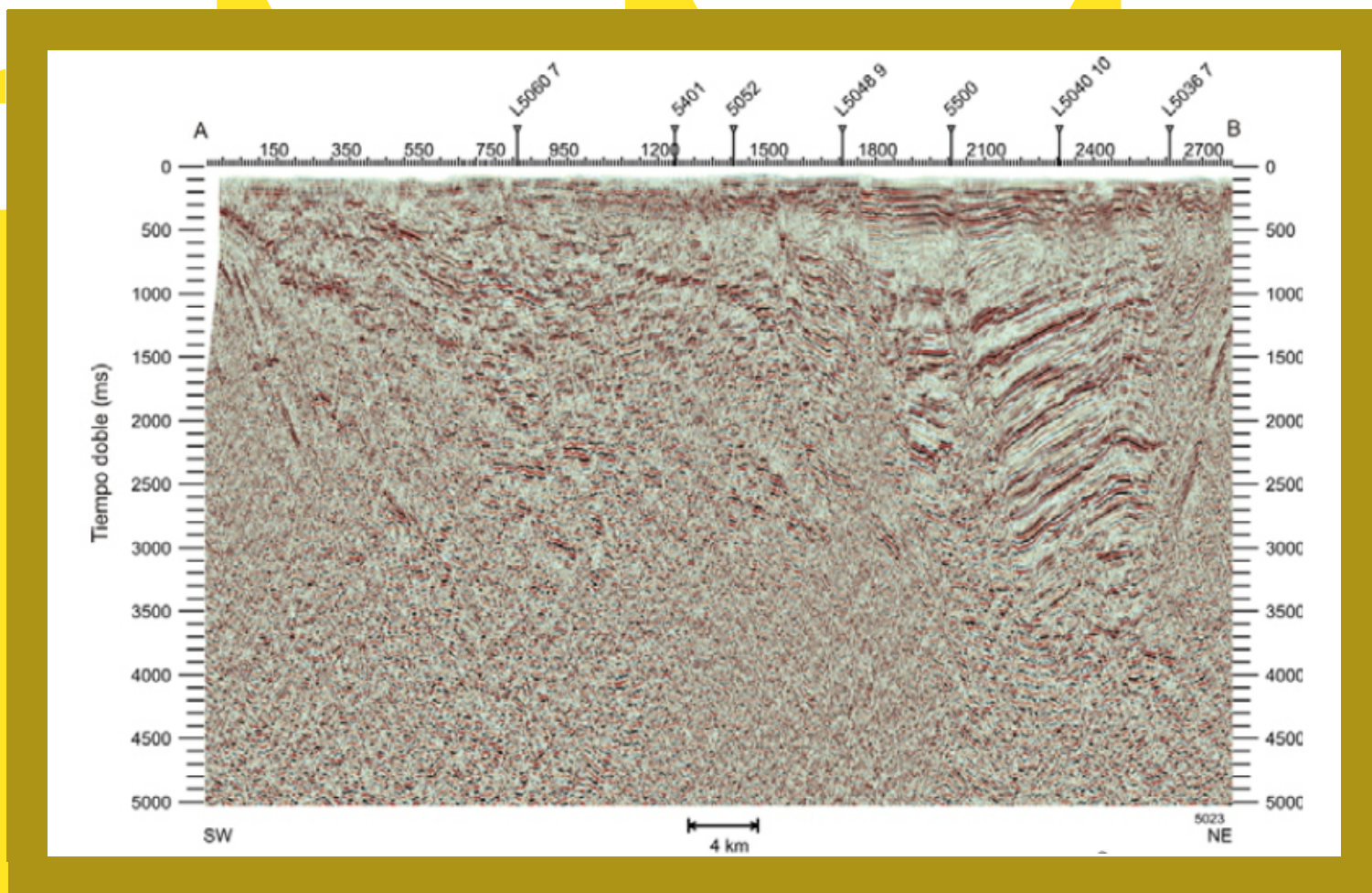


# Geofísica



# GEOS

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

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

GEOS se publica dos 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 2010-2011

**Dr. Julián Adem Chain**  
Presidente Honorario

**Dr. José Manuel Romo Jones**  
*División de Ciencias de la Tierra, CICESE*  
Presidente

**Dr. Avto Gogichaisvili**  
*Instituto de Geofísica, UNAM*  
Vicepresidente

**Dr. Héctor López Loera**  
*Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica*  
Secretario General

**Dr. Raúl Castro Escamilla**  
*División de Ciencias de la Tierra, CICESE*  
Secretario de Investigación

**Dr. Claudia Arango Galván**  
*Instituto de Geofísica, UNAM*  
Secretario de Difusión

**Dr. Xyoli Pérez Campos**  
*Instituto de Geofísica, UNAM*  
Secretario de Educación

**Dr. Víctor Manuel Wong Ortega**  
*División de Ciencias de la Tierra, CICESE*  
Tesorero

**GEOS**, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, contiene artículos de investigación originales, artículos de divulgación, notas cortas, 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 número y en <http://www.ugm.org.mx/geos.html>

Dirigir toda correspondencia a:  
Editorial GEOS  
División de Ciencias de la Tierra, CICESE  
[ldelgado@cicese.mx](mailto:ldelgado@cicese.mx)  
Tel.en Ensenada B.C.: (646)175-0500, Ext. 26060

#### Editores Principales

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

Claudia Arango Galván  
[claudiar@geofisica.unam.mx](mailto:claudiar@geofisica.unam.mx)  
UGM

#### Comité Editorial

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

#### Apoyo Técnico Editorial

Marcela Cruz Navarro - [marce\\_cn@hotmail.com](mailto:marce_cn@hotmail.com)  
María Cristina Álvarez Astorga  
Alejandro F. Nava Pichardo

Título: GEOS

Periodicidad: semestral

ISSN: 0186-1891

Editado en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carret. Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

**EDITORIAL** ...369

**ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN**

**VARIACIONES DE TIEMPO DE RECORRIDO EN UN MEDIO UNIDIMENSIONAL CON VELOCIDAD ESTOCÁSTICAMENTE HETEROGÉNEA: UN EFECTO CONTRAINTUITIVO**  
F. Alejandro Nava Pichardo ...370

**GEOMETRÍA DE LA CUENCA WAGNER, GOLFO DE CALIFORNIA, A PARTIR DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN**  
César Aguilar Campos, Mario González Escobar y J. Arturo Martín-Barajas ...376

**ASPECTOS DE LA SISMOTECTÓNICA DE NICARAGUA Y SU ALREDEDOR**  
José Frez y Ena Gámez ...387

**REPORTES**

**MEXICANO TIENE MEDIO CENTENAR DE ESCLAVOS: XIII OLIMPIADA ESTATAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA**  
Enrique Gómez Treviño ...410

**ORIGEN Y NATURALEZA DEL UNIVERSO Y LA XII OLIMPIADA ESTATAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA DE BAJA CALIFORNIA**  
Enrique Gómez Treviño ...417

**COMUNICACIONES**

**POLÍTICA EDITORIAL** ...429

## Ciencia y Educación en Tiempos de Centenarios

La ciencia, para bien o para mal, llegó para quedarse en la Tierra. Nació en la Grecia antigua, fue abandonada y medio sobrevivió en Egipto en los tiempos de los romanos, más precisamente se enquistó en Alejandría. En la edad media pasa su adolescencia en el mundo árabe, y alcanza su juventud en el siglo XIX en Europa. Varios países, entre ellos Japón, se enamoraron de ese ser juvenil que hacía que Europa fuera más atractiva que ningún otro continente. En ese mismo siglo XIX, importaron masivamente libros de texto, métodos educativos y maestros, y en unas cuanta décadas se pusieron a la par de muchos países occidentales. Francisco I. Madero, en su célebre libro de 1908 que precedió a la Revolución Mexicana, reclama a Porfirio Díaz que en sus tres décadas de gobierno, y a pesar de sus partidarios que se hacían llamar *los científicos*, nunca intentó ni logró lo que ya para ese entonces había logrado Japón. Y es que cuando entró al poder Don Porfirio, el nivel educativo de Japón era inferior al de México, y 30 años después, ya para terminar su dictadura, Japón superaba tremendamente a México.

Eran los tiempos del primer centenario de la Independencia de México. Ahora estamos celebrando el bicentenario. También estamos celebrando el centenario de la Revolución. A cien años de Don Porfirio mucho se ha logrado: es indudable que el nivel educativo actual es muy superior al de antes de la Revolución. Sin embargo, seguimos rezagados porque mientras nosotros avanzamos los demás también avanzan, y lo hacen mejor que nosotros. No basta con comparar lo que somos actualmente con lo que fuimos antes y sentirnos satisfechos. El mundo moderno exige mucho más. Hay que estar atentos a lo que hacen los demás países y tratar de superarlos. Y así cada quién, en una especie de darwinismo internacional en que lo importante es ser más competitivo que el otro y así atraer la inversión de capitales.

Los niveles de competitividad contemplan muchos factores. Uno de ellos es el nivel educativo, mas no es el más importante. Y sin embargo, con el tiempo la educación podría convertirse en el factor más importante para de alguna manera replantear las bases de la economía mundial, las cuales se remontan a más de dos siglos con Adam Smith. Crecimiento, competencia, explotación de los recursos de la Tierra como si fueran inagotables, y así desde entonces hasta ahora. Creíamos que el aire y el mar eran colaboradores gratuitos. Ahora sabemos que sí cobran, y que desde siempre han estado cobrando, pero no lo sabíamos. Ahora todo el mundo lo sabe porque nos están pasando la factura de 200 años de industrialización. La cuestión es que en el siglo XIX algunos sí lo sabían pero eran los menos y nadie les hacía caso. Realmente muy pocos comprendían las sutilezas del efecto del dióxido de carbono en la atmósfera. Tal vez si hubiera sido una preocupación general, basada en una educación de la población en general -sólo tal vez- la civilización hubiera tomado otro camino para abastecerse de energía, o habría tomado medidas al respecto desde entonces.

Y hablando de medidas que podemos tomar, terminemos con algo simple y de todos los días: ¿Separamos la basura en México? A decir verdad algunos sí lo hacen pero son los menos y nadie les hace caso. En muchos países la basura se separa desde hace décadas. ¿Para cuándo lo haremos nosotros? ¿Que tal para el tricentenario?

Enrique Gómez Treviño



# VARIACIONES DE TIEMPO DE RECORRIDO EN UN MEDIO UNIDIMENSIONAL CON VELOCIDAD ESTOCÁSTICAMENTE HETEROGÉNEA: UN EFECTO CONTRAINTUITIVO

F. Alejandro Nava Pichardo

Depto. de Sismología, CICESE, Ensenada, B.C., México

fnav@cicese.mx

## RESUMEN

Variaciones aleatorias pequeñas en la velocidad de propagación en un medio unidimensional, que siguen alguna distribución probabilística con media nula, influyen en los tiempos de recorrido de los rayos sísmicos en forma un tanto contraintuitiva. En el caso unidimensional, la distribución de las variaciones en estos tiempos es, como se esperaría intuitivamente, similar a la de las variaciones de velocidad de propagación, pero tiene menor desviación estándar y media mayor que cero, de manera que la velocidad aparente presenta un retraso medio que puede ser significativo. Se presenta un ejemplo numérico y la justificación matemática de dichos efectos, así como una explicación de por qué estos efectos son contrarios a algunos resultados obtenidos para medios multidimensionales.

Palabras clave: Tiempos de recorrido, medios con velocidad aleatoria.

## ABSTRACT

Small random variations in the propagation velocity within a one-dimensional medium, that follow some probabilistic distribution with zero mean, influence the travel times of seismic rays in a somewhat counterintuitive way. The distribution of the variations in these times is, as would be intuitively expected, similar to that of the velocity variations, but has a smaller standard deviation, and a non-zero, positive, mean, so that the apparent velocity features a mean delay which can be significant. A numerical example and the mathematical justification of these effects are presented, as well as an explanation of why these effects are contrary to some results obtained for multidimensional media.

Key words: Travel times, random velocity media.

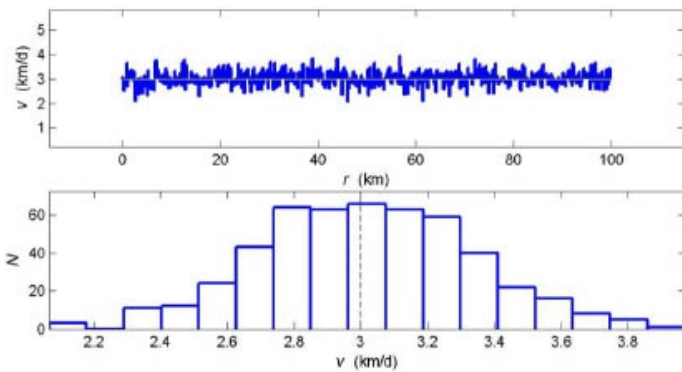
## INTRODUCCIÓN

En estudios de distribuciones hipocentrales que relacionan las distancias entre posibles fuentes de información y sitios receptores de ésta con los correspondientes tiempos de recorrido, mediante la suposición o búsqueda de una velocidad de propagación dada, es importante estimar el efecto de variaciones en dicha velocidad sobre los tiempos de recorrido.

Si el medio de propagación es geológicamente homogéneo con una velocidad promedio característica, podemos esperar intuitivamente que, de punto a punto, la velocidad local varíe alrededor de dicha velocidad característica con variaciones aleatorias, pequeñas en su gran mayoría y con media muy pequeña o nula.

En ese caso, podemos esperar, intuitivamente, que los tiempos de recorrido varíen de manera estadísticamente correspondiente a las variaciones; esto es, que, para una distancia dada, los tiempos sean tales que las velocidades aparentes obtenidas de dividir la distancia entre éstos, se distribuyan de la misma forma que las variaciones de velocidad, con las mismas media y desviación estándar.

Veremos, mediante un experimento numérico, que el efecto de las variaciones de velocidad mencionadas no corresponde al intuitivo para un medio unidimensional; en particular, la velocidad promedio presenta un corrimiento que la hace más lenta.



**Figura 1.** Ejemplo de variación de velocidad a lo largo de un rayo (arriba) y el histograma correspondiente (abajo). Puede apreciarse que el histograma refleja la distribución normal utilizada para generar las variaciones.

El efecto de variaciones aleatorias de velocidad en medios bi- y tridimensionales ha sido ampliamente estudiado (e.g. Chernov, 1960) y los estudios han encontrado un corrimiento en la velocidad aparente promedio. Sin embargo, para altas frecuencias, este corrimiento es hacia mayores velocidades, en contra de lo observado en el caso unidimensional.

Presentaremos la justificación matemática del corrimiento de velocidad en el medio unidimensional y una explicación de la aparente contradicción en signo con los corrimientos en medios de más dimensiones.

## EL EXPERIMENTO NUMÉRICO Y SU EXPLICACIÓN MATEMÁTICA

Supongamos una señal sísmica que se propaga de fuente a receptor a través de una distancia  $r$  con velocidad  $v$ ; el tiempo que tarda en hacerlo es

$$t_0 = \frac{r}{v} \tag{1}$$

donde el subíndice cero indica que la velocidad no varía.

Consideremos ahora la distancia dividida en  $n$  intervalos y supongámoslos iguales para facilitar esta exposición (el efecto es el mismo si los consideramos desiguales), de manera que

$$r = n \Delta r \tag{2}$$

y supongamos que la velocidad varía cada intervalo  $\Delta r$ :

Para un intervalo cualquiera  $\Delta r_i = \Delta r$ , la velocidad está dada por  $v + \delta v_i$ , donde  $\delta v_i$  es la variación aleatoria; la velocidad media a lo largo de  $r$  es

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v + \delta v_i) \tag{3}$$

y el tiempo de recorrido, está dado por

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta r}{v + \delta v_i} \tag{4}$$

Es de esperarse que las variaciones de velocidad sean debidas a la suma de efectos de una variedad de causas, por lo que una distribución normal puede ser adecuada para modelar dichas variaciones. Vamos a hacer el experimento numérico generando variaciones aleatorias de velocidad distribuidas normalmente con media cero, pero los efectos descritos no dependen de la distribución particular usada, siempre que ésta sea unimodal y tenga media cero.

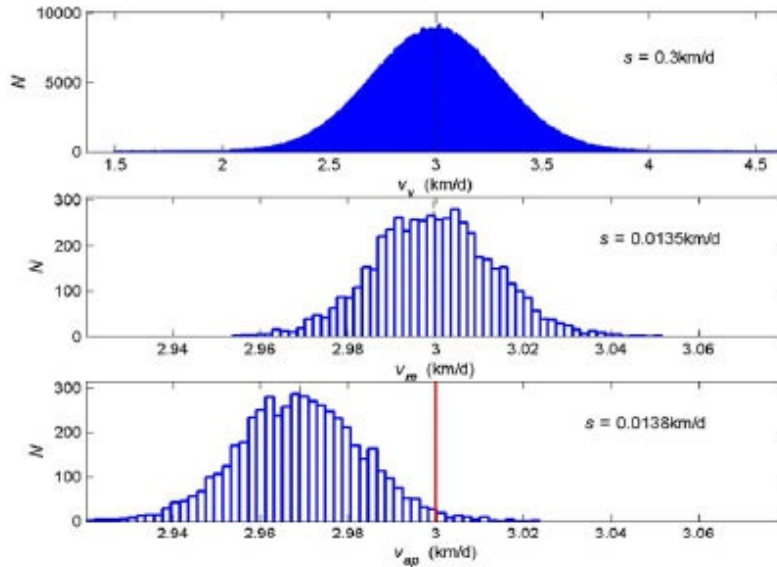


Figura 2. Histograma de las 2,500,000 velocidades generadas (arriba), de las 5,000 velocidades medias a lo largo de cada rayo (centro) y de las velocidades aparentes (abajo). En todas, la línea vertical discontinua indica el valor medio y la línea vertical gruesa indica el valor de  $v = 3 \text{ km/d}$  y  $r = 100 \text{ km}$

Consideremos  $v=3 \text{ km/d}$  y  $r= 100 \text{ km}$ , de manera que  $t_0 = 33.3\bar{3}\text{d}$ . La Figura 1 muestra un ejemplo de la variación de la velocidad para  $\Delta r = 0.2\text{km}$  y  $n=500$ , con  $\delta v$  aleatorio distribuido normalmente con desviación estándar  $\sigma_v = 0.1 v = 0.3 \text{ km/d}$

Generamos  $m=5,000$  rayos, evaluando para cada uno la velocidad media  $v_m$  y el tiempo  $t$ , según las ecuaciones (3) y (4). A partir de cada  $t$ , calculamos la velocidad aparente

$$v_{ap} = \frac{r}{t} = \frac{r}{t_0 + \delta t} \quad (5)$$

y la distancia aparente

$$r_{ap} = v t = r + v \delta t \quad (6)$$

La Figura 2 muestra, en su cuadro superior, el histograma de las velocidades generadas, que refleja de manera muy convincente la distribución normal usada; la desviación estándar medida  $\delta v$  concuerda muy bien con  $\sigma_v$ .

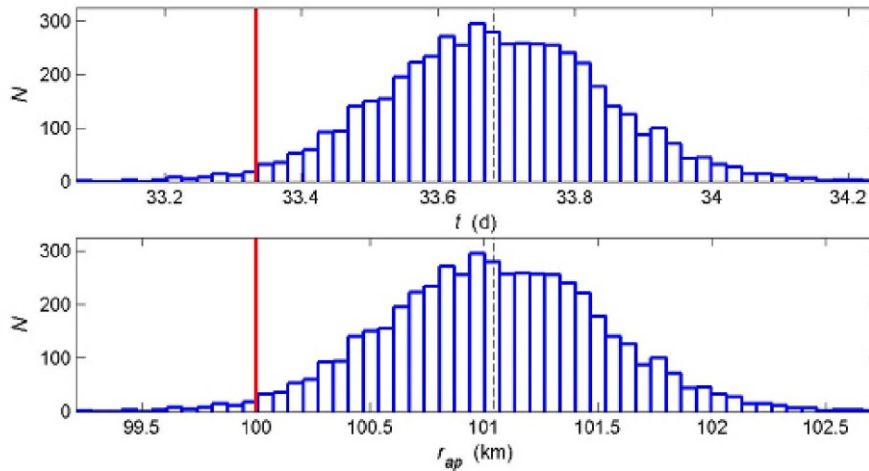
El histograma de los tiempos  $t$  calculados para dichas velocidades se muestra en la Figura 3 (arriba); es en esta figura donde se observa que no se cumplen las predicciones intuitivas:

la distribución sí parece ser normal, pero su valor medio difiere de  $t_0$  por  $\delta t = 0.3429\text{d}$  ( $\sim 1\%$ ) y su desviación estándar medida  $s_t = 0.1532 \text{ d}$  es mucho menor que la correspondiente a la de  $v$ ; corresponde más bien a la de  $v_m$ , cuyo histograma se muestra en la Figura 2 (en medio) y cuya  $S_{v_m} = 0.0135$  (nótese la diferencia en la extensión de los correspondientes ejes de abscisas). Este último punto es muy fácil de explicar; cada  $t$  corresponde a una  $v_m$  que es una media de  $n$  elementos de  $v$ , y es bien sabido que la desviación estándar de estas medias es

$$\sigma_{v_m} = \frac{\sigma_v}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

El corrimiento del tiempo medio y los correspondientes corrimientos de  $r_{ap}$  y  $v_{ap}$  son debidos a que las variaciones de velocidad aparecen en el denominador, y no en el numerador, de la ecuación (4). Efectivamente, podemos expresar esta ecuación como

$$t = \frac{\Delta r}{v} \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + \frac{\delta v_i}{v}}$$



**Figura 3.** Histogramas de  $t$  (arriba) y de  $r_{ap}$  (abajo); en ambos la línea vertical discontinua indica el valor medio de la distribución y la línea continua gruesa indica los valores para  $v$  invariable,  $t_0$  y  $r$ , respectivamente.

y desarrollar el denominador como serie, seguros de que converge pues el término  $\delta v_j / v$  es menor que la unidad, de manera que

$$t = \frac{\Delta r}{v} \sum_{i=1}^n \left[ 1 - \frac{\delta v_i}{v} + \left(\frac{\delta v_i}{v}\right)^2 - \left(\frac{\delta v_i}{v}\right)^3 + \dots \right] = t_0 + \delta t \quad (8)$$

donde

$$\delta t = \frac{\Delta r}{v} \left[ - \sum_{i=1}^n \frac{\delta v_i}{v} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta v_i}{v}\right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta v_i}{v}\right)^3 + \dots \right] \quad (9)$$

Ya que las variaciones  $\delta v_i$  son aleatorias y, con igual probabilidad, positivas o negativas, los términos de sumatorias con potencias impares de la ecuación (9) son muy pequeños o nulos (el primer término es nulo por definición), mientras que aquellos con potencias pares, siempre positivas, sí contribuyen al valor absoluto de  $\delta t$ . En la práctica, este valor está dominado por la sumatoria de términos cuadráticos y puede estimarse, *grosso modo*, como

$$\delta t \approx \frac{\Delta r}{v} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta v_i}{v}\right)^2 \approx \frac{\Delta r}{v^3} \sum_{i=1}^n (\delta v_i)^2 \approx \frac{\Delta r}{v^3} \sigma_v^2 (n-1) \quad (10)$$

¿Qué tan importante es el efecto de la variación de la velocidad? El valor medio de  $t$  depende, naturalmente, de  $\sigma_v$  y de la distancia  $r$  que recorre el rayo; el tamaño de  $\Delta r$  influye solamente sobre la desviación estándar de  $t$ . La Figura 4 ilustra, para  $v = 3 \text{ km/dy}$  y  $\Delta r = 0.2 \text{ km}$ , la diferencia entre el tiempo  $t_0$  y el valor medio de  $t$ , así como la desviación estándar de éste para diferentes distancias y dos valores de  $\sigma_v$ . Puede verse que el efecto de dicha variación puede ser significativo a largas distancias, aún para variaciones pequeñas de la velocidad ( $\sim 0.01 v$ ), y ser bastante considerable para variaciones grandes ( $\sim 0.10 v$ ); en ambos casos, para las distancias mostradas, la diferencia en tiempos sobrepasa una desviación estándar (dos para variaciones grandes).

Mencionaremos, de paso, que para el caso de velocidad de tipo difusivo, donde

$$t_0 = \frac{r^2}{v} ,$$

un análisis similar al caso elástico discutido arriba indica que existe también aumento en los tiempos de recorrido, dado por

$$\delta t = 2\sqrt{t_0} \sqrt{\theta} + \theta$$

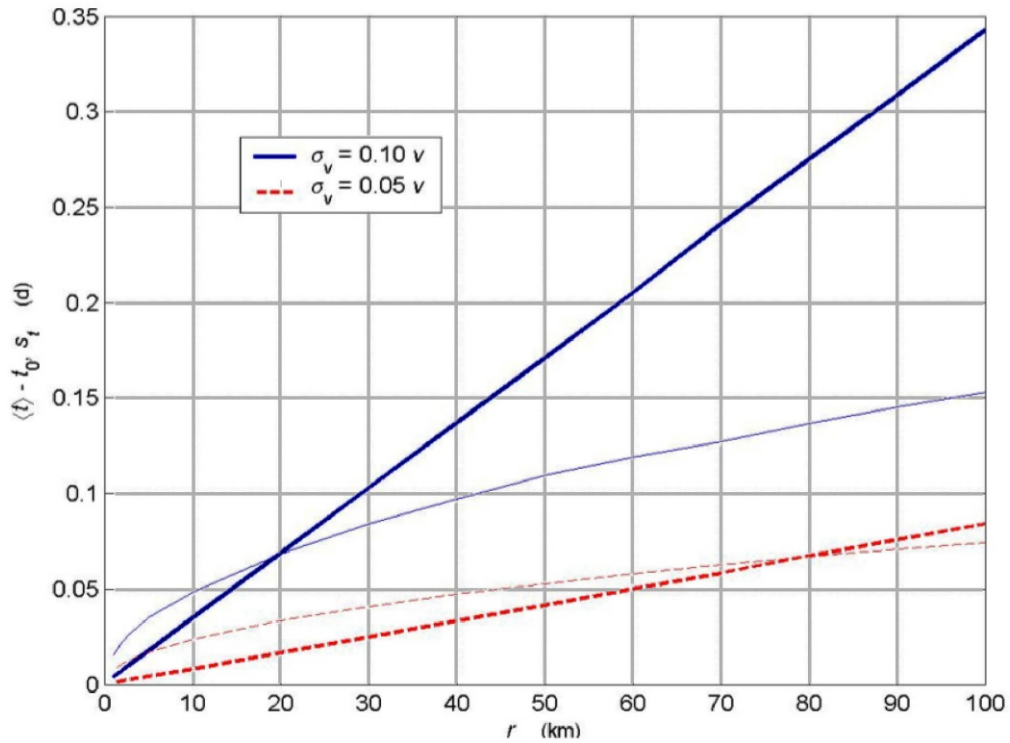


Figura 4. Diferencia entre  $t_0$  y  $t$  media (líneas gruesas) y desviación estándar de  $t$  (líneas delgadas), como funciones de la distancia, para  $v=3$  km/d y  $\Delta r = 0.2$  km.

donde

$$\sqrt{\theta} = \frac{\Delta r}{\sqrt{v}} \left[ -0.5 \sum_{i=1}^n \frac{\delta v_i}{v} + 0.375 \sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta v_i}{v} \right)^2 - 0.3125 \sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta v_i}{v} \right)^3 + \dots \right]$$

## EL CASO MULTIDIMENSIONAL

Los tiempos de recorrido en medios con velocidades que varían en forma aleatoria han sido ampliamente estudiados, tanto desde el punto de vista teórico, usualmente en el límite de altas frecuencias (e.g. Chernov, 1960; Samuelides, 1998), como numéricamente, mediante métodos de diferencias finitas (e.g. Frankel y Clayton, 1990; Müller et al., 1992). El corrimiento de velocidad ha sido ampliamente reconocido; sin embargo, los métodos basados en aproximaciones de rayos obtienen corrimientos hacia velocidades ¡más altas!

La explicación es sugerida por dos factores. El primero es que el corrimiento de la velocidad aumenta con la longitud de la trayectoria (Samuelides, 1998). El segundo, que el corrimiento es función de la frecuencia; la velocidad aparente es mayor para frecuencias más altas, y decrece conforme baja la frecuencia hasta alcanzar un corrimiento negativo para frecuencias muy bajas (Müller et al., 1992, Roth et al., 1993). Müller et al. (1992) mencionan que Wielandt (1987) encontró que en un medio con inclusiones de baja velocidad, las ondas se difractan alrededor de estas inclusiones.



Es el mismo mecanismo por el cual una onda críticamente refractada  $P_n$  puede viajar más rápido que una onda directa  $P_g$ , a pesar de recorrer un camino más largo.

Podemos considerar a un medio con variaciones de velocidad aleatorias como un medio con inclusiones tanto más rápidas como más lentas. Las altas frecuencias, cuyas longitudes de onda son pequeñas, pueden difractarse aprovechando las inclusiones de alta velocidad y, mientras mayor es el trayecto, más tiempo pueden ahorrar que si siguieran una trayectoria directa pasando igualmente por zonas de velocidad intermedia y baja. Conforme baja la frecuencia y las longitudes de onda aumentan, el trayecto es menos versátil, hasta llegar al límite en que la longitud de onda es mucho mayor que el tamaño de las inclusiones (la escala a la cual varía aleatoriamente la velocidad del medio) y la trayectoria entre dos puntos ya no puede variar, de manera que la onda viaja a través de (muestrea) velocidades con todas las variaciones. Para un medio unidimensional la trayectoria no puede variar; por eso, independientemente de la frecuencia, la onda muestrea todas las velocidades como en el ejemplo mostrado antes.

## CONCLUSIONES

Las variaciones en tiempo de viaje de un rayo sísmico causadas por variaciones aleatorias de velocidad con medias nulas a lo largo del recorrido, causan cambios en los tiempos de recorrido cuyos valores medios, no sólo son distintos de cero, sino que pueden alcanzar valores significativos. Para medios unidimensionales o para el límite de bajas frecuencias en medios multidimensionales, predominan los retrasos, de manera que las velocidades aparentes son menores, mientras que para altas frecuencias en medios multidimensionales predominan los adelantos.

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a Juan Antonio Madrid por sus comentarios y a Miguel Rodríguez por su acertada y constructiva crítica..

## REFERENCIA

- Chernov, L. (1960) *Wave propagation in a random medium*. McGraw-Hill, USA.
- Müller, G., Roth, M., & Korn, M. (1992) Seismic-wave traveltimes in random media. *Geophys.J. Int.* 110, 29-41.
- Roth, M., Müller, G., & Schneider (1993) Velocity shift in random media. *Geophys.J. Int.* 115, 552-563.
- Samuelides, Y. (1998) Velocity shift using the Rytov approximation. *J. Acoust. Soc. Am.* 104, 2596-2603.
- Wielandt, E. (1987) On the validity of ray approximation for interpreting delay times. En *Seismic Tomography*, Nolet, G. (Ed), Reidel, Holanda [Citado en Müller *et al.*, 1992].

Manuscrito recibido: 11 de octubre de 2006

Manuscrito aceptado: 5 de julio de 2007

## GEOMETRÍA DE LA CUENTA WAGNER, GOLFO DE CALIFORNIA, A PARTIR DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN

César Aguilar Campos, Mario González Escobar y J. Arturo Martín-Barajas

CICESE-Ciencias de la Tierra Km 107 Carr. Tijuana-Ensenada, C.P. 22860

Apdo. Postal 2732, Ensenada, B.C. México.

### RESUMEN

Datos sísmicos de reflexión 2D multicanal, fueron procesados e interpretados con la finalidad de estudiar la geometría de la cuenca Wagner, localizada en el norte del Golfo de California. Los datos propiedad de Petróleos Mexicanos se colectaron entre 1979 – 1980. Se interpretaron las fallas Consag, Wagner y Cerro Prieto. La falla Consag (nombre informal), la cual es reportada por primera vez, limita la cuenca Wagner al oeste, mientras que al este y al nor-noreste está limitada por las fallas Wagner y Cerro Prieto, respectivamente. La falla Wagner intersecta con la falla Cerro Prieto en un ángulo de  $130^\circ$ , por lo que el depocentro dobla al NW adyacente a la zona de falla de Cerro Prieto, mientras que el segmento más al norte de la falla Consag, se flexiona  $25^\circ$  al NE e intersecta la zona de falla de Cerro Prieto en un ángulo de  $110^\circ$ . Asociada a esta estructura se observa la mayor subsidencia de la cuenca, que es de hasta  $\sim 300$  m y presenta un salto de falla de  $\sim 400$  m en el extremo norte. Considerando que tanto la fallas Consag como la falla Wagner intersectan oblicuamente a la falla Cerro Prieto, es posible que aquellas, que son principalmente normales, tengan componente lateral, que es lo que genera un movimiento vertical oblicuo, en el cual domina el movimiento vertical sobre el horizontal. Si estas fallas fueran perpendiculares a Cerro Prieto la extensión sería completa, como es el caso de la cuenca Delfín, ubicada al SW del área de estudio, en donde las fallas normales son perpendiculares a la falla transforme Ballenas. El área y perímetro de la cuenca es de  $\sim 1330$  km<sup>2</sup> y 158 km., respectivamente.

Palabras clave: cuenca Wagner, Golfo de California, sísmica de reflexión 2D

### INTRODUCCIÓN

La cuenca Wagner se ubica en un segmento de límite de placas tectónicas, localizado en la parte más al norte del Golfo de California (Fig. 1). Dicha cuenca se considera un incipiente centro de dispersión (Persaud et al., 2003); se ha desarrollado entre dos fallas mayores, la falla Cerro Prieto, que es transforme lateral derecha con componente normal y limita al norte-noreste a la cuenca y la falla Wagner, que es la frontera este-sureste de dicha cuenca. Al sur, la cuenca Wagner se conecta con la cuenca Consag; la frontera entre ambas no está bien definida (Persaud et al., 2003), mientras que al oeste se ignoran por completo sus características geométricas. A diferencia de la boca del golfo, donde la formación de corteza oceánica inició alrededor de los 3.5 Ma (Persaud, 2003), el norte

del golfo, donde se localiza la cuenca Wagner, este tipo de corteza no se ha identificado ya que no presenta anomalías magnéticas simétricas; además, contiene zonas anchas de deformación difusa semejantes a las que se presentan en la región de los valles de Mexicali e Imperial. El conocimiento actual acerca de la estructura geológica de la cuenca proviene de estudios de sismología de terremotos, de sísmica de reflexión y de mapas magnéticos y gravimétricos (Phillips, 1964; Lomnitz et al., 1970; Nelly y Bischoff, 1973; Pérez-Cruz, 1982; Persaud et al., 2003; Aragón-Arreola, 2006; Martín-Barajas et al., 2006; García-Abdeslem, 2006; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007, entre otros), sin embargo, la alta razón de sedimentación y la poca y baja magnitud de la actividad sísmica

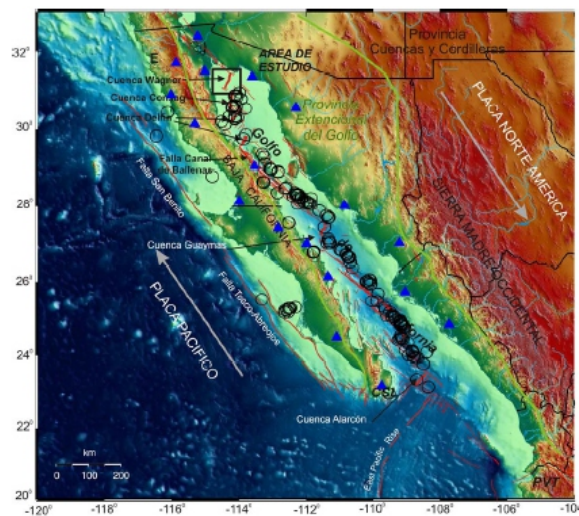
(Castro et al., 2007), impiden ubicar estructuras geológicas en gran parte de esta región. De 1978 a 1980, como parte del Prospecto San Felipe-Tiburón (Pérez-Cruz, 1982), Petróleos Mexicanos (PEMEX) colectó datos de sísmica de reflexión en la región de la Tiburón (Pérez-Cruz, 1982), Petróleos Mexicanos (PEMEX) colectó datos de sísmica de reflexión en la región de la cuenca. Por medio del procesado e interpretación de estos datos, se configura su geometría, haciendo énfasis en su sector oeste, hasta ahora desconocido.

### MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICA REGIONAL

El Golfo de California en general es un sistema de rift oceánico extensional oblicuo; sin embargo, en la región norte se observa una transición de un ambiente tectónico oceánico a uno continental en el límite entre las placas del Pacífico y de Norteamérica (Nagy y Stock, 2000). El Golfo de California varía morfológica y estructuralmente de norte a sur; en él se localizan cuencas extensionales conectadas por fallas transformes de rumbo lateral derecho (Figura 1).

Las cuencas son más someras en el norte, mientras que las del centro y sur son más profundas y se les considera centros de dispersión nacientes (Curry et al., 1982; Lonsdale, 1989; Persaud et al., 2003). Estas cuencas son producidas por un sistema extensional oblicuo en el cual la deformación se acomoda en fallas transformes en el sur y en fallas oblicuas en el norte (Fenby y Gastil, 1991; Nagy y Stock, 2000).

Al sur del golfo y en su parte central, la frontera entre la placa Pacífico-Norteamérica muestra zonas de deformación bien delimitadas o definidas, por ejemplo: la cuenca de Guaymas y la zona de falla del Canal de Ballenas (Figura 1). En el norte, en contraste, existen zonas anchas de deformación difusa semejantes a las que hay en el continente, como en la región de la Provincia del Salton. Debido a la alta razón de sedimentación y la falta de evidencia de formación del piso oceánico, se considera que la corteza del norte del Golfo puede ser similar a una corteza transicional (Persaud, 2003).



**Figura 1.** Mapa estructural del Golfo de California. Se muestra el área de estudio con rectángulo negro y el sistema de fallas con líneas rojas en la Provincia Extensional del Golfo y sureste de la Provincia de Cuencas y Cordilleras (Basin and Range) y áreas adyacentes. Las principales estructuras en el Norte del golfo son las cuencas Wagner y Consag; FCP = Falla Cerro Prieto. E = Ensenada, CSL = Cabo San Lucas, PVT = Puerto Vallarta. Los triángulos azules son las estaciones de la red sísmica NARS ubicadas alrededor del golfo y los círculos en negro son los eventos registrados por dicha red del 2004 al 2006 (Castro et al., 2007).

La cuenca Wagner es la depresión más septentrional del Golfo de California, tiene forma alargada y se orienta N-S (Figura 1). Se conecta al sur con la cuenca Consag y su geometría no esta bien definida (Persaud et al., 2003). Fenby y Gastil (1991), infirieron, con exploración sísmica y anomalías magnéticas, que es un centro de dispersión incipiente limitado al norte por la falla Cerro Prieto y al sur por un sistema de fallas de rumbo a lo largo de la cuenca Consag (Figura 1). En el borde occidental de la cuenca aflora un intrusivo dacítico conocido como Roca Consag, que probablemente es producto de actividad volcánica menor a 1 Ma (A. Martín-Barajas y M. López, comunicación personal, 2008). Sin embargo, en la cuenca no hay indicios de actividad volcánica reciente, pero sí la presencia de baja actividad sísmica y alto flujo de calor (Frez y González, 1991; Castro et al., 2007). En este sector occidental, exceptuando Roca Consag, se desconoce la o las estructuras que delimiten su frontera.

Hasta la década de los setenta, la interpretación más detallada de la tectónica del norte del Golfo

se logró a partir de datos obtenidos de sismica de reflexión monocanal colectados en 1970 (Henyey y Bischoff, 1973). A partir de estos datos se elaboró un mapa de fallas, marcado por limitaciones debidas a la gran cantidad de múltiples reflexiones generadas por las estructuras y las reverberaciones derivadas de la señal de la fuente. Anteriormente, Phillips (1964), había estimado que la parte superficial de esta región está formada por tres capas en los primeros 25 km, mientras que Couch et al. (1991), estimaron un espesor de corteza de aproximadamente 13 km para la zona norte.

Pérez-Cruz (1982), definió en lo general las cuencas Wagner y Consag, localizadas en el norte del Golfo de California. Hurtado-Artunduaga (2002), analizando líneas sísmicas en la región, reportó que el margen este-sureste de la cuenca Wagner está delimitado por una caída de basamento de cerca de 3 km; probablemente esta estructura es la prolongación hacia el sur de la falla Cerro Prieto. El mismo autor menciona que se desconoce la conexión entre la cuenca Wagner y la zona de falla de Cerro Prieto y propuso que ésta se efectúa mediante una zona

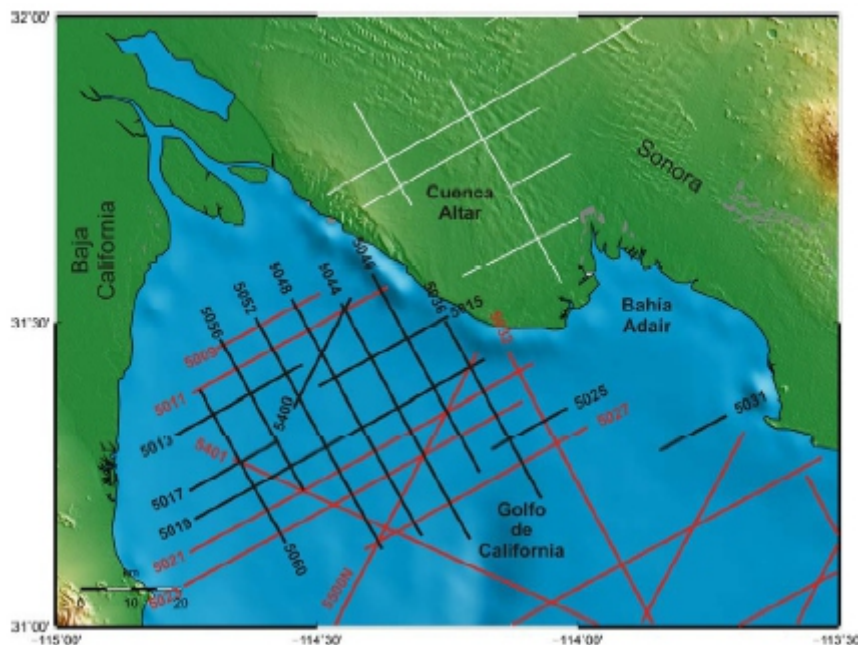
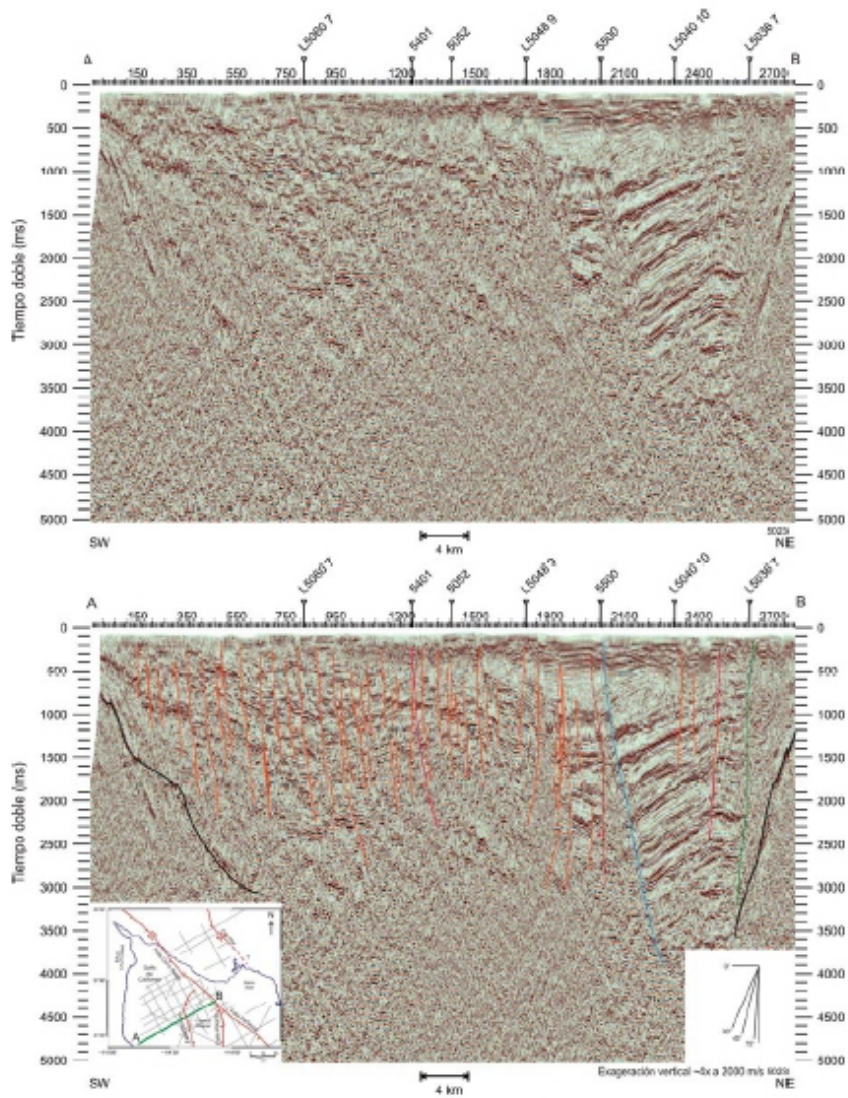


Figura 2. Las líneas negras, representan la sismica procesada en el presente trabajo; en rojo, las líneas interpretadas por González-Escobar et al. (2006). Todas las líneas fueron utilizadas para la interpretación. En Sonora, las líneas localizadas en la Cuenca Altar, fueron tomadas de Pérez-Tinajero (2007). Los números a los lados de las líneas indican su identificación.



de transferencia, constituida por un arreglo de fallas distribuidas en escalón que transfiere el movimiento entre la cuenca Wagner y la zona de falla Cerro Prieto al norte. Persaud et al. (2003), a partir de la interpretación de datos sísmicos de alta resolución colectados en 1999, con una resolución de metros hasta 2 km por debajo del fondo marino, reportaron estructuras en el sector sur de la cuenca Wagner y en la cuenca Consag (figuras 1 y 2), así como algunas características de los epicentros en dichas cuencas; sin embargo,

los datos no permiten ver las estructuras profundas (mayores a 2 km). En el trabajo de Persaud et al. (2003) no se cubrió la parte norte de la Cuenca Wagner. Aragón-Arreola (2006) realizó una primera interpretación a partir de datos sísmicos propiedad de PEMEX. En esa interpretación se puede observar que no se cubrió la parte más al norte del Golfo, debido posiblemente por la poca cobertura de las líneas sísmicas de que se disponía.



**Figura 3.** Sección 5023 localizada en el extremo sur del área de estudio. Se observa claramente la cuenca Wagner limitada por fallas (sector derecho de la figura). Es característico que dentro de la cuenca se tiene un paquete de reflectores de 5 km de largo por 5 km de espesor sin que muestren deformación importante; la mayor subsidencia de la cuenca se localiza al oeste. Las líneas rojas son fallas. El perfil A-B de la figura en el recuadro inferior izquierdo representa la sección sísmica y el recuadro de la derecha indica el ángulo de buzamiento.



## DATOS Y ANÁLISIS

Los datos sísmicos de reflexión para el presente trabajo fueron obtenidos por PEMEX entre los años 1978 y 1980 como parte del Prospecto San Felipe–Tiburón (Pérez-Cruz, 1982). La información sísmica es 2D, marina multicanal que se obtuvo usando un arreglo de 48 canales espaciados cada 50 m, utilizando como fuente sísmica cañones de aire (161 pulgadas cúbicas). El tiempo de grabación fue de 6.144 s y el intervalo de muestreo fue de 2 ms, con una redundancia de 4800 %. El procesamiento de los datos fue generalmente bajo los estándares de la industria petrolera. La secuencia de proceso de los datos de reflexión fue la siguiente: edición de trazas, filtrado, divergencia esférica, deconvolución, análisis de velocidad basado en coeficientes de semblanza, corrección por normal moveout (NMO), apilamiento, corrección por divergencia esférica, filtrado variante en tiempo y migración (Yilmaz, 1987). Para la interpretación de los datos se usaron las técnicas descritas por Badley (1985). Tanto para el proceso como para la interpretación se utilizaron los programas ProMax<sup>tm</sup> y LandMark<sup>tm</sup> de Halliburton<sup>tm</sup>. Se procesaron e interpretaron

14 líneas sísmicas, las cuales suman ~490 km lineales (Aguilar, 2007). Estas tienen una orientación S60°W y N30°W, excepto una de ellas que es oblicua a las anteriores (Figura 2).

## INTERPRETACIÓN

Uno de los rasgos estructurales más notorios de la información procesada es la abundancia de fallas. Muchas de éstas se presentan en zonas no trabajadas con anterioridad y, por lo mismo, no se conoce cuál es su papel tectónico en el marco regional; por ejemplo, la región al oeste del área de estudio (Figura 2). Estas estructuras se presentan con cierto arreglo subparalelo de fallas normales con ángulos de echado mayor a 40° y con un promedio de una falla por kilómetro. Las fallas son normales y casi todas buzan hacia el NE. En la Figura 3 se observa que la densidad de las fallas es mayor que la mostrada en las figuras 4 y 5. En general, muchas de éstas no se manifiestan superficialmente en el piso oceánico por la cobertura sedimentaria. Se observa que, salvo las estructuras más prominentes, la mayoría de las fallas no perturban los estratos más profundos, y a

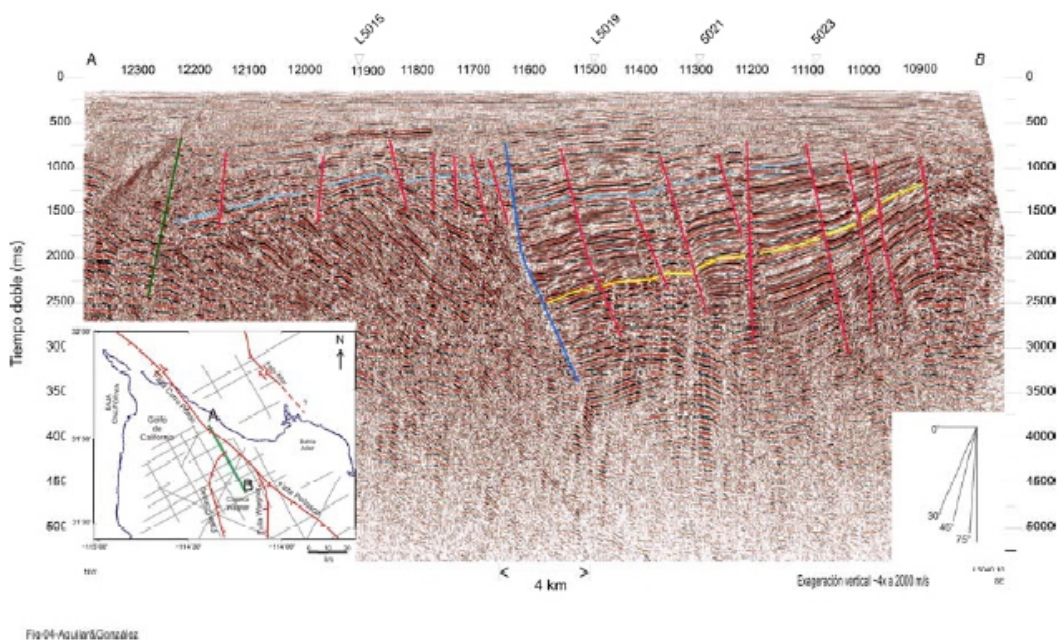
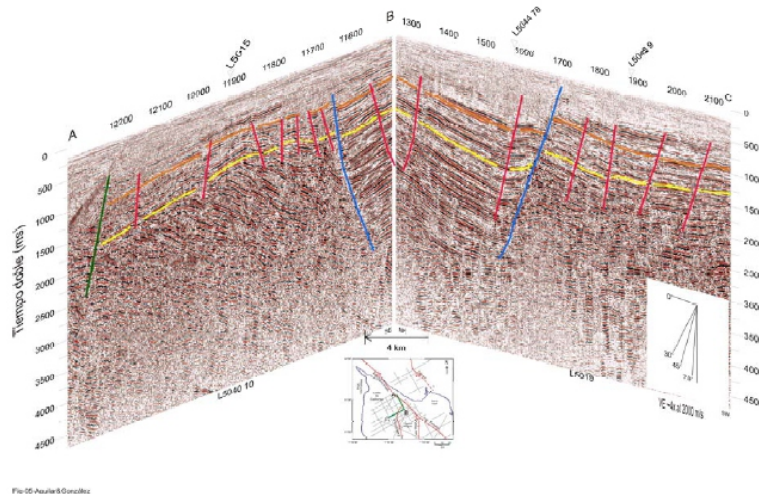


Figura 4. Perfil que corta la cuenca Wagner de norte a sur (5040). Se observa claramente el límite norte de la cuenca que corresponde a la falla Consag. El color azul marino representa un horizonte sísmico de referencia.



**Figura 5. Secciones sísmicas en zig-zag.** Los números en el eje horizontal se refiere a los puntos de tiro. En la figura inferior se muestra la localización y el trazo de las secciones. El recuadro de la parte inferior derecha indica el ángulo de buzamiento. La línea azul marino corresponde a la misma estructura en los dos sectores, en este caso, la falla Consag. Los horizontes en cada una de los sectores es el mismo para ambas y están representadas por los colores amarillo y naranja.

tiempos mayores de ~4 s de tiempo doble (TD) de viaje las imágenes sísmicas no tienen una buena definición.

La Figura 3 muestra una sección sísmica que se localiza en la parte sur del área en donde se observa la frontera norte de la cuenca Wagner y las fallas sintéticas asociadas. En dicha sección se muestra un reflector, tanto al este como al oeste, pero no se observa en la parte central; éste es interpretado como el basamento acústico (líneas negras en la Figura 3). Llama la atención el gran espesor de sedimentos en la Cuenca Wagner, los cuales están ligeramente basculados al oeste, hacia la falla Consag (línea azul, Figura 3) y su deformación es casi nula. Un comportamiento similar se presenta en varias secciones sísmicas, por lo que se puede decir que la subsidencia es mayor en el sector de la falla Consag y no en la falla Wagner, como también puntualizó Aragón-Arreola (2006).

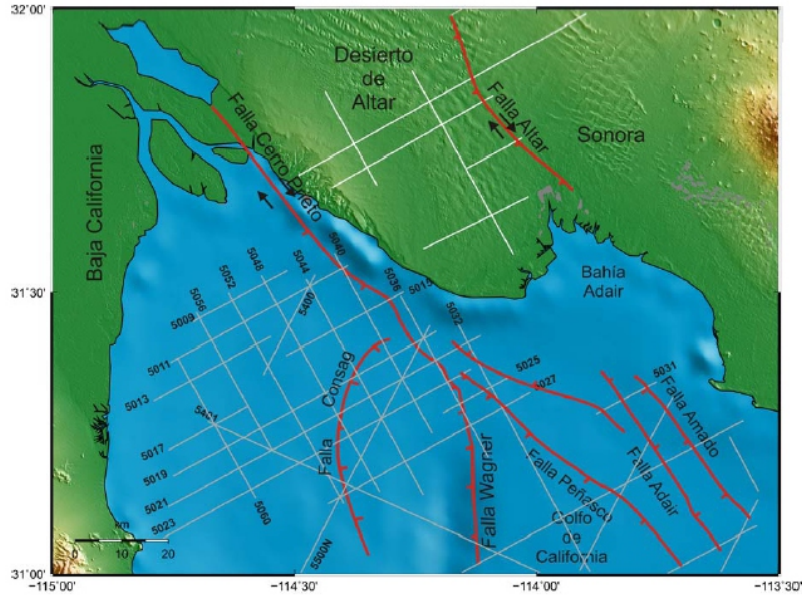
La sección mostrada en la Figura 4, en su parte norte, presenta una zona donde los reflectores son difíciles de seguir lateralmente, así como múltiples difracciones, las cuales son características de una zona de falla de rumbo (Yilmaiz, 1987). Esta sección presenta la estructura que delimita en su parte noroeste la cuenca Wagner, aquí nombrada informalmente

falla Consag, por ser descrita por primera vez. La Figura 5, muestra una sección sísmica con arreglo ortogonal en zig-zag, en la que podemos observar claramente la falla Consag que delimita la frontera al oeste de la cuenca Wagner. También se muestran dos horizontes sísmicos (colores amarillo y naranja) con la finalidad de enmarcar más claramente la presencia de dicha falla.

## INTERPRETACIÓN

La Figura 6 muestra los resultados de la interpretación. Se indican las fallas Cerro Prieto y Wagner que, aunque conocidas, no habían sido definidas con información de sísmica de reflexión; además, la falla Consag que aquí se reporta por vez primera.

Una de las principales estructuras es la falla Cerro Prieto que se extiende desde la región del valle de Mexicali en dirección al golfo con un rumbo N43°W y echado de ~85° al oeste (Figura 6). El límite SE se conecta con las fallas Wagner y Peñasco (González-Escobar et al., 2006). En el área de estudio se extiende a lo largo de ~32 km, es lateral derecha (Pacheco-Romero et al., 2006), lo cual es evidenciado por los reflectores



**Figura 6.** Principales estructuras interpretadas en este trabajo: fallas Cerro Prieto, Wagner y Consag. Las demás estructuras localizadas en el golfo, son tomadas de González-Escobar et al. (2006). Líneas rectas en el desierto de Altar, así como la falla Altar, corresponden a secciones sísmicas interpretadas por Pérez-Tinajero (2007). En las líneas sísmicas, los números corresponden a su etiqueta en la toma de datos.

difusos que no presentan continuidad lateral ubicados en el margen oriental de la falla. La falla Wagner, por sus dimensiones, también es una de las principales estructuras en la región y marca el límite oriental de la Cuenca Wagner con una longitud de ~38 km (Figura 6). La traza de la falla tiene una orientación N10°W y un echado de 55° hacia el oeste con desplazamiento de reflectores de hasta 1 km. La terminación de los estratos hacia la falla es en forma discordante hacia arriba (onlap), es decir, los reflectores tienden a comprimirse hacia arriba a lo largo del plano de la falla. La falla Wagner intersecta con la falla Cerro Prieto en un ángulo de 130° (Figura 6), por lo que el depocentro de la cuenca Wagner dobla al NW adyacente a la zona de falla de Cerro Prieto. La falla Consag se localiza al oeste de la falla Wagner (Figura 6) y limita en dicho sector a la cuenca Wagner; hacia el sur del área de estudio es casi paralela a la falla Wagner con un rumbo variable NE-SW, una longitud aproximada de 90 km y un echado promedio de 50° hacia el este y es de tipo normal. El segmento más al norte de la falla, se curva 25° hacia el NE e intersecta la zona de falla

de Cerro Prieto en un ángulo de 110° (Figura 6). Asociada a esta estructura se observa la mayor subsidencia de la cuenca que puede ser hasta de 300 m y presenta un salto de falla de ~400 m. (Figura 3).

## GEOMETRÍA DE LA CUENCA WAGNER

La correlación de las estructuras permitió definir la zona norte de la cuenca Wagner. La Figura 7 muestra las dimensiones de la cuenca. El área configurada tiene un área de 1330 km<sup>2</sup> y un perímetro de 158 km. La longitud de la frontera de la cuenca a lo largo de la falla Cerro Prieto es de 18 km, en Consag de 68 km y, en Wagner, es de 42 km. Este sector norte es una cuenca asimétrica delimitada en la parte oriental por las fallas Wagner y Cerro Prieto. La cuenca tiene una deflexión hacia al noroeste adyacente a la zona de falla Cerro Prieto (Figura 7). El límite oeste de la cuenca o depocentro es contiguo a la falla Consag, la cual se extiende por más de 90 km en una dirección N-S con un echado de ~50° al E. El largo de la cuenca es de unos 60 km y el ancho de cerca de 27 km.



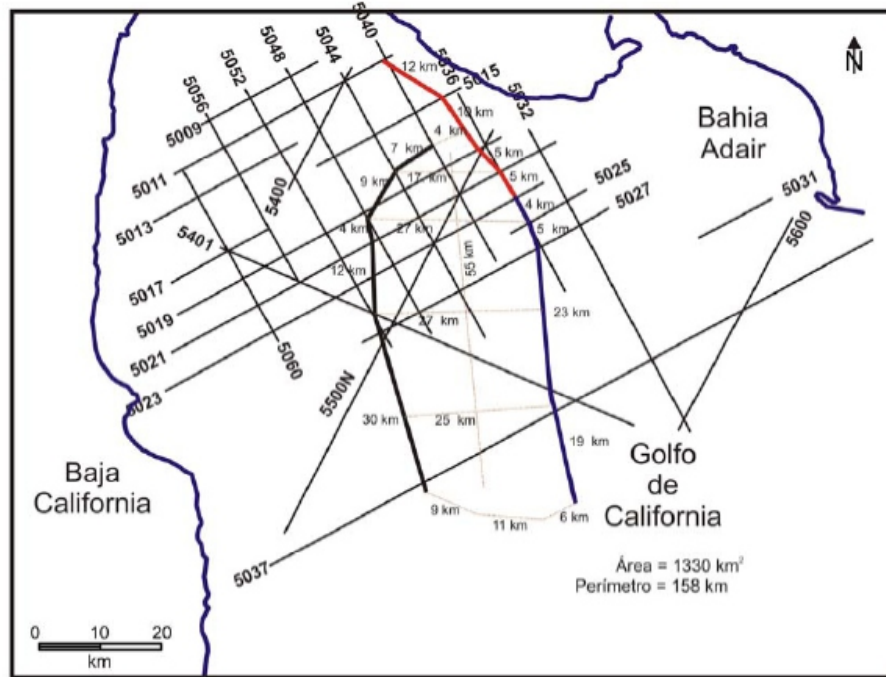


Figura 7. Configuración del depocentro de la cuenca Wagner. Profundidad en tiempo doble (ms). Las líneas gruesas corresponden a las estructuras que limitan la cuenca. Las longitudes en km indican distancias entre estructuras.

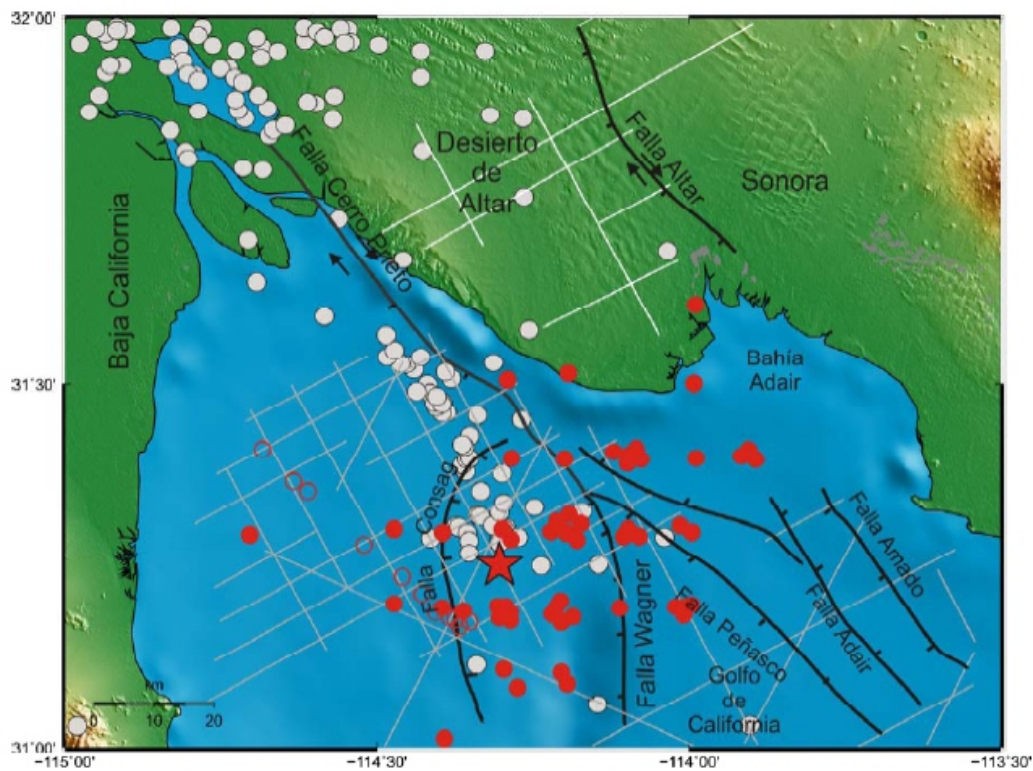


Figura 8. Actividad sísmica tomada de la base de datos de RESNOM para el periodo 1979-2007 (círculos blancos). Los círculos oscuros rellenos muestran enjambres sísmicos reportados por Thatcher y Brune (1971); círculos oscuros vacíos en la cuenca también corresponden al enjambre, pero localizados utilizando diferencias de tiempo entre las ondas P y S. La estrella roja corresponde a uno de los eventos mayores que fue registrado por una red sísmica local. El rango de magnitudes está entre 5 y 3.5.

## SISMICIDAD

Con el propósito de correlacionar las estructuras interpretadas con la escasa actividad sísmica reportada, se recurrió a los catálogos de datos sísmicos para la región de estudio provenientes de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) para el periodo de 1976-2007; también, se consultaron los catálogos de Southern California Earthquake Data Center (SCEDC), USGS-Earthquake Center, Preliminar Determination Epicenter (PDE), entre otros. Ya que no se observaron diferencias significativas en la localización de los epicentros de las distintas fuentes, se decidió utilizar la base de RESNOM, por ser la más confiable por tener estaciones más cercanas a los eventos sísmicos.

La Figura 8 muestra los epicentros que se localizan principalmente al oeste de la falla Cerro Prieto y en la región de la falla Consag. El total de eventos extraídos de la base de datos son 144 y oscilan entre 1.7 y 4.4 $M_w$  encontrándose algunos eventos sin magnitud. La mayoría de las profundidades de los eventos reportados en el catálogo es superior a los 30 km, por lo que se decidió no mostrar un perfil de éstas. Lo anterior es en virtud de que se considera que la corteza en esta zona no debería ser tan profunda y, además, algunos de los hipocentros tienen errores significativos en sus localizaciones. La actividad sísmica es relativamente baja en comparación con la que ocurre en el Valle de Mexicali, al norte de la zona de estudio. En la misma Figura 8, en círculos rojos, se incluyen los epicentros reportados por Thatcher y Brune (1971) para un enjambre sísmico ocurrido en la zona en Marzo de 1969. Estos investigadores reportaron alrededor de 70 eventos con magnitudes entre 4 y 5.5, ocurridos en dos semanas. No reportan hipocentros, pero argumentan que están por debajo de los 40 km. EL mecanismo focal reportado para uno de los eventos fuertes (estrella en la Figura 8) es de falla normal, con azimut 50° y echado de 60° W.

Tomando en cuenta el lugar del epicentro, esta información se asocia a la falla Consag.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Un rasgo característico en todas las imágenes sísmicas es la gran cantidad de fallas. En su mayoría son de tipo normal; hay en promedio, una falla por km. Se caracterizan por un marcado paralelismo entre ellas, en su mayoría con ángulos de echado mayores a los 45° y generalmente afectan sólo las secuencias sedimentarias y no alcanzan el piso oceánico. Muchas de estas fallas no pudieron correlacionarse en las secciones sísmicas vecinas.

La falla Cerro Prieto es una de las principales estructuras del norte del Golfo de California y Provincia del Salton Sea donde se manifiesta el movimiento entre las placas Norteamérica y Pacífico. Esta falla es de tipo dextral; se extiende a lo largo de 80 km desde el centro de dispersión Cerro Prieto hasta la Cuenca Wagner. El trazo de la falla es visible únicamente en su sector sur y su continuidad hacia el norte ha sido determinada por mecanismos focales y métodos geofísicos (Frez y González, 1991; Pacheco et al., 2006). De acuerdo con nuestros resultados, esta falla se encuentra en las secciones sísmicas en una zona difusa de reflexiones (zona de trituración-sector B del perfil; Figura 3). Esta falla se conecta en su parte sur con las fallas Wagner y Consag las cuales forman parte de los límites este y oeste de la cuenca. Finalmente, la falla Consag se localiza al oeste de la falla Wagner (Figura 6) y limita en dicho sector a la cuenca Wagner. Hacia el sur del área de estudio esta estructura es casi paralela a la falla Wagner.

Considerando que tanto las fallas Consag y Wagner intersectan oblicuamente a la falla Cerro Prieto es posible que ambas fallas (que son principalmente normales) tengan componente lateral lo que genera un movimiento vertical oblicuo, predominantemente vertical.



Si estas fallas fueran perpendiculares a Cerro Prieto la extensión produciría una cuenca similar a las de Delfín Superior y Delfín Inferior ubicadas al SW del área de estudio en donde las fallas normales de estas cuencas son perpendiculares a la falla transforme Ballenas (Persaud et al., 2003). Si comparamos nuestros resultados con un modelo ideal de una cuenca de tipo pull apart (Busby e Ingersoll, 1995), se puede observar que la diferencia radica en que el modelo ideal cuenta con dos fallas de rumbo que controlan e inducen movimientos de deformación a la cuenca, mientras que en nuestros resultados solo se tiene una falla maestra, que es la falla Cerro Prieto.

Con todo lo anterior, podemos resumir que la falla Consag, junto con las fallas Wagner y Cerro Prieto, conforman la geometría de la cuenca Wagner, en los sectores norte, este y oeste, mientras que al sur se conecta con la cuenca Consag. El área y perímetro de la cuenca son de . aproximadamente 1330 km y 158 km, respectivamente. La cuenca se considera de tipo "pull apart" inmadura. Posiblemente las fallas Wagner y Consag adquieran en el futuro, una posición perpendicular a la falla Cerro Prieto permitiendo una extensión completa.

## AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT por el apoyo de beca para realizar estudios de maestría (C. Aguilar-Campos), a Petróleos Mexicanos por permitir el uso de la información y a Halliburton Drilling Evaluation & Digital Solutions de México, por el uso del software vía el Gran Universitario que se tiene con CICESE. Agradecemos también a los árbitros Felipe de Jesús Escalona Alcázar y un anónimo, por sus atinadas observaciones y su generosa revisión.

## REFERENCIAS

- Aguilar, C., 2007. Sísmica de Reflexión en el Alto Golfo de California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., 82pp.
- Aragón-Arreola, M., 2006. Structural evolution of basins in the Northern and Central Gulf of California. Implications for rift kinematics and strain accommodation. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., 146pp.
- Aragón-Arreola, M. and Martín-Barajas, A., 2007. Westward migration of extension in the northern Gulf of California, México. *Geology*, 35-6, 571-574.
- Badley, M. E., 1985. *Practical Seismic Interpretation*, Int. Human Resour. Dev. Corp., Boston, Mass.
- Busby, C.J. and R. V. Ingersoll, 1995. *Tectonics of Sedimentary Basins*. Blackwell Science, 579pp.
- Castro, R. R., Méndez, O., Pérez-Vertti, A., Mendoza, A., and Inzunza, L., 2007. Seismicity in the Gulf of California Region Recorded by the NARS-Baja Array: Preliminary Results. American Geophysical Union (AGU) Joint Assembly, Acapulco, México, 22-25th May 2007.
- Curray, J. R., Moore, D. G., Kelts, K., and Einsele, G., 1982. Tectonics and geological history of the passive continental margin at the tip of Baja California. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 64:1089-1116.
- Fenby, S. and Sand Gastil, R. G., 1991. Geologic-Tectonic Map of the Gulf of California and Surrounding Areas. En: *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*, AAPG Bulletin. Memoir 47:79-83.
- Frez, J., and González, J. J., 1991. Crustal Structure and Seismotectonics of Northern Baja. En: Dauphin, J. P. y Simoneit, B. R. T. (eds.). *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists. 47:261-283.
- García-Abdeslem, J., 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California. Volumen 2 – Métodos Potenciales, Reporte técnico No. 80303843, PEMEX. 48pp.
- González-Escobar, M., Martín-Barajas, A., Abdeslem-García, J., y Aragón-Arreola, M., 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California, Volumen 2 - Procesamiento e interpretación de datos de sísmica de reflexión. Reporte técnico No. 80303843, PEMEX. 23p.

- Heney, T. L. and Bischoff, J. L., 1973. Tectonic elements of the Northern part of the Gulf of California. Geological Society of America Bulletin. 84:315-330.
- Hurtado-Artunduaga, A. D., 2002. Modelo estructural de la cuenca de Wagner en el Golfo de California basado en sísmica de reflexión multicanal (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. 109pp.
- Lomnitz, C., Allen, C., Brune, J., and Thatcher, W., 1970. Sísmica y tectónica de la región norte del Golfo de California, México, resultados preliminares. Geof. Int., vol. 10, 37-48.
- Lonsdale, P., 1989. Geology and tectonic history of the Gulf of California. En: Winterer, D. and Hussong, M. (eds.). The Eastern Pacific Ocean and Hawaii. The Geology of North America Geological Society of America, Boulder, CO. 499-521.
- Martín-Barajas, A., Abdeslem-García, J., Helenes Escamilla, J., González-Escobar M., Aragón-Arreola, M., y M. Pacheco-Romero, M., 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California. Volumen 1 – Integración de resultados. Reporte técnico No. 80303843, PEMEX. 63pp.
- Nagy, E. A. and Stock, J. M., 2000. Structural controls on the continent-ocean transition in the northern Gulf of California. Journal of Geophysical Research. 105(B7): 16,251-16,269.
- Pacheco-Romero, M. F., Martín-Barajas, A., Elders, W.A., Espinosa-Cardena, J. M., Helenes, J., and Segura, A., 2006. Stratigraphy and structure of the Altar basin of NW Sonora: Implications for the history of the Colorado River delta and the Salton trough. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 23(1):1-22.
- Pérez-Cruz, G., 1982. Algunos resultados de la Investigación geológico-geofísica en la porción noroccidental del Golfo de California. Boletín de la Sociedad Mexicana de Geólogos Petroleros. 6:71-77.
- Pérez-Tinajero, C., 2007. Sísmica de Reflexión en el Desierto de Altar, Sonora México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. 101pp.
- Persaud, P., 2003. Images of Early Continental Breakup in and around the Gulf of California and the Role of Basal Shear in Producing Wide Plate Boundaries. Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 144pp.
- Persaud, P., Stock, J. M., Steckler, M., Martín-Barajas, A., Diebold, J. B., Gonzalez-Fernandez, A., and Mountain, G., 2003. Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag and Delfin Basins, Northern Gulf of California, Mexico. Journal of Geophysical Research. 108(7).
- Phillips, R. P., 1964. Seismic refraction studies in Gulf of California, in Marine Geology of the Gulf of California, T.H. Van Andel and G.G. Shor, Eds, Amer. Assoc. Petrol. Geologists, Tulsa, Oklahoma.
- Thatcher, W. and Brune, J. N., 1971. Seismic Study of an Oceanic Ridge Earthquake Swarm in the Gulf of California. Geophys. J. R. Astr. Soc. 473-489.
- Yilmaz, O., 1987. Seismic Data Processing. Investigations in Geophysics, Society of Exploration Geophysicists. Second Edition. Tulsa, Okla, 526pp.

Recepción del manuscrito: 7 de noviembre de 2007

Aceptación del manuscrito: 1 de septiembre de 2008

# ASPECTOS DE LA SISMOTECTÓNICA DE NICARAGUA Y SU ALREDEDOR

José Frez y Ena Gámez

División de Ciencias de la Tierra, CICESE

jofrez@cicese.mx

## RESUMEN

Utilizamos información electrónica de acceso público (líneas de costa, así como catálogos de hipocentros y de mecanismos focales) para caracterizar aspectos de la sismotectónica de Nicaragua y sus alrededores. Nos concentramos en tres temas. En cuanto a valores del parámetro  $b$  de la relación de Gutenberg-Richter, no encontramos diferencias significativas en su distribución espacial. El sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001 ( $M_w = 7.7$ ) disparó una importante actividad hacia el SE, en una región aladaña a la zona de réplicas frente a la costa de Nicaragua, la cual no se ha reportado hasta ahora. El estudio de la distribución de los ejes P y T de los mecanismos focales de la región proporciona detalles del régimen extensivo de la placa en subducción. En particular, comparamos los valores de la inclinación (medida con respecto a la vertical) de esta placa que resultan de a) la proyección vertical de los hipocentros y perpendicular a la costa ( $\sim 13^\circ$ ) y b) de las de los ejes T a 200 km de profundidad ( $\sim 20^\circ$ ). La inclinación de los ejes T muestra una disminución sistemática, gradual y con poca variabilidad desde un valor de  $50^\circ$  a una profundidad de  $\sim 70$  km.

## INTRODUCCIÓN

La sismicidad de Nicaragua y, más en general, del sistema de arco-trinchera de América Central ha recibido gran atención, por ejemplo, en Molnar y Sykes (1969), Dewey y Algermissen (1974), Burbach et al. (1984), White (1991), Dewey y Suárez (1991), Protti et al. (1994), Protti et al. (1995), Ambraseys y Adams (2001), La Femina et al. (2002), entre otros. La instalación de redes de estaciones sismológicas en Nicaragua y países vecinos ha completado la información de catálogos globales de sismicidad y mecanismos focales (Protti et al., 1994; Protti et al., 1995, entre otros); al mismo tiempo, ha proveído de datos para estudios de la estructura sísmica correspondiente (por ejemplo, Husen et al., 2003, Matumoto et al., 1977). Hay que agregar el estudio de sismos destructivos (Algermissen et al., 1974; Brown et al., 1974; Quintero y Kissling, 2001; artículos incluidos en Rose et al., 2004), de sismicidad histórica, así como los que tratan la formación y comparación de catálogos sísmicos (White y Harlow, 1993; Ambraseys y Adams,

2001; Fernández et al., 2004; Montero y Peraldo, 2004; Randall et al., 2004). Aunque el centro de nuestra atención es la región de Nicaragua, tomamos como región de estudio al cuadrante entre los meridianos  $84^\circ W$  y  $90^\circ W$  y latitudes  $10^\circ N$  y  $15^\circ N$  (Figura 1). En este artículo, exploramos el uso de catálogos electrónicos de acceso público para determinar algunas características sismotectónicas. En particular y para la región de estudio, estimamos valores del parámetro  $b$  de la relación de Gutenberg-Richter a tres profundidades, determinamos la dependencia en profundidad de los ejes P y T de mecanismos focales sísmicos y reevaluamos la región en que la transferencia de los esfuerzos producidos por el sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001 ( $M_w = 7.7$ ) dispara sismicidad. Otro propósito de este artículo es pedagógico: comprobamos que hay información en sitios electrónicos para que los estudiantes de postgrado realicen proyectos de clases, dados los conocimientos computacionales adecuados (MATLAB, en nuestro caso).

## MARCO TECTÓNICO

Un esquema del marco tectónico de América Central se presenta en la Figura 1. Nicaragua forma parte de la placa del Caribe; en la costa del Pacífico, la placa Cocos subduce hasta los ~200 km, que es la profundidad máxima de los sismos. La mayor parte de la actividad sísmica en la región ocurre bajo el océano, a profundidades someras y es resultado de la interacción entre las dos placas; esta actividad incluye los sismos de mayor magnitud ( $M \geq 7.0$ ). En el continente, se distinguen dos franjas tectónicas, paralelas y cercanas a la costa, que poseen fallas de rumbo y con sismicidad superficial; una es la Cadena Volcánica y, la otra, la Depresión de Nicaragua. Los sismos asociados a la tectónica continental tienen magnitudes menores que 7.0 pero producen gran destrucción debido a que están más cerca de ciudades o poblados. Debido a que los sismos que ocurren en las cercanías de la trinchera y en la placa de subducción tienen mecanismos focales inversos y normales y los que ocurren próximos al eje central de la cadena volcánica son de rumbo, se ha sugerido que el movimiento relativo entre ambas placas es ligeramente oblicuo (Harlow y White, 1985) con una componente horizontal en dirección paralela

al arco de 8 mm/año (Guzmán-Speziale, 2001). La complicación de que las trazas de las fallas con dirección NE-SW son más comunes que las que tienen dirección paralela a la trinchera ha sido tratada por Burbach et al. (1984) y La Femina et al. (2002). Los primeros proponen una segmentación de la subducción de América Central con independencia en la subducción de cada segmento; los segundos, una acomodamiento del movimiento por una rotación de bloques con un eje vertical.

## DATOS

Los datos fueron obtenidos en distintos sitios electrónicos de dominio público. Las líneas de costas y otros límites provienen de National Geophysical Data Center (NOAA/NGDC): <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/shorelines.html>. El catálogo mundial de hipocentros (1973-2007) es el del National Earthquake Information Center-(NEIC/USGS): <http://neic.usgs.gov/neis/epic/> mientras que el catálogo regional de hipocentros (1995-2006) proviene del sitio de la Red Sísmica de Nicaragua: [www.ineter.gob.ni/geofisica/sis/red/nic\\_survey.htm](http://www.ineter.gob.ni/geofisica/sis/red/nic_survey.htm); hemos utilizado este catálogo entre los

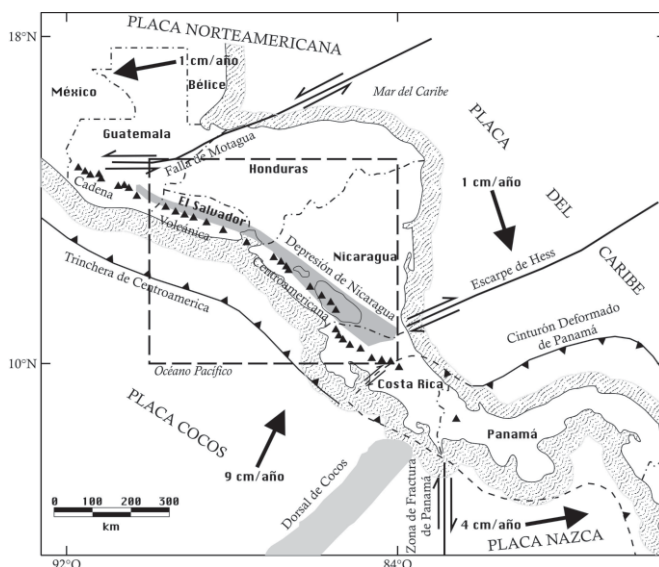


Figura 1. Marco tectónico de América Central, basado en De Mets (2001), Harlow y White (1985) y Guzmán-Speziale (2001). El área de estudio es la enmarcada.

años 1995 y 2006. Finalmente, los parámetros de los mecanismos focales (1976-2007) pertenecen al catálogo CMT (Harvard): [www.globalcmt.org/CMTsearch.html](http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html).

### SISMICIDAD; CATÁLOGOS DE HIPOCENTROS.

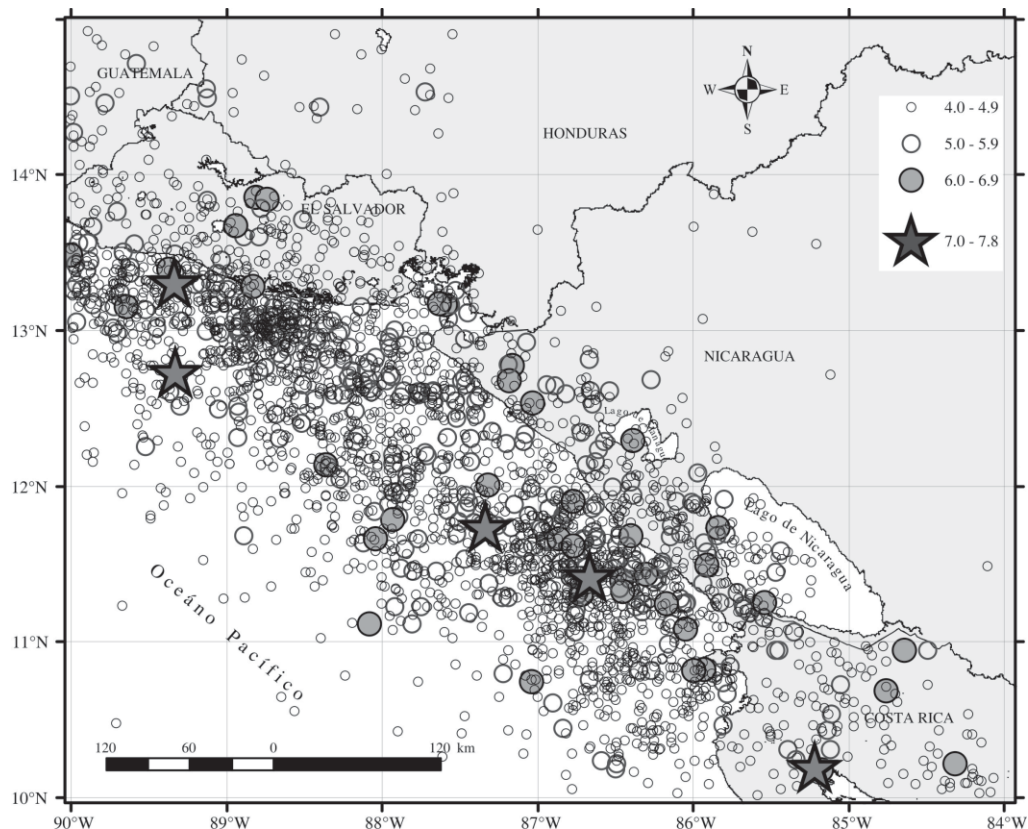
#### Catálogo Mundial NGSC

La Figura 2 muestra los epicentros en la región de estudio según el catálogo NGSC entre 1973 y 2006. Los epicentros con  $M > 7.0$  están localizados en la región en que interactúan ambas placas, o sea, en el mar y en las cercanías de la trinchera mientras que la sismicidad  $6.0 \geq M \geq 5.0$  se distribuye en forma relativamente homogénea.

#### Catálogo Regional

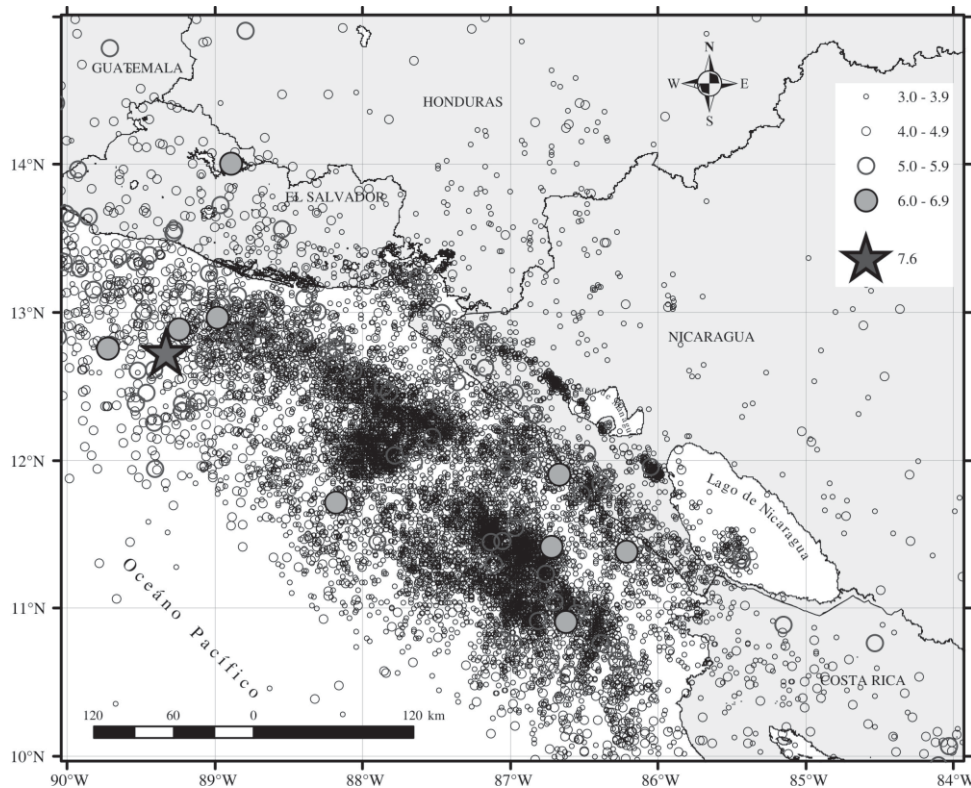
Un mapa de sismicidad más detallado que el anterior (Figura 3) contiene las determinaciones (1995-2006) que provienen de la red regional de estaciones sismológicas que mantiene el INETER (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales). El sismo de mayor magnitud, de El Salvador del 13 de enero de 2001,  $M_w = 7.7$ , es objeto de atención especial en una sección posterior. La alineación de epicentros de sismos asociados a la cadena volcánica se destaca con claridad.

La costa tiene un cambio de orientación en la longitud  $87.6^\circ W$ , es decir, en el golfo de Fonseca, el cual marca el límite entre El Salvador, Honduras y Nicaragua. El ángulo con respecto a la dirección W-E es  $-15^\circ$  y  $-43^\circ$ , respectivamente para los segmentos NW (costa de El Salvador, mayormente) y SE (costa de Nicaragua, mayormente).



**Figura 2. Mapa epicentral (1973-2006); catálogo NGSC. Epicentro del sismo de El Salvador, 13/01/2001,  $M_w = 7.7$ , Lat = 12.74, Lon = 89.33, según INETER.**





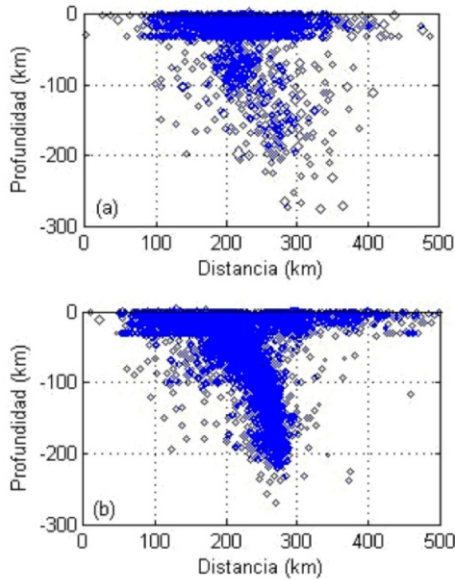
**Figura 3. Mapa epicentral (1995-2006); catálogo INETER. Epicentro del sismo de El Salvador del 13/01/2001, MW = 7.7, Lat = 12.74, Lon = 89.33, según INETER.**

Este cambio de dirección aparece más suavizado en la traza de la trinchera (Figura 1). La Figura 4 muestra dos perfiles verticales con hipocentros, ambos son perpendiculares a los segmentos de costa NW y SE; los orígenes de ambos perfiles están, respectivamente, en los puntos {11.0N; 89.5W} y {10.5N; 88.5W}. El perfil SE tiene un cambio en la inclinación de la placa de subducción a 80-100 km de profundidad; el ángulo pasa de 36° a 13°, ambos, con un error de  $\pm 5^\circ$ , aproximadamente. (En este trabajo, las inclinaciones se miden con respecto al eje vertical). La densidad de sismos es mucho menor en el perfil NW, lo que no es sorprendente porque el catálogo proviene de la red de estaciones ubicadas en Nicaragua. Así, la placa en subducción en el perfil NW no se resuelve con claridad aunque hay sugerencia de una conducta distinta sobre y debajo los 100 km.

El lector puede encontrar perfiles semejantes en Burbach et al. (1984) y Protti et al. (1995), los que coinciden esencialmente con los aquí presentados.

#### **LA SECUENCIA SÍSMICA INICIADA POR EL SISMO DEL 13 DE ENERO DE 2001**

Según el catálogo CMT un sismo de magnitud  $M_w = 7.7$  ( $m_b = 6.4, M_s = 7.8$ ) ocurrió el 13 de enero de 2001, a las 17:33 GMT y frente a la costa del El Salvador (12.97°N; 89.13°W). (Por simplicidad, este sismo puede ser referido de aquí en adelante sólo por la fecha de ocurrencia). El mecanismo focal, según el mismo catálogo es normal; con los ejes T aproximadamente horizontales y perpendiculares a la dirección de la costa; esta característica se mantiene para las réplicas (Martínez-Días et al., 2004).



**Figura 4. Corte vertical con hipocentros tomados del catálogo regional INETER; el corte es aproximadamente perpendicular a la línea de costa en los segmentos a) NE, mayormente de El Salvador; b) SE, mayormente de Nicaragua. El acimut de la costa que corresponde a cada perfil es N15°E y N43°E, respectivamente.**

Este sismo inicia una secuencia interesante que ha sido estudiada por Parsons (2002), Benito et al. (2004) y Martínez-Días et al. (2004); nuestro propósito es completar la descripción de la secuencia. Ellos ponen énfasis en que, por transferencia de esfuerzos, este sismo dispara el sismo superficial que ocurre el 13 de febrero ( $M_w = 6.6$ ), o sea un mes después; este sismo, con sus réplicas, se asocia con la cadena volcánica. En lo que sigue, utilizamos el catálogo de INETER. La Figura 5 muestra un acotamiento poligonal que rodea las réplicas, así como la actividad adicional que se correlaciona con la ocurrencia de este sismo durante el año 2001. Dicha figura está hecha con el criterio de circunscribir los epicentros que ocurrieron después del sismo principal de tal modo que estén rodeados por una actividad sísmica de densidad claramente menor. La región circunscrita puede subdividirse en tres: la primera, de mayor densidad, contiene las réplicas propiamente tales que se sitúan entre las longitudes 88.5W y 89.5W; la segunda corresponde a la ya mencionada alineación,

paralela a la costa, de epicentros y asociada a la cadena volcánica (Parsons, 2002; Benito et al., 2004, y Martínez-Días et al., 2004); la tercera contiene una actividad no reportada hasta ahora, que es menos densa en sismos y localizada, en el océano, frente a la costa de Nicaragua. La Figura 6 muestra la actividad ( $M \geq 3.5$ , a partir del 01/01/1995) en el tiempo, tanto en magnitud como en longitud e incluye las réplicas y la actividad disparada, pero no incluye la que ocurre en el continente. Por último, la Figura 7 es similar a la Figura 6, pero para  $M \geq 5.0$ . Las conclusiones son inmediatas.

La tercera subregión estuvo relativamente quieta para sismos  $M \geq 5.0$  (por lo menos, desde 1995) hasta la ocurrencia del terremoto de enero de 2001. Enseguida, toda la tercera sub-región entra en una actividad caracterizada por enjambres de sismos principales con  $M \geq 5.0$  que continúa hasta el final del catálogo (diciembre del 2006), seis años después de la ocurrencia del sismo principal.

La interpretación más directa es que la región poligonal delimita aproximadamente un bloque tectónico cuyo estado de esfuerzos se acomoda a la energía liberada por el sismo  $M_w = 7.7$ . Los 6 años en que la sismicidad ha ocurrido hasta fines de 2006 tiende hacia la estimación de 7-11 años que entrega Parsons (2002) para sismos disparados por uno principal con  $M \geq 7.0$ . No tenemos antecedentes de otro sismo destructivo que haya disparados sismicidad en dos subregiones claramente separadas en el espacio.

#### CONSTANTE $b$ DE LA RELACIÓN DE GUTENBERG-RICHTER

El cálculo de la constante  $b$  de la relación Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1954) es estándar para encontrar diferencias en el régimen tectónico, tanto en el espacio como en el tiempo; en este último caso, por ejemplo, para tratar de encontrar diferencias antes y después

de la ocurrencia de un sismo destructivo. En nuestro trabajo, reducimos la ley a la distribución (de probabilidad) exponencial negativa, utilizamos el método de máxima verosimilitud (Utsu, 1965) para la estimación del parámetro  $b$  y, en la visualización de resultados, usamos histogramas de densidad y escala lineal porque ilustran mejor la calidad de los datos. El método de máxima verosimilitud ajusta la serie de tiempo y no el histograma, como lo hace el método de cuadrados mínimos. El error (nivel de significación del 95%, en este trabajo) sigue una distribución  $\chi^2$  de donde resulta natural utilizar la distribución de Fisher para probar la significación de la diferencia entre dos valores de  $b$  (Aki, 1965; Utsu, 1965; Utsu, 1966) aunque es elemental comparar la diferencia entre dos valores de  $b$  tomando en cuenta los errores de estimación. Sin embargo, es importante acotar que el mencionado error de la estimación toma en

cuenta sólo el carácter aleatorio de la distribución (la exponencial negativa); esto quiere decir que factores como errores en el valor de las magnitudes, en el carácter posiblemente incompleto del catálogo y por el carácter inapropiado de la relación de Gutenberg-Richter, no están tomados en cuenta. Por ello, el análisis debe hacerse con cautela.

Las magnitudes son  $m_b$  para el catálogo global (NGSC). El catálogo regional (INETER) combina el uso de la magnitud local y la de coda; como es usual, ambas estimaciones coinciden generalmente dentro de un par de décimas de unidad de magnitud. Dada la geometría de la red, hay una posible dependencia de la estimación de la magnitud con respecto al acimut del hipocentro, particularmente para sismos que ocurren en el océano y en la placa en subducción; este efecto no ha sido estudiado.

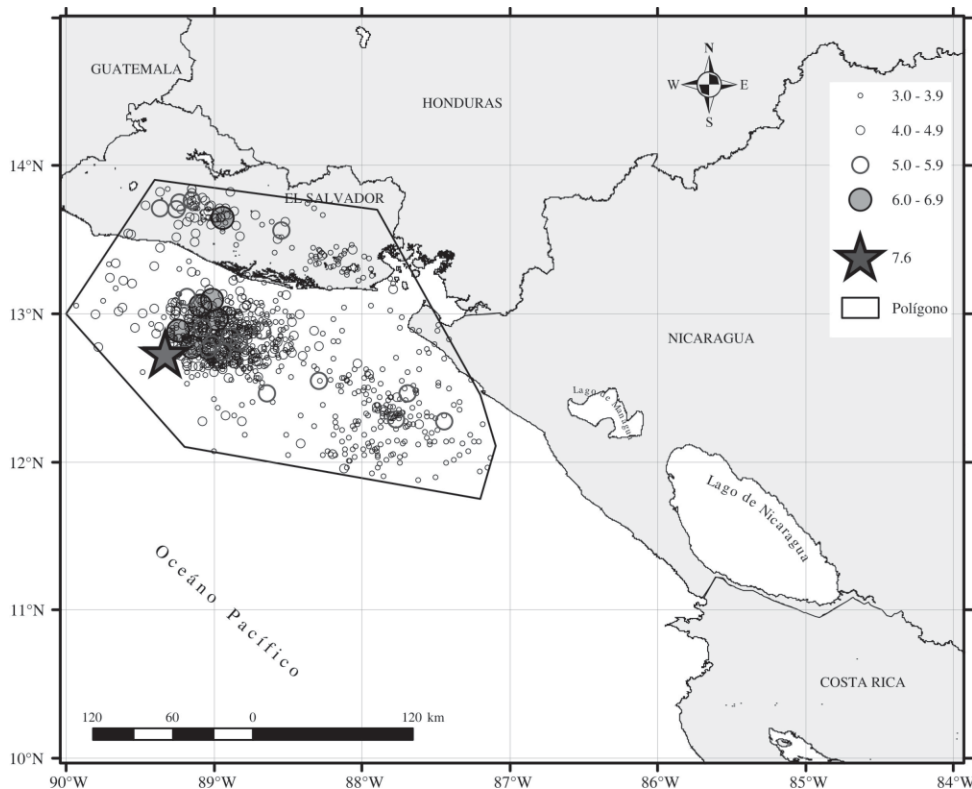


Figura 5. Zona de réplicas y de sismicidad disparada durante 2001 por el sismo de El Salvador del 13/01/2001, Mw = 7.7. Note las tres secuencias que se separan fácilmente: a) una alta densidad de réplicas que rodea al epicentro del sismo principal (estrella); b) actividad en el continente compuesta por un sismo principal y réplicas y que se correlaciona con la cadena volcánica, y c) actividad que se ubica frente a la costa NW de Nicaragua.

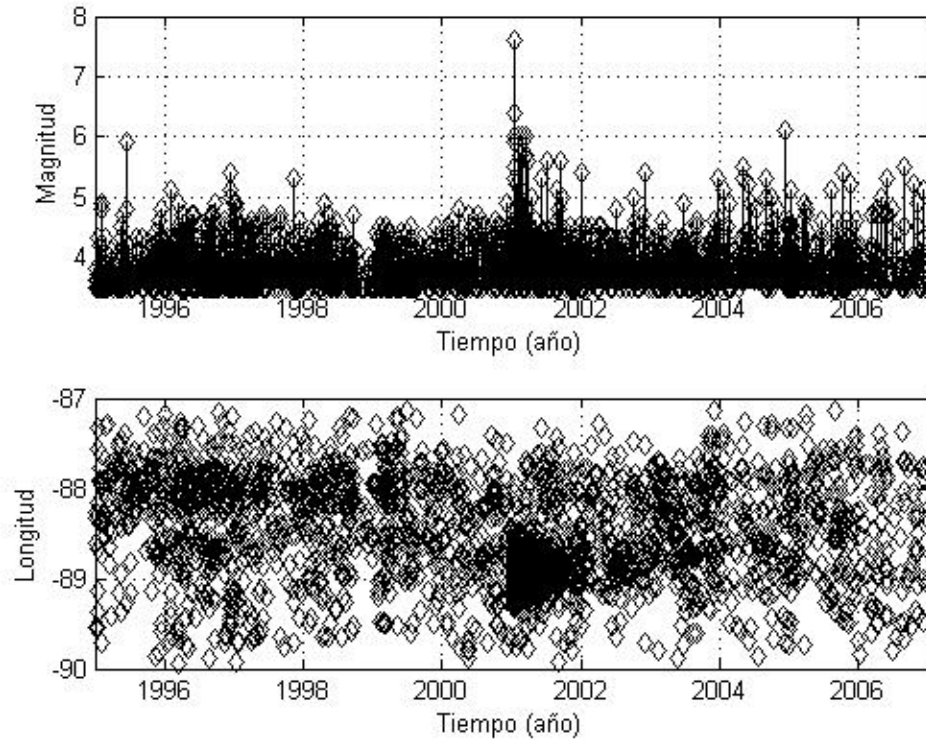


Figura 6. Sismicidad en tiempo (1995-2001) para  $M \geq 3.5$  que ocurre en la placa oceánica y que aparece en la Figura 5. Catálogo: INETER. Figura superior: Magnitud vs. Tiempo. Figura inferior: Posición en Longitud vs. Tiempo. Nótese el aumento de sismicidad a partir de la ocurrencia del sismo de El Salvador del 13/01/2001,  $M_w = 7.7$ , y la delimitación de las réplicas al menos por 1 año, entre las longitudes  $89.5^\circ W$  y  $88.5^\circ W$ .

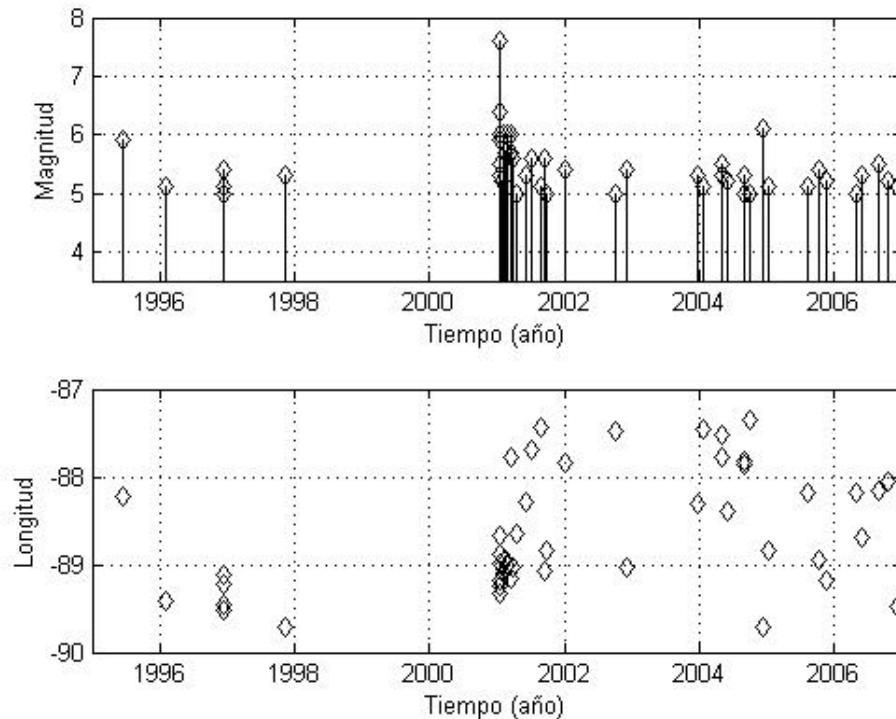


Figura 7. Igual que en figura 6, pero para  $M \geq 5.0$ . Nótese la ausencia de sismicidad por los tres años previos a la ocurrencia del sismo de El Salvador del 13/01/2001,  $M_w = 7.7$ , y el aumento posterior de actividad sísmica.



Utilizamos las dos regiones (NE y SW) que definimos en la sección anterior; con ello, delimitamos para el catálogo INETER un subcatálogo más confiable (frente a la costa de Nicaragua) de la parte que lo es menos (frente a la costa de El Salvador); junto a esto, dividimos el rango de la profundidad ( $h$ ) en tres segmentos ( $h \leq 45$  km;  $45 \text{ km} < h \leq 100$  km;  $h \geq 100$  km). Estos límites de profundidades resultan de la conducta observada en el perfil de profundidades de la Figura 4.

Las figuras 8 a la 13 muestran histogramas con los datos y las curvas de ajuste para el catálogo mundial (NGSC) y el regional (INETER) los cuales se han subdividido en las dos regiones NW (El Salvador) y SE (Nicaragua) y en los tres rangos de profundidades que describimos anteriormente. Los resultados numéricos se muestran en las tablas 1 a la 6.

Los resultados en la estimación de los valores de  $b$  pueden resumirse en que todos son compatibles con un valor entre 1.00-1.15 si tomamos en cuenta los límites de significación y el número reducido de sismos de algunos casos; esto último es común para las profundidades más grandes. El catálogo mundial sugiere un valor más alto de  $b$  para la región frente a la costa de El Salvador (1.20-1.25), que el resultado para el catálogo regional. Algo semejante ( $b$  entre 1.15 y 1.33) se observa para el catálogo regional en la región SE (frente a la costa de Nicaragua) y a profundidades entre 45 y 100 km. Es difícil evaluar la significación de este último resultado.

Muchos de los histogramas tienen oscilaciones alrededor de la línea que marca la tendencia central del ajuste. Por ejemplo, el ajuste en a) y b) de la Figura 12 es bueno desde la magnitud 3.4; sin embargo,

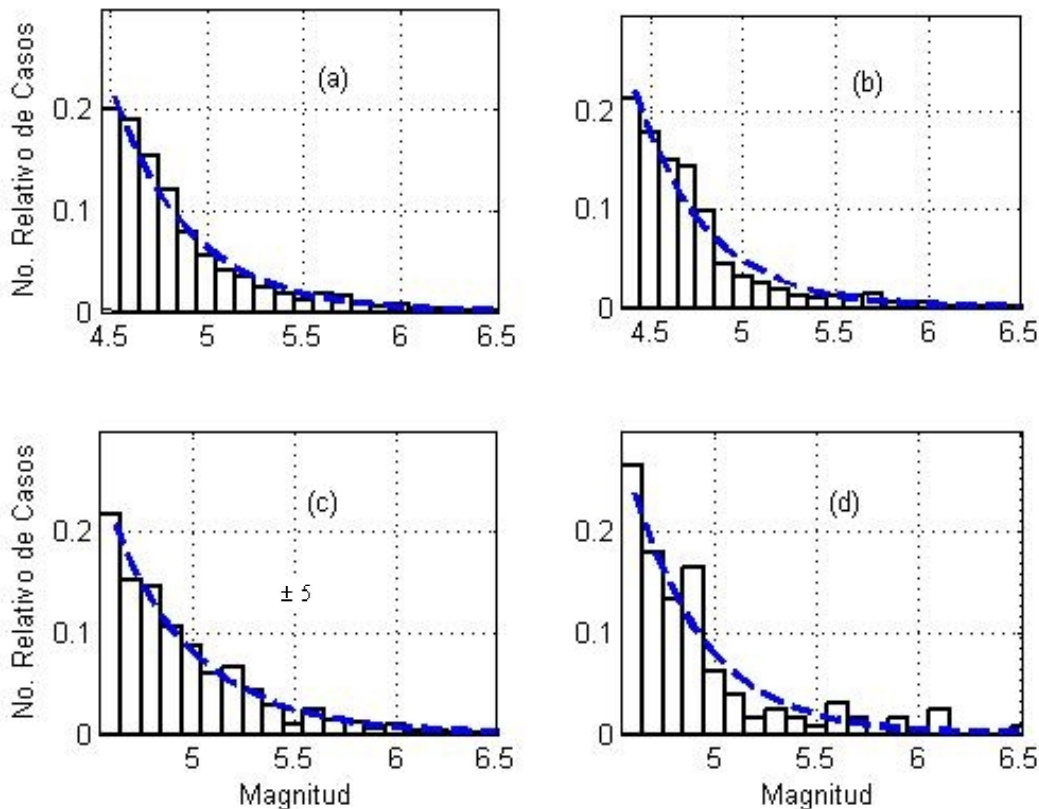


Figura 8. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: NOAA/NGDC (mundial) 1973-2006 para las dos regiones. Profundidades: a) todas; b)  $h \leq 45$  km; c)  $45 \text{ km} \leq h < 100$  km; d)  $h \geq 100$  km.

Tabla 1. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 8. Prof.: Profundidades; NC: Número de Casos;  $b$ : Valor central estimado; Rango- $b$ : Rango calculado con un nivel de confianza del 95%;  $M_{inf}$ : Magnitud de corte inferior;  $M_{sup}$ : Magnitud de corte superior.

Prof.	NC	$b$	Rango- $b$	$M_{inf}$	$M_{sup}$
Todas	1503	1.09	1.14-1.03	4.5	8.0
$h \leq 45$	929	1.14	1.22-1.07	4.4	7.0
$45 < h \leq 100$	518	1.06	1.15-0.97	4.6	8.0
$h > 100$	128	1.23	1.45-1.01	4.6	8.0

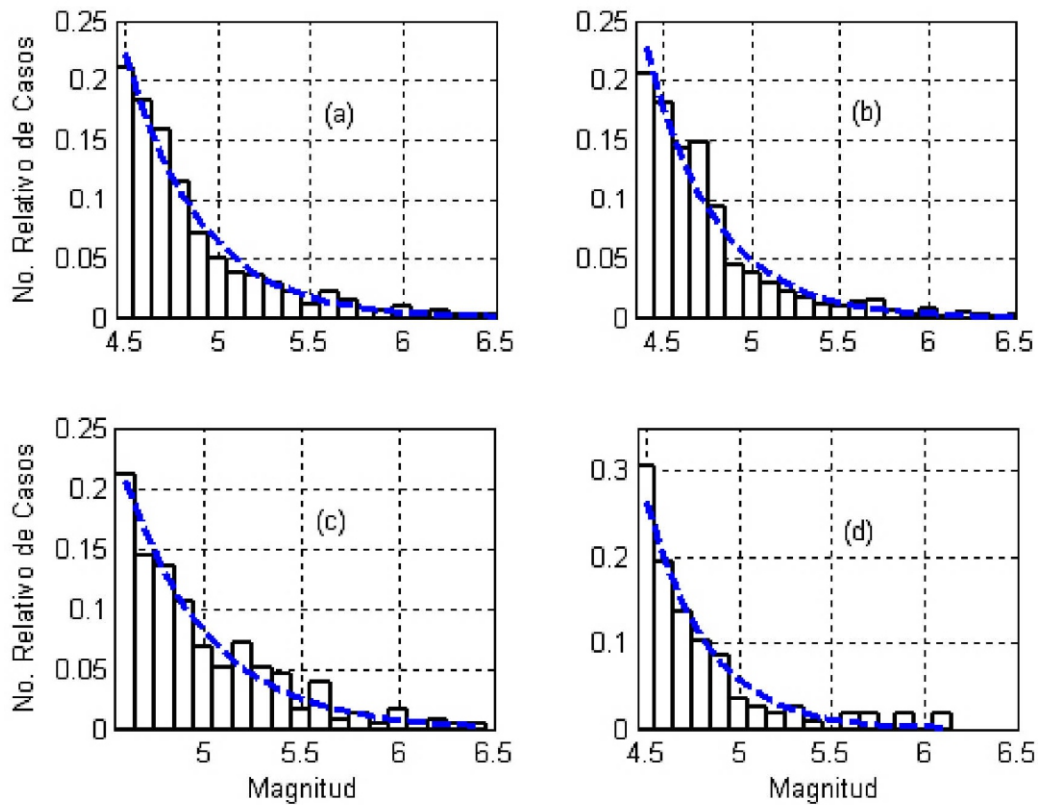


Figura 9. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: NOAA/NGDC (mundial) 1973-2006 para la región SE (frente a la costa de Nicaragua). Profundidades: a) todas; b)  $h \leq 45$  km; c)  $45 \text{ km} < h < 100$  km; d)  $h \geq 100$  km.

Tabla 2. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 9. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	$b$	Rango- $b$	$M_{inf}$	$M_{sup}$
Todas	881	1.10	1.17-1.03	4.5	6.5
$h \leq 45$	619	1.13	1.22-1.04	4.4	6.5
$45 < h \leq 100$	237	1.00	1.15-0.89	4.6	6.5
$h > 100$	118	1.35	1.63-1.13	4.5	6.5

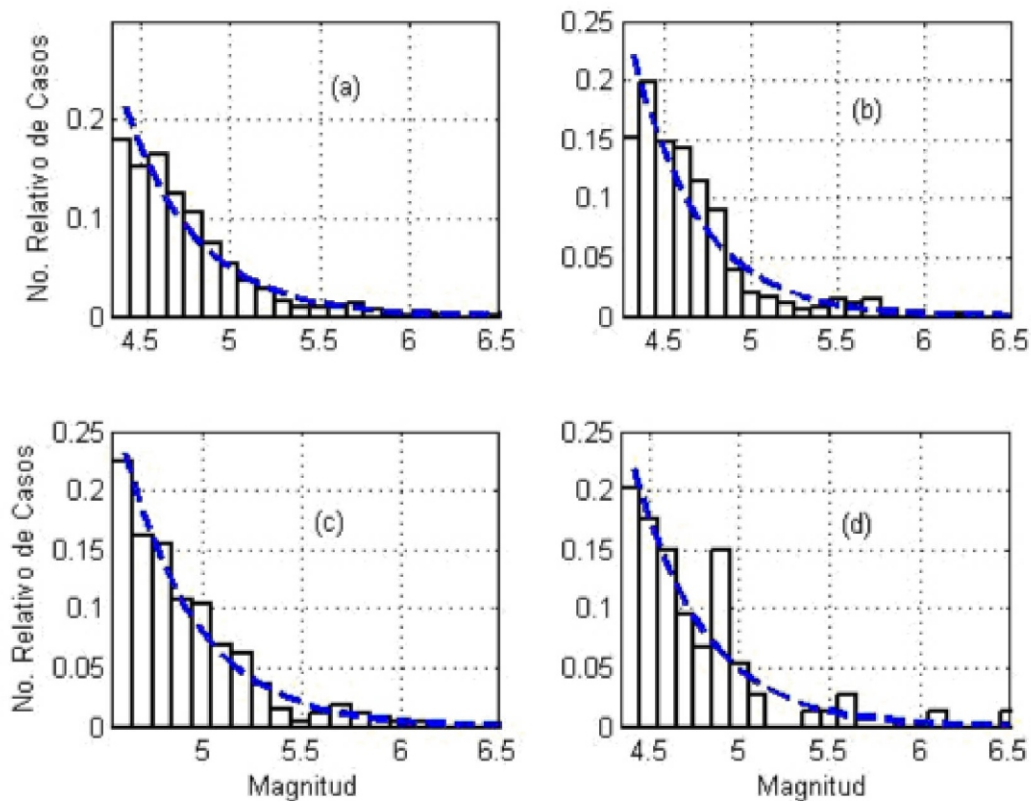


Figura 10. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: NOAA/NGDC (mundial) 1973-2006 para la región NW (frente a la costa de El Salvador). Profundidades: a) todas; b)  $h \leq 45$  km; c)  $45 \text{ km} \leq h < 100 \text{ km}$ ; d)  $h \geq 100 \text{ km}$ .

Tabla 3. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 10. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	$b$	Rango- $b$	$M_{inf}$	$M_{sup}$
Todas	743	1.08	1.17-1.01	4.4	8.0
$h \leq 45$	357	1.12	1.25-1.02	4.3	7.0
$45 < h \leq 100$	277	1.18	1.34-1.06	4.6	8.0
$h > 100$	74	1.11	1.42-0.90	4.4	8.0

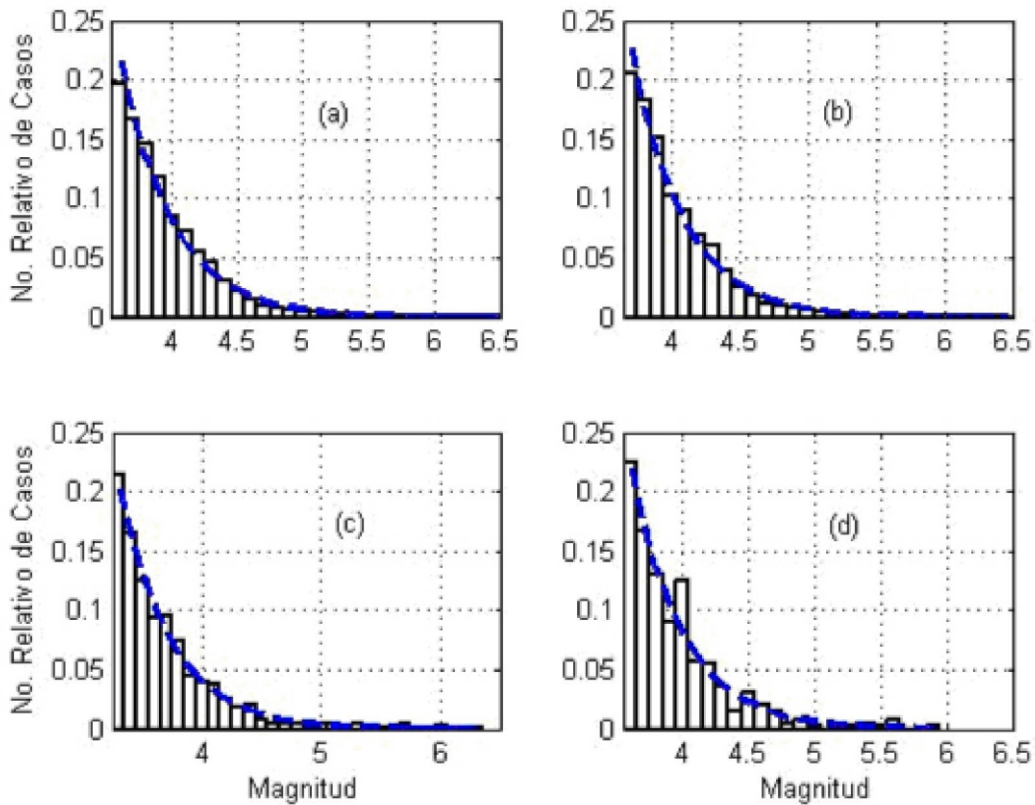


Figura 11. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para las dos regiones. Profundidades: a) todas; b)  $h \leq 45$  km; c)  $45 \text{ km} \leq h < 100$  km; d)  $h \geq 100$  km



Tabla 4. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 11. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	$b$	Rango- $b$	$M_{inf}$	$M_{sup}$
Todas	5598	1.10	1.13-1.07	3.6	8.0
$h \leq 45$	3387	1.15	1.19-1.12	3.7	8.0
$45 < h \leq 100$	777	1.02	1.10-0.96	3.3	8.0
$h > 100$	400	1.12	1.23-1.01	3.6	8.0

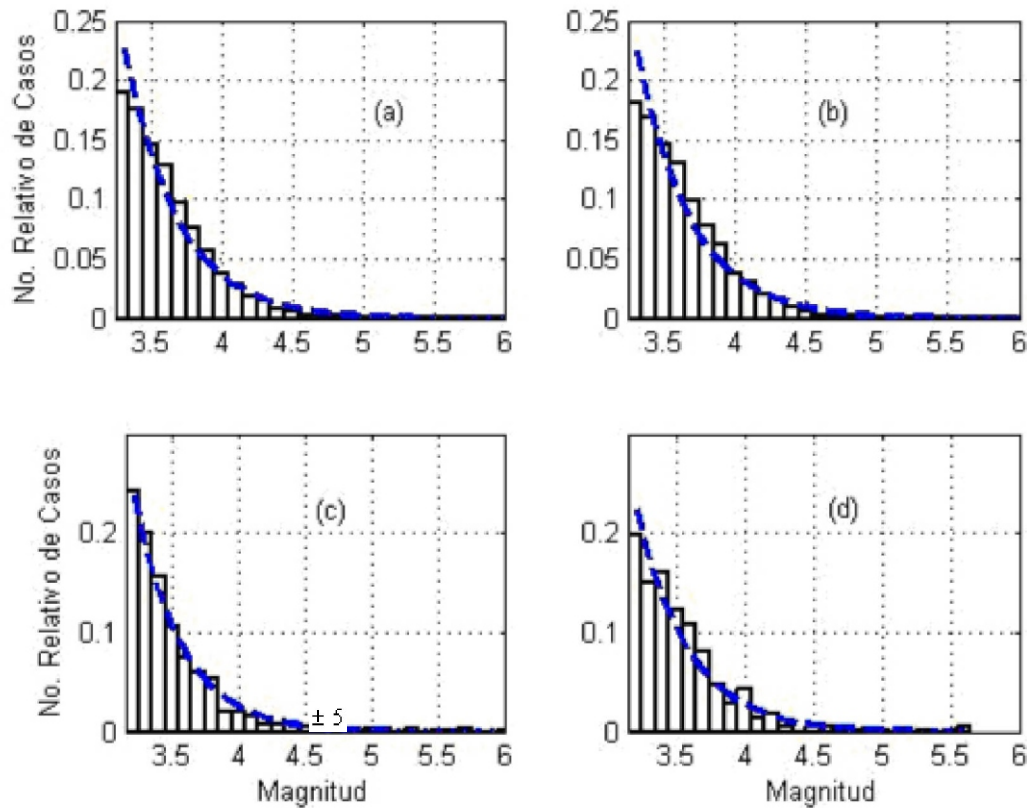


Figura 12. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para la región SE (frente a la costa de Nicaragua). Profundidades: a) todas; b)  $h \leq 45$  km; c)  $45 \leq km < h < 100$  km; d)  $h \geq 100$  km.

Tabla 3. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 10. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	$b$	Rango- $b$	$M_{inf}$	$M_{sup}$
Todas	743	1.08	1.17-1.01	4.4	8.0
$h \leq 45$	357	1.12	1.25-1.02	4.3	7.0
$45 < h \leq 100$	277	1.18	1.34-1.06	4.6	8.0
$h > 100$	74	1.11	1.42-0.90	4.4	8.0

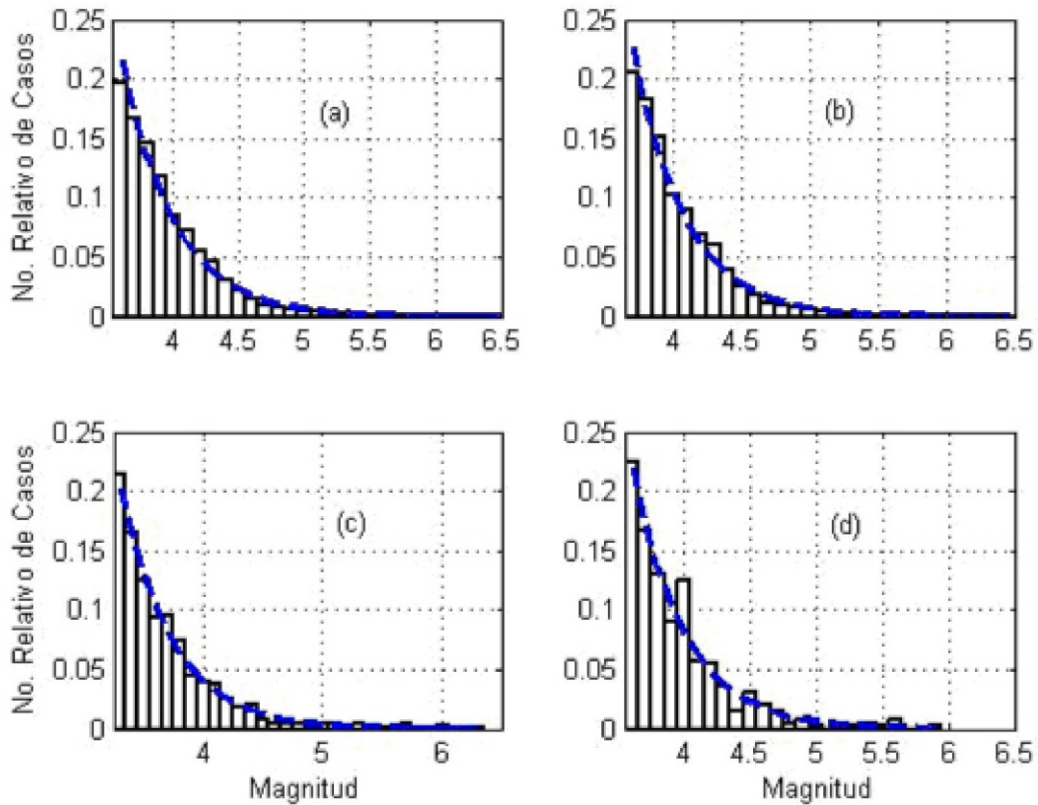


Figura 11. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para las dos regiones. Profundidades: a) todas; b)  $h \leq 45$  km; c)  $45 \text{ km} < h < 100$  km; d)  $h \geq 100$  km

Tabla 4. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 11. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	<i>b</i>	Rango- <i>b</i>	$M_{inf}$	$M_{sup}$
Todas	5598	1.10	1.13-1.07	3.6	8.0
$h \leq 45$	3387	1.15	1.19-1.12	3.7	8.0
$45 < h \leq 100$	777	1.02	1.10-0.96	3.3	8.0
$h > 100$	400	1.12	1.23-1.01	3.6	8.0

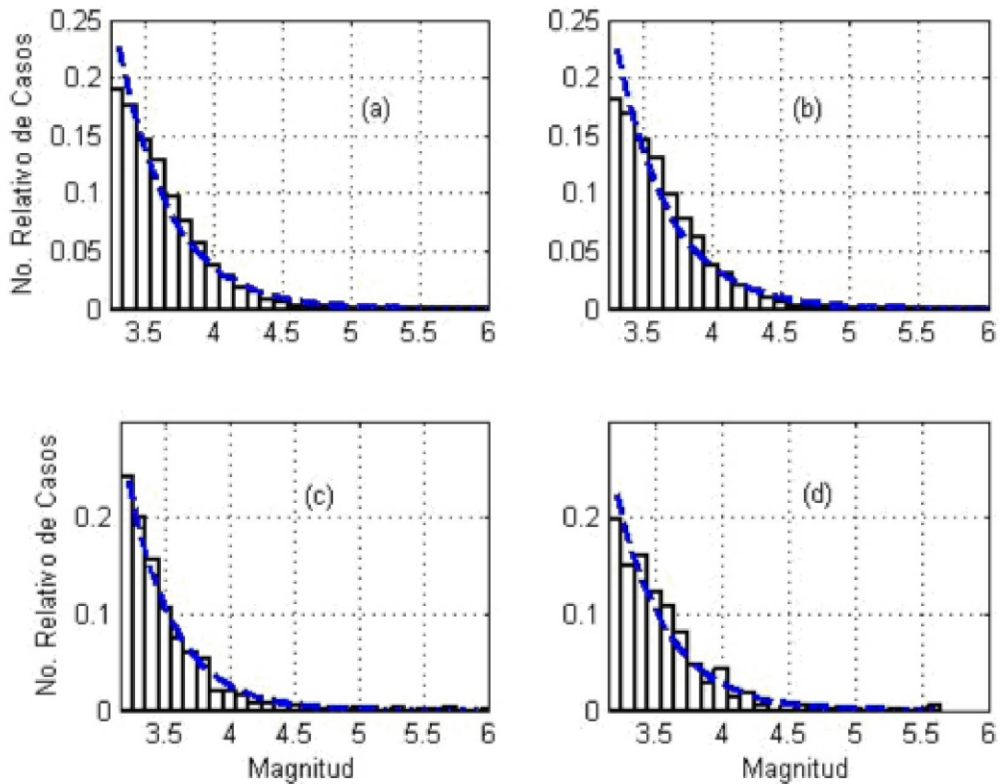


Figura 12. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para la región SE (frente a la costa de Nicaragua). Profundidades: a) todas; b)  $h \leq 45$  km; c)  $45 \text{ km} \leq h < 100$  km; d)  $h \geq 100$  km.

Tabla 5. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la Figura 12. Los encabezados son los mismos que en la Tabla 1.

Prof.	NC	<i>b</i>	Rango- <i>b</i>	<i>M</i> <sub>inf</sub>	<i>M</i> <sub>sup</sub>
Todas	6344	1.16	1.19-1.13	3.3	8.0
<i>h</i> ≤ 45	5235	1.14	1.18-1.11	3.3	8.0
45 < <i>h</i> ≤ 100	770	1.24	1.33-1.15	3.2	8.0
<i>h</i> > 100	689	1.15	1.25-1.07	3.2	8.0

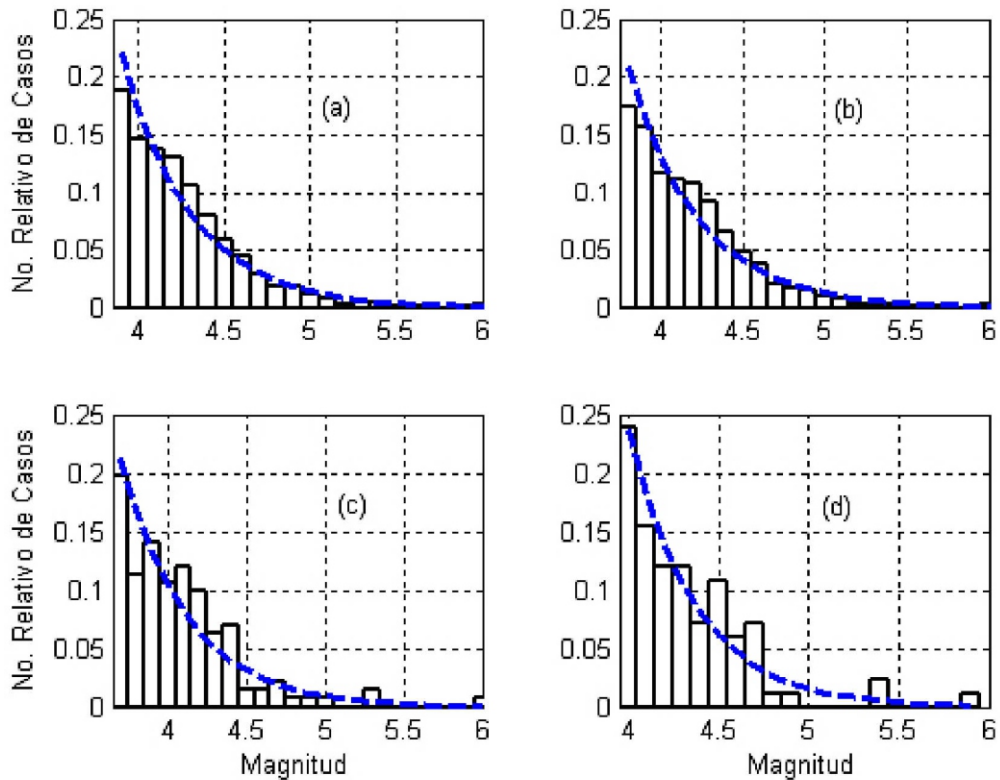


Figura 13. Resultados del ajuste de los datos a la relación de Gutenberg-Richter. Catálogo: INETER (regional) 1995-2006 para la región NW (frente a la costa de El Salvador). Profundidades: a) todas; b)  $h \leq 45$  km; c)  $45 \text{ km} \leq h < 100 \text{ km}$ ; d)  $h \geq 100 \text{ km}$ .



**Tabla 6. Resultados numéricos que corresponden a los casos de la figura 13. Los encabezados son los mismos que en la tabla 1.**

Prof.	NC	<i>b</i>	Rango- <i>b</i>	$M_{inf}$	$M_{sup}$
Todas	1318	1.09	1.15-1.03	3.9	8.0
$h \leq 45$	1359	1.02	1.08-0.97	3.8	8.0
$45 < h \leq 100$	142	1.05	1.24-0.89	3.7	8.0
$h > 100$	84	1.18	1.48-0.96	4.0	8.0

el histograma tiene una "corcova" (con respecto a la tendencia central marcada por la línea de ajuste) entre las magnitudes entre 3.5 y 4.0. Si la magnitud de corte se aumenta a 3.6, los valores de *b* aumentan a 1.38 y 1.40, respectivamente, y la perturbación al ajuste desaparece. Por otro lado, si se aumenta la magnitud de corte en el análisis de catálogo regional en las tres variantes (completo y para las regiones SW y NE) nos queda un resultado contradictorio: los valores no regionalizados resultan ser "normales", entre 1.00 y 1.15, mientras que los regionalizados producen valores entre 1.20 y 1.35 (SW) y entre 1.30 y 1.40 (NE). Sólo si tomamos en cuenta la "corcova" en el cálculo, resultan valores compatibles para todo el catálogo y para la regionalización NW/SE. Semejante situación ocurre en varios otros casos que el lector puede revisar en las figuras; por ejemplo, hay casos con una oscilación entre las magnitudes 5.5 y 6.0. La Figura 8 es un ejemplo en este respecto; si dejamos afuera del ajuste a las magnitudes entre 5.5 y 6.0 resultan nuevamente valores muy altos de *b* que producen incompatibilidades en la regionalización y semejantes a las ya descritas. Hay reportes de oscilaciones en los histogramas de densidad alrededor de la tendencia central; un ejemplo es la Figura 3 de Utsu (1999). La presencia de estas convexidades y concavidades ha sido estudiada por Lasocki y Papadimitriou (2006), quienes proponen métodos estadísticos para evaluar la significación de ellas; de ser significativas, proponen un método no paramétrico (básicamente, suavización) para formar un modelo más complejo que la ley de Gutenberg-Richter.

En nuestro caso, observamos la presencia de oscilaciones (con respecto a una línea de ajuste a la ley de Gutenberg-Richter) tanto en datos que provienen del catálogo mundial como del regional, pero en distintos rangos de magnitudes; por ello, concluimos que estas perturbaciones con respecto a dicha ley no provienen de la realidad geofísica sino, probablemente, de peculiaridades de cada base de datos.

En este punto, vale la pena recapitular y señalar dos cosas: a) es común que se reporte (v. gr., Utsu, 1999; Pisarenko y Sornette, 2003; Lasocki y Papadimitriou, 2006) que la distribución de magnitudes presenta oscilaciones con respecto a una tendencia central (casi siempre, resultado del ajuste a la ley de Gutenberg-Richter) y b) dadas las dificultades para evaluar el efecto de la exactitud de los valores de magnitudes y del carácter completo de los catálogos en la determinación de la constante *b*, es costumbre aceptada evaluar el catálogo por los resultados de la estimación de la constante *b*.

Dejamos al estudio detallado de esta situación para otro trabajo y, provisionalmente, concluimos que, si suavizamos el efecto de estas oscilaciones, los valores de *b* resultan casi siempre "normales", en nuestro caso, entre 1.0 y 1.15.

Monterroso y Kulhánek (2003) utilizaron el catálogo regional MIDAS (30 años, 2345 sismos, magnitud umbral mínima de 4.2) para tratar de obtener la variación espacial del parámetro *b* en Centroamérica; para ello, utilizan, en profundidad, ventanas corridas con un número fijo de sismos. La región B (503 sismos; ventanas de 75 sismos) corresponde a la SE (Nicaragua) de nuestro trabajo. Obtienen  $0.99 \pm 0.04$  como resultado de todo el catálogo; además, un valor de  $1.440 \pm 0.13$  a una profundidad centrada en 124 km y en un rango de 40 km. Es difícil hacer una comparación de estos resultados con los nuestros.

El valor 1.44 a profundidades más grandes que 100 km se compara con también valores grandes que obtuvimos hasta que tomamos en cuenta la existencia de oscilaciones en los histogramas para definir la magnitud de corte inferior. Por otro lado, nos parece que el número de sismos que estos autores utilizan por ventana (75) y globalmente (386) es demasiado pequeño; en nuestro caso, los números son un orden de magnitud más altos (tabla 5). Si tomamos dos desviaciones estándares (0.26; 95% de confianza bajo la hipótesis gaussiana), la significación de la variación en profundidad del valor de  $b$  que estos autores encuentran no parece significativa. Por último, resulta imposible comparar resultados sin tener las figuras con el ajuste de los datos, cosa que Monterroso y Kulháněk (2003) no presentan.

La detección de cambios en el parámetro  $b$  antes y después de la ocurrencia del sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001 no entrega resultados claros; los datos no son suficientes como para llegar a conclusiones significativas.

#### MECANISMOS FOCALES

En el período 1976 a 2007, el catálogo CMT contiene 243 determinaciones de mecanismos focales en la región de estudio. El lector puede encontrar un despliegue de mecanismos focales ("beach-balls") obtenidos de esta y otras fuentes de información y para América Central en La Femina et al. (2002), Lindholm et al. (2004) y Fernández et al. (2004). Además de los mecanismos focales del CMT, hay determinaciones obtenidas de datos de redes regionales de América Central, así como de fuentes más antiguas como, por ejemplo, Molnar y Sykes (1969), Isacks y Molnar (1971) y Dean y Drake (1978). En esta sección, estudiamos la distribución de los mecanismos focales sólo del catálogo CMT ya que a) son muchos, b) son el resultado de un procedimiento único, c) creemos que el nivel de validez de las determinaciones es

homogéneo y d) el rango de fechas (30 años) del catálogo es adecuado. Preferimos analizar gráficamente los ejes P y T ya que es una forma más compacta de visualizar la base de datos y nos permite discutir, en forma más simple, su significación tectónica. Aunque la dirección de estos ejes no refleja necesariamente la distribución de los esfuerzos para sismos superficiales, ya que ellos pueden ocurrir en zonas de debilidad preestablecidas (fallas antiguas), esta situación no es tan cierta para sismos no superficiales.

Así, nos concentramos, primero, en encontrar regularidades en la distribución de los ejes P y T en la zona de subducción. Para formar las figuras siguientes, hemos utilizado ecuaciones como las entregadas por Gasperini y Vannucci (2003), comprobadas con las de Jarosh y Aboodi (1970). Con ellas, obtenemos la representación de los ejes P y T que visualizamos en la semiesfera superior y en proyección vertical y horizontal.

La Figura 14 muestra la distribución de los ejes P y T para sismos con profundidad mayor a 80 km y proyectados horizontalmente en el ecuador de una esfera focal común para todos los sismos. Se puede observar un fuerte agrupamiento de los ejes T en acimut e inclinación, con una inclinación (medida, a lo largo de todo este artículo, desde el eje vertical) promedio de  $36.5^\circ$  y una desviación estándar de  $8.4^\circ$ . Este valor señala la dirección de la subducción.

Además, resulta que los esfuerzos extensivos son los que se transmiten por la placa en subducción. Isacks y Molnar (1969) encuentran que esto sucede en la mayoría de las zonas de Benioff y, en particular aunque con muy pocos ejemplos, en Centro América.

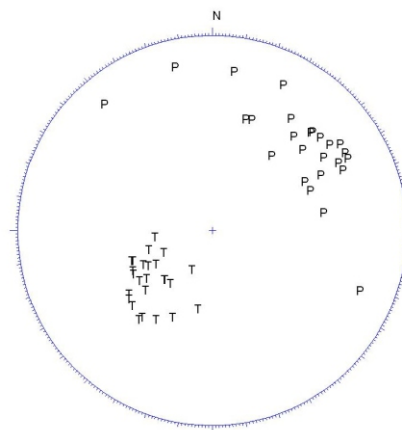
La Figura 15 muestra los ejes P y T proyectados en una sección vertical y perpendicular a la costa. Hemos tomado todos los sismos con profundidad mayor a 80 km que están en el

catálogo y que aparecen en la figura anterior mientras que, para los sismos con profundidad menor a 80 km (dado el número muy alto de sismos), hemos seleccionado aquéllos con magnitud mayor o igual a 6.0. La Figura 16 es una ampliación, para profundidades menores a 80 km, de la figura anterior mientras que la Figura 17 muestra cuantitativamente la distribución de la inclinación (con respecto a la vertical) de los ejes P y T con la profundidad.

Observamos que las direcciones de los ejes T de sismos no superficiales ( $h \geq 80$  km) tienen aproximadamente la dirección de subducción (Figura 4) y muestran un régimen extensivo en su interior. No se aprecia a estas profundidades mecanismos inversos asociados al movimiento relativo entre ambas placas.

Los sismos más superficiales (figuras 15 y 16) tienen: a) mecanismos de rumbo (ejes P y T casi horizontales) dentro del continente y asociados a la cadena volcánica; b) mecanismos normales (ejes P casi verticales; los T, casi horizontales) en el océano que señalan la flexión de la placa y c) mecanismos inversos (ejes T casi verticales; los P, casi horizontales), en el centro de la figura 16 y que se asocian al movimiento relativo de la placa. Estos resultados para sismos superficiales han sido reportados en la literatura (Dean y Drake, 1978; Burbach et al., 1984; White, 1991; La Femina et al., 2002).

La Figura 17 muestra cuantitativamente la distribución de la inclinación (medida con respecto a la vertical) de los ejes P y T con la profundidad. Para los primeros 55 km, hay una gran variedad en estos ángulos. A profundidades mayores, la inclinación de los ejes T muestran una disminución sistemática y con poca variabilidad hasta alcanzar un valor de  $\sim 20^\circ$  a 200 km de profundidad. Este valor se acerca al de  $13^\circ$  que hemos estimado para la zona de Benioff a esa profundidad según el perfil vertical de sismicidad (Figura 4). Sin embargo, la inclinación del mecanismo focal del sismo más profundo



**Figura 14. Ejes P y T (proyección equiareal, semiesfera superior de la esfera focal) de los sismos con profundidad mayor o igual a 80 km, para todas las magnitudes. El catálogo es el CMT entre 1976 y 2007.**

rompe esta tendencia; es un caso aislado y con una profundidad que no es típica para esta región. El cambio de la dirección de la placa a los 100 km que se advierte en la dependencia de la profundidad de los hipocentros (Figura 4) está asociado al paso desde una gran variabilidad de las direcciones de los ejes P y T, para profundidades menores a los 100 km, al dominio de una muy simple tendencia sistemática a profundidades más grandes.

## CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Nos hemos concentrado en tres temas específicos con resultados no reportados, a nuestro conocimiento, en la literatura.

Primero, en la determinación de la constante  $b$  de la relación de Gutenberg-Richter, no encontramos diferencias significativas en su distribución espacial; los valores estimados son compatibles con un rango entre 1.0 y 1.15. Los histogramas contienen oscilaciones alrededor de la tendencia central que es necesario tomar en cuenta en el ajuste; en caso contrario, pueden resultar valores incompatibles entre sí. No es posible comparar nuestros resultados con los de Monterroso y Kuhánek (2003) para la región de Nicaragua (común en ambos trabajos) debido a

que el número de datos que utilizan estos autores parece ser insuficiente para alcanzar una variabilidad pequeña a un nivel de significación del 95%; además, estos autores no publican las curvas de ajuste.

El hecho de que las oscilaciones de los histogramas observados alrededor de la curva de ajuste no coinciden en los dos catálogos utilizados indica que estas oscilaciones no provienen de una complejidad más alta que la del modelo dado por la distribución de Gutenberg-Richter. En este punto, es necesario acotar que la mayor parte de las modificaciones paramétricas de la relación de Gutenberg-Richter se refieren a magnitudes grandes, mayores a 7.0, lo que no es el caso para los catálogos utilizados en nuestro trabajo.

El sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001, =  $M_w=7.7$ , disparó sismicidad que cubre una

región adicional a la hasta ahora reportada (v. gr., Parsons, 2002; Benito et al., 2004 y Martínez-Días et al., 2004).

Así, nos concentramos, primero, en encontrar regularidades en la distribución de los ejes P y T en la zona de subducción. Para formar las figuras siguientes, hemos utilizado ecuaciones como las Mostramos que una región de tamaño comparable al de réplicas y ubicado al SE de ella entró en actividad al ocurrir el sismo principal y lo ha estado haciendo por los últimos 6 años; la actividad se destaca claramente, específicamente en el rango de magnitud entre 5 y 5.5. Parsons (2002) ha estudiado globalmente la ocurrencia de sismicidad que ocurre afuera de la zona "clásica" de réplicas, es decir, en las inmediaciones del sismo principal y en el mismo plano de fractura. Este autor concluye que el sismo principal propaga esfuerzos de corte en subsecuentes y vecinos planos de ruptura; dicha actividad obedece a una forma generalizada de la ley de Omori, cuyo rango de acción llega hasta unos 240 km y por aproximadamente 7-11 años. La actividad que señalamos cumple con estos requerimientos, en distancia y tiempo.

Finalmente, el estudio de la distribución espacial de los ejes P y T de los mecanismos focales de la región proporciona más detalles que los reportados hasta ahora para esta región. Específicamente, los valores de la inclinación de la subducción a 200 km de profundidad y determinada por la sismicidad y los ejes T son  $\sim 20^\circ$  y  $\sim 13^\circ$ , respectivamente. Además, la inclinación medida por la dirección de los ejes T muestra una disminución sistemática y con poca variabilidad desde un valor de  $50^\circ$  a una profundidad de unos 70 km. Pensamos que la visualización de los ejes P y T entrega en forma más rápida y compacta el significado sismotectónico de un conjunto de mecanismos focales, en comparación con las populares figuras con "beach balls". Este tipo más simplificado de visualización proviene de los clásicos trabajos de Isacks y Molnar (1969, 1971).

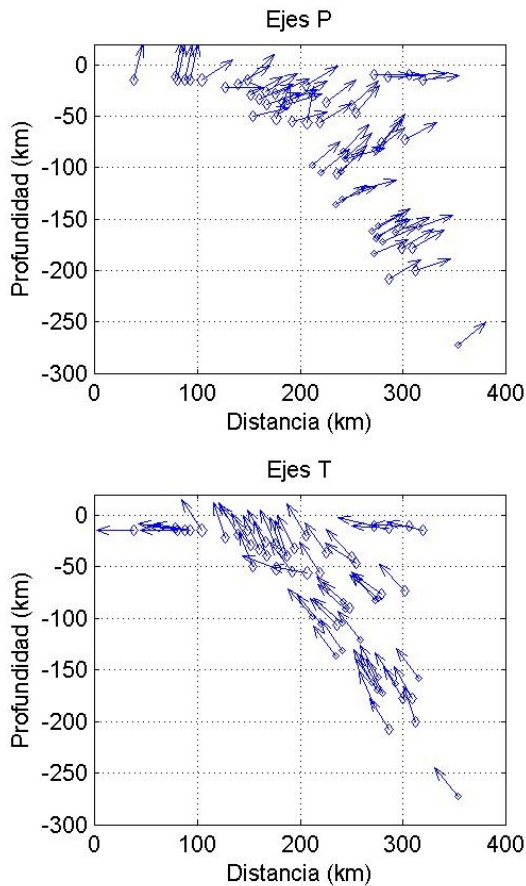


Figura 15. Visualización de la dirección de los ejes P y T con la profundidad y en dirección perpendicular a la costa.



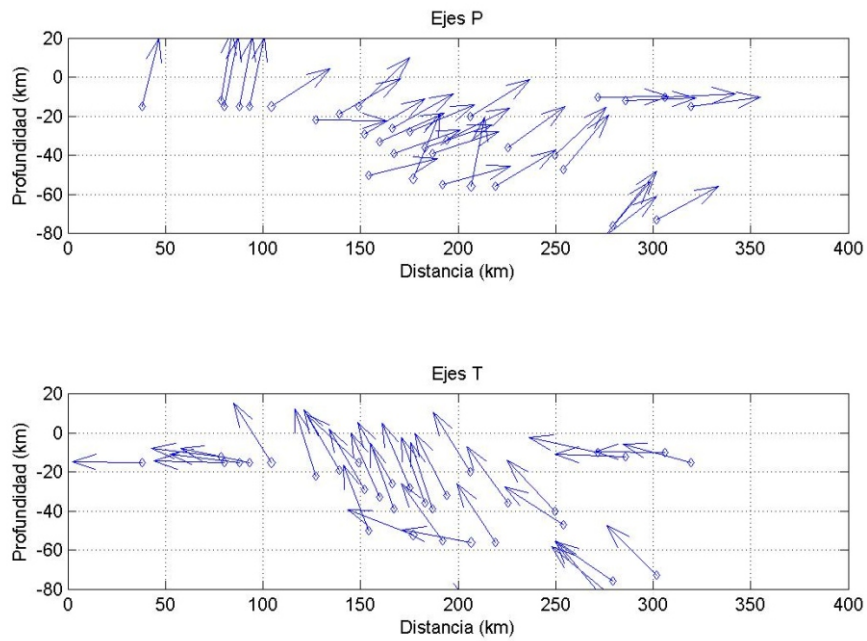


Figura 16. Ampliación de la Figura 15 para profundidades menores a los 80 km.

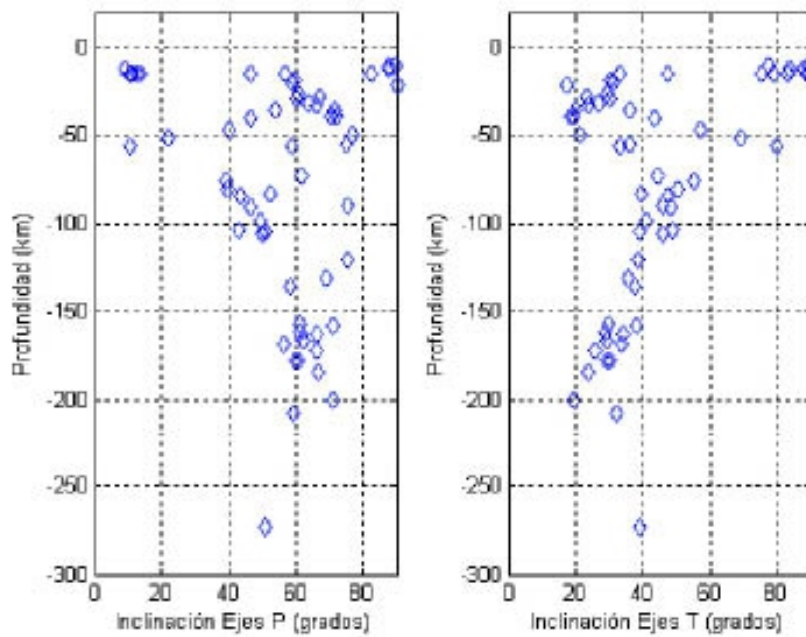


Figura 17. Variación de la inclinación (medida con respecto al eje vertical) de los ejes P y T con la profundidad. Los datos son los mismos que se utilizan en la Figura 15.

Los dos ejemplos del uso de las direcciones de los ejes P y T que hemos encontrado, aunque para las placas en subducción en el Pacífico Noroeste, son Houston y Zhang (1992) y Zhou (1990).

Este trabajo, además, muestra que es posible utilizar datos electrónicos de acceso público para propósitos de proyectos de clases en el posgrado de Ciencias de la Tierra con el objeto de aplicar conocimientos e iniciativas así como habilidades computacionales. Los resultados, como en nuestro caso, pueden ser significativos en cuanto a investigación..

## RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a las instituciones de las cuales obtuvimos nuestra información, especialmente al personal del INETER (Nicaragua) que gentilmente complementó la información obtenida de su sitio electrónico. Agradecemos también la dedicación y pulcritud de los dos árbitros. J. Carlos ayudó a formatear el catálogo regional de sismos de Nicaragua para dejarlo en una versión de uso simple en nuestros programas de cómputo mientras que V. Frías, con gran paciencia, diagramó la figura 1 de acuerdo a nuestros requerimientos. Este artículo surgió de una extensión de un proyecto de clase en el curso de posgrado sobre Sismotectónica que entrega el primer autor en el CICESE.

## REFERENCIAS

- Aki, K. (1965) Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits, Bulletin Earthquake Research Institute, vol. 43, pp. 232-239.
- Algermissen, S.T., J.W. Dewey, W.H. Dillinger and C.J. Langer (1974) The Managua earthquake of December 13, 1972: Location, focal mechanism, and intensity distribution, BSSA, vol. 64, pp. 993-1003.
- Ambraseys, N.N. and R.D. Adams (2001) The Seismicity of Central America: A Descriptive Catalogue: 1898-1995, World Scientific Science, 308 pp.
- Benito, B., J.M. Cepeda and J.J. Martínez (2004) Analysis of the spatial and temporal distribution of the 2001 earthquakes in El Salvador, en: Rose, W.I., J.J. Bommer, D. López, M.J. Car, and J.J. Major (eds.), *Natural Hazards in El Salvador*, Special Paper 375, Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp. 339-356.
- Brown, R.D., P. L. Ward and G. Plafker (1974) Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua, earthquakes of December 23, 1972, Bull. Seism. Soc. Am., vol. 64, pp. 1031-
- Burbach, G. V., C. Frohlich, W. D. Pennington and T. Matumoto (1984) Seismicity and tectonics of the subducted Cocos plate, Journal of Geophysical Research, vol. 89, B9, pp. 7719-7735.
- Dean, B.W. and C.L. Drake (1978) Focal mechanism solutions and tectonics of Central America, Journal of Geology, vol. 86, pp. 111-128.
- Dewey, J.W. and S.T. Algermissen (1974) Seismicity of Middle America arc-trench system near Managua, Nicaragua, BSSA, vol. 64, pp. 1033-1048.
- Dewey, J.W. and G. Suárez (1991) Seismotectonics of Middle America, en: Slemmons, D.B., E.R. Engdahl, M.D. Zoback and D.D. Blackwell (eds.), *Neotectonics of North America*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Decade Map Volume I, pp. 309-321.
- Fernández, M., C.D. Escobar and C.A. Redondo (2004) Seismographs networks and seismic observations in El Salvador and Central America, en: Rose, W.I., J.J. Bommer, D. López, M.J. Car, and J.J. Major (eds.), *Natural Hazards in El Salvador*, Special Paper 375, Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp. 257-268.

- Gasperini, P. and G. Vannucci (2003) FPSPACK: a package of FORTRAN subroutines to manage earthquake focal mechanism data, *Computers and Geosciences*, vol. 29, pp. 893-901.
- Gutenberg and Richter (1954) *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Princeton University Press, 273 pp.
- Guzmán-Speziale, M. (2001) Active seismic deformation in the grabens of northern Central America and its relationship to the relative motion of the North-America\_Caribbean plate boundary, *Tectonophysics*, vol. 337, pp. 39-51.
- Harlow, D.H. and R.A. White (1985) Shallow earthquakes along the volcanic chain of Central America: Evidence for oblique subduction, [abs.], *Earthquake Notes*, v. 56, pp. 28.
- Houston, H. and J. Zhang (1992) A global survey of the state of stress in subducting slabs: the role of phase transitions, en: D. Christensen, M. Wyss, R.E. Haberman, and J. Davies (eds.), *Proc. Wadati Conf. Subduction Earthquakes*, pp. 37-38, Fairbanks: Geophys. Inst. Univ Alaska. (NER)
- Husen, S., R. W. Quintero, E. Kissling and B. Hacker (2003) Subduction-zone, structure and magmatic processes beneath Costa Rica constrained by local earthquake tomography and petrological modeling, *Geophys. J. Int.*, vol. 155, pp. 11-32.
- Isacks, B. and P. Molnar (1969) Mantle earthquake mechanisms and the sinking of the lithosphere, *Nature*, vol. 223, pp. 1121-1124.
- Isacks, B. and P. Molnar (1971) Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal-mechanism solutions of mantle earthquakes. *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 9, pp. 103-174.
- Jarosh, H. and E. A. Aboodi (1970) Towards a unified notation of source parameters, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, vol. 21, pp. 513-529.
- La Femina, P. C., T. H. Dixon and W. Strauch (2002) Bookshelf faulting in Nicaragua, *Geology*, vol. 30, pp. 751-754.
- Lasocki, S. and E. Papadimitriou (2006) Magnitude distribution complexity in seismicity from Greece, *Journal of Geophysics Research*, vol. 111, B11309, doi:10.1029/2005JB003794.
- Lindholm, C.D., C.A. Redondo and H. Bungum (2004) Two earthquake databases for Central America; en: W.I. Rose, J.J. Bommer, D. López, M.J. Car y J.J. Major (eds.), *Natural Hazards in El Salvador*, Special paper 375, Geological Society of America, Boulder Colorado, pp. 357-362.
- Martínez-Días, J. J., J. A. Álvarez-Gómez, B. Benito and D. Hernández (2004) Triggering of destructive earthquakes in El Salvador, *Geology*, vol. 32, pp. 65-68.
- Matumoto, T.M., M. Ohtake, G. Latham and J. Umana (1977) Crustal structure in Southern Central America, *BSSA*, vol. 67, pp. 121-133.
- Molnar, P. and L.R. Sykes (1969) Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity, *Geol. Soc. Am. Bulletin*, vol. 80, pp. 1639-1684.
- Monterroso, D. A. and O. Kulhánek (2003) Spatial variations of b-values in the subduction zone of Central America, *Geofísica Internacional*, vol. 42, pp. 575-587.
- Montero, W. and G. Peraldo (2004) Current knowledge of the Central America historical seismicity: an analysis of recent catalogues, vol. 47, pp. 477-485.
- Parsons, T. (2002) Global Omori-law decay of triggered earthquakes: Large aftershocks outside the classical aftershock zone, *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, 2199, DOI 10.1029/2001JB000646.
- Pisarenko, V.F. and D. Sornette (2003) Characterization of the frequency of extreme earthquake events by the generalized Pareto distribution, *Pure and Applied Distribution*, vol. 60, pp. 2343-2364.
- Protti, M., F. Gundel and K. McNally (1994) The geometry of the Wadati-Benioff zone under southern America and its tectonic significance: results from high-resolution local seismographic network, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 84, pp. 271-287.
- Protti, M., F. Gundel and K. McNally (1995) Correlation between the age of the subducting Cocos Plate and the geometry of the Wadati-Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica, en: Mann, P. (ed.), *Geological and Tectonics Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 295, pp. 309-326.
- Quintero, R. and E. Kissling (2001) An improved P-wave velocity reference model for Costa Rica, *Geofísica Internacional*, vol. 40, pp. 3-19.

- Randall, A.W., J.P. Logorría, and I.L. Cifuentes (2004) Seismic history of the Middle America subduction zone along El Salvador, Guatemala and Chiapas, México: 1526-2000; en: Rose, W.I., J.J. Bommer, D. López, M.J. Car, and J.J. Major (eds.), *Natural Hazards in El Salvador*, Special Paper 375, Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp.378-3396.
- Rose, W.I., J.J. Bommer, D. López, M.J. Car, and J.J. Major (eds.) (2004) Natural hazards in El Salvador, Special paper 375, Geological Society of America, Boulder Colorado.
- Utsu, T. (1965) A method for determining the value of  $b$  in the formula  $\log N = a - bM$  showing the magnitude-frequency relation for earthquakes, *Geophysical Bulletin Hokkaido University*, vol.13, pp.99-103.
- Utsu, T. (1966) A statistical significance test of the difference in  $b$ -value between two earthquake groups, *Journal of the Physics of the Earth*, vol.14, pp.37-40.
- Utsu, T. (1999) Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches, *Pure and Applied Geophysics*, vol.155, pp.509-535.
- White, R. A. (1991) Tectonics implications of upper-crustal seismicity in Central America; en: Slemmons, D.B., E.R. Engdahl, M.D. Zoback and D.D. Blackwell (eds.), *Neotectonics of North America*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Decade Map Volume I, pp.323-3338.
- White, R. A. and D. H. Harlow (1993) Destructive upper-crustal earthquakes of Central America since 1900, *BSSA*, vol.83, pp.115-1142.
- Zhou, H.W. (1990) Observations on earthquake stress axes and seismic morphology of deep slab, *Geophys. J. Int.*, vol.103, pp.377-401.

Manuscrito recibido: 7 de noviembre de 2007

Manuscrito aceptado: 5 de mayo de 2008



## MEXICANO TIENE MEDIO CENTENAR DE ESCLAVOS: XIII OLIMPIADA ESTATAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Enrique Gómez Treviño

CICESE, Ensenada, Baja California, 22860 México

Correo electrónico: egomez@cicese.mx

Trabajar intensamente por varias semanas, buscando información y reflexionando al respecto, y multiplicando o dividiendo cantidades para obtener lo que se les pide, es como generalmente se preparan los estudiantes de preparatoria que vienen al CICESE a presentar el examen de la Olimpiada Estatal de Ciencias de la Tierra, que se realiza en colaboración con la Unión Geofísica Mexicana (UGM) desde 1995.

Si bien al final hay ganadores y premiaciones, como en cualquier olimpiada, el objetivo no es producir estudiantes de alto rendimiento que representen a Baja California en un evento nacional, pues no existe tal competencia. Desde un principio el objetivo ha sido complementar la educación que se da en clase, mediante una especie de curso intensivo –medio autodidacta, medio dirigido– sobre cuestiones que perfectamente pueden manejar los estudiantes pero que, por lo general, no se ven en ninguna de las clases regulares.

De forma indirecta el curso también se dirige a los profesores, pues la mayoría se involucra y se siente parte del equipo de su escuela. A la fecha han participado alrededor de 1000 estudiantes. En la última olimpiada, la decimotercera, participaron 96 estudiantes de los cinco municipios de Baja California. El examen incluyó 100 preguntas de un total de 200 que previamente les fueron facilitadas como guía. Durante varios años, en cada edición, procuramos hacer 100 preguntas nuevas, por lo que ya se tiene un banco de información más o menos surtido.

En los años siguientes haremos tres o cuatro guías de 200 preguntas cada una, para ir las alternando en las siguientes olimpiadas. En lo que sigue encontrarán preguntas típicas del último examen.

Cinco grupos, cada uno con cuatro preguntas

Las preguntas en esta versión corta del examen están divididas en cinco grupos, cada uno con cuatro preguntas.

### **Primer grupo: La tele también educa, pero hay que fijarse bien**

Este primer grupo fue motivado por los incendios recientes en California y Baja California. La respuesta a la primera pregunta es obvia, si se piensa precisamente en qué parte del continente estamos. Las dos siguientes generalmente son parte de los noticieros, siempre y cuando la noticia la dé un reportero curioso y bien informado. La última de las cuatro generalmente es incorrectamente contestada por la mayor parte de los estudiantes.

1. Existen varias regiones en el mundo con clima mediterráneo como el del sur de California y norte de Baja California (en Europa, Australia, América del Norte, América del Sur, África, e incluso Asia). Se trata de áreas muy pequeñas en los diferentes continentes. A primera vista pareciera que están distribuidas sin ninguna relación entre sí. Sin embargo, en realidad sí existe un patrón que las incluye a todas y que explica porqué las lluvias se presentan en invierno.

¿Cuál es este patrón?

- a) todas están en el hemisferio norte
- b) todas están en el hemisferio sur
- c) todas están al occidente de los continentes
- d) todas están al oriente de los continentes

2. Los vientos de Santa Ana que se presentan en California y Baja California se producen porque en los Estados Unidos se desarrolla, más o menos periódicamente, un fenómeno atmosférico asociado con

- a) alta presión
- b) baja presión
- c) huracanes
- d) tornados

3. Los vientos de Santa Ana fluyen hacia el

- a) norte
- b) sur
- c) este
- d) oeste

4. Los incendios forestales que por lo general acompañan a los vientos de Santa Ana

- a) se deben al calentamiento global
- b) se deben a la civilización
- c) se han producido desde antes de la civilización
- d) se deben a que el Río Colorado trae poca agua

### Segundo grupo: Oro, plata y camarones: economía y costos ambientales

El segundo grupo se refiere a aspectos productivos de la región. En las dos primeras preguntas se les dan datos de producción de una mina de oro que operó en San Felipe hace algunos años y se les pide que estimen las ganancias. La idea no es que sepan a cuánto ascendieron las ganancias, sino que se enteren indirectamente de una de las actividades productivas más importantes del estado.

Las otras dos preguntas del grupo se refieren a la pesca de camarón en el Mar de Cortés o Golfo de California. Se relaciona el volumen de pesca con la cantidad de dióxido de carbono y de litros de combustible que intervienen en el proceso, y se les pide que calculen las respectivas cantidades por cada kilogramo de camarón. Los resultados son sorprendentes y le hacen a uno sentirse culpable cada vez que come camarones. Lean las dos preguntas, pero no hagan cuentas si quieren seguir siendo inocentes. Mejor una ignorancia piadosa que la verdad incómoda de Al Gore.

1. De 1994 a 2001 operó en San Felipe, Baja California, una planta procesadora de rocas. Las rocas eran procesadas por 500 trabajadores repartidos en 3 turnos. El objetivo era extraer el oro contenido en las rocas. Para separar el oro de la roca se requiere invertir energía y recursos que, si el precio del oro está muy bajo, no se alcanza a recuperar lo que se invierte y la planta debe cerrarse. En la planta de San Felipe el costo de recuperación era de 250 dólares por onza de oro recuperada. Si el precio promedio del oro en los ocho años en que la planta estuvo en operación era de 330 dólares la onza, y en total se recuperaron 600 mil onzas de oro: ¿Cuál fue la ganancia en millones de dólares?

- a) 0.05
- b) 0.5
- c) 5
- d) 50

2. De la mina de San Felipe además de oro se extrajo plata. En este caso fueron 6 millones de onzas, las cuales se vendieron a alrededor de 6 dólares la onza. ¿En cuántos millones de dólares se vendió la plata que se extrajo de la mina?

- a) 0.036
- b) 0.36
- c) 3.6
- d) 36

3. En el Mar de Cortés se pescan anualmente 20,000 toneladas de camarón. En el proceso y como consecuencia del uso de combustible fósiles por los barcos camaroneros, se producen 50 mil toneladas de CO<sub>2</sub> que se arrojan a la atmósfera. ¿Cuántos kg de CO<sub>2</sub> se producen por cada kg de camarón?

- a) 2.5
- b) 25
- c) 250
- d) 2,500

4. En el Mar de Cortés se pescan anualmente 20,000 toneladas de camarón. Para ello los barcos camaroneros utilizan 30 millones de litros de combustible. ¿Cuántos litros de combustible se gastan por cada kg de camarón?

- a) .0015
- b) .015
- c) .15
- d) 1.5

### Tercer grupo: Respirar no contamina, pero usar la compu sí

De lo que no hay que sentirse culpable es de respirar. Respirar es una necesidad, un placer gratuito y, para nuestro alivio: no contamina. Vaya noticia, hasta que ganamos una los humanos. Hagan sus cuentas con los datos de la primera pregunta del tercer grupo, y denle gracias a dios por dotarnos de pulmones chiquitos. Respiren y respiren sin culpa ni remordimientos que no es pecado ni religioso ni ambiental.

El resto de las preguntas se refieren al uso de automóviles y aparatos eléctricos. Que los automóviles producen dióxido de carbono no es ninguna novedad, pero resulta sorprendente la cantidad de sus emisiones. Un litro de gasolina pesa menos de un kilogramo; sin embargo, al quemarse se convierte en varios kilogramos de dióxido de carbono.

A primera vista esto parecería imposible pero no tiene nada de magia, así son muchas reacciones químicas en las que interviene el oxígeno del aire.

Resulta entonces que los pescadores de camarón no son los únicos malos de la película, pues en el viaje al mercado para comprar un kilo de camarones nuestro auto emite tanto o más dióxido de carbono que el emitido para capturarlos. Para no contaminar, mejor entonces quedarse en casa viendo televisión y/o trabajando en la computadora. ¿Resultado?: Tanto o más emisiones que en el supuesto recorrido para comprar el también supuesto kilo de camarón. Las últimas dos preguntas aluden precisamente a nuestra ilusión generalizada de que la energía eléctrica no contamina. De hecho, la mayor parte de las emisiones de dióxido de carbono en el mundo están asociadas con la producción de energía eléctrica.

1. El dióxido de carbono que producimos los humanos en el proceso de respirar no se considera en los cálculos de las emisiones globales de dicho gas, porque formamos parte del ciclo natural y porque la cantidad es pequeña en comparación con la de los combustibles fósiles. Se ha estimado con mediciones que una persona produce alrededor de 20 gr/h de CO<sub>2</sub> en el proceso de respiración. ¿A cuántos kg equivale esto anualmente?

- a) 10
- b) 50
- c) 100
- d) 200

2. La mayor parte de la energía eléctrica que se produce en el mundo se obtiene en plantas que queman combustibles fósiles, muy similares a la que opera en Rosarito, Baja California. ¿Cuánto CO<sub>2</sub> se emite a la atmósfera en estas plantas por cada kwh de energía?

- a) 100 g
- b) 300 g

- c) 600 g
- d) 1,000 g

3. Supongamos que para transportarse una persona utiliza su auto el cual consume un litro de gasolina al día (en realidad muy poco consumo para cualquier recorrido normal.) ¿Cuántos kg de CO<sub>2</sub> emite a la atmósfera en un año?

- a) 90
- b) 900
- c) 300
- d) 3,000

4. Supongamos que una computadora funcionando por 5 horas, 5 horas no es nada raro, consume en ese tiempo 1 kwh. ¿Cuántos kg de CO<sub>2</sub> significan al año el uso de la computadora por 5 horas al día?

- a) 3.5
- b) 35
- c) 350
- d) 3,500

### Cuarto grupo: Mexicano tiene medio centenar de esclavos

El metro como unidad de longitud es muy conveniente en muchos aspectos de la vida diaria porque es más o menos de nuestro tamaño. Por su parte, el kwh para energía y el kw para potencia no nos dicen mucho en relación con lo que podemos hacer los humanos. Es más conveniente definir otra unidad, aunque ésta no exista y se preste a ridiculización. La llamaremos esclavo de potencia (ep), y será la potencia media que puede desarrollar una persona en un día.

En las primeras dos preguntas del cuarto grupo se desarrolla la equivalencia entre ep y kw. Resulta que como productores de energía no somos muy eficientes, pues en un promedio de 24 horas apenas si podríamos mantener encendido un foco pequeño.

La tercera pregunta se refiere al uso que hacemos de potencia en todos los rubros expresándolo en ep, lo cual nos viene a dar el equivalente en esclavos que están continuamente a nuestro servicio. Resulta que son muchos. Para mantener un foco de 100 watts encendido por 24 horas se requerirían varios esclavos, una computadora necesitaría el doble, y una plancha muchísimos más. Imagínense varios esclavos en cada poste del alumbrado público dándole vuelta a un generador para que no se apague el foco, y así toda la noche.

El término esclavo no solo refleja que algo que no es nosotros trabaja para nosotros, sino además que, como a los esclavos reales, prácticamente no se les paga nada. Con lo que pagamos por la energía que consumimos –gas, electricidad, etc.– apenas si se podrían comprar un chicle, o tal vez dos, pero definitivamente no les alcanzaría ni para un huevo al día. A esto se refiere la última de las preguntas: desde esta perspectiva pagamos muy poco en relación con lo que recibimos. Como última reflexión podríamos decir que si bien estos esclavos casi no nos cuestan, en realidad nos están pasando la factura en términos ambientales porque exhalan mucho dióxido de carbono y son muchos, muchísimos. Reemplazarlos por esclavos igualmente económicos, pero que no exhalen tanto gas de invernadero, es lo que trae actualmente de cabeza a políticos y científicos de todo el mundo.

1. La potencia física (trabajo o energía por unidad de tiempo) que puede desarrollar una persona no es tan uniforme como lo puede ser el de una máquina. Una persona puede desarrollar mucha potencia por un corto tiempo, después de lo cual debe descansar. Para desarrollar potencia sin descansar por varias horas el esfuerzo debe ser moderado. Una estimación de la potencia que puede desarrollar una persona por un periodo largo se puede hacer considerando la energía o trabajo que debe hacer una persona de 70 kg de masa para subir su propio peso hasta la cima de una montaña de 3,000 m de altura.



El trabajo que debe desarrollar es (en millones de Joules)

- a) 2
- b) 4
- c) 6
- d) 8

2. Independientemente de tiempo que le tome subir la montaña (por ejemplo, 8 o más horas), es natural pensar que no podrá hacer más trabajo por el resto del día, pues necesitará tiempo para descansar, comer y dormir. Podemos entonces suponer que lo más que puede hacer un hombre en 24 horas es subir la montaña de 3,000 m de altura cargando su propio cuerpo de 70 kg y que esa es la potencia promedio que puede desarrollar. La potencia desarrollada (trabajo/tiempo) en watts es:

- a) 5
- b) 10
- c) 15
- d) 25

3. En el mundo el promedio de potencia (energía por unidad de tiempo) que utilizamos los humanos se estima en 2,000 watts per cápita (incluye todos los rubros: energía eléctrica, energía para el transporte, etc.) Considerando que físicamente solamente podemos desarrollar determinada cantidad de watts, lo anterior implica que equivalentemente vivimos como si tuviésemos a nuestro servicio muchos esclavos. En el caso de México operamos con 1,400 watts por habitante considerando también todos los rubros. ¿Cuántos esclavos nos corresponderían?

- a) 12
- b) 36
- c) 46
- d) 56

4. Considerando la potencia que puede desarrollar un humano promediada sobre 24 horas: ¿Cuánta energía puede producir en 24 horas en kwh? Una vez obtenida esta cantidad, multiplicarla por el precio del kwh en Baja California y obtener lo que le pagaríamos a cada uno de los esclavos que nos ayudan a mantener nuestra economía. ¿Cuánto le pagaríamos al día?

- a) 1 peso
- b) 5 pesos
- c) 20 pesos
- d) 50 pesos

### Quinto grupo: Viendo el mar con otros ojos

Vayámonos ahora a la playa para relajarnos un poco y olvidarnos de incendios forestales, kilos de camarón y exhalaciones de gases de invernadero. Si bien no se necesita ser experto en oceanografía física para apreciar y disfrutar de las bellezas de la playa, descubrir algunas cosas básicas sobre las olas del mar no le estorba a nadie. Saber cómo y por qué se comportan las olas como lo hacen es importante en muchas actividades productivas y de seguridad. En la primera pregunta del último grupo se plantea simplemente que determinen la frecuencia de las olas que llegan a las playas en Baja California, y se les indica que, por lo general, cada mar tiene una frecuencia característica.

Después se les pide que indiquen si la velocidad de la ola aumenta o disminuye al acercarse a la playa. Enseguida, en la tercera pregunta se les plantea una manera de saberlo sin tener que visitar la playa, basándose en el hecho de que prácticamente todas las olas que llegan a la playa lo hacen perpendicularmente. En la última se les pregunta qué es lo que permanece sin cambio cuando una ola se acerca a la playa.

Está comprobado que estos conocimientos hacen que se disfrute mejor de la playa, y que si además se comparten con la pareja en un atardecer en la playa harán del improvisado maestro(a) la persona más inoportuna y aburrida del mundo. ¡Buena suerte!

1. Las olas que se ven todos los días a lo largo de las costas de California y de la Península de Baja California se producen por el efecto del viento mar adentro en el Océano Pacífico. El ritmo de las olas depende del régimen de vientos y puede variar, pero cada región tiene un ritmo más o menos regular que se considera normal para esa parte del planeta. En el caso de Baja California y California: ¿Cuántas olas llegan normalmente a la playa cada minuto?

- a) 1
- b) 2
- c) 3
- d) 6

2. Si bien en muchos sentidos los tsunamis y las olas comunes difieren en algunos aspectos, ambos fenómenos necesariamente tienen mucho en común, pues después de todo se trata en los dos casos de ondas en el mar. Una de las cosas que tienen en común es que cuando se acercan a la costa su velocidad cambia con respecto a la que tenían en alta mar. ¿Aumenta o disminuye la velocidad? O tal vez no cambia.

- a) no cambia
- b) aumenta
- c) disminuye
- d) no aplica

3. Para saber cómo cambia la velocidad de una ola al acercarse a la playa no hay nada como observarla en su camino. Sin embargo, esto no es estrictamente necesario. Una de las cosas más fascinantes de la ciencia es conectar un hecho con otro, de tal forma que conociendo uno de ellos se pueda deducir el otro. De hecho, eso es lo que es la ciencia.

La ciencia no es simplemente un conjunto de conocimientos aislados que hay que aprender uno por uno. El poder de la ciencia deriva de que esos conocimientos están organizados y jerarquizados, y de que uno puede deducir, partiendo de pocos principios o leyes, hechos conocidos y por conocer, sin tener que observarlos directamente. O sea que podemos predecir. El caso que nos ocupa es muy simple pero ejemplifica esta conexión. El saber, por haberlo observado, que las olas llegan perpendicularmente a la playa a pesar de que se aproximan a ella de todas las direcciones, implica una de las tres opciones: a) que su velocidad aumenta al acercarse a la playa, b) que su velocidad disminuye, o bien c) que no hay variación. Para reconocer la conexión imaginen una ola que se aproxima oblicuamente a la playa, y consideren las tres opciones. En una de ellas la ola debe girar para alinearse a lo largo de la playa, en otra debe girar para dirigirse normal o perpendicularmente a la playa, y en la otra no gira. Obviamente, la respuesta correcta es la que corresponde al caso que lleva a que las olas lleguen normalmente a la costa. ¿Cuál de las opciones conduce al hecho real?

- a) aumento de la velocidad
- b) disminución de la velocidad
- c) misma velocidad
- d) que no hay variación

4. En cualquier fenómeno existen cantidades que cambian y otras que no cambian. En el caso de las olas del mar ¿Cuál de las siguientes variables o cantidades no cambia en el proceso de pasar de alta mar a la playa?

- a) altura
- b) frecuencia
- c) longitud de onda
- d) velocidad

## Los ganadores de la XIII Olimpiada Estatal de Ciencias de la Tierra fueron...

Maestro asesor: Manuel Armando Gómez Piñón.

Plantel: COBACH La Mesa, Tijuana.

1er. Lugar:

Christian Uriel Pérez Delgadillo

2do. Lugar:

Guadalupe Ramos García

3er. Lugar:

Eduardo Luis Romero Saucedo

# ORIGEN Y NATURALEZA DEL UNIVERSO Y LA XII OLIMPIADA ESTATAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA DE BAJA CALIFORNIA

Enrique Gómez Treviño

CICESE, Ensenada, Baja California, 22860 México

Correo electrónico: egomez@cicese.mx

## ¿De dónde salió el Universo?

En estudios de distribuciones hipocentrales que relacionan las distancias entre posibles fuentes de información y sitios receptores de ésta con los correspondientes tiempos de recorrido, mediante la suposición o búsqueda de una velocidad de propagación dada, es importante estimar el efecto de variaciones en dicha velocidad sobre los tiempos de recorrido.

Definitivamente hay orden en el Cosmos, desde lo más pequeño a lo más grande, tal como lo intuyeron los filósofos jónicos de la antigua Grecia, quienes fueron los primeros en descubrir que podíamos descubrir lo que se oculta a primera vista.

## Diagramas de rocas y diagramas de estrellas

Existen diferentes tipos de rocas, de diferente origen y de diferentes edades. Hay rocas derivadas de material reciclado de la corteza terrestre, y hay rocas que provienen de material relativamente primitivo del manto. Así también hay diferentes tipos de estrellas, de diferente origen y de diferentes edades. Hay estrellas derivadas de material reciclado de otras estrellas, y hay estrellas que provienen de material relativamente primitivo originado en los inicios del Universo. Y así como hay diagramas sobre la formación de rocas en función de presión y temperatura, así también hay diagramas para las estrellas. Se puede caracterizar su estado actual en términos de magnitud y temperatura, así como representar su evolución en el tiempo.

## La Tierra no se expande pero el Universo sí

Antes de la teoría de la tectónica de placas, la formación de montañas y de las cuencas oceánicas se explicaba con la idea de la contracción o expansión de la Tierra. Estas explicaciones actualmente nos parecen risorias, pero en su tiempo eran muy serias. Tan serias, que los artículos al respecto aparecían en las mismas revistas en las que se publicaron más tarde los artículos que establecieron la tectónica de placas. Y de hecho, en algunos casos por los mismos autores.

En el caso de Universo las cosas pasaron al revés. Primero se suponía que era estático, porque no había evidencias de contracción o expansión, y después se descubrió que se está expandiendo. El descubrimiento fue doble, en el sentido que primero se hizo de una manera y después de otra. Einstein, cuando se puso a reformular la teoría de la gravitación de Newton para adecuarla a la relatividad, encontró que, en la nueva concepción, el espacio no podía existir estático.



Debía estar expandiéndose, pero como en ese tiempo todo mundo consideraba que debía estar estático, Einstein introdujo una constante en su teoría para forzar la situación. Cuando años después, Hubble descubrió, por observación, que las galaxias se separan a una velocidad proporcional a su distancia, Einstein se percató que al introducir su constante había cometido el peor error de su carrera, y así lo expresó tiempo después. Y es que la recesión de las galaxias no se puede entender en términos comunes como producto de una simple explosión. Las galaxias en realidad prácticamente no se están desplazando en el espacio, sino que es el espacio entre ellas el que se está expandiendo, y como consecuencia se separan unas de otras. Esto sucede solamente a gran escala, por lo que nadie se preocupe de que esté aumentando de volumen.

## Un Universo gratuito

Según el modelo inflacionario, que combina aspectos de mecánica cuántica y cosmología, el Universo bien pudo aparecer como una simple fluctuación de energía, o más bien como una muy compleja fluctuación de energía. Y todo sin violar la conservación de la energía. El origen de la idea viene de los tiempos de la segunda guerra mundial, retomada hace casi dos décadas en combinación con los últimos descubrimientos en partículas elementales. La idea original en realidad es muy simple. Nació como una de esas coincidencias curiosas que se olvidan pero que con el tiempo se valoran en su verdadera dimensión. En su autobiografía, George Gamow rescata la anécdota de que cruzaban una avenida cuando le comentó a Einstein lo que Pascual Jordan había calculado la noche anterior.

Einstein se detuvo impresionado y por poco los atropellan a los dos. Lo que Jordan había calculado era muy simple: que la energía gravitacional -negativa por naturaleza- de cualquier masa es exactamente igual a la energía de su masa -positiva por naturaleza-, cuando la masa se concentra en un solo punto.

La idea de Jordan era que, en principio, una estrella podría nacer de la nada. El modelo inflacionario retomó esta idea aplicándola a todo el Universo.

## Recapitulando

En los últimos 100 años, varias generaciones de científicos han realizado descubrimientos sobre cómo se comporta la materia a niveles atómicos y subatómicos. Durante el mismo periodo, también se han hecho descubrimientos de cómo se comportan y de qué están hechas las estrellas. Combinando estos conocimientos de lo más pequeño y cercano, con los de lo más grande y lejano, ha surgido un modelo del universo que contempla no sólo su comportamiento actual, sino también su pasado y su futuro. Los descubrimientos más espectaculares, algunos buscados y otros inesperados, apuntan a que el universo tuvo un inicio en el tiempo y que, aunque parezca absurdo, bien pudo haber aparecido de la nada. Desde entonces, el universo se ha estado expandiendo sin que sepamos a ciencia cierta su destino final. Si bien el modelo no está completo en el mismo sentido en que lo está el modelo del átomo, los aspectos principales están comprobados y recomprobados y muy difícilmente el modelo dará un vuelco. Faltan algunos detalles y se está trabajando en ellos. Lo que se tiene es lo suficientemente coherente y confiable, así que bien vale la pena familiarizarse con las principales evidencias. Después de todo, se trata del mundo en que vivimos. ¿Dónde y cómo se formaron los átomos de carbono y oxígeno de que estamos hechos? ¿Existen desde el inicio del universo? ¿Y los de hidrógeno, tienen el mismo origen? Además de las respuestas, que bien podrían ser en uno u otro sentido, lo importante es el cómo. Esto es, el cómo los científicos saben estas cosas, pues es obvio que ellos no estuvieron allí cuando pasó todo lo que dicen.

## Recomendaciones para los estudiantes

Las preguntas de la XII olimpiada girarán alrededor del origen y naturaleza del universo en que vivimos, más o menos en las líneas indicadas más arriba. Las palabras o conceptos clave son: Big Bang o Gran Explosión; Expansión del Espacio; Radiación de Fondo de Microondas Cósmicas o Cosmic Background Radiation; Modelo Inflacionario o Inflationary Model; Satélite COBE; Telescopio Hubble; Supernova o Supernovae; Supernovas Históricas, particularmente la SN 1987A; Las Estrellas más Viejas; Origen del Sistema Solar; Diagrama HR de clasificación de las estrellas, y la trayectoria en el diagrama HR de estrellas que evolucionan dependiendo de su masa. Formulen ustedes mismos preguntas posibles. Por ejemplo, sobre temperaturas en diferentes etapas, personajes, distancias típicas, millones de años de tal o cuál proceso o sobre los procesos mismos. Hay muchas páginas en la Red sobre estos aspectos, tanto en español como en inglés (la Wikipedia está en muchos idiomas). En la Red hay simuladores muy divertidos del diagrama HR.

Este año la guía no contiene las preguntas explícitas con sus cuatro respuestas opcionales para contestarlas de antemano. Las preguntas explícitas y las opciones, o sea el examen mismo, lo tendrán hasta el día del evento, a la hora de iniciar la competencia. Ello implica que cambia un poco la manera de prepararse para el examen. Se recomienda que revisen los diferentes temas y que los discutan entre ustedes y con sus maestros. Otra vez: planteen preguntas ustedes mismos y hagan exámenes para practicar. Esto ayuda a enfocar la atención en la búsqueda e incluso a recordar mejor lo que se lee. Descubrirán que el tema del origen del universo dejó de estar basado en especulaciones para pasar a ser un tema de la ciencia hecha y derecha. Para no ir muy lejos, revisen las contribuciones de los Premio Nobel de Física de este año.

Las preguntas van a ser simples, no se preocupen demasiado. Lo importante es que con las diferentes lecturas y discusiones puedan por ustedes mismos contar la historia del universo en sus aspectos más generales y, sobre todo, que piensen en los diferentes argumentos y evidencias. Las respuestas a las preguntas serán entonces más que obvias. Además, no podrán sino sentir mucho respeto por todo lo que los rodea, por la Tierra, por el Sol, por todas las estrellas y por ustedes mismos. Los átomos de sus cuerpos, los átomos que respiran y que se comen, no siempre estuvieron aquí y ni siquiera provienen del Big Bang. Estos átomos nacieron después, como una especie de subproducto de la actividad de las estrellas. Estamos hechos de polvo de estrellas, pero muy bien formaditos y con código ADN en nuestras células, ADN que también está hecho de polvo de estrellas. ¿Cómo se combinó todo para que nosotros llegásemos a existir? Este es un tema mucho más difícil que el del origen del universo. Tal vez lo veamos en otra ocasión. Por lo pronto concéntrense en el tema de este año. Suerte con el examen.

## Los ganadores de la Décimo Segunda Olimpiada

**Primer lugar:** Antonio Valdez Ceballos, COBACH Plantel Mexicali. Profesora Talpa Lara Moreno.

**Segundo lugar:** Daniel Sheimbaum Frank, Centro Educativo Patria (Ensenada). Profesor Samuel Ayón.

**Tercer lugar:** Beatriz Alina Juárez Álvarez, Universidad del Noroccidente de Latinoamérica (Ensenada). Profesor Luis Ramón Siero González.

Se les otorgaron medallas de oro, plata y bronce, al primero, segundo y tercer lugar, respectivamente, y premios en efectivo. Todos los maestros y estudiantes recibieron su constancia de participación.

## El examen

XII Olimpiada Estatal de Ciencias de la Tierra  
Unión Geofísica Mexicana, A.C.  
CICESE  
Sábado 25 de noviembre de 2006  
Ensenada, Baja California

1. La cosmología es el estudio a gran escala de la estructura y la historia del universo. En particular, trata los temas relacionados con su origen y su evolución. Es material de estudio para la física, astronomía, filosofía y religión. La cosmología moderna nació en 1916 con la publicación de la Teoría General de la Relatividad. Esta teoría fue desarrollada por el científico.

- a) Rutherford
- b) Einstein
- c) Hubble
- d) Lemaitre

2. La Teoría General de la Relatividad es una teoría de la gravedad, y se basa en una especie de coincidencia que fue primero notada por Newton. La coincidencia es que la masa gravitacional es exactamente igual a la masa inercial. Dicho de otra forma, la capacidad de una masa para producir gravedad es exactamente igual a su resistencia para moverse. Newton calibró sus leyes para que así fuese, pues conocía los resultados de Galileo de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración. En la Teoría General de la Relatividad esta coincidencia se tomó como evidencia de algo más profundo en la naturaleza, y con esa suposición se llegó a una formulación más completa de la gravedad, con la que se pudieron abordar fenómenos más complejos que los que abordaba la teoría original de Newton. A la relación entre la masa inercial y la gravitacional se le conoce como el principio de

- a) igualdad
- b) exactitud
- c) equivalencia
- d) coincidencia

3. El científico que desarrolló la Teoría General de la Relatividad se dio cuenta que sus ecuaciones implicaban que el espacio solamente podía existir expandiéndose, lo cual a su vez implicaba un universo en expansión. Como en ese tiempo, 1916, no se tenía evidencia de un universo en expansión, sino que se consideraba que el universo era estático, este científico introdujo una constante artificial en sus ecuaciones para forzarlas a que se adecuaran a la realidad, o sea a un universo estático. La introducción artificial de esta constante la consideró este científico como el error más grande de su carrera científica, pues poco después se descubrió por observaciones la expansión del universo. A esta constante se le conoce como la constante.

- a) universal
- b) cosmológica
- c) galáctica
- d) de Hubble

4. En la ciencia, si un científico no considera una posibilidad en sus teorías u observaciones, otros están listos para considerarla. Así, en 1922, un meteorólogo y matemático de la ex Unión Soviética, quien muriera poco después de neumonía tras realizar observaciones meteorológicas en globo en pleno invierno, publicó las primeras soluciones de las ecuaciones de la Relatividad General que mostraban como posibilidad un universo en expansión. El apellido de este científico era

- a) Friedmann
- b) Lemaitre
- c) Einstein
- d) Cobe

5. En la ciencia es común que científicos de diferentes partes del mundo hagan descubrimientos similares más o menos al mismo tiempo e independientemente unos de otros. Así, en 1927, un sacerdote católico de Bélgica, quien había estudiado física y matemáticas, resolvió las ecuaciones de la

Relatividad General encontrando soluciones que implicaban que el espacio se está expandiendo. El apellido de este sacerdote era

- a) Friedmann
- b) Lemaitre
- c) Einstein
- d) Cobe

6. Si el espacio se está expandiendo y el universo haciéndose más grande, entonces en el pasado era más pequeño. Extrapolando hacia atrás en el tiempo podemos inferir que hubo un momento en que todo el universo debió estar concentrado en un solo punto. Con base en sus soluciones de la Relatividad General y en algunas observaciones sobre lo que en ese entonces se conocía como nebulosas espirales, las cuales después se determinó que estaban fuera de nuestra galaxia y que eran galaxias por sí mismas, el sacerdote jesuita de Bélgica propuso que el universo entero alguna vez estuvo concentrado en lo que llamó el “átomo”

- a) universal o completo
- b) divino o celestial
- c) supertodo o superátomo
- d) primordial o primigenio

7. La explosión de este “átomo” inicial fue lo que más tarde se llamaría el Big Bang o Gran Explosión. La idea no es que de un solo átomo que explotó salieron todos los átomos de universo, sino más bien que todos los átomos del universo estuvieron juntos en el pasado en un volumen muy pequeño, una especie de huevo de donde salió todo el universo. De hecho, el sacerdote jesuita de Bélgica lo llamo el huevo

- a) cósmico
- b) universal
- c) divino
- d) atómico

8. La teoría rival más importante del Big Bang se conoce como Teoría del Estado Estacionario. Se acepta que el universo está en expansión pero no se acepta que haya tenido un principio. Se postula un universo eterno cuya densidad global de materia no cambia. Para que la densidad de materia no cambie a pesar de que haya expansión se requiere que

- a) desaparezca materia
- b) aparezca nueva materia
- c) se conserve la misma materia
- d) desaparezcan galaxias

9. La Teoría del Estado Estacionario fue propuesta por un científico que hizo descubrimientos muy importantes en el tema de la evolución de las estrellas y de la síntesis de los elementos químicos, y quien además fue un renombrado autor de ciencia ficción. Murió en el año 2001. Su nombre:

- a) Arthur Clarke
- b) I. Assimov
- c) A. Einstein
- d) F. Hoyle

10. Irónicamente, el nombre con el que se le conoce a la teoría más aceptada, la del Big Bang, fue acuñado por su oponente principal, el autor de la Teoría del Estado Estacionario. En una entrevista en la BBC de Londres, este autor, queriendo explicar en una forma burlona lo ridículo de un universo que se inicia con una explosión, se refirió a esa teoría como la de un Big Bang. El autor del término se llamaba

- a) Arthur Clarke
- b) I. Assimov
- c) A. Einstein
- d) F. Hoyle



11. La Radiación Cósmica de Fondo es la energía electromagnética que:

- a) causó al Big Bang
- b) sobró del Big Bang
- c) le faltó al Big Bang
- d) mantiene al Universo

12. Las primeras estrellas que se formaron después de Big Bang estaban compuestas de:

- a) todos los elementos
- b) H, He y Na y U
- c) Fe y Ni
- d) H y He

13. El porcentaje de H que predicen las leyes físicas para después del Big Bang, una vez que la materia se enfrió lo suficiente para formar átomos es de:

- a) 0
- b) 25
- c) 50
- d) 75

14. El porcentaje de He que predicen las leyes físicas para después del Big Bang, una vez que la materia se enfrió lo suficiente para formar átomos es de:

- a) 0
- b) 25
- c) 50
- d) 75

15. El porcentaje de Fe predicen las leyes físicas para después del Big Bang, una vez que la materia se enfrió lo suficiente para formar átomos es de:

- a) 0
- b) 25
- c) 50
- d) 75

16. ¿Qué científico realizó los primeros cálculos de las proporciones de elementos que se formaron después del Big Bang?

- a) Gamow
- b) Wilson
- c) Hubble
- d) Einstein

17. ¿Cuántos millones de años después del Big Bang se formó el Sol?

- a) 100
- b) 1,000
- c) 5,000
- d) 10,000

18. Los primeros átomos se formaron después del Big Bang cuando la temperatura de la materia se redujo por la expansión a (en grados Centígrados)

- a) 3
- b) 30
- c) 300
- d) 3,000

19. ¿Cuántos años después del Big Bang aparecieron los primeros átomos de elementos químicos?

- a) 300
- b) 3,000
- c) 30,000
- d) 300,000

20. ¿A qué temperatura el Universo se volvió transparente a la radiación electromagnética? (grados Centígrados)

- a) 3
- b) 30
- c) 300
- d) 3,000

21. Cuando se inició la formación de elementos químicos después del Big Bang el Universo era más pequeño de lo que es ahora. ¿Cuántas veces más pequeño?

- a) 10
- b) 100
- c) 1,000
- d) 10,000

22. Una millonésima de segundo después del Big Bang el Universo era más o menos del tamaño de Sistema Solar. ¿Cuál era su temperatura? (millones de grados)

- a) 10
- b) 100 m
- c) 1,000
- d) 10,000

23. Año en que se descubrió la Radiación Cósmica de Fondo.

- a) 1964
- b) 1954
- c) 1944
- d) 1934

24. Científicos que descubrieron la Radiación Cósmica de Fondo.

- a) Penzias y Wilson
- b) Einstein y Hoyle
- c) Gamow y Freeman
- d) Hubble y Bode

25. La Radiación Cósmica de Fondo fue predicha años antes de que se descubriera mediante observaciones, bajo la hipótesis de que el Universo era más pequeño en el pasado, y que debió de ser opaco a la radiación electromagnética en alguna época para después volverse transparente. El científico que la predijo fue

- a) Gamow
- b) Hubble
- c) Einstein
- d) Hoyle

26. De las mediciones realizadas por el satélite COBE se determinó que la temperatura actual del Universo es de (grados Kelvin)

- a) 2.27
- b) 7.22
- c) 2.99
- d) 2.72

27. La curva del espectro que se obtuvo del satélite COBE tiene exactamente la forma que predice la teoría. A esta radiación se le conoce como la radiación del cuerpo

- a) opaco
- b) blanco
- c) caliente
- d) negro

La teoría del Big Bang predice la forma específica del espectro de la Radiación Cósmica de Fondo, misma que fue confirmada por las mediciones del satélite COBE. La ordenada y la abscisa de esta curva son, respectivamente

- a) Intensidad y longitud de onda
- b) intensidad y magnitud
- c) longitud de onda y espectro
- d) velocidad y frecuencia

29. En 1671 se determinó la escala o tamaño absoluto del sistema solar. Antes de ese año se conocían sólo las distancias relativas entre los planetas y el Sol. El sistema se calibró midiendo por triangulación la distancia de la Tierra a

- a) la Luna
- b) el Sol
- c) Marte
- d) Venus

30. La triangulación para establecer la escala absoluta del sistema solar se hizo tomando como base del triángulo una línea imaginaria entre Europa y América del Sur. Las mediciones se realizaron simultáneamente en ambos continentes por científicos de

- a) Francia
- b) Inglaterra
- c) Holanda
- d) Alemania

31. La estrella más cercana al Sol es Próxima Centauro. La distancia que nos separa de esta estrella es muy grande para expresarla en kilómetros. Es más conveniente utilizar como unidad un año-luz, que es la distancia que viaja la luz en un año. La distancia a Próxima Centauro es: (en años luz)

- a) 0.422
- b) 4.22
- c) 42.2
- d) 422.2

32. Se estima que el diámetro del Universo observable es de (en millones de años-luz):

- a) 30,000
- b) 1,500
- c) 150,000
- d) 150

33. La Vía Láctea, la galaxia en que vivimos, tiene un diámetro de (en años-luz)

- a) 100
- b) 1,000
- c) 10,000
- d) 100,000

34. En la Vía Láctea existen muchas estrellas. ¿Más o menos cuántas? (en millones)

- a) 100
- b) 1,000
- c) 10,000
- d) 100,000

35. En el Universo existen muchas galaxias. (Más o menos cuántas? (en millones)

- a) 100
- b) 1,000
- c) 10,000
- d) 100,000

36. En comparación con otras galaxias el tamaño de la Vía Láctea es

- a) muy pequeño
- b) pequeño
- c) promedio
- d) muy grande

37. Las dos Nubes de Magallanes, la grande y la pequeña, son dos galaxias que se encuentran relativamente cerca de la Vía Láctea. La distancia a la que se encuentra la pequeña es de 200,000 años-luz. Esta cantidad comparada con el diámetro de la Vía Láctea es

- a) la cuarta parte
- b) la mitad
- c) igual
- d) el doble

38. La Vía Láctea tiene, en millones de años-luz, un diámetro de

- a) 0.001
- b) 0.01
- c) 0.1
- d) 1.0

39. Las galaxias por lo general se concentran en grupos. El Grupo Local al que pertenece nuestra galaxia tiene un diámetro de alrededor de 5 millones de años luz. Comparada con el diámetro de nuestra galaxia esta cantidad es mayor

- a) 5 veces
- b) 50 veces
- c) 500 veces
- d) 5,000 veces

40. Los grupos de galaxias tienden a concentrarse a su vez en lo que se llaman Superclusters. El Supercluster al que pertenece nuestro Grupo Local tiene un diámetro de alrededor de 100 millones de años-luz. Esto significa que el Supercluster Local es mayor que el Grupo Local

- a) 2 veces
- b) 4 veces
- c) 10 veces
- d) 20 veces

41. Los superclusters más cercanos al Supercluster Local están a una distancia de 300 millones de años luz. Esta distancia es mayor al diámetro de nuestro supercluster

- a) 0.03 veces
- b) 0.3 veces
- c) 3 veces
- d) 30 veces

42. Si la distancia entre superclusters es de 300 millones de años-luz: ¿Cuántos superclusters caben en un diámetro del Universo?

- a) 100
- b) 1,000
- c) 10,000
- d) 100,000

43. ¿Más o menos cuántas galaxias tiene el Grupo Local al que pertenece la Vía Láctea?

- a) 3
- b) 30
- c) 300
- d) 3,000

44. El término “parallax” o paralaje se refiere a la alteración producida en la posición aparente de un objeto cuando el observador se cambia de posición. Observen un dedo de su mano a una distancia de unos 20 cm y cierren alternativamente uno y otro ojo. El dedo está en los dos casos en el mismo lugar. Sin embargo, ustedes pueden ver cómo cambia su posición aparente con respecto al fondo (pared, puerta, etc.) Esta diferencia de posición es lo que nos permite estimar distancias. A medida que alejan el dedo, la diferencia en la posición aparente con uno y otro ojo

- a) queda igual
- b) aumenta
- c) disminuye
- d) se incrementa

45. 360 grados equivale a  $2\pi$  radianes ( $\pi=3.1416$ ). ¿Cuánto vale un grado en radianes?

- a) 0.17
- b) 0.017
- c) 1.7
- d) 17

46. ¿Y cuánto vale un minuto de arco en radianes? (un grado equivale a 60 minutos de arco)

- a) 0.00029
- b) 0.0029
- c) 0.029
- d) 0.29

47. ¿Y cuánto vale un segundo de arco en radianes? (un minuto equivale a 60 segundos de arco)

- a) 0.0000048
- b) 0.000048
- c) 0.00048
- d) 0.0048

48. En un triángulo isósceles en el que los dos lados iguales son mucho mayores que la base, se cumple que el ángulo pequeño ( $t$ ) es igual a la base ( $b$ ) entre la altura ( $a$ ). Esto es, que  $t=b/a$ . La relación se cumple cuando el ángulo se expresa en radianes. Si la base del triángulo vale la unidad, se puede calcular la altura simplemente conociendo el pequeño ángulo opuesto a la también pequeña base. La fórmula para la altura es

- a)  $a=t$
- b)  $a=bxt$
- c)  $a=1/t$
- d)  $a=2/t$

49. Si la base del triángulo isósceles vale la unidad y el ángulo  $t$  opuesto a la base vale un grado: ¿Cuál es la altura del triángulo?

- a) 59 unidades
- b) 5.9 unidades
- c) 0.59 unidades
- d) 590 unidades

50. Si la base del triángulo isósceles vale la unidad y el ángulo  $t$  opuesto a la base vale un minuto de arco: ¿Cuál es la altura del triángulo?

- a) 3450 unidades
- b) 345 unidades
- c) 34.5 unidades
- d) 3.45 unidades

51. Si la base del triángulo isósceles vale la unidad y el ángulo  $t$  opuesto a la base vale un segundo de arco: ¿Cuál es la altura del triángulo?

- a) 208,300 unidades
- b) 20,830 unidades
- c) 2,083 unidades
- d) 208 unidades

52. En astronomía se utiliza como base del triángulo isósceles el diámetro de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. La altura del triángulo es lo que se desea calcular. Esta altura corresponde a la distancia a la estrella que se está estudiando. Obviamente no se puede hacer observaciones de ángulos simultáneamente en lados opuestos de la órbita. Para que las mediciones correspondan a una base de un diámetro de la órbita, es necesario hacer las observaciones separadas por un periodo de

- a) 12 meses
- b) 6 meses
- c) 3 meses
- d) un mes

53. La unidad astronómica (UA) de distancia es la distancia de la Tierra al Sol. Esta distancia es de (en millones de kilómetros)

- a) 1.5
- b) 15
- c) 150
- d) 1500

54. La distancia a las estrellas es muy grande (nos hemos dado cuenta poco a poco) para expresarse en kilómetros o incluso en UA. Los astrónomos acostumbran utilizar, además del año-luz, una unidad de distancia que llaman el pársec (parallax of one arc second, o paralaje de un segundo de arco). Un pársec es la altura de un triángulo isósceles cuya base es una UA y cuyo ángulo opuesto a la base es un segundo de arco. La altura de este triángulo, un pársec, equivale a



- a) 208,300 UA
- b) 20,830 UA
- c) 2,083 UA
- d) 208 UA

55. Un pársec corresponde a una distancia de 3.26 años-luz. La estrella Alfa Centauro se encuentra a una distancia de 4.29 años luz. Esta distancia corresponde en pársec a

- a) 12.5
- b) 13.7
- c) 1.78
- d) 1.32

56. En 1929 se descubrió que el espectro de la luz de galaxias lejanas era similar al de nuestro sol pero que estaba desplazado o corrido hacia el color rojo, indicando que dichas galaxias se están alejando de nosotros. El corrimiento es hacia longitudes de onda

- a) mayores
- b) cortas
- c) menores
- d) blancas

57. La expansión del espacio opera a nivel de

- a) átomos
- b) planetas
- c) estrellas
- d) galaxias

58. Como consecuencia de la expansión del espacio nuestros cuerpos y todo lo que nos rodea se está haciendo cada vez más grande

- a) falso
- b) es posible
- c) cierto
- d) no se sabe

59. El concepto o mecanismo de inflación cósmica explica el Universo en sus etapas

- a) finales
- b) intermedias
- c) más allá del final
- d) más tempranas

60. La supernova SN 1987A explotó a una distancia de la Tierra de 51.5 kilo-pársec. Esto implica que en realidad no explotó en 1987 cuando lo vimos nosotros, sino muchos años antes. ¿Cuántos años antes?

- a) 170
- b) 1,700
- c) 17,000
- d) 170,000

61. Unas horas antes de que llegara la luz de la explosión de SN 1987A a la Tierra, se registró la llegada de neutrinos producto de la misma explosión. ¿Cuántas horas antes?

- a) 1
- b) 2
- c) 3
- d) 4

62. El hecho de que los neutrinos hayan llegado primero que la luz de la SN 1987A concuerda con los modelos físico-matemáticos que se tienen de las supernovas. La llegada anticipada de los neutrinos se interpreta como

- a) que viajan más rápido que la luz
- b) la luz se produce horas después de la explosión del núcleo que produce los neutrinos
- c) los neutrinos vienen de otra parte
- d) los neutrinos se aceleraron en el camino

64. Las estrellas llegan a existir varios miles de millones de años, por lo que nadie puede observar la evolución de una única estrella desde su nacimiento hasta su muerte. ¿Cómo entonces se construyen modelos de la evolución estelar?

- a) Observando el Sol con mucho detalle
- b) comparando la astronomía griega y china con la actual
- c) Volviendo al Big Bang
- d) observando muchas estrellas que se encuentren en diferentes etapas de su existencia

65. En el diagrama H-R de evolución estelar el Sol se encuentra actualmente en la región que se conoce como

- a) estrellas promedio
- b) secuencia principal
- c) sector rojo
- d) secuencia secundaria

66. El Sol terminará cuando se agoten los procesos de fusión en su interior como una estrella

- a) enana roja
- b) enana azul
- c) enana blanca
- d) enana café

67. Las estrellas brillan y se mantienen sin colapsarse porque en su interior se libera energía. Cuando se fusionan elementos ligeros entre sí se libera energía, de tal forma que el elemento (átomo) resultante tiene menos energía que los originales. La liberación de energía cesa cuando el elemento resultante es el

- a) Na
- b) He
- c) Fe
- d) U

68. Astrónomos chinos observaron y describieron en el año 1054 la aparición, y desaparición después de tres semanas, de una estrella muy brillante. El brillo era tal que podía verse de día. Ahora se sabe que se trató de la explosión de una supernova, los remanentes de la cual se observan actualmente como una nebulosa. ¿Cómo se llama esta nebulosa?

- a) Cangrejo
- b) Orión
- c) Osa Mayor
- d) China

69. Los restos de la supernova observada por los chinos está a 6,500 millones de años-luz de la Tierra. Esto implica que se encuentra en la

- a) Nube de Magallanes
- b) Galaxia M2
- c) Vía Láctea
- d) Galaxia Andrómeda

70. ¿En qué galaxia explotó la SN 1987A?

- a) Nube de Magallanes
- b) Galaxia M2
- c) Vía Láctea
- d) Galaxia Andrómeda

## POLÍTICAS EDITORIALES

**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 en forma impresa como electrónica.

Los artículos de investigación publicados en **GEOS** deben ser **originales** son **arbitrados** por al menos dos expertos del tema; mientras que los trabajos de divulgación son arbitrados por un especialista del tema. Los editores se reservan el derecho de 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. El autor principal tendrá oportunidad de revisar la versión final de su trabajo antes de publicarlo en WEB de la UGM ([www.ugm.org.mx](http://www.ugm.org.mx)).

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)

Claudia Arango Galván (UGM)  
[claudiar@geofisica.unam.mx](mailto:claudiar@geofisica.unam.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).

Las 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.

#### 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**.

#### 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 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 suficientes 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 la 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 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. En: 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  $g/cm^3$   
 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.

$$g(\mathbf{r}) = g_0 \int \frac{\rho(\mathbf{r}_0)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2} d\mathbf{r}_0$$



---

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

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

---

Con un cordial saludo

**Luis A. Delgado Argote y Claudia Arango Galván**  
Editores

---

### Costo anual de anuncios en GEOS

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

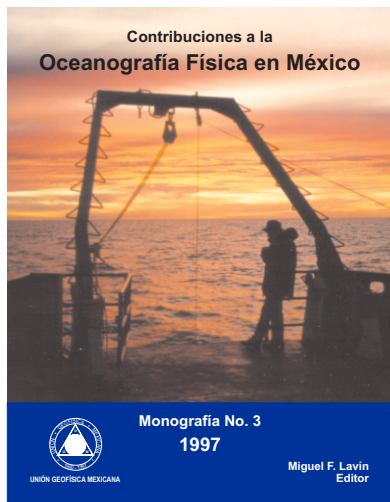
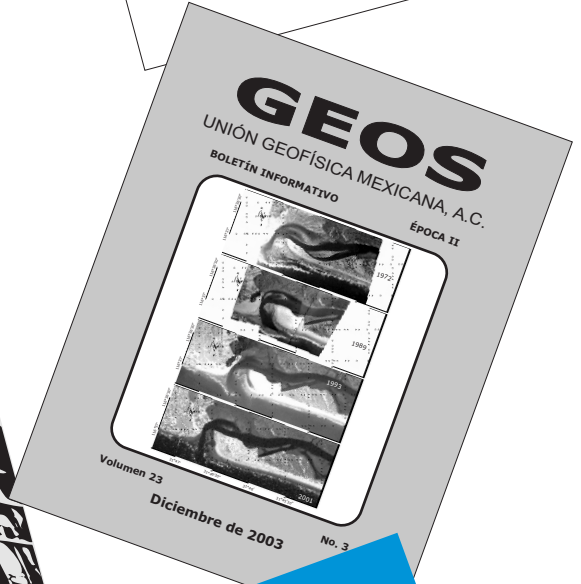
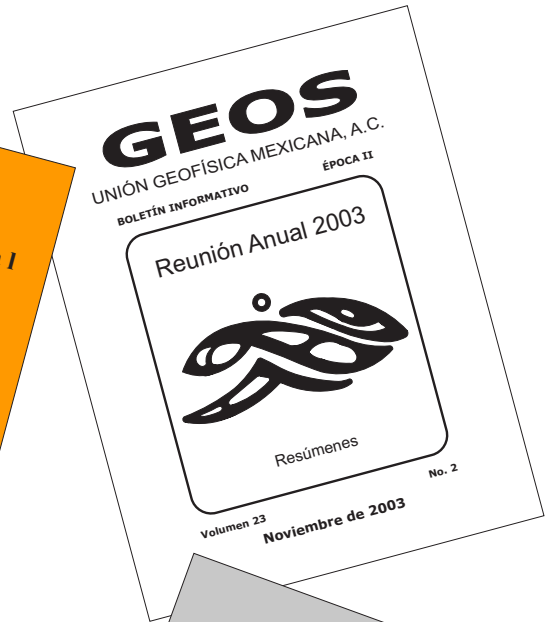
---

# GEOS

Información 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)





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