96-B	48280	Puerto Vallarta	Jal.	México
319	370	Apdo. Postal No. 55-534	9340	México	D.F.	México
320	108	Av. IPN, s/n, Playa Palo de Santa Rita	23096	La Paz	B.C.S	México
321	107	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
322	204	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
323	206	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
324	356	Km 8, Carret. Linares-Cerro Prieto, Col. Hda. De Guadalupe	67700	Linares	N.L.	México
325	327	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México



## UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004

No.	Miembro	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Nombre	Institución	Correo Electrónico
326	420						X			Olivos Ortiz Aramis	UCOL	
327	465								X	Oropeza Rosales Fernando	IMTA	foropeza@haloc.imta.mx
328	353					X				Oropeza Villalobos Beatriz	UNAM	
329	249	X	X	X	X		X			Orozco Esquivel María Teresa	UNAM	torozco@geociencias.unam.mx
330	286	X	X	X						Orta Francisco	APASCO	
331	417						X			Ortega Guerrero Beatriz	UNAM	bortega@geofisica.unam.mx
332	281			X						Ortega Guerrero Marcos Adrián	UNAM	maog@geociencias.unam.mx
333	210			X		X		X		Ortega Rivera María Amabel	UNAM	amabel@geociencias.unam.mx
334	478								X	Ortiz Aguilar José Luis	APASCO	orvaing@prodigy.net.mx
335	326		X	X		X		X		Ortiz Alemán Carlos	FJBS	carloso@servidor.unam.mx
336	126						X			Oskin Michael	CALTECH	
337	359				X	X		X		Ostroumov Mikhail	UMICH	ostroum@zeus.umich.mx
338	111	X	X	X	X	X	X	X		Pacheco Alvarado Francisco Javier	UNAM	javier@ollin.igeofcu.unam.mx
339	242	X								Padilla Arredondo Gustavo	CIBNOR	gpadilla@cibnor.mx
340	237	X		X		X				Pal Verma Jaiswal Mahendra	IIE	mahendra@iie.org.mx
341	109		X							Palma Guzmán Sergio Hugo	CFE	
342	110		X							Palma Pérez Oswaldo	CFE	
343	398						X			Paniagua Quiroga Jesús Darío	UV	
344	115	X	X	X	X					Pavía López Edgar Gerardo	CICESE	epavia@cicese.mx
345	118		X							Payero De Jesús Juan S.	UASD	jpayero@tricom.net
346	116	X	X	X	X					Paz Moreno Francisco Abraham	UNISON	paz@marina.geologia.uson.mx
347	42	X			X					Pedrín Aviles Sergio	CIBNOR	spedrin@cibnor.mx
348	159			X	X	X				Peláez Salvador Roberto	PEMEX	pelaez_fi_unam.@yahoo.com
349	446							X		Peña Alonso Tomás	ITCM	topeax@hotmail.com
350	320		X							Peraza Vizcarra Ramón	UAS	
351	114	X			X	X		X		Pereyra Díaz Domitilo	UV	dpereyra@uv.mx
352	463							X		Pérez Campos Xyoli	UNAM	
353	207		X	X	X	X	X			Pérez de Tejada Héctor	UNAM	hector@ifunam.ifsicaen.unam.mx
354	209		X		X	X		X		Pérez Enríquez Román	UNAM	roman@geociencias.unam.mx
355	425						X			Pérez Flores Marco Antonio	CICESE	mperez@geofisica.cicese.mx
356	254			X						Pérez García Ismael	UNAM	ismael@servidor.unam.mx
357	112		X	X					X	Pérez Rocha Luis Eduardo	FJBS	perezrocha63@hotmail.com
358	352				X	X				Pérez Sesma José Antonio A.	UV	pereyra@dino.coacade.uv.mx
359	113	X	X	X	X	X			X	Pérez Venzor José Antonio	UABCS	japerez@calafia.uabcs.mx
360	421						X			Pervago Evgueni	IMP	
361	146	X	X		X					Peterson Villalobos Héctor	LIBRA	libra@telnor.net
362	460								X	Plata Rosas Javier	UABC	liplata@yahoo.com
363	117				X					Pola Simuta Cosme	UANL	cpola@ccr.dsi.uanl.mx
364	402						X	X		Posada Sánchez A.E.	BUAP	
365	291	X								Prieto Mendoza Jesús José	UABCS	jprieto@calafia.uabcs.mx
366	397					X	X			Quintero Núñez Margarito	UABC	
367	358	X	X		X				X	Ramírez Aguilar Isabel	CICESE	iramirez@cicese.mx
368	453							X		Ramírez Cruz Luis Cuauhtémoc	IMP	
369	294	X	X	X	X			X	X	Ramírez Hernández Jorge	UABC	jramirez@iing.mxl.uabc.mx
370	277		X	X	X					Ramírez Herrera María Teresa	CALSTATELA	ramirez@csulb.edu
371	220	X	X	X	X	X			X	Ramírez Ruíz Juan José	UCOL	ramirez@cgic.ucol.mx
372	447							X	X	Ramírez Sánchez Elisa Leonor	CICESE	eramirez@cicese.mx
373	121	X	X	X	X					Ramírez Trejo Ana Rosa		
374	122	X								Ramírez Vázquez Carlos Ariel	UCOL	carlosr@cgic.ucol.mx
375	434							X		Ramos H. Silvia	UCAC	silviaramos@terra.com.mx
376	120			X						Ramos Jiménez Esteban	CENAPRED	erj@cenapred.unam.mx
377	309		X							Ramos Leal José Alfredo	IPN	
378	7					X				Ramos Martínez Jaime	IMP	jrmartin@imp.mx
379	119	X	X	X	X	X	X	X	X	Randall Roberts John	UGTO	randall@redes.imt.com.mx
380	123	X		X	X	X		X		Rebollar Bustamante Cecilio Javier	CICESE	rebollar@cicese.mx
381	449							X	X	Reyes Cortes Ignacio A.	UACH	
382	124	X	X	X	X	X				Reyes Dávila Gabriel Ángel	UCOL	gabrielr@cgic.ucol.mx
383	344				X					Reyes Rodríguez de la Gala Jorge	CICESE	jreyes@cicese.mx
384	346				X					Reyes Trujque Javier	UACAMP	
385	260		X							Reyes Zamora César Alfonso	CICESE	reyesz@cicese.mx
386	219					X				Rivera Rodríguez Jesús	UNAM	jrivera@servidor.unam.mx
387	329		X							Rocha Fernández José Luis	UV	abraxas@speedy.coacade.uv.mx
388	217				X	X	X	X		Rodríguez Castañeda José Luis	UNAM	jrod@servidor.unam.mx
389	215	X								Rodríguez Castillo Ramiro	UNAM	rrdz@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
390	256		X	X			X			Rodríguez González Miguel	UNAM	mrod@gea.iingen.unam.mx



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004 Continúa

No.	Miembro	Dirección	C.P.	Ciudad	Estado	País
326	420	Av. 25 de Julio, 965, Col. Villas San Sebastián	28045	Colima	Col.	México
327	465	Paseo Cuauhnahuac, 8532, Col. Progreso	62550	Cuernavaca	Mor.	México
328	353	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
329	249	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
330	286	Campos Eliseos, 345, Piso 16, Col. Polanco	11550	México	D.F.	México
331	417	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
332	281	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
333	210	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Querétaro	Qro.	México
334	478	Calle 12, 1870, Col. FFCC	44440	Guadalajara	Jal.	México
335	326	Carret. Al Ajusco, 203, Col. Héroes de Padierna	14200	México	D.F.	México
336	126	N. Poema Place 201, 11507	91311	Chatsworth	California	USA
337	359	Edificio U, Cd. Universitaria	58070	Morelia	Mich.	México
338	111	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
339	242	Km 2.35, Camino al Tular, Estero de Bacochibampo	85465	Guaymas	Son.	México
340	237	Av. Reforma, 113, Col. Palmira	62490	Temixco	Mor.	México
341	109	Lic. Ángel Compers, 65, Col. Dr. Miguel Silva	58120	Morelia	Mich.	México
342	110	El Greco, 5181, Col. Real Vallarta	45020	Zapopan	Jal.	México
343	398	Loma del Estadio, s/n, Cd. Universitaria	91090	Xalapa	Ver.	México
344	115	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
345	118	Ciudad Universitaria		Santo Domingo	Santo Domingo	Rep. Dominicana
346	116	Apdo. Postal No. 847, Zona Centro	83000	Hermosillo	Son.	México
347	42	Km 2.35, Camino al Tular, Estero de Bacochibampo	85465	Guaymas	Son.	México
348	159	Manzana 72, Lote 1, Fracc. José M. Morelos, 5a. Sección	55070	Ecatepec	EdoMéx	México
349	446	Calle Sexta, 902, Col. Jardín 20 de Noviembre		Ciudad Madero	Tamps.	México
350	320			Mazatlán	Sin.	México
351	114	Circuito Gonzálo Aguirre Beltran, s/n, Zona Universitaria	91000	Xalapa	Ver.	México
352	463	D MZ XIII, 10, , Educación, Coyoacán	4400	México	D.F.	México
353	207	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
354	209	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Querétaro	Qro.	México
355	425	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
356	254	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
357	112	Santa María, 214, Col. Malinalco		Azcapotzalco	EdoMéx	México
358	352	Zona Universitaria, s/n, Cd. Universitaria	91090	Xalapa	Ver.	México
359	113	Km 5.5, Carret. Al Sur, Zona Universitaria	23000	La Paz	B.C.S	México
360	421	Eje Central Lázaro Cárdenas, 152, Col. San Bartolo Atepehuacán	7730	México	D.F.	México
361	146	Priv. Ixtlachiuatl, 100, Col. La Sierra	22170	Tijuana	B.C.	México
362	460	Edificio 6C Dpto. 11 Vallarta, 500, Vallarta	48315	Puerto Vallarta	Jal.	México
363	117	16 de Septiembre, 606 Poniente	67770	Linares	N.L.	México
364	402	Bldv. Valsequillo y Circuito CU, s/n, Cd. Universitaria		Puebla	Pue.	México
365	291	Retorno Mango, 1855, Col. Infonavit	23070	La Paz	B.C.S	México
366	397	Av. Gran Lago de los Osos, 964, Col. Jardines del Lago, 1ª Sección	21330	Mexicali	B.C.	México
367	358	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
368	453			México	D.F.	México
369	294	P.O. Box 3439	92232	Calexico	California	USA
370	277	Bellflower Boulevard, 1250	90840	Long Beach	California	USA
371	220	Av. 25 de Julio, 965, Col. Villas San Sebastián	28045	Colima	Col.	México
372	447	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
373	121	Apdo. Postal No. 343	45920	Ajijic	Jal.	México
374	122	Av. 25 de Julio, 965, Col. Villas San Sebastián	28045	Colima	Col.	México
375	434	Rio de Cantela, 221, Fracc. Paraiso II	29019	Tuxtla Gutierrez	Chis.	México
376	120	Av. Delfin Madrigal, 665, Col. Pedregal de Santo Domingo	4360	México	D.F.	México
377	309	Av. Hornos, 1003, Col. Ampliación Indeco	71230	Xoxocotlan	Oax.	México
378	7	Eje Central Lázaro Cárdenas, 152, Col. San Bartolo Atepehuacán	7730	México	D.F.	México
379	119	Mineral de la Valenciana, 2, Col. Marfil	36250	Guanajuato	Gto.	México
380	123	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
381	449	Escorza Esq. Con Venustiano Carranza, 900		Chihuahua	Chih.	México
382	124	Av. 25 de Julio, 965, Col. Villas San Sebastián	28045	Colima	Col.	México
383	344	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
384	346	Agustín Melgar, s/n		Campeche	Camp.	México
385	260	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
386	219	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
387	329	Altamirano, 99, Zona Centro	91000	Xalapa	Ver.	México
388	217	Misión de la Caborica, 14, Col. Bachoco	83148	Hermosillo	Son.	México
389	215	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
390	256	Río Bamba, 674, , Col. Lindavista	70472	México	D.F.	México



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004

No.	Miembro	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Nombre	Institución	Correo Electrónico
391	127		X	X						Rodríguez Ramírez Joel	CICESE	joel@geofisica.cicese.mx
392	433							X		Rodríguez Torres Rafael	UNISON	
393	314		X							Rodríguez Zuñiga José Luis	FJBS	sanz@mpsnet.com.mx
394	218					X	X	X		Roldán Quintana Jaime	UNAM	jaimer@servidor.unam.mx
395	413						X			Romero delaCruz Oscar Mario	UNAM	oromero@geologia.unam.mx
396	221	X	X			X				Romero Espejel Héctor	CICESE	hromero@pangea.cicese.mx
397	246	X								Romero Pascual Mercedes	UCM	romero@eucmos.sim.ucm.es
398	125	X	X	X	X	X	X	X	X	Romo Jones José Manuel	CICESE	jromo@geofisica.cicese.mx
399	213	X		X			X			Ronquillo Jarillo Gerardo	IMP	gerardo@orion.expl.imp.mx
400	268	X								Rosales Álvarez Julio	CFE	
401	267	X								Rosales Grano Pedro	SEP	
402	253	X		X	X	X	X	X		Rosas Helguera José	UDG	jrosas@quantum.ucting.udg.mx
403	322	X		X	X		X	X	X	Royo Ochoa Miguel	UACH	mroyo@uach.mx
404	278	X								Rubio Culebras Eduardo	CSIC	erubio@ija.csic.es
405	401						X	X		Rueda Gaxiola Jaime	IPN	
406	140	X	X	X	X	X	X	X	X	Sabina Ciscar Federico	UNAM	fjs@uxmym1.iimas.unam.mx
407	383					X				Sakai Ricardo K.	SUNY	sakai@asrc.cestm.albany.edu
408	212	X								Saldívar Medina Eric	UMICH	saldivar@zeus.umich.mx
409	264			X						Salinas Prieto José Antonio	IMTA	jsalinas@tlaloc.imta.mx
410	458								X	Sánchez Andrés Raquel	ITSON	rsanchez@itson.mx
411	392					X			X	Sánchez Carrillo Salvador	ITSON	sscarril@itson.mx
412	325		X				X	X		Sánchez Gómez Rubén	UDG	rsanchez@ccip.udg.mx
413	128	X	X							Sánchez Monclú Alfredo	IMP	alfredo_sanchez@hotmail.com
414	223				X					Sánchez Pérez Juan	CFE	jsanchez@cfe.gob.mx
415	129		X		X		X	X	X	Sánchez Zamora Osvaldo	UNAM	osvaldo@ollin.igeofcu.unam.mx
416	139	X								Santamaría Saldaña Dora Elva	CFE	sismo00@cfe.gob.mx
417	227	X		X		X				Sarmiento López Citlali	IMP	csarmien@imp.mx
418	201			X						Sawada Munehisa	CENAPRED	sawada@cenapred.unam.mx
419	131	X	X	X	X			X		Schaaf Peter	UNAM	pschaaf@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
420	389					X				Schiller Friedrich	UNIJENA	mali@geo.uni-jena.de
421	382					X				Sekerzh Zenkovich Sergey	UDG	seker@ccip.udg.mx
422	469								X	Sheinbaum Pardo Julio	CICESE	
423	337		X							Shultz David M.	NSSL	schultz@nssl.noaa.gov
424	134		X	X	X	X	X			Silva García José Teodoro	IPN	tsilva@redipn.ipn.mx
425	1	X	X	X	X	X				Singh Shri Krishna	UNAM	krishna@ollin.igeofcu.unam.mx
426	133		X	X						Skiba Yuri Nickolaevich	UNAM	skiba@servidor.unam.mx
427	224		X			X				Soler Arechalde Ana María	UNAM	anesoler@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
428	424						X	X	X	Solis Pichardo Gabriela	UNAM	
429	135				X					Sosa Uscanga Ignacio	UV	
430	363				X					Sotelo Parra Anselmo	GEM	
431	431						X	X		Spelz Madero Ronald	CICESE	rspelz67@msn.com
432	365				X					Staines Urías Francisca	UABC	
433	136	X	X	X	X	X				Steinich Birgit	UNAM	birgit@geociencias.unam.mx
434	226	X	X	X	X	X	X	X		Stock Joanne M.	CALTECH	jstock@gps.caltech.edu
435	276	X			X					Suárez Arriaga Mario César	UNAM	msuarez@zeuz.ccu.umich.mx
436	132	X	X	X	X	X	X	X		Suárez Plascencia Carlos	UDG	csuarez@udgserv.cencar.udg.mx
437	225	X								Suárez Reynoso Gerardo	UNAM	gerardo@ollin.igeofcu.unam.mx
438	137	X			X	X	X		X	Suárez Vidal Francisco	CICESE	fsuarez@pangea.cicese.mx
439	222	X								Suter Cargnelutti Max	UNAM	sutermx@aol.com
440	430						X			Szynkaruk Ewa	UNAM	ews@uamex.mx
441	231			X						Talavera Mendoza Oscar	UAEG	
442	319		X							Tapia Armenta Juan	IPN	jjtapia@citedi.mx
443	145	X		X	X					Taran Yuri	UNAM	taran@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
444	141				X	X	X			Tejeda Martínez Adalberto	UV	atejeda@uv.mx
445	330			X						Téles Duarte Miguel Ángel	UABC	
446	142	X	X	X	X	X		X	X	Tereshchenko Irina E.	UDG	itereshc@ccip.udg.mx
447	230	X	X	X	X		X			Tolson Jones Gustavo	UNAM	tolson@servidor.unam.mx
448	144				X	X	X	X		Torres Hernández José Ramón	UASLP	
449	263	X	X	X						Torres Orozco Ernesto	UCOL	etorres@gcic.ucol.mx
450	228	X	X			X			X	Trasviña Castro Armando	CICESE	trasvi@cicese.mx
451	386				X	X				Ulacco Humberto	UASL	
452	271	X	X			X	X			Urrutia Fucugauchi Jaime	UNAM	juf@tonatiuh.igeofcu.unam.mx
453	355				X					Vai Rossana	IMP	
454	241			X		X		X		Valdés González Carlos	UNAM	carlos@ollin.igeofcu.unam.mx
455	393					X				Valencia Moreno Martín Andres	UNAM	



## UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004 Continuación

No.	Miembro	Dirección	C.P.	Ciudad	Estado	País
391	127	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
392	433	Ingenieros, 22, Fracc. Status	83210	Hermosillo	Son.	México
393	314	Carret. Al Ajusco, 203, Col. Héroes de Padierna	14200	México	D.F.	México
394	218	Quinta Mayor, 133, Col. Las Quintas	83240	Hermosillo	Son.	México
395	413	Apdo. Postal No. 1039, Zona Centro	83000	Hermosillo	Son.	México
396	221	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
397	246	Av. Complutense, s/n	28040	Madrid	Madrid	España
398	125	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
399	213	Eje Central Lázaro Cárdenas, 152, Col. San Bartolo Atepehuacán	7730	México	D.F.	México
400	268	Km 26.5, Carret. Pascualitos-Pescadero, Cerro Prieto	21100	Mexicali	B.C.	México
401	267	Km 4, Carret. A Varadero Nacional, Sector Playitas	85480	Guaymas	Son.	México
402	253	Apdo. Postal No. 4-045, Sector Reforma	44840	Guadalajara	Jal.	México
403	322	Priv. Altamirano, 3511, Col. Santo Niño	31320	Chihuahua	Chih.	México
404	278	Lluis Solé i Sabaris, s/n	8028	Barcelona	Barcelona	España
405	401	Golondrina, 53, Col. M. del Bosque	54500	Atizapán	EdoMéx	México
406	140	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
407	383	Fuller Road, 251	12203	Albany	New York	USA
408	212	Ganadería La Laguna, 38, Col. Jardines del Teroo		Morelia	Mich.	México
409	264	Paseo Cuauhnahuac, 8532, Col. Progreso	62550	Jiutepec	Mor.	México
410	458	5 de Febrero, 818 Sur, Zona Centro		Ciudad Obregón	Son.	México
411	392	5 de Febrero, 818 Sur, Zona Centro		Ciudad Obregón	Son.	México
412	325	Calzada del Obrero, 1503, Col. Federalismo	44350	Guadalajara	Jal.	México
413	128	Apdo. Postal No. 224	24101	Ciudad del Carmen	Camp.	México
414	223	Oklahoma, 85, Piso 4, Col. Napoles	3810	México	D.F.	México
415	129	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
416	139	Zaragoza, 17, Col. Tulyahualco	16700	México	D.F.	México
417	227	Calle 42, 28, Col. Tacubaya		Ciudad del Carmen	Camp.	México
418	201	Av. Delfín Madrigal, 665, Col. Pedregal de Santo Domingo	4360	México	D.F.	México
419	131	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
420	389	D-07740		Jena		Germany
421	382	Marcelino García Barragán y Olímpica, 1421	44421	Guadalajara	Jal.	México
422	469	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
423	337	Halley Circle, 1313	73069	Norman	Oklahoma	USA
424	134	Justo Sierra, 28		Jiquilpan	Mich.	México
425	1	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
426	133	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
427	224	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
428	424	Cerro Dos Conejos, 108, Col. Romero de Terreros	4310	México	D.F.	México
429	135	Loma del Estadio, s/n, Cd. Universitaria	91000	Xalapa	Ver.	México
430	363	8 Norte, Manzana 262, Lote 11, Col. Los Robles	62500	Jiutepec	Mor.	México
431	431	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
432	365	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
433	136	Campus Juriquilla, s/n, Dom. Conocido	76230	Juriquilla	Qro.	México
434	226	Shakespeare Drive, 2824	91108	San Marino	California	USA
435	276	Patzimba, 438, Col. Vistabella	58090	Morelia	Mich.	México
436	132	Killimanjaro, 1727, Sector Independencia	44240	Guadalajara	Jal.	México
437	225	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
438	137	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
439	222	Apdo. Postal No. 1039, Zona Centro	83000	Hermosillo	Son.	México
440	430	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
441	231	Ex-Hacienda de San Juan Bautista, Taxco El Viejo	40200	Taxco	Gro.	México
442	319	Av. Del Parque, 1310, Col. Mesa de Otay	22510	Tijuana	B.C.	México
443	145	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
444	141	Zona Universitaria, s/n, Cd. Universitaria	91090	Xalapa	Ver.	México
445	330	Km 106, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
446	142	Río Autlán, 2180, 34, Sector Atlas	44421	Guadalajara	Jal.	México
447	230	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
448	144	Av. Dr. Manuel Nava, 5, Zona Universitaria	78240	San Luis Potosí	S.L.P.	México
449	263	Constitución, 37, Col. Morelos	28217	Manzanillo	Col.	México
450	228	Miraflores entre Mulegú y La Paz, 334, Fracc. BellaVista	23050	La Paz	B.C.S	México
451	386	Chacabuco, 917, 5700		San Luis	San Luis	Argentina
452	271	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
453	355	Eje Central Lázaro Cárdenas, 152, Col. San Bartolo Atepehuacán	7730	México	D.F.	México
454	241	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
455	393	Apdo. Postal No. 1039, Zona Centro	83000	Hermosillo	Son.	México



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004

No.	Miembro	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	Nombre	Institución	Correo Electrónico
456	86	X	X	X	X	X	X	X	X	Valenzuela Wong Raúl	UNAM	raul@ollin.igeofcu.unam.mx
457	229			X						Valle Levinson Arnoldo	ODU	arnoldo@ccpo.odu.edu
458	147	X	X	X	X	X				Vázquez González Rogelio	CICESE	rvazquez@geofisica.cicese.mx
459	311		X	X						Vázquez Jaimes María Elena	ENVIRON	evazquez@environcorp.com
460	335		X							Vega Granillo Ricardo	UNISON	rickvega@geologia.uson.mx
461	238	X								Velasco Clímato Néctor	IMP	nvelasco@imp.mx
462	239			X						Venegas Salgado Saúl	CFE	cfeinf@mail.giga.com
463	342				X					Vera Sánchez Jorge Ramón	PEMEX	
464	100	X			X	X		X		Victoria Morales Alfredo	UNAM	victoria@servidor.unam.mx
465	234	X	X	X	X	X	X	X	X	Vidal Villegas Antonio	CICESE	vidalv@cicese.mx
466	240	X	X					X		Villanueva Urrutia Elba Elsa	UNAM	eevu@atmosfera.unam.mx
467	279	X				X	X		X	Villegas García César José	SCINTREX	cvillega@intercable.net
468	148	X								Villicaña Cruz Francisco Javier	UNAM	
469	345			X	X		X	X		Watts Christopher	IMADES	
470	451							X		Weber Bodo	CICESE	bweber@cicese.mx
471	149	X	X	X	X	X	X	X		Wong Ortega Víctor Manuel	CICESE	vwong@cicese.mx
472	185	X	X	X	X	X				Yussim Guarneros Sergio	UNAM	yussim@servidor.unam.mx
473	151	X	X		X	X		X	X	Zárate DelValle Pedro F.	UDG	pzarate@quantum.ucting.udg.mx
474	321		X							Zárate Vázquez María	UNAM	mariaz@servidor.unam.mx
475	56		X							Zavala Jorge	UNAM	igs@servidor.unam.mx
476	295						X			Zavala Sanson Luis	CICESE	lzavala@cicese.mx
477	150	X	X	X	X		X	X	X	Zobin Vyacheslav M.	UCOL	vzobin@cgic.ucol.mx
478	211						X			Zuñiga Davila-Madrid F. Ramón	UNAM	ramon@geociencias.unam.mx



UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. • Miembros 2004 Continuación

No.	Miembro	Dirección	C.P.	Ciudad	Estado	País
456	86	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
457	229	52nd St., 768	23529	Norfolk	Virginia	USA
458	147	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
459	311	Wishire Boulevard, Suite 4950, 707	90017	Los Ángeles	California	USA
460	335	Bvd. Transversal y Rosales, s/n, Zona Centro	83000	Hermosillo	Son.	México
461	238	Calle 42, 28, Col. Tacubaya		Ciudad del Carmen	Camp.	México
462	239	Alejandro Volta, 655, Col. Electricistas	58290	Morelia	Mich.	México
463	342	Isidoro Olvera, 26, Col. Presidente Ejidal	440	México	D.F.	México
464	100	Luis Martínez del Campo, 39, Col. Romero de Terreros	4310	México	D.F.	México
465	234	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
466	240	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
467	279	Sierra Nevada, 207, Col. Villas del Valle	66288	Garza García	N.L.	México
468	148	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
469	345	Reyes y Aguascalientes, s/n, Col. San Benito	83190	Hermosillo	Son.	México
470	451	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
471	149	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
472	185	Atotonilco, 88, , Col. San Felipe de Jesús	7510	México	D.F.	México
473	151	Isla Sombrero, 2917, Col. Jardines de la Cruz	44950	Guadalajara	Jal.	México
474	321	Circuito Exterior, Cd. Universitaria, Col. Coyoacán	4510	México	D.F.	México
475	56	Parque del Conde, 12, , Col. San José Insurgentes	3900	México	D.F.	México
476	295	Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada	22860	Ensenada	B.C.	México
477	150	Av. 25 de Julio, 965, Col. Villas San Sebastián	28045	Colima	Col.	México
478	211	Tanganitos, 1	36000	Guanajuato	Gto.	México



# Posgrado

## Maestría y Doctorado en Ciencias de la Tierra

### **GEOLOGÍA**

Geología  
Estructural  
Geología Marina  
Geocronología  
Vulcanología  
Estratigrafía  
Petrología  
Tectónica  
Geoquímica  
Sensores Remotos

### **GEOFÍSICA APLICADA**

Exploración Geofísica  
Simulación Numérica  
Problemas Inversos  
Electromagnetismo  
Geofísica Marina  
Geohidrología

### **SISMOLOGÍA**

Estudios de  
Microsismicidad  
Peligro y Riesgo  
Sísmico  
Problemas Inversos  
Sismología Teórica  
Fuentes Sísmicas  
Sismotectónica

**Centro de Investigación Científica y  
de Educación Superior de Ensenada**

Para mayores informes dirigirse a:

**CICESE**

Dirección de Estudios de Posgrado  
Apartado Postal 2732  
Km 107, Carretera Tijuana-Ensenada  
Ensenada, Baja California  
C.P. 22860, México  
Tel. 01(646)175-0500 Ext. 23001  
Fax: 01(646)174-4880  
<http://www.cicese.mx>





**INSTITUTO DE GEOFÍSICA  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN  
MATEMÁTICAS APLICADAS Y EN SISTEMAS  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA**



La Universidad Nacional Autónoma de México, a través de estas entidades, ofrece estudios de maestría y doctorado en el marco del programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, comprendiendo más de 50 líneas de investigación bajo la dirección de más de 120 tutores que estudian diferentes campos del conocimiento como:

**AGUAS SUBTERRÁNEAS  
ESTRATIGRAFÍA  
EXPLORACIÓN  
FÍSICA DE LA ATMÓSFERA  
FÍSICA DEL INTERIOR DE LA TIERRA  
FÍSICA ESPACIAL  
GEOLOGÍA AMBIENTAL**

**GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y TECTÓNICA  
GEOQUÍMICA Y PETROLOGÍA  
MODELACIÓN MATEMÁTICA Y  
COMPUTACIONAL DE SISTEMAS TERRESTRES  
SISMOLOGÍA  
VULCANOLOGÍA**

**SEDE**

La sede del Posgrado se ubica en Ciudad Universitaria en la Cd. de México, aunque también pueden realizarse estudios de posgrado en las Unidades Regionales ubicadas en los Campus Juriquilla, Querétaro y Hermosillo, Sonora.

**BECAS**

Los estudiantes aceptados al Posgrado en Ciencias de la Tierra podrán aspirar a obtener una beca a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, de la propia Universidad Nacional Autónoma de México, de la Secretaría de Relaciones Exteriores, de dependencias diversas de Intercambio Académico, de las embajadas de México en el extranjero, del Consorcio de Instituciones Latinoamericanas de Posgrado e Investigación, de la Secretaría de Educación Pública a través de sus programas PROMEP y SUPERA, de la Organización de Estados Americanos y del Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

**INFORMES E INSCRIPCIONES**

Coordinación del Posgrado en Ciencias de la Tierra  
Instituto de Geofísica, UNAM  
Cd. Universitaria, Circuito de la Investigación Científica, 04510, México, D.F.  
Tels.: 52 (5) 622-4130, 622-4137 Fax: 52 (5) 622-4097  
E-mail: [coord@anahuac.igeofcu.unam.mx](mailto:coord@anahuac.igeofcu.unam.mx)  
<http://nundehui.igeofcu.unam.mx/posgrado.html>





Barragán Reyes Rosa María  
Gerencia de Geotermia, IIE  
rmb@iie.org.mx

Abril Gaspar Alejandro  
Proyectos Geotermoeléctricos, CFE  
alejandro.abril@cfe.gob.mx

Pal Verma Mahendra  
Gerencia de Geotermia, IIE  
mahendra@iie.org.mx

Arellano Gómez Víctor Manuel  
Gerencia de Geotermia, IIE  
vag@iie.org.mx

García Gutiérrez Alfonso  
Gerencia de Geotermia, IIE  
aggarcia@iie.org.mx

Aragón Aguilar Alfonso  
Gerencia de Geotermia, IIE  
aaragon@iie.org.mx

## ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA MEXICANA

La Asociación Geotérmica Mexicana (AGM) es una sociedad civil, no lucrativa, formada por profesionistas dedicados a los diversos aspectos relacionados con el aprovechamiento de la energía geotérmica. Fue fundada en 1992 para reforzar la colaboración académica, científica, industrial y tecnológica entre la comunidad geotérmica nacional y entre sus nexos internacionales. Su objetivo es difundir y promover las actividades de investigación, desarrollo y explotación de la energía geotérmica en México y en el extranjero, estableciendo un foro de análisis y discusión que permita intercambiar los conocimientos y experiencias de sus miembros. La AGM agrupa especialistas en diversas disciplinas, como: Física, Geología, Geoquímica, Geofísica, Ingeniería de Yacimientos, Ingeniería Industrial, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica, etc. Actualmente es una organización miembro de la International Geothermal Association (IGA).

La Asociación Geotérmica Mexicana, invita a todos los profesionales y académicos relacionados con la Geotermia, a formar parte de nuestra asociación, contribuyendo así al fortalecimiento de nuestra comunidad.

<http://www.ugm.org.mx/agg>



## MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



EL DEPARTAMENTO DE FÍSICA DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS DE LA U. DE G., OFRECE CURSOS DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA, CON ESPECIALIDAD EN:

### *FÍSICA DEL OCÉANO Y DE LA ATMÓSFERA*

La maestría y el doctorado están dirigidos a egresados de las Licenciaturas en: Oceanografía, Meteorología, Física, Matemáticas o carreras afines al posgrado a juicio del comité consultivo. El programa de maestría está integrado al padrón de posgrados de excelencia del CONACYT, por lo que existe oportunidad de obtener beca por parte de éste, o del PROMEP.

Informes al Tel/Fax: (3)619 82 92 y 619 80 54. Dra. Irina Tereshchenko  
CUCEI, Módulo V  
E-mail: [itereshc@ccip.udg.mx](mailto:itereshc@ccip.udg.mx)  
Página WEB: <http://fisica.cucei.udg.mx>



## Maestría y Doctorado en Ingeniería Hidráulica



La División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM ofrece cursos de maestría y doctorado en Ingeniería Hidráulica en sus instalaciones de Progreso, Morelos, México.

Las asignaturas que se imparten son, entre otras:

*Hidráulica General*  
*Métodos Matemáticos*  
*Mecánica de Fluidos*  
*Hidrología de Superficie*

*Irrigación y Drenaje*  
*Geohidrología*  
*Métodos Numéricos*  
*Obras Hidráulicas*

La maestría y el doctorado están dirigidos a egresados de Ingeniería Civil, Ciencias Agropecuarias y carreras afines. Estos cursos están apoyados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua a través de becas, biblioteca, computadoras y laboratorios.

Informes al Tel. (73) 194-049 o 194-000, Ext. 532 con el Dr. Alvaro Muñoz en Paseo Cuauahuac #8532, Progreso, Morelos, México. C.P. 62550.



## POLÍTICA EDITORIAL

GEOS es el boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, contiene artículos de investigación originales así como artículos de divulgación y notas cortas sobre aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM; se publican tres números en el año tanto en forma impresa como electrónica.

Los artículos de investigación publicados en GEOS deben ser originales son arbitrados por al menos dos expertos en el tema; mientras que los trabajos de divulgación son arbitrados por un especialista en el tema. Los editores se reservan el derecho decidir sobre la publicación de notas o reportes.

Son particularmente bienvenidas todas aquellas contribuciones que coadyuven a la difusión y a la enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

Una vez concluido el proceso de arbitraje, el manuscrito será devuelto al primer autor con los comentarios de los árbitros y del editor. El manuscrito corregido en forma final será editado por el Editor Técnico de GEOS para su publicación impresa y electrónica. No se enviarán pruebas de galera.

Cualquier cambio a la política editorial de GEOS se publicará en el primer número de cada volumen.

### INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Publicar en GEOS es gratuito, todos los manuscritos deberán enviarse en forma electrónica a cualquiera de los editores principales:

Luis Alberto Delgado Argote (CICESE)  
[ldelgado@cicese.mx](mailto:ldelgado@cicese.mx)

José Manuel Romo Jones (UGM)  
[jromo@cicese.mx](mailto:jromo@cicese.mx)

#### PREPARACIÓN DE TEXTO:

Podemos procesar manuscritos en formato WORD, texto ASCII o LaTeX. Se recomienda que los manuscritos no excedan 12 páginas en el formato de la revista (una página contiene aproximadamente 900 palabras).

#### PREPARACIÓN DE FIGURAS E ILUSTRACIONES:

Las ilustraciones y figuras se pueden enviar en cualquiera de los siguientes formatos: TIF, EPS, PS, DXF, DWG, PDF, JPG o WMF; y deben enviarse en archivos individuales y separados del texto.

La publicación de figuras a color en la versión impresa de GEOS no es posible por ahora, sin embargo la versión electrónica puede contener ilustraciones a todo color, se recomienda a los autores preparar sus figuras pensando en ambas ediciones.

#### SECCIONES

Con excepción de las notas, todas las contribuciones deberán incluir: título, resumen (en español y en inglés), introducción, una sección de métodos, una sección de resultados, una sección de discusión y/o conclusiones y una sección de referencias bibliográficas.

### RESUMEN

El resumen no deberá exceder 350 palabras. Al prepararlo haga énfasis en los objetivos de la investigación, los resultados más importantes y las conclusiones alcanzadas. En el resumen no deben aparecer citas bibliográficas.

### INTRODUCCIÓN

La introducción deberá destacar la relevancia del problema e incluir una revisión adecuada de publicaciones antecedentes sobre el tema. El objetivo de la introducción es enmarcar el problema dentro del estado general del conocimiento en el área que le corresponde, destacar la contribución del trabajo y motivar la lectura del artículo completo.

### METODOLOGÍA

La metodología empleada en el trabajo deberá ser descrita con suficiente detalle para que otros miembros de la comunidad puedan comprenderla, pero al mismo tiempo, debe ser sencilla para que un lector inexperto pueda comprender las ideas fundamentales. Los desarrollos demasiado detallados, pero necesarios, deben diferirse a una sección apéndice.

### RESULTADOS

Usualmente, los resultados de la aplicación de cualquier metodología pueden presentarse en forma de tablas o figuras. Evite redundancias mediante una adecuada selección de sus resultados. Los



pies de figura deberán ser lo suficientemente explicativos para resaltar la importancia de lo que se ilustra sin necesidad de acudir al texto.

## DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

En esta sección se deben discutir las implicaciones de los resultados, su concordancia o divergencia con hipótesis anteriores, construir nuevas hipótesis derivadas de ellos, discutir sus aplicaciones prácticas y posibles limitaciones.

## REFERENCIAS

Todas las referencias deberán estar agrupadas en orden alfabético por apellido del primer autor. Si un autor es citado más de una vez el mismo año, utilice el sufijo, a, b, etc. para distinguir el trabajo. Aquellos manuscritos que no estén en publicados (aceptados o en prensa) no deberán incluirse en las referencias. Los artículos de divulgación podrán agregar una sección de referencias recomendadas.

## FORMATO PARA CITAS

Para cada autor o co-autor, escriba con mayúscula únicamente la primera letra del apellido y después las iniciales. Utilice letras mayúsculas sólo en la primera letra del título y para los nombres propios. Incluya el nombre completo de la revista o editorial que la publicó, volumen y páginas. Por ejemplo:

- Alvarez-Borrego, S., 1996, Satellite derived photosynthetic pigment surveys: A review of marine phytoplankton biomass and productivity, *Geofísica Internacional*, v. 35, p. 51-61.
- Lomnitz, C., 1995, Diez años después: Una reinterpretación de la catástrofe de 1985. *Err.* F. Medina-Martínez, L. A. Delgado-Argote y G. Suárez-Reynoso, editores, La Sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 (M=8.1), Unión Geofísica Mexicana, *Monografía No. 2*, p. 61-67.
- Ripa, P., y Velázquez, G., 1993, Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, v. 32, p. 41-56.
- Sánchez-Sesma, F.J., and Luzón, F., 1994, Seismic response of three-dimensional alluvial valleys for incident P, S, and Rayleigh waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 85, p. 269-284.
- Winkler, H.G.F., 1967, *Petrogenesis of metamorphic rocks*, 2nd Ed., Springer-Verlag, New York, 237 pp.

## UNIDADES

Con algunas excepciones, todas las unidades físicas deberán expresarse en el Sistema Internacional de unidades (SI). Las siguientes excepciones son aceptables:

densidad en g/cm<sup>3</sup>

presión en bar

## EXPRESIONES MATEMÁTICAS

Escriba sus ecuaciones en la forma más simple posible, utilizando signos de puntuación. Utilice itálicas para todos los símbolos, exceptuando las letras griegas. Vectores y matrices se escribirán con negrillas. Numere en forma consecutiva y entre paréntesis todas las ecuaciones que aparezcan en el texto.

$$g(r) = g_0 \int_{r_0}^r \frac{r(r_0)}{|r - r_0|^2} dr_0^3$$

---

Recordamos a todos los miembros de la Unión Geofísica Mexicana, A.C.  
que la cuota para el 2004 es de \$400.00 para investigadores  
y \$300.00 para estudiantes.

página internet: [www.ugm.org.mx](http://www.ugm.org.mx)

---

**Favor de hacer llegar su cuota a:**

Ivonne Pedrín Morales  
División de Ciencias de la Tierra  
CICESE  
Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada  
Ensenada, 22860, B.C., México  
Correo electrónico: [ipedrin@cicese.mx](mailto:ipedrin@cicese.mx)

Mónica Nava  
Unidad de Apoyo Editorial, Instituto de Geofísica  
UNAM  
Cd. Universitaria, Delegación Coyoacán  
México, 04510, D.F., México  
Correo electrónico: [achaman@igeofcu.unam.mx](mailto:achaman@igeofcu.unam.mx)

Con un cordial saludo

**Luis A. Delgado Argote y José M. Romo Jones**  
Editores

---

**Costo anual de anuncios en GEOS**

<b>Instituciones:</b>	<b>Comerciales y Gubernamentales</b>	<b>Académicas</b>
<b>Página completa</b>	<b>\$4,000.00</b>	<b>\$2,000.00</b>
<b>Media página</b>	<b>\$2,000.00</b>	<b>\$1,000.00</b>

---

**GEOS**

Revista a la venta con:

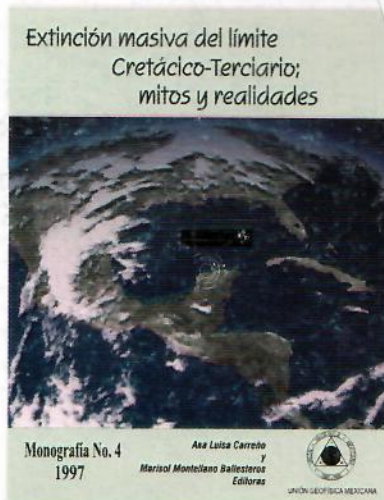
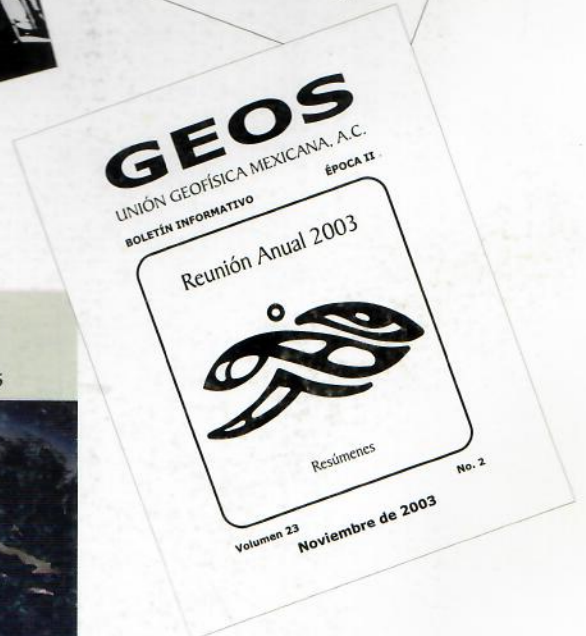
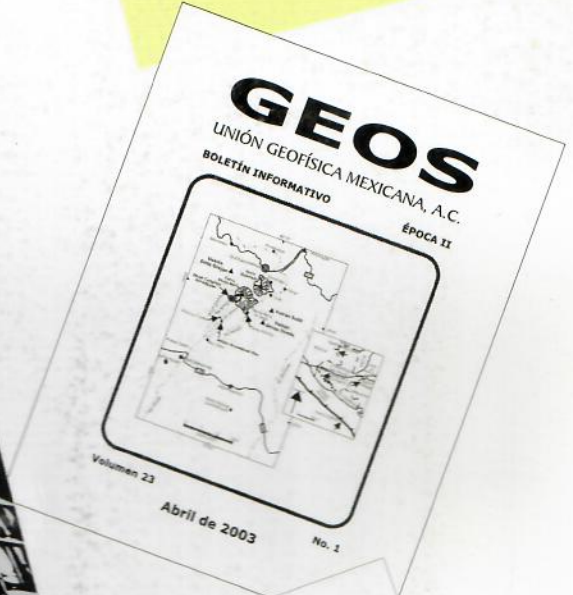
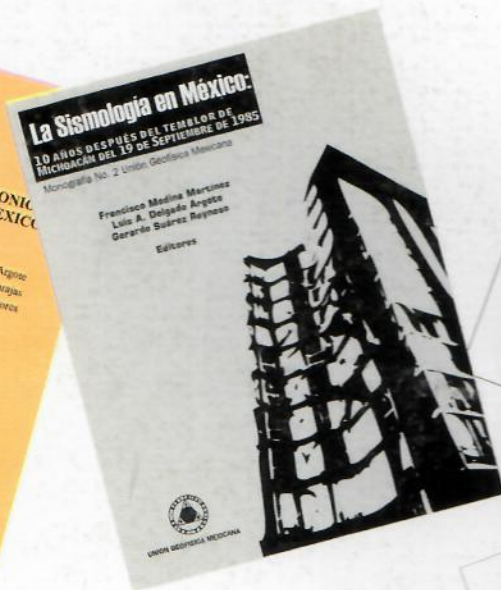
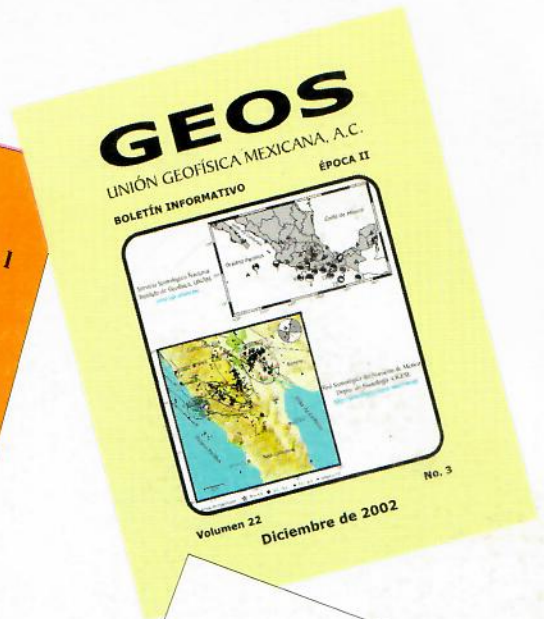
Ivonne Pedrín Morales  
División de Ciencias de la Tierra  
Tel: 01(646)174-5050  
Ext: 26004  
Correo electrónico: [ipedrin@cicese.mx](mailto:ipedrin@cicese.mx)

Costo del ejemplar \$60.00

Mónica Nava  
Unidad de Apoyo Editorial  
Instituto de Geofísica, UNAM  
Tel: (01)5622-4115 y 5550-2486  
Correo electrónico: [monica@igeofcu.unam.mx](mailto:monica@igeofcu.unam.mx)







Tus trabajos de investigación y divulgación tienen cabida en estos foros de la Unión Geofísica Mexicana, A.C.